A FONDO 12.2 LA TERMODINÁMICA Y EL CUERPO HUMANO

Al igual que los cuerpos de todos los demás organismos, el cuerpo humano no es un sistema cerrado. Debemos consumir alimentos y oxígeno para sobrevivir. Tanto la primera como la segunda leyes de la termodinámica tienen interesantes implicaciones para estos procesos.

El cuerpo humano metaboliza la energía química almacenada en los alimentos y/o los tejidos adiposos del cuerpo. Éste es un proceso muy eficiente, porque, normalmente, el 95% del contenido energético de los alimentos se metaboliza. Parte de esta energía metabolizada se convierte en trabajo, W, para hacer circular la sangre, realizar las tareas diarias, etc. El resto se lanza al ambiente en forma de calor, Q. Para un hombre normal de 65 kg, se necesitan alrededor de 80 J de trabajo por segundo sólo para mantener en funcionamiento las diversas partes del cuerpo, como el hígado, el cerebro y los músculos.

La primera ley de la termodinámica, o la ley de la conservación de la energía, puede escribirse como $\Delta U = Q - W$.

Aquí, ΔU es el cambio en la energía interna del cuerpo, que podría venir de dos contribuciones. Una es a partir de los alimentos que se consumen, y la otra proviene de la grasa que almacena el cuerpo en los tejidos adiposos. Así, tenemos que $\Delta U = \Delta U_{\text{alimentos}} + \Delta U_{\text{grasa}}$. De ahí que ΔU sea una cantidad negativa, ya que conforme la energía almacenada en los alimentos y la grasa se convierte en calor y trabajo, nuestro cuerpo tiene menos energía almacenada (hasta que, de nuevo, se consume alimento). Como Q es pérdida de calor hacia el ambiente, también es una cantidad negativa.

El cuerpo humano es un ejemplo de una máquina de calor biológica. La fuente de energía de esta máquina es la energía metabolizada a partir de los alimentos y los tejidos adiposos. Parte de esta energía se convierte en trabajo, y el resto se expulsa hacia el ambiente en forma de calor. Esta situación es directamente análoga a una máquina que toma calor de un depósito caliente, realiza trabajo mecánico y expulsa el exceso de calor hacia el ambiente. Así, la eficiencia del cuerpo humano es

$$\varepsilon = \frac{\text{salida de trabajo}}{\text{entrada de energía}} = \frac{W}{|\Delta U|}$$

Puesto que W, Q y ΔU varían considerablemente de una actividad a otra, la eficiencia a menudo se determina utilizando la tasa de tiempo de estas cantidades, esto es, el trabajo por unidad de tiempo (potencia P), $W/\Delta t$, y la energía consumida por unidad de tiempo (tasa metabólica) $|\Delta U|/\Delta t$:

$$\varepsilon = \frac{W}{|\Delta U|} = \frac{W/\Delta t}{(|\Delta U|/\Delta t)} = \frac{P}{(|\Delta U|/\Delta t)}$$

La potencia utilizada durante una actividad particular, como correr o montar bicicleta, se mide con un dispositivo llamado *dinamómetro*. Se ha descubierto que la tasa metabólica es directamente proporcional a la tasa de consumo de oxígeno, de manera que es factible medir esta tasa ($|\Delta U|/\Delta t$) utilizando dispositivos que registran la respiración, como el que se observa en la figura 1. Así, es posible determinar la eficiencia del cuerpo para desempeñar diferentes actividades midiendo la tasa de consumo de oxígeno asociada con cada actividad por separado.

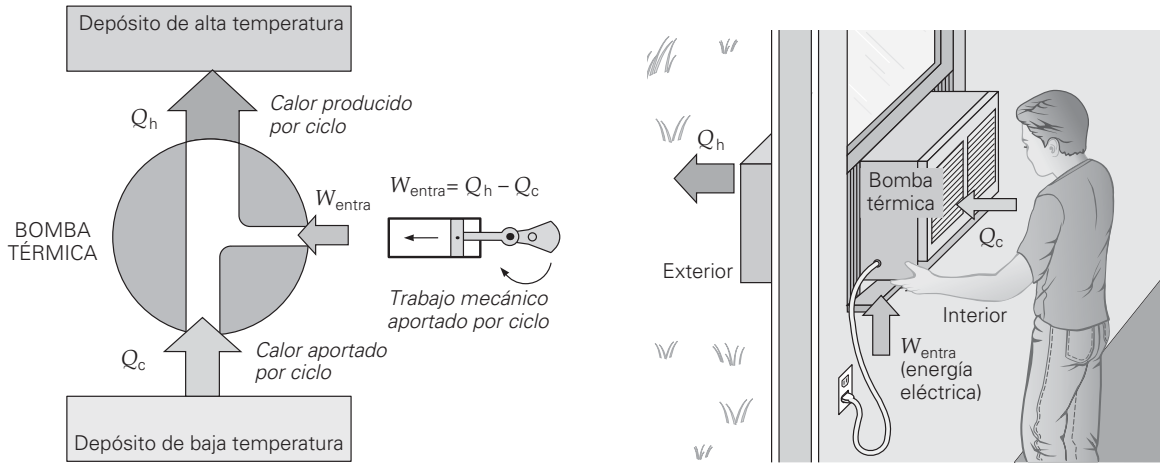
La mayoría de la eficiencia del cuerpo humano depende de la actividad muscular y de qué músculos se utilicen. Los músculos de mayor tamaño en el cuerpo son los de las piernas, de manera que si en una actividad se utilizan tales músculos, la eficiencia asociada con la actividad es relativamente alta. Por ejemplo, algunos ciclistas profesionales logran alcanzar una eficiencia tan alta como el 20%, generando más de 2 hp de potencia en ráfagas cortas de intensa actividad. Por el contrario, los músculos de los brazos son relativamente pequeños, así que actividades como hacer pesas tienen una eficiencia menor del 5%. Al igual que cualquier otra máquina de calor, el cuerpo humano nunca alcanza el 100% de eficiencia. Cuando la gente hace ejercicio, se genera mucho calor que se desperdicia; por eso debe deshacerse de él a través de procesos como la transpiración, para evitar el sobrecalentamiento. Lea más sobre la regulación fisiológica de la temperatura corporal en la sección A fondo 11.1 (p. 380) del capítulo 11.

FIGURA 1 Medición de la energía consumida y el trabajo realizado Un dispositivo que registra la respiración y un dinamómetro permiten conocer tanto la potencia como la tasa metabólica de esta ciclista.

Bombas térmicas: refrigeradores, acondicionadores de aire y bombas de calor

La función que desempeña una bomba térmica es básicamente opuesta a la de una máquina de calor. El término **bomba térmica** es genérico y se aplica a *cualquier* dispositivo, incluidos refrigeradores, acondicionadores de aire y bombas de calor, que transfiere energía calorífica de un depósito de baja temperatura a uno de alta temperatura (▸figura 12.17a). Para que se efectúe una transferencia así, es preciso aportar trabajo. Puesto que la segunda ley de la termodinámica indica que el calor no fluye *espontáneamente* de un cuerpo frío a uno caliente, es necesario aportar los medios para que se efectúe ese proceso, es decir, obtener trabajo del entorno.

Nota: en la acepción que se le da aquí, el término *bomba térmica* es general y no se refiere específicamente a los dispositivos que suelen usarse para calentar edificios. Esos dispositivos se llaman *bombas de calor*.



a) b)

▲ **FIGURA 12.17 Bombas térmicas** ***a***) Diagrama de flujo de energía para una bomba térmica cíclica generalizada. La anchura de la flecha que representa Q_h, el calor transferido al depósito de alta temperatura, es igual a las anchuras combinadas de las flechas que representan W_{entra} y Q_c, lo cual refleja la conservación de la energía: $Q_h = W_{entra} + Q_c$. ***b***) Un acondicionador de aire es un ejemplo de bomba térmica. Utilizando el trabajo aportado, transfiere calor (Q_c) de un depósito de baja temperatura (el interior de la casa) a un depósito de alta temperatura (el exterior).

Un ejemplo conocido de bomba térmica es el acondicionador de aire. Con trabajo aportado por energía eléctrica, se transfiere calor del interior de la casa (depósito de baja temperatura) al exterior de la casa (depósito de alta temperatura), como se ilustra en la figura 12.17b. Un refrigerador (▸figura 12.18) funciona exactamente con los mismos principios y procesos. Con el trabajo efectuado por la compresora (W_{entra}), el calor (Q_c) se transfiere a la bobina del evaporador dentro del refrigerador. Después, la combinación de este calor y trabajo (Q_h) se expulsa al exterior del refrigerador a través del condensador.

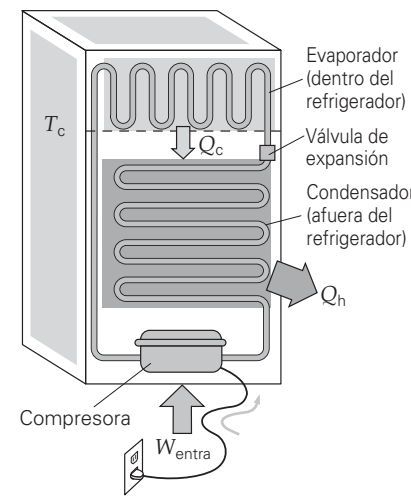
En esencia, un refrigerador o un acondicionador de aire bombean calor *contra* un gradiente de temperatura o "cuesta arriba". (Pensemos en bombear agua hacia la cima de una colina contra la fuerza de gravedad.) La eficiencia de enfriamiento de esta operación se basa en la cantidad de calor *extraída* del depósito a baja temperatura (el refrigerador, el congelador o el interior de la casa), Q_c, relativa al trabajo W_{entra} necesario para hacerlo. Puesto que un refrigerador práctico opera en un ciclo para extraer continuamente calor, $\Delta U = 0$ para el ciclo. Entonces, por la conservación de la energía (primera ley de la termodinámica), $Q_c + W_{entra} = Q_h$, donde Q_h es el calor expulsado al depósito de alta temperatura o al exterior.

La medida del desempeño de un refrigerador o acondicionador de aire se define de distinta manera que la de una máquina de calor, por la diferencia en sus funciones. Para los aparatos que enfrían, la eficiencia se expresa con un **coeficiente de desempeño (CDD)**. Puesto que lo que se busca es extraer la mayor cantidad de calor (Q_c, para enfriar cosas o mantenerlas frías) por unidad de trabajo aportado (W_{entra}), el coeficiente de desempeño para un refrigerador o acondicionador de aire (CDD_{ref}) es la razón de esas dos cantidades:

$$CDD_{ref} = \frac{Q_c}{W_{entra}} = \frac{Q_c}{Q_h - Q_c} \quad \textit{(refrigerador o acondicionador de aire)} \qquad (12.13)$$

Así pues, cuanto mayor sea el CDD, mejor será el desempeño; es decir, se extrae más calor por unidad de trabajo efectuado. Durante el funcionamiento normal de un refrigerador, el aporte de trabajo es menor que el calor extraído, así que el CDD es mayor que 1. Los CDD de refrigeradores representativos varían entre 3 y 5, dependiendo de las condiciones de operación y los detalles de diseño mecánico. Este intervalo implica que la cantidad de calor extraída del depósito frío (el refrigerador, congelador o interior de la casa) es de tres a cinco veces la cantidad de trabajo necesaria para extraerlo.

Cualquier máquina que transfiere calor en la dirección opuesta a la del flujo natural se denomina *bomba térmica*. El término **bomba de calor** se aplica específicamente a dispositivos comerciales empleados para enfriar casas y oficinas durante el verano, así como para calentarlas en el invierno. El funcionamiento durante el verano es el de un acondicionador de aire. En este modo, el aparato enfría el interior de la casa y calienta el



▲ **FIGURA 12.18 Funcionamiento de un refrigerador** El refrigerante se lleva calor (Q_c) del interior como calor latente. Esta energía calorífica y el trabajo aportado (W_{entra}) se descargan desde el condensador hacia el entorno (Q_h). Podemos ver un refrigerador como un extractor de calor (Q_c) de una región que ya está fría (su interior), o bien, como bomba de calor que agrega calor (Q_h) a una área que ya está caliente (la cocina).

exterior. En su modo de calefacción para el invierno, una bomba de calor calienta el interior y enfría el exterior, generalmente tomando energía calorífica del aire frío o del suelo.

Al considerar una bomba de calor en su modo de calefacción, lo que interesa es la *producción* de calor (para calentar algo o mantenerlo caliente), así que el CDD en este caso se define de manera diferente que el de un refrigerador o acondicionador de aire. Como se esperaría, es la razón de Q_h entre W_{entra} (la calefacción que se obtiene a cambio del trabajo aportado), o bien,

$$\mathrm{COP}_{hp} = \frac{Q_h}{W_{entra}} = \frac{Q_h}{Q_h - Q_c} \quad \textit{(bomba de calor en modo de calentamiento)} \quad (12.14)$$

donde, una vez más, hemos usado $Q_c + W_{entra} = Q_c$. Los CDD de bombas de calor representativas varían entre 2 y 4, también dependiendo de las condiciones de operación y del diseño.

En comparación con la calefacción eléctrica, las bombas de calor son muy eficientes. Por cada unidad de energía eléctrica consumida, una bomba de calor por lo regular bombea de 1.5 a 3 veces más calor que el proporcionado por los sistemas de calefacción eléctrica directa. Algunas bombas de calor utilizan agua de depósitos subterráneos, pozos o tuberías enterradas como depósito de calor a baja temperatura. Tales bombas de calor son más eficientes que las que usan el aire exterior, porque el calor específico del agua es mayor que el del aire, y la diferencia en la temperatura promedio entre el agua y el aire interior suele ser más pequeña.

Ejemplo 12.11 ■ Acondicionamiento de aire/bomba de calor: un sistema ambidextro

Un acondicionador de aire que opera en verano extrae 100 J de calor del interior de una casa por cada 40 J de energía eléctrica que consume. Determine *a*) el CDD del dispositivo y *b*) su CDD si opera como bomba de calor en invierno. Suponga que puede transferir la misma cantidad de calor con el mismo consumo de electricidad, sin importar en qué dirección opere.

Razonamiento. Conocemos el aporte de trabajo y de calor en el inciso *a*, así que aplicamos la definición de CDD de un refrigerador (ecuación 12.13). Para la operación inversa, lo importante es la producción de calor, cantidad que deberemos obtener de la conservación de la energía.

Solución.

Dado: $Q_c = 100\ \mathrm{J}$, $W_{entra} = 40\ \mathrm{J}$

Encuentre: *a*) COP_{ref} *b*) COP_{hp}

a) Por la ecuación 12.13, el CDD para esta máquina cuando opera como acondicionador de aire es

$$\mathrm{CDD}_{ref} = \frac{Q_c}{W_{entra}} = \frac{100\ \mathrm{J}}{40\ \mathrm{J}} = 2.5$$

b) Cuando la máquina opera como bomba de calor, el calor pertinente es el producido, que puede calcularse con base en la conservación de la energía:

$$Q_h = Q_c + W_{entra} = 100\ \mathrm{J} + 40\ \mathrm{J} = 140\ \mathrm{J}$$

Por lo tanto, el CDD de esta máquina que opera como bomba de calor en invierno es, por la ecuación 12.14,

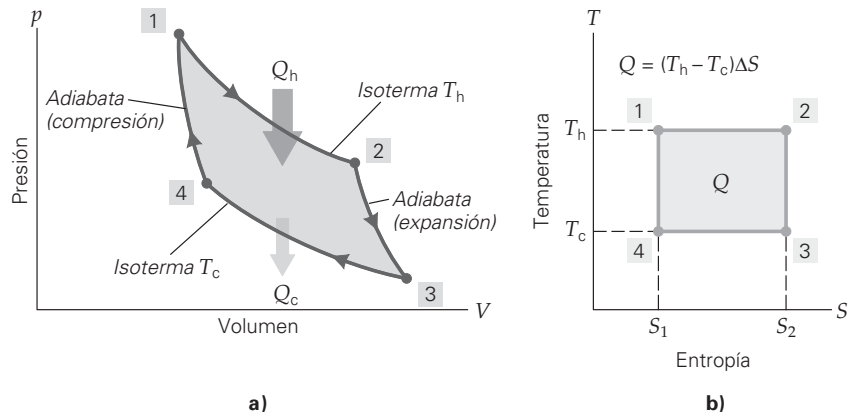
$$\mathrm{CDD}_{hp} = \frac{Q_h}{W_{entra}} = \frac{140\ \mathrm{J}}{40\ \mathrm{J}} = 3.5$$

Ejercicio de refuerzo. *a*) Suponga que la máquina de este ejemplo se rediseña de forma que efectúe las mismas operaciones, pero con un consumo de trabajo 25% menor. ¿Qué valores tendría entonces el CDD? *b*) ¿Cuál CDD tendría un incremento porcentual mayor?

12.6 Ciclo de Carnot y máquinas de calor ideales

OBJETIVOS: *a*) Explicar la aplicación del ciclo de Carnot a las máquinas de calor, *b*) calcular la eficiencia ideal de Carnot y *c*) plantear la tercera ley de la termodinámica.

El planteamiento de la segunda ley de la termodinámica hecho por Lord Kelvin indica que cualquier máquina de calor *cíclica*, sin importar su diseño, siempre despide algo



◀ **FIGURA 12.19 El ciclo de Carnot** ***a)*** El ciclo de Carnot consiste en dos isotermas y dos adiabatas. Se absorbe calor durante la expansión isotérmica y se despide calor durante la compresión isotérmica. ***b)*** En un diagrama *T-S*, el ciclo de Carnot forma un rectángulo, cuya área es igual a *Q*.

de energía calorífica (sección 12.5). Pero, ¿cuánta energía debe perderse en el proceso? En otras palabras, ¿qué eficiencia *máxima* puede tener una máquina de calor? Al diseñar una máquina de calor, los ingenieros se esfuerzan por hacerla lo más eficiente posible; no obstante, debe haber algún límite teórico que, por la segunda ley, será menor que el 100 por ciento.

El ingeniero francés Sadi Carnot (1796-1832) estudió dicho límite. Lo primero que buscó fue el ciclo termodinámico que usaría una máquina de calor *ideal*, es decir, el ciclo más eficiente. Carnot descubrió que la máquina de calor ideal absorbe calor de un depósito de alta temperatura *constante* (T_h) y despide calor hacia un depósito de baja temperatura *constante* (T_c). Idealmente, estos dos procesos son isotérmicos y reversibles, y podrían representarse como dos isotermas en un diagrama *p-V*. Sin embargo, ¿qué procesos completan el ciclo? Carnot demostró que tales procesos tanto adiabáticos como reversibles. De acuerdo con la sección 12.3, las curvas correspondientes en un diagrama *p-V* se llaman adiabatas y son más empinadas que las isotermas (▲figura 12.19a). Una máquina de calor irreversible que opere entre dos depósitos de calor a temperaturas constantes no puede tener una eficiencia mayor, que la de una máquina de calor reversible que opere entre las mismas dos temperaturas.

PHYSLET®
Ilustración 21.4 Máquinas y entropía

Así pues, el **ciclo de Carnot** ideal consiste en dos isotermas y dos adiabatas y se le puede representar de forma más conveniente en un diagrama *T-S*, donde forma un rectángulo (figura 12.19b). El área bajo la isoterma superior (1-2) es el calor agregado al sistema desde el depósito de alta temperatura: $Q_h = T_h\Delta S$. Asimismo, el área bajo la isoterma inferior (3-4) es el calor despedido: $Q_c = T_c\Delta S$. Aquí, Q_h y Q_c son las transferencias de calor a temperaturas *constantes* (T_h y T_c, respectivamente). No hay transferencia de calor ($Q = 0$) durante las ramas adiabáticas del ciclo. (¿Por qué?)

La diferencia entre estas transferencias de calor es el trabajo producido, que es igual al área encerrada por los caminos del proceso (las áreas sombreadas de los diagramas):

$$W_{\text{neto}} = Q_h - Q_c = (T_h - T_c)\Delta S$$

Puesto que ΔS es el mismo para ambas isotermas (véase la figura 12.19b, procesos 1-2 y 3-4), podemos usar las expresiones para relacionar las temperaturas y los calores. Es decir, como

$$\Delta S = \frac{Q_h}{T_h} \quad \text{y} \quad \Delta S = \frac{Q_c}{T_c}$$

tenemos

$$\frac{Q_h}{T_h} = \frac{Q_c}{T_c} \quad \text{o} \quad \frac{Q_c}{Q_h} = \frac{T_c}{T_h}$$

PHYSLET®
Ilustración 21.1 Máquina de Carnot

Esta ecuación puede servir para expresar la eficiencia de una máquina de calor ideal en términos de temperatura. Por la ecuación 12.12, esta **eficiencia de Carnot** ideal (ε_C) es

$$\varepsilon_C = 1 - \frac{Q_c}{Q_h} = 1 - \frac{T_c}{T_h}$$

o bien,

$$\varepsilon_C = 1 - \frac{T_c}{T_h} \qquad \textit{Eficiencia de Carnot (máquina de calor ideal)} \qquad (12.15)$$

donde la eficiencia fraccionaria suele expresarse como porcentaje. Note que T_c y T_h deben expresarse en kelvin.

Nota: las temperaturas en la eficiencia de Carnot son las absolutas, expresadas en kelvin.

La eficiencia de Carnot expresa el límite teórico superior de la eficiencia termodinámica de una máquina de calor cíclica que opera entre dos extremos conocidos de temperatura. En la práctica, tal límite es inasequible, pues ningún proceso de máquina real es reversible. No es posible construir una verdadera máquina de Carnot porque los procesos reversibles necesarios únicamente pueden aproximarse.

Nota: la eficiencia de Carnot, que nunca puede alcanzarse, es un límite superior ideal.

No obstante, la eficiencia de Carnot ilustra muy bien una idea general: cuanto mayor sea la diferencia entre las temperaturas de los depósitos de calor, mayor será tal eficiencia. Por ejemplo, si T_h es el doble de T_c, o bien, $T_c/T_h = 0.5$, la eficiencia de Carnot es

$$\varepsilon_C = 1 - \frac{T_c}{T_h} = 1 - 0.50 = 0.50\ (\times 100\%) = 50\%$$

En cambio, si T_h es cuatro veces T_c, de manera que $T_c/T_h = 0.25$,

$$\varepsilon_C = 1 - \frac{T_c}{T_h} = 1 - 0.25 = 0.75\ (\times 100\%) = 75\%$$

Puesto que una máquina de calor nunca puede tener una eficiencia térmica del 100%, resulta útil comparar su eficiencia real ε con su eficiencia teórica máxima, la de un ciclo de Carnot, ε_C. Para entender a fondo la importancia de este concepto, conviene estudiar con detenimiento el ejemplo siguiente.

También hay CDD de Carnot para refrigeradores y bombas de calor (véase el ejercicio 98).

Ejemplo 12.12 ■ Eficiencia de Carnot: la verdadera medida de eficiencia para cualquier máquina real

Un ingeniero está diseñando una máquina de calor cíclica que operará entre las temperaturas de 150 y 27°C. *a*) ¿Qué eficiencia teórica máxima puede alcanzar? *b*) Suponga que la máquina, una vez construida, en cada ciclo efectúa 100 J de trabajo con un aporte de 500 J de calor. ¿Qué eficiencia tiene y qué tan cercana está de la eficiencia de Carnot?

Razonamiento. La eficiencia máxima a temperaturas alta y baja específicas está dada por la ecuación 12.15. Recuerde que hay que convertir a temperaturas absolutas. En el inciso *b*, calculamos la eficiencia real y la comparamos con la respuesta del inciso *a*.

Solución.

Dado:
$T_h = 150°C + 273 = 423\ K$
$T_c = 27°C + 273 = 300\ K$
$W_{neto} = 100\ J$
$Q_h = 500\ J$

Encuentre:
a) ε_C (eficiencia de Carnot)
b) ε (eficiencia real) y compárela con ε_C

a) Utilizamos la ecuación 12.15 para calcular la eficiencia teórica máxima:

$$\varepsilon_C = 1 - \frac{T_c}{T_h} = 1 - \frac{300\ K}{423\ K} = 0.291\ (\times 100\%) = 29.1\%$$

b) La eficiencia real es, por la ecuación 12.12,

$$\varepsilon = \frac{W_{neto}}{Q_h} = \frac{100\ J}{500\ J} = 0.200\ (\text{o } 20.0\%)$$

Por lo tanto,

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_C} = \frac{0.200}{0.291} = 0.687\ (\text{o } 68.7\%)$$

Dicho de otro modo, la máquina de calor está operando al 68.7% de su máximo teórico. ¡No está mal!

Ejercicio de refuerzo. Si la temperatura operativa alta de la máquina de este ejemplo se aumentara a 200°C, ¿cómo cambiaría la eficiencia teórica?

La tercera ley de la termodinámica

Podemos realizar otra inferencia de la expresión para la eficiencia de Carnot (ecuación 12.15). Parecería posible tener $\varepsilon_C = 100\%$ tan sólo si T_c es cero absoluto. (Véase la sección 10.3.) Sin embargo, nunca se ha llegado al cero absoluto, aunque experimentos a ultra-bajas temperaturas (criogénicos) han llegado a 20 nK (2×10^{-8} K) de esa marca. Al parecer, es imposible reducir la temperatura de un sistema que ya está cercano al cero absoluto en un número finito de pasos. Un planteamiento sencillo de la **tercera ley de la termodinámica** es el siguiente:

Es imposible llegar al cero absoluto en un número finito de procesos térmicos.

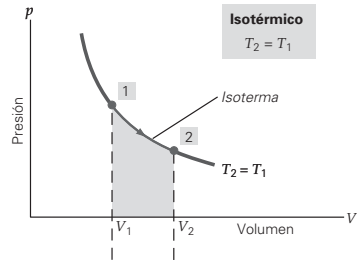
En otras palabras, aunque se han hecho intentos, parece imposible alcanzar experimentalmente el cero absoluto. (Véase la nota al pie de la p. 347, capítulo 10.)

Repaso del capítulo

- La **primera ley de la termodinámica** es un planteamiento de la conservación de la energía para un sistema termodinámico. Expresada en forma de ecuación, relaciona el cambio de la energía interna de un sistema con el flujo de calor y el trabajo efectuado sobre él, y está dada por

$$Q = \Delta U + W \tag{12.1}$$

- Los **procesos termodinámicos** (con gases) son
  isotérmicos: si se efectúan a temperatura constante
  isobáricos: si se efectúan a presión constante
  isométricos: si se efectúan con volumen constante
  adiabáticos: si no interviene flujo de calor



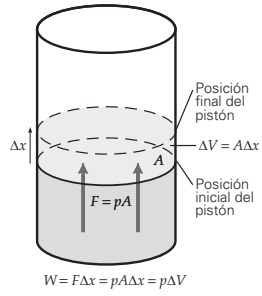
- Las expresiones de **trabajo termodinámico** efectuado por un gas ideal durante varios procesos son:

$$W_{\text{isotérmico}} = nRT \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \quad \textit{(proceso isotérmico de gas ideal)} \tag{12.3}$$

$$W_{\text{isobárico}} = p(V_2 - V_1) = p\Delta V \textit{(proceso isobárico con gas ideal)} \tag{12.4}$$

$$W_{\text{adiabático}} = \frac{p_1V_1 - p_2V_2}{\gamma - 1} \quad \textit{(proceso adiabático con gas ideal)} \tag{12.9}$$

(En el proceso adiabático, $\gamma = c_p/c_v$ es la razón de los calores específicos, a temperatura y a volumen constantes, respectivamente.)



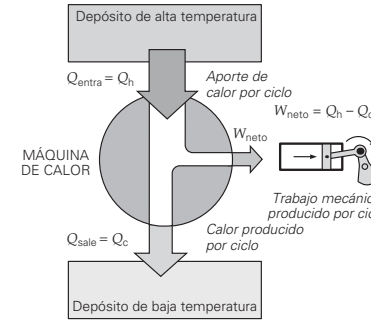
- La **segunda ley de la termodinámica** indica si un proceso se puede realizar naturalmente o no, o bien, indica la dirección que toma un proceso.
- La **entropía** (S) es una medida del desorden de un sistema. El **cambio de entropía** de un objeto a temperatura constante está dado por

$$\Delta S = \frac{Q}{T} \tag{12.10}$$

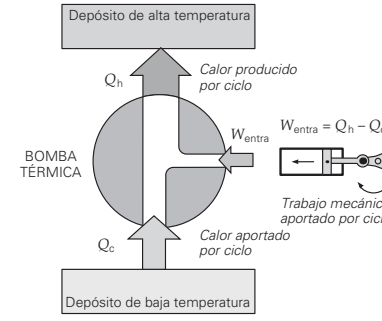
La entropía total del Universo aumenta en todo proceso natural.

- Una **máquina de calor** es un dispositivo que convierte calor en trabajo. Su **eficiencia térmica** ε es la razón del trabajo producido entre el calor aportado:

$$\varepsilon = \frac{W_{\text{neto}}}{Q_h} = \frac{Q_h - Q_c}{Q_h} = 1 - \frac{Q_c}{Q_h} \tag{12.12}$$

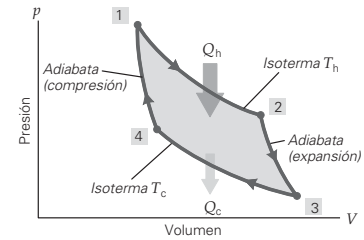


- Una **bomba térmica** es un dispositivo que transfiere energía calorífica de un depósito de baja temperatura a uno de alta temperatura. El coeficiente de desempeño (CDD) es la razón del calor transferido entre el trabajo aportado. El CCD difiere dependiendo de si la bomba térmica se usa como bomba de calor o como acondicionador de aire/refrigerador.



- Un **ciclo de Carnot** es un ciclo teórico de máquina de calor que consiste en dos isotermas y dos adiabatas. Su eficiencia es la más alta que cualquier máquina de calor podría alcanzar, operando entre dos extremos de temperatura. La eficiencia de un ciclo de Carnot es

$$\varepsilon_C = 1 - \frac{T_c}{T_h} \tag{12.15}$$



Ejercicios*

Los ejercicios designados **OM** *son preguntas de opción múltiple; los* **PC** *son preguntas conceptuales; y los* **EI** *son ejercicios integrados. A lo largo del texto, muchas secciones de ejercicios incluirán ejercicios "apareados". Estos pares de ejercicios, que se identifican con* números subrayados, *pretenden ayudar al lector a resolver problemas y aprender. El primer ejercicio de cada pareja (el de número par) se resuelve en la Guía de estudio, que puede consultarse si se necesita ayuda para resolverlo. El segundo ejercicio (de número impar) es similar, y su respuesta se da al final del libro.*

12.1 Sistemas, estados y procesos termodinámicos

1. **OM** En un diagrama *p-V*, un proceso reversible es un proceso *a*) cuyo camino se conoce, *b*) cuyo camino se desconoce, *c*) para el cual los pasos intermedios son estados no de equilibrio o *d*) nada de lo anterior.

2. **OM** Podría haber un intercambio de calor con el entorno en *a*) un sistema térmicamente aislado, *b*) un sistema totalmente aislado, *c*) un depósito de calor o *d*) nada de lo anterior.

3. **OM** Sólo se conocen los estados inicial y final de los procesos irreversibles en *a*) diagramas *p-V*, *b*) diagramas *p-T*, *c*) diagramas *V-T* o *d*) todos los anteriores.

4. **PC** Explique por qué el proceso de la figura 12.1b *no* es el de un gas ideal a temperatura constante.

5. **PC** ¿Un proceso irreversible significa que el sistema no puede regresar a su estado original? Explique por qué.

12.2 Primera ley de la termodinámica *y* 12.3 Procesos termodinámicos para un gas ideal

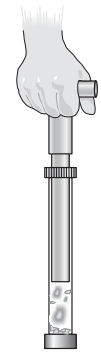
6. **OM** No entra ni sale calor del sistema en un proceso *a*) isotérmico, *b*) adiabático, *c*) isobárico o *d*) isométrico.

7. **OM** Según la primera ley de la termodinámica, si se efectúa trabajo sobre un sistema, *a*) la energía interna del sistema debe cambiar, *b*) se debe transferir calor desde el sistema, *c*) la energía interna del sistema debe cambiar o se debe transferir calor desde el sistema o ambas cuestiones o *d*) se debe transferir calor al sistema.

8. **OM** Cuando se añade calor a un sistema de gas ideal durante un proceso de expansión isotérmica, *a*) se efectúa trabajo sobre el sistema, *b*) disminuye la energía interna, *c*) el efecto es el mismo que el de un proceso isométrico o *d*) nada de lo anterior.

9. **PC** En un diagrama *p-V*, dibuje un proceso cíclico que consista en una expansión isotérmica, seguida de una compresión isobárica y de un proceso isométrico, en ese orden.

10. **PC** En la ▼ figura 12.20, el émbolo de una jeringa se empuja rápidamente y se queman los trocitos de papel en el interior. Explique este fenómeno utilizando la primera ley de la termodinámica. (Asimismo, no hay bujías en los motores diesel. ¿Cómo puede encenderse la mezcla aire-combustible?)



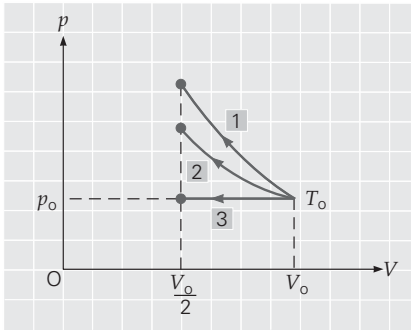
◀ **FIGURA 12.20 Jeringa de fuego** Véase el ejercicio 10.

11. **PC** Comente el calor, el trabajo y el cambio de energía interna de su cuerpo cuando juega un partido de baloncesto.

12. **PC** En un proceso adiabático, no hay intercambio de calor entre el sistema y el ambiente; pero cambia la temperatura de un gas ideal. ¿Cómo puede ser eso? Explique.

* Considere las temperaturas como exactas.

13. PC Un gas ideal, que inicialmente está a temperatura T_o, presión p_o y volumen V_o, se comprime a la mitad de su volumen inicial. Como se muestra en la ▼figura 12.21, el proceso 1 es adiabático, el 2 es isotérmico y el 3 es isobárico. Ordene el trabajo efectuado sobre el gas durante los tres proceso, de mayor a menor, y explique cómo hizo el ordenamiento.



▲ **FIGURA 12.21 Procesos termodinámicos**
Véase el ejercicio 13.

14. **El** ● Un recipiente rígido contiene 1.0 moles de un gas ideal que recibe lentamente 2.0×10^4 J de calor. *a*) El trabajo efectuado por el gas es 1) positivo, 2) cero o 3) negativo. ¿Por qué? *b*) ¿Cómo cambia la energía interna del gas?

15. **El** ● Una cantidad de gas ideal pasa por un proceso cíclico y efectúa 400 J de trabajo neto. *a*) La temperatura del gas al término del ciclo es 1) mayor, 2) igual o 3) menor que cuando comenzó. ¿Por qué? *b*) ¿Se añade o quita calor al sistema, y de cuánto calor estamos hablando?

16. ● Durante un partido de tenis, usted perdió 6.5×10^5 J de calor, y su energía interna también disminuyó en 1.2×10^6 J. ¿Cuánto trabajo efectuó durante el partido?

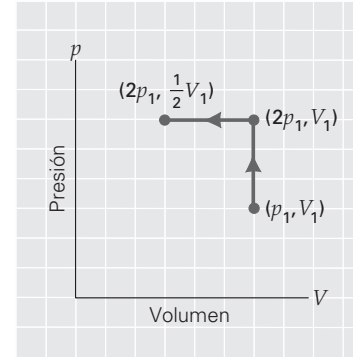
17. **El** ● Mientras efectúa 500 J de trabajo, un sistema de gas ideal se expande adiabáticamente a 1.5 veces su volumen. *a*) La temperatura del gas 1) aumenta, 2) no cambia o 3) disminuye. ¿Por qué? *b*) ¿Cuánto cambia la energía interna del gas?

18. **El** ● Un sistema de gas ideal se expande de 1.0 m^3 a 3.0 m^3 a presión atmosférica, al tiempo que absorbe 5.0×10^5 J de calor en el proceso. *a*) la temperatura del sistema 1) aumenta, 2) permanece igual o 3) disminuye. ¿Por qué? *b*) ¿Qué cambio sufre la energía interna del sistema?

19. ●● Un gas a baja densidad (es decir, que se comporta como un gas ideal) tiene una presión inicial de 1.65×10^4 Pa y ocupa un volumen de 0.20 m^3. La lenta adición de 8.4×10^3 J de calor al gas hace que se expanda isobáricamente hasta un volumen de 0.40 m^3. *a*) ¿Cuánto trabajo efectúa el gas durante el proceso? *b*) ¿Cambia la energía interna del gas? Si es así, ¿cuánto cambia?

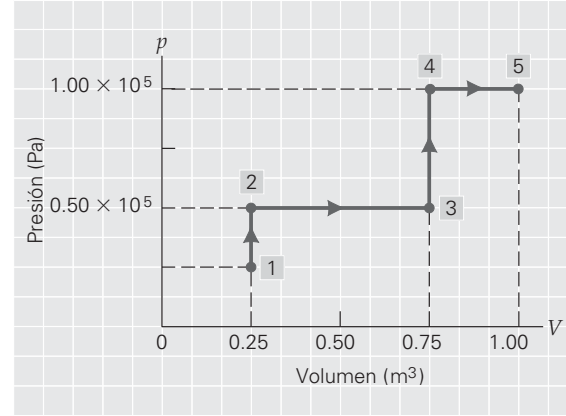
20. ●● Un competidor olímpico en halterofilia levanta 145 kg una distancia vertical de 2.1 m. Al hacerlo, su energía interna disminuye en 6.0×10^4 J. Para su cuerpo, ¿cuánto calor fluye y en qué dirección?

21. **El** ●● Un gas ideal se somete a los procesos reversibles que se muestran en la ▼figura 12.22. *a*) ¿El cambio total de energía interna del gas es 1) positivo, 2) cero o 3) negativo? ¿Por qué? *b*) En términos de las variables de estado *p* y *V*, ¿cuánto trabajo efectúa el gas o se efectúa sobre él y *c*) cuánto calor neto se transfiere en el proceso total?



▲ **FIGURA 12.22 Diagrama *p-V* para un gas ideal**
Véase el ejercicio 21.

22. ●● Una cantidad fija de gas experimenta los cambios reversibles ilustrados en el diagrama *p-V* de la ▼figura 12.23. ¿Cuánto trabajo se efectúa en cada proceso?



▲ **FIGURA 12.23 Un diagrama *p-V* y trabajo**
Véanse los ejercicios 22 y 23.

23. ●● Suponga que, después del proceso final de la figura 12.23 (véase el ejercicio 22), la presión del gas se reduce isométricamente de 1.0×10^5 Pa a 0.70×10^5 Pa, y luego el gas se comprime isobáricamente de 1.0 m^3 a 0.80 m^3. Calcule el trabajo total efectuado en todos estos procesos, del 1 al 5.

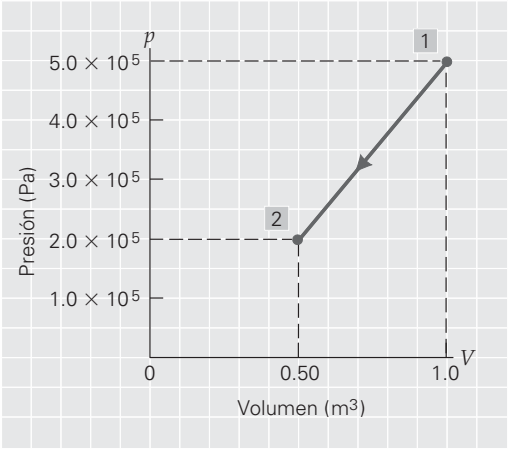
24. **El** ●● 2.0 moles de un gas ideal se expanden isotérmicamente de un volumen de 20 L a otro de 40 L, mientras su temperatura permanece en 300 K. *a*) El trabajo efectuado por el gas es 1) positivo, 2) negativo, 3) cero. Explique por qué. *b*) ¿Cuál es la magnitud del trabajo?

25. **El** ●● Un gas está encerrado en un pistón cilíndrico con un radio de 12.0 cm. Lentamente, se agrega calor al gas y la presión se mantiene a 1.00 atm. Durante el proceso, el pistón se mueve 6.00 cm. *a*) Éste es un proceso 1) isotérmico, 2) isobárico, 3) adiabático. Explique su respuesta. *b*) Si el calor que se transfiere al gas durante la expansión es de 420 J, ¿cuál será el cambio en la energía interna del gas?

26. ●● Un gas ideal monoatómico ($\gamma = 1.67$) se comprime adiabáticamente desde una presión de 1.00×10^5 Pa y un volumen de 240 L a un volumen de 40.0 L. *a*) ¿Cuál es la presión final del gas? *b*) ¿Cuánto trabajo se realiza sobre el gas?

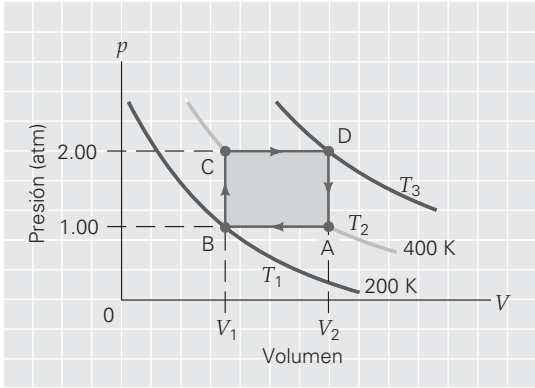
27. **El** ●●● La temperatura de 2.0 moles de gas ideal se eleva de 150 a 250°C mediante dos procesos distintos. En el proceso I, se agregan 2500 J de calor al gas; en el proceso II, se agregan 3000 J de calor. *a*) ¿En qué caso es mayor el trabajo efectuado: 1) en el proceso I, 2) en el proceso II o 3) es el mismo. Explique por qué. [*Sugerencia:* véase la ecuación 10.16.] *b*) Calcule el cambio en la energía interna y en el trabajo efectuado en cada proceso?

28. **El** ●●● Un mol de gas ideal se comprime como se muestra en el diagrama *p-V* de la ▼figura 12.24. *a*) ¿El trabajo efectuado por el gas es 1) positivo, 2) cero o 3) negativo? ¿Por qué? *b*) ¿Qué magnitud tiene ese trabajo? *c*) ¿Cuál es el cambio en la temperatura del gas?



▲ **FIGURA 12.24 Proceso de *p-V* variable y trabajo** Véase el ejercicio 28.

29. ●●● Un mol de gas ideal se somete al proceso cíclico de la ▸figura 12.25. *a*) Calcule el trabajo que interviene en cada uno de los cuatro procesos. *b*) Determine ΔU, W y Q para el ciclo completo. *c*) Calcule T_3.



▲ **FIGURA 12.25 Un proceso cíclico** Véase el ejercicio 29.

12.4 Segunda ley de la termodinámica y entropía

30. **OM** En cualquier proceso natural, el cambio total en la entropía del Universo no puede ser *a*) negativo, *b*) cero o *c*) positivo.

31. **OM** La segunda ley de la termodinámica *a*) describe el estado de un sistema, *b*) sólo es válida cuando se satisface la primera ley, *c*) descarta las máquinas de movimiento perpetuo o *d*) no es válida para un sistema aislado.

32. **OM** Un gas ideal se comprime isotérmicamente. El cambio en la entropía para este proceso es *a*) positivo, *b*) negativo, *c*) cero, *d*) ninguno de los anteriores.

33. **PC** ¿La entropía de cada uno de estos objetos aumenta o disminuye? *a*) Se derrite *hielo*; *b*) se condensa *vapor de agua*; *c*) se calienta *agua* en una estufa; *d*) se enfrían *alimentos* en un refrigerador.

34. **PC** Cuando una cantidad de agua caliente se mezcla con una cantidad de agua fría, el sistema combinado alcanza el equilibrio térmico a cierta temperatura intermedia. ¿Cómo cambia la entropía del sistema (ambos líquidos)?

35. **PC** Un estudiante desafía la segunda ley de la termodinámica diciendo que la entropía no tiene que aumentar en todas las situaciones, como cuando el agua se congela. ¿Es válido este desafío? ¿Por qué?

36. **PC** ¿Un organismo vivo es un sistema abierto o un sistema aislado? Explique su respuesta.

37. **El** ● 1.0 kg de hielo se funde por completo en agua líquida a 0°C. *a*) El cambio en la entropía del hielo (agua) en este proceso es 1) positivo, 2) cero, 3) negativo. Explique su respuesta. *b*) ¿Cuál *es* el cambio en la entropía del hielo (agua)?

38. **El** ● Un proceso implica la condensación de 0.50 kg de vapor de agua a 100°C. *a*) El cambio de entropía del vapor (agua) es 1) positivo, 2) cero o 3) negativo. ¿Por qué? *b*) ¿Cuál *es* el cambio la entropía del vapor (agua)?

39. ● ¿Cuánto cambia la entropía de 0.50 kg de vapor de mercurio ($L_v = 2.7 \times 10^5$ J/kg) al condensarse en su punto de ebullición de 357°C?

40. ●● En una expansión isotérmica a 27°C, un gas ideal realiza 30 J de trabajo. ¿Cuál es el cambio en la entropía del gas?

41. ●● Durante un cambio de fase líquida a sólida de una sustancia, el cambio de entropía es de -4.19×10^3 J/K. Si se extrae 1.67×10^6 J de calor en el proceso, ¿qué punto de congelación tiene la sustancia en grados Celsius?

42. **El** ●● Un mol de un gas ideal experimenta una compresión isotérmica a 20°C, y se realiza un trabajo de 7.5×10^3 J para comprimirlo. *a*) ¿Qué sucede con la entropía del gas: 1) se incrementa, 2) permanece igual o 3) disminuye? ¿Por qué? *b*) ¿Cuál es el cambio en la entropía del gas?

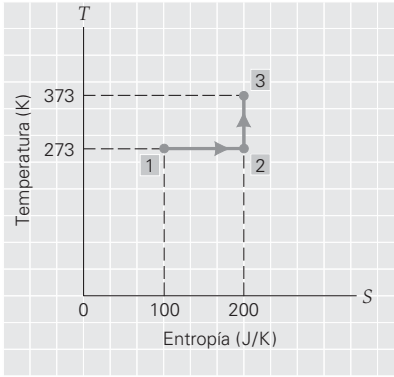
43. **El** ●● Una cantidad de un gas ideal experimenta una expansión isotérmica reversible a 0°C y realiza 3.0×10^3 J de trabajo sobre su entorno en el proceso. *a*) ¿La entropía del gas 1) se incrementa, 2) permanece igual o 3) disminuye? Explique su respuesta. *b*) ¿Cuál es el cambio en la entropía del gas.

44. **El** ●● Un sistema aislado consiste en dos depósitos térmicos muy grandes, con temperaturas constantes de 373 y 273 K, respectivamente. Suponga que fluyen espontáneamente 1000 J de calor del depósito frío al caliente. *a*) El cambio total en la entropía del sistema aislado (ambos depósitos) sería 1) positivo, 2) cero, 3) negativo. Explique su respuesta. *b*) ¿Qué cambio total de entropía tendría el sistema aislado?

45. **El** ●● Dos depósitos de calor, a 200 y 60°C, respectivamente, se ponen en contacto térmico, y fluyen espontáneamente 1.50×10^3 J de calor de uno al otro, sin que la temperatura cambie de manera significativa. *a*) El cambio en la entropía del sistema de los dos depósitos es 1) positivo, 2) cero, 3) negativo. Explique por qué. *b*) ¿Cómo cambia la entropía del sistema de dos depósitos?

46. ●● En invierno, el calor de una casa cuya temperatura interior es de 18°C se fuga a razón de 2.0×10^4 J cada segundo. Si la temperatura exterior es de 0°C. *a*) ¿Cuánto cambia la entropía de la casa cada segundo? *b*) ¿Cuál es el cambio total de entropía por segundo del sistema casa-exterior?

47. **El** ●●● Un sistema pasa del estado 1 al estado 3 como se muestra en el diagrama *T-S* de la ▼figura 12.26. *a*) El calor que se transfiere en el proceso descrito es 1) positivo, 2) cero, 3) negativo. Explique. *b*) Calcule el calor total transferido cuando el sistema pasa del estado 1 al estado 3.



▲ **FIGURA 12.26 Entropía y calor** Véanse los ejercicios 47 y 48.

48. **El** ●●● Suponga que el sistema descrito por el diagrama *T-S* de la figura 12.26 se devuelve a su estado original, el estado 1, con un proceso reversible indicado por una línea recta del estado 3 al 1. *a*) El cambio de entropía del sistema para este proceso cíclico general es 1) positivo, 2) cero, 3) negativo. Explique por qué. *b)* ¿Cuánto calor se transfiere en el proceso cíclico? [*Sugerencia*: véase el ejemplo 12.7.]

49. ●●● Un cubo de hielo de 50.0 g a 0°C se coloca en 500 mL de agua a 20°C. *Determine* el cambio de entropía (una vez que se haya derretido todo el hielo) *a*) para el hielo, *b*) para el agua y *c*) para el sistema hielo-agua.

12.5 Máquinas de calor y bombas térmicas*

50. **OM** Para una máquina de calor cíclica, *a*) $\varepsilon > 1$, *b*) $Q_h = W_{neto}$, *c*) $\Delta U = W_{neto}$, *d*) $Q_h > Q_c$.

51. **OM** Una bomba térmica *a*) se califica por su eficiencia térmica, *b*) requiere aporte de trabajo, *c*) no es consistente con la segunda ley de la termodinámica o *d*) infringe la primera ley de la termodinámica.

52. **OM** ¿Qué determina la eficiencia térmica de una máquina de calor? *a*) $Q_c \times Q_h$; *b*) Q_c/Q_h; *c*) $Q_h - Q_c$; *d*) $Q_h + Q_c$.

53. **PC** ¿Qué pasa con la energía interna de una máquina de calor cíclica después de un ciclo completo?

54. **PC** ¿Dejar abierta la puerta del refrigerador es una forma práctica de refrescar una habitación? ¿Por qué?

55. **PC** El planteamiento de Lord Kelvin de la segunda ley de la termodinámica aplicada a máquinas de calor ("Ninguna máquina de calor que opera en un ciclo puede convertir totalmente su aporte de calor en trabajo") se refiere a su operación *en un ciclo*. ¿Por qué se incluye la frase "en un ciclo"?

56. **PC** La energía producida por una bomba térmica es mayor que la consumida para operar la bomba. ¿Este dispositivo infringe la primera ley de la termodinámica?

57. **PC** En los ciclos normales de convección atmosférica, aire frío a mayor altura se transfiere a un nivel más bajo y más cálido. ¿Esto infringe la segunda ley de la termodinámica? Explique.

58. ● Un motor de gasolina tiene una eficiencia térmica del 28%. Si absorbe 2000 J de calor en cada ciclo, *a*) ¿cuánto trabajo neto efectúa en cada ciclo? *b*) ¿Cuánto calor se disipa en cada ciclo?

59. ● Si una máquina efectúa 200 J de trabajo neto y disipa 600 J de calor por ciclo, ¿cuál es su eficiencia térmica?

60. ● Una máquina de calor con una eficiencia térmica del 20% efectúa 800 J de trabajo neto en cada ciclo. ¿Cuánto calor se pierde al entorno (el depósito de baja temperatura) en cada ciclo?

61. ● Un motor de combustión interna con eficiencia térmica del 15.0% efectúa 2.60×10^4 J de trabajo neto en cada ciclo. ¿Cuánto calor pierde la máquina en cada ciclo?

*Considere exactas las eficiencias.

62. **EI** ● El calor producido por un motor específico es 7.5×10^3 J por ciclo, y el trabajo neto que resulta es 4.0×10^3 J por ciclo. *a*) El aporte de calor es 1) menor que 4.0×10^3 J, 2) entre 4.0×10^3 J y 7.5×10^3 J, 3) mayor que 7.5×10^3 J. Explique su respuesta. *b*) ¿Cuáles son la entrada de calor y la eficiencia térmica del motor?

63. ●● Un motor de gasolina quema combustible que libera 3.3×10^8 J de calor por hora. *a*) ¿Cuál es la entrada de energía durante un periodo de 2.0 h? *b*) Si el motor genera 25 kW de potencia durante este tiempo, ¿cuál será su eficiencia térmica?

64. **EI** ●● Un ingeniero rediseña una máquina de calor y mejora su eficiencia térmica del 20 al 25%. *a*) ¿La razón del calor producido al calor aportado 1) aumenta, 2) no cambia o 3) disminuye? ¿Por qué? *b*) ¿Cuánto *cambia* Q_c/Q_h?

65. **EI** ●● Un motor de vapor debe mejorar su eficiencia térmica del 8.00 al 10.0%, mientras continúa produciendo 4500 J de trabajo útil cada ciclo. *a*) ¿La razón entre la entrada de calor y la salida de calor 1) aumenta, 2) permanece igual o 3) disminuye? Explique su respuesta. *b*) ¿Cuál es su cambio en Q_h/Q_c?

66. ●● Un refrigerador toma calor de su interior frío a razón de 7.5 kW cuando el trabajo requerido se aporta a razón de 2.5 kW. ¿Con qué rapidez se despide calor hacia la cocina?

67. ●● Un refrigerador con un CDD de 2.2 extrae 4.2×10^5 J de calor de su área de almacenamiento en cada ciclo. *a*) ¿Cuánto calor despide en cada ciclo? *b*) Calcule el aporte total de trabajo en joules para 10 ciclos.

68. ●● Una bomba de calor quita 2.0×10^3 J de calor al exterior y suministra 3.5×10^3 J de calor al interior de una casa en cada ciclo. *a*) ¿Cuánto trabajo se requiere por ciclo? *b*) ¿Qué CDD tiene esta bomba?

69. ●● Un acondicionador de aire tiene un CDD de 2.75. Calcule el consumo de potencia de la unidad si debe extraer 1.00×10^7 J de calor del interior de la casa en 20 min?

70. ●● Una máquina de vapor tiene una eficiencia térmica de 30.0%. Si su aporte de calor por ciclo proviene de la condensación de 8.00 kg de vapor de agua a 100°C, *a*) ¿qué trabajo neto producirá por ciclo y *b*) cuánto calor se perderá al entorno en cada ciclo?

71. ●●● Un motor de gasolina tiene una eficiencia térmica del 25.0%. Si el calor se expulsa del motor a una tasa de 1.50×10^6 J por hora, ¿cuánto tiempo tardará el motor en realizar una tarea que requiere una cantidad de trabajo de 3.0×10^6 J?

72. ●●● Una planta que quema hulla produce 900 MW de electricidad y opera con una eficiencia térmica del 25%. *a*) Calcule la tasa de aporte de calor a la planta. *b*) Calcule la tasa de descarga de calor de la planta. *c*) El agua a 15°C de un río cercano se utiliza para enfriar la descarga de calor. Si el agua enfriadora no supera una temperatura de 40°C, ¿cuántos galones de agua enfriadora se necesitarán por minuto?

73. ●●● Una máquina de cuatro tiempos opera según el ciclo Otto. Su producción es de 150 hp a 3600 rpm. *a*) ¿Cuántos ciclos se efectúan en 1 min? *b*) Si la eficiencia térmica de la máquina es del 20%, ¿cuánto calor se le aporta en cada minuto? *c*) ¿Cuánto calor se desecha (por minuto) al entorno?

12.6 Ciclo de Carnot y máquinas de calor ideales

74. **OM** El ciclo de Carnot consiste en *a*) dos procesos isobáricos y dos isotérmicos, *b*) dos procesos isométricos y dos adiabáticos, *c*) dos procesos adiabáticos y dos isotérmicos o *d*) cuatro procesos arbitrarios que vuelven el sistema a su estado inicial.

75. **OM** ¿Qué relación de temperatura de depósitos producirá la mayor eficiencia en una máquina de Carnot? *a*) $T_c = 0.15T_h$, *b*) $T_c = 0.25T_h$, *c*) $T_c = 0.50T_h$ o *d*) $T_c = 0.90T_h$?

76. **OM** Para una máquina de calor que opera entre dos depósitos con temperaturas T_c y T_h, la eficiencia de Carnot es *a*) el máximo valor posible, *b*) el mínimo valor posible, *c*) el valor promedio o *d*) ninguno de los anteriores.

77. **PC** Los motores de automóvil pueden ser enfriados por aire o por agua. ¿Qué tipo de motor se espera que sea más eficiente y por qué?

78. **PC** Si tiene la opción de operar una máquina de calor entre los siguientes dos pares de temperaturas para los depósitos frío y caliente, ¿qué par elegiría y por qué?: 100 y 300°C; 50 y 250°C.

79. **PC** Los motores diesel son mucho más eficientes que los de gasolina. ¿Qué tipo de motor opera a más alta temperatura? ¿Por qué?

80. ● Una máquina de vapor opera entre 100 y 30°C. ¿Qué eficiencia de Carnot tiene la máquina ideal que opera entre esas temperaturas?

81. ● Una máquina de Carnot tiene una eficiencia del 35% y toma calor de un depósito de alta temperatura a 147°C. Calcule la temperatura Celsius del depósito de baja temperatura de esta máquina.

82. ● ¿Qué temperatura tiene el depósito caliente de una máquina de Carnot que tiene una eficiencia del 30% y un depósito frío a 20°C?

83. ● Se ha propuesto usar las diferencias de temperaturas en el océano para operar una máquina de calor que genere electricidad. En las regiones tropicales, la temperatura del agua en la superficie es de aproximadamente 25°C, y a grandes profundidades es cercana a 5°C. *a*) ¿Qué eficiencia teórica máxima tendría una máquina así? *b*) ¿Sería práctica una máquina de calor con una eficiencia tan baja? Explique por qué.

84. ● Un ingeniero quiere operar una máquina de calor con una eficiencia del 40% entre un depósito de alta temperatura a 350°C y uno de baja temperatura. ¿Qué temperatura máxima puede tener el depósito frío para que la máquina resulte práctica?

85. ●● Una máquina de Carnot toma 2.7×10^4 J de calor de un depósito caliente (320°C) en cada ciclo, y desecha una parte a un depósito frío (120°C). ¿Cuánto trabajo efectúa la máquina en cada ciclo?

86. ●● Una máquina de Carnot con una eficiencia del 40% opera con un depósito de baja temperatura a 50°C y despide 1200 J de calor en cada ciclo. Calcule *a*) el aporte de calor por ciclo y *b*) la temperatura Celsius del depósito de alta temperatura.

87. **EI** ●● Una máquina de Carnot toma calor de un depósito a 327°C y tiene una eficiencia del 30%. La temperatura del escape no se altera y la eficiencia se aumenta al 40%. *a*) La temperatura del depósito caliente es 1) menor, 2) igual, 3) mayor que 327°C. Explique. *b*) ¿Cuál será la nueva temperatura del depósito caliente?

88. ●● Un inventor afirma haber creado una máquina de calor que, en cada ciclo, toma 5.0×10^5 J de calor de un depósito de alta temperatura a 400°C y despide 2.0×10^5 J al entorno, que está a 125°C. ¿Invertiría usted su dinero en la producción de esta máquina? Explique por qué.

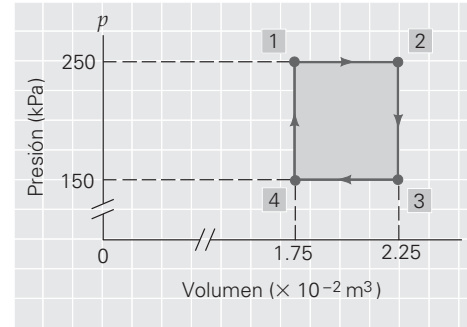
89. ●● Un inventor asegura haber creado una máquina de calor que genera 10.0 kW de potencia con una entrada de calor de 15.0 kW, mientras opera entre depósitos a 27 y 427°C. *a*) ¿Es válida su aseveración? *b*) Para generar 10.0 kW de potencia, ¿cuál será la entrada mínima de calor requerida?

90. ●● Una máquina de calor opera con una eficiencia térmica que es el 45% de la eficiencia de Carnot. Las temperaturas de los depósitos de alta y de baja temperaturas son de 400 y 100°C, respectivamente. Calcule la eficiencia de Carnot y la eficiencia térmica de la máquina.

91. ●● Una máquina de calor tiene una eficiencia térmica que es la mitad de la de una máquina de Carnot, que opera entre las temperaturas de 100 y 375°C. *a*) Calcule la eficiencia de Carnot de esa máquina de calor. *b*) Si la máquina de calor absorbe calor a razón de 50 kW, ¿con qué rapidez despide calor?

92. **EI** ●● La ecuación 12.15 indica que cuanto mayor sea la diferencia de temperatura entre los depósitos de una máquina de calor, mayor será la eficiencia de Carnot de esa máquina. Suponga que puede elegir entre aumentar la temperatura del depósito caliente cierto número de kelvins o reducir la temperatura del depósito frío en ese mismo número de kelvins. *a*) Para tener el máximo incremento en la eficiencia, usted 1) haría más caliente el depósito de alta temperatura o 2) haría más frío el depósito de baja temperatura; o bien, 3) tanto 1 como 2 producen el mismo cambio de eficiencia, así que no importa lo que se elija. ¿Por qué? *b*) Demuestre numéricamente su respuesta al inciso *a*.

93. ●● La sustancia de trabajo de una máquina de calor cíclica es 0.75 kg de un gas ideal. El ciclo consiste en dos procesos isobáricos y dos isométricos ▼figura 12.27. ¿Qué eficiencia tendría una máquina de Carnot que operara con los mismos depósitos de alta y baja temperaturas?



▲ **FIGURA 12.27 Eficiencia térmica** Véase el ejercicio 93.

94. ●● En cada ciclo, una máquina de Carnot toma 800 J de calor de un depósito a alta temperatura y descarga 600 J en uno de baja temperatura. ¿Qué razón de temperaturas tienen los depósitos?

95. **EI**●● Una máquina de Carnot que opera entre depósitos a 27 y 227°C efectúa 1500 J de trabajo en cada ciclo. *a*) El cambio en la entropía de la máquina para cada ciclo es 1) negativo, 2) cero, 3) positivo. ¿Por qué? ¿Cuál es el calor aportado a la máquina?

96. ●● La *temperatura de autoignición* de un combustible se define como la temperatura a la cual la mezcla de combustible y aire podría autoexplotar y quemarse. Por lo tanto, establece un límite superior en la temperatura del depósito caliente en un moderno motor de automóvil. Las temperaturas de autoignición para los combustibles comúnmente disponibles de gasolina y diesel están alrededor de 500 y 600°F, respectivamente. ¿Cuáles son las eficiencias de Carnot máximas de un motor de gasolina y de uno de diesel si la temperatura del depósito frío es de 27°C?

97. ●● A causa de limitaciones de materiales, la temperatura máxima del vapor de agua supercalentado que se usa en una turbina para generar electricidad es de aproximadamente 540°C. *a*) Si el condensador de vapor opera a 20°C, ¿qué eficiencia máxima de Carnot tiene la turbina? *b*) La eficiencia real está entre 35 y 40%. ¿Qué le indica este intervalo?

98. ●●● Hay un coeficiente de desempeño de Carnot (CCD_C) para un refrigerador ideal (Carnot). *a*) Demuestre que esa cantidad está dada por

$$CDD_C = \frac{T_c}{T_h - T_c}$$

b) ¿Qué nos dice esta cantidad en cuanto a ajustar las temperaturas para obtener el máximo de eficiencia de un refrigerador? (¿Puede estimar la ecuación para el CDD_C de una bomba de calor?)

99. ●●● Un vendedor le dice que un nuevo refrigerador con alto CDD extrae, en cada ciclo, 2.6×10^3 J de calor del interior del refrigerador a una temperatura de 5°C y despide 2.8×10^3 J hacia la cocina a 30°C. *a*) Calcule el CDD del refrigerador. *b*) ¿Es posible esta situación? Justifique su respuesta.

100. ●●● Una bomba de calor ideal equivale a una máquina de Carnot que opera en reversa. *a*) Demuestre que el CDD de Carnot de la bomba de calor es

$$\mathrm{CDD_C} = \frac{1}{\varepsilon_C},$$

donde ε_C es la eficiencia de Carnot de la máquina de calor. *b*) Si una máquina de Carnot tienen una eficiencia del 40%, ¿cuál sería el $\mathrm{CDD_C}$ cuando funciona en reversa como una bomba de calor? (Véase el ejercicio 98.)

Ejercicios adicionales

101. Cuando un automóvil viaja a 75 mi/h por la carretera, su motor desarrolla 45 hp. Si este motor tiene una eficiencia termodinámica del 25% y 1 gal de gasolina tiene un contenido energético de 1.3×10^8 J, ¿cuál será la eficiencia del combustible (en millas por galón) de este automóvil?

102. Un gramo de agua (cuyo volumen es 1.00 cm^3) a 100°C se convierte en un volumen de 1.67×10^3 cm^3 de vapor a presión atmosférica. ¿Cuál es el cambio en la energía interna del agua (vapor)?

103. En un partido muy reñido, un jugador de baloncesto llega a producir 300 W de potencia. Suponiendo que la eficiencia del "motor" del jugador es del 15% y que el calor se disipa principalmente a través de la evaporación del sudor, ¿cuánta masa de sudor se evapora por hora?

104. Una máquina de Carnot produce 400 J de trabajo por ciclo. Si cada ciclo de 600 J de calor se disipan hacia un depósito frío a 27°C, ¿cómo cambia la entropía del depósito caliente cada ciclo?

105. Una cantidad de un gas ideal a una presión inicial de 2.00 atm experimenta una expansión adiabática a la presión atmosférica. ¿Cuál es la razón de la temperatura final con respecto a la temperatura inicial del gas?

106. Una planta generadora de energía de 100 MW tiene una eficiencia del 40%. Si se utiliza agua para expulsar el calor desperdiciado y la temperatura del agua no debe aumentar en más de 12C°, ¿cuál será la masa de agua que debe fluir a través de la planta cada segundo?

PHYSLET® Los siguientes problemas de física Physlet se pueden utilizar con este capítulo.
20.8, 20.9, 20.10, 20.11, 21.1, 21.2, 21.3, 21.4, 21.5, 21.6, 21.7, 21.8.

CAPÍTULO 13

VIBRACIONES Y ONDAS

13.1 Movimiento armónico simple 434

13.2 Ecuaciones de movimiento 439

13.3 Movimiento ondulatorio 446

13.4 Propiedades de las ondas 449

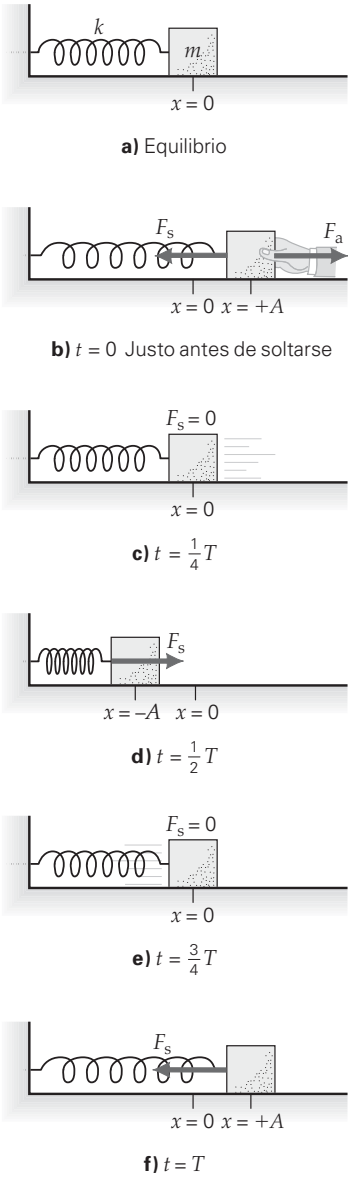
13.5 Ondas estacionarias y resonancia 454

HECHOS DE FÍSICA

- Ondas (de diferentes tipos) viajan a través de sólidos, líquidos y gases, así como del vacío.
- Las perturbaciones provocan ondas. Los soldados que marchan para cruzar viejos puentes de madera saben que deben romper el paso y no marchar a una cadencia periódica. Esto podría corresponder con una frecuencia natural del puente, lo cual generaría resonancia y grandes oscilaciones que dañaría el puente e incluso provocaría su derrumbe.
- Las *ondas cerebrales* son diminutos voltajes eléctricos oscilantes en el cerebro. Estas ondas se miden colocando en el cuero cabelludo electrodos que están conectados a un *electro*encefaló*grafo* (EEG) para obtener un registro (*gráfica*) de las señales eléctricas (*electro*) del cerebro (*encéfalo*). Las señales eléctricas del cerebro se representan en forma de ondas cerebrales, cuya frecuencia depende de la actividad del cerebro.
- Los *maremotos* no están relacionados con las mareas. Es más apropiado utilizar el término japonés *tsunami*, que significa "gran ola en el puerto". Los efectos de un tsunami se intensifican en espacios confinados de bahías y puertos. Las olas se originan por terremotos subterráneos y se desplazan a través del océano con una rapidez que alcanza los 960 km/h, con poca evidencia en la superficie. Cuando un tsunami alcanza una costa poco profunda, la fricción la frena y, al mismo tiempo, la desplaza hacia arriba hasta formar una masa de agua de 5 a 30 m de alto, que choca contra la orilla.

La fotografía muestra lo que la mayoría de la gente pensaría primero cuando oye hablar de onda. Todos conocemos las olas oceánicas y sus parientes más pequeñas, las ondas que se forman en un estanque cuando algo perturba la superficie. Sin embargo, en muchos sentidos, las ondas más importantes para el ser humano, y las que más interesan a los físicos, o son invisibles o no parecen ondas. El sonido, por ejemplo, es una onda. Quizá lo más sorprendente sea que la luz es una onda. De hecho, todas las radiaciones electromagnéticas son ondas: ondas de radio, microondas, rayos X, etc. Cada vez que nos asomamos a un microscopio, nos ponemos un par de anteojos o miramos un arcoiris, estamos experimentando energía ondulatoria en forma de luz. Primero vamos a examinar una descripción básica de las ondas.

En general las ondas están relacionadas con vibraciones u oscilaciones —un movimiento de ida y vuelta—, como el de una masa colgada de un resorte o un péndulo, y para tales movimientos resultan fundamentales las fuerzas restauradoras o momentos de fuerza. En un medio material, la fuerza restauradora la proporcionan fuerzas intermoleculares. Si una molécula se perturba, las fuerzas restauradoras ejercidas por sus vecinas tienden a devolver la molécula a su posición original, así que comienza a oscilar. Al hacerlo, afecta a las moléculas adyacentes, que a la vez comienzan a oscilar. Esto se denomina *propagación*. Pero, ¿qué es lo que propagan las moléculas de un material? La respuesta es *energía*. Una sola perturbación, como cuando damos una sacudida rápida al extremo de una cuerda estirada, produce una *pulsación ondulatoria*. Una perturbación continua, repetitiva, genera una propagación continua de energía que llamamos *movimiento ondulatorio*. Sin embargo, antes de examinar las ondas en medios materiales, nos conviene analizar las oscilaciones de una sola masa.



▲ **FIGURA 13.1 Movimiento armónico simple (MAS)** Cuando un objeto en un resorte ***a)*** se desplaza respecto a su posición de equilibrio, $x = 0$, y ***b)*** se suelta, el objeto adquiere un MAS (suponiendo que no haya pérdidas por fricción). El tiempo que le toma completar un ciclo es el periodo de oscilación (T). (Aquí, F_s es la fuerza del resorte y F_a es la fuerza aplicada.) ***c)*** En $t = T/4$, el objeto está otra vez en su posición de equilibrio; ***d)*** en $t = T/2$, está en $x = -A$. ***e)*** Durante el siguiente medio ciclo, el movimiento es a la derecha; ***f)*** en $t = T$, el objeto está otra vez en su posición inicial ($t = 0$) como en *b*.

13.1 Movimiento armónico simple

OBJETIVOS: *a*) Describir el movimiento armónico simple y *b*) describir cómo varían la energía y la rapidez en este tipo de movimiento.

El movimiento de un objeto oscilante depende de la fuerza restauradora que hace que el objeto se desplace de ida y vuelta. Conviene iniciar el estudio de este tipo de movimientos considerando el tipo más sencillo de fuerza que actúa a lo largo del eje x: una fuerza directamente proporcional al desplazamiento del objeto respecto al equilibrio. Un ejemplo común es la fuerza de resorte (ideal), descrita por la **ley de Hooke** (sección 5.2),

$$F_s = -kx \tag{13.1}$$

donde k es la constante del resorte. En el capítulo 5 vimos que el signo menos indica que la fuerza siempre tiene la dirección opuesta al desplazamiento; es decir, la fuerza siempre tiende a *restaurar* el resorte a su posición de equilibrio.

Suponga que un objeto descansa sobre una superficie horizontal sin fricción y está conectado a un resorte como se muestra en la ◂figura 13.1. Cuando el objeto se desplaza hacia un lado de su posición de equilibrio y se suelta, se moverá de un lado a otro; es decir, vibrará u oscilará. Aquí, evidentemente la oscilación o vibración es un *movimiento periódico*: un movimiento que se repite una y otra vez siguiendo el mismo camino. En el caso de oscilaciones lineales, como las de un objeto sujeto a un resorte, el camino podría ser hacia un lado y el otro, o hacia arriba y hacia abajo. En el caso de un péndulo oscilante, el camino es un arco circular hacia uno y otro lados.

El movimiento bajo la influencia del tipo de fuerza descrita por la ley de Hooke se denomina **movimiento armónico simple (MAS)**, porque la fuerza es la fuerza restauradora más simple y porque el movimiento se puede describir con funciones armónicas (senos y cosenos), como veremos más adelante en este capítulo. La distancia dirigida de un objeto en MAS, respecto a su posición de equilibrio, es el **desplazamiento** del objeto. En la figura 13.1 vemos que el desplazamiento puede ser positivo o negativo, lo cual indica dirección. Los desplazamientos máximos son $+A$ y $-A$ (figura 13.1b, d). La magnitud del desplazamiento máximo, o la distancia máxima de un objeto respecto a su posición de equilibrio, es la **amplitud (*A*)** de la oscilación, una cantidad escalar que expresa la distancia de ambos desplazamientos extremos respecto a la posición de equilibrio.

Además de la amplitud, dos cantidades importantes que describen una oscilación son su periodo y su frecuencia. El **periodo (*T*)** es el tiempo que el objeto tarda en completar un ciclo de movimiento. Un ciclo es un viaje redondo *completo*, es decir, el movimiento durante una oscilación completa. Por ejemplo, si un objeto parte de $x = A$ (figura 13.1b), entonces cuando vuelva a $x = A$ (como en la figura 13.1f) habrá completado un ciclo durante un tiempo que llamamos periodo. Si un objeto está inicialmente en $x = 0$ cuando se le perturba, su segundo regreso a este punto marcará un ciclo. (¿Por qué un segundo regreso?) En todo caso, el objeto recorrería una distancia de $4A$ durante un ciclo. ¿Puede usted demostrar esto?

La **frecuencia (*f*)** es el número de ciclos por segundo. La relación entre frecuencia y periodo es

$$f = \frac{1}{T} \quad \textit{frecuencia y periodo} \tag{13.2}$$

Unidad SI de frecuencia: hertz (Hz) o ciclo por segundo (ciclo/s)

La relación inversa se refleja en las unidades. El periodo es el número de segundos por ciclo y la frecuencia es el número de ciclos por segundo. Por ejemplo, si $T = \frac{1}{2}$ ciclo, entonces completa 2 ciclos cada segundo o $f = 2$ ciclos/s.

La unidad estándar de frecuencia es el **hertz (Hz)**, que es un ciclo por segundo.* Por la ecuación 13.2, la frecuencia tiene unidades de recíproco de segundos ($1/\text{s}$ o s^{-1}),

* La unidad se llama así en honor al físico alemán Heinrich Hertz (1857-1894), quien fue uno de los primeros investigadores de las ondas electromagnéticas.

TABLA 13.1 Términos empleados para describir el movimiento armónico simple

desplazamiento:	la distancia dirigida de un objeto ($\pm x$) desde su posición de equilibrio.
amplitud (A):	la magnitud del desplazamiento máximo, o la distancia máxima, de un objeto desde su posición de equilibrio.
periodo (T):	el tiempo para completar un ciclo de movimiento.
frecuencia (f):	el número de ciclos por segundo (en hertz o segundos a la inversa, donde $f = 1/T$).

puesto que el periodo es una medida de tiempo. Aunque el ciclo no es realmente una unidad, en algunos casos sería conveniente expresar la frecuencia en ciclos por segundo, para facilitar el análisis de unidades. Esto es similar al uso del radián (rad) para describir movimiento circular en las secciones 7.1 y 7.2.

Los términos que describen el MAS se resumen en la tabla 13.1.

Energía y rapidez de un sistema masa-resorte en MAS

En el capítulo 5 vimos que la energía potencial almacenada en un resorte que se estira o comprime una distancia $\pm x$ respecto al equilibrio (que elegimos como $x = 0$) es

$$U = \tfrac{1}{2}kx^2 \tag{13.3}$$

El *cambio* de energía potencial de un objeto que oscila en un resorte está relacionado con el trabajo efectuado por la fuerza del resorte. Un objeto con masa m que oscila en un resorte también tiene energía cinética. Juntas, las energías cinética y potencial dan la energía mecánica total E del sistema:

$$E = K + U = \tfrac{1}{2}mv^2 + \tfrac{1}{2}kx^2 \tag{13.4}$$

Cuando el objeto está en uno de sus desplazamientos máximos, $+A$ o $-A$, está instantáneamente en reposo, $v = 0$ (▼figura 13.2). Así, toda la energía está en forma de energía potencial ($U_{\text{máx}}$) en este punto; es decir,

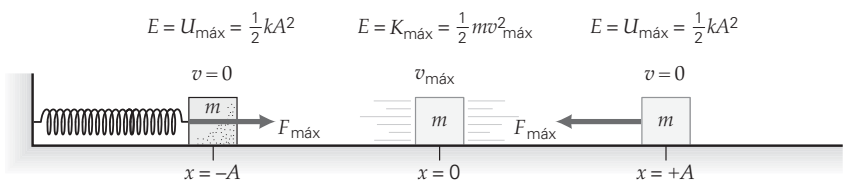
$$E = \tfrac{1}{2}m(0)^2 + \tfrac{1}{2}k(\pm A)^2 = \tfrac{1}{2}kA^2$$

o bien,

$$E = \tfrac{1}{2}kA^2 \quad \textit{energía total de un objeto en MAS en un resorte} \tag{13.5}$$

Esto es un resultado general para MAS:

> La energía total de un objeto en movimiento armónico simple es directamente proporcional al cuadrado de la amplitud.



▲ **FIGURA 13.2 Oscilaciones y energía** Para una masa que oscila en MAS en un resorte (sobre una superficie sin fricción), la energía total en las posiciones de amplitud ($\pm A$) es toda energía potencial ($U_{\text{máx}}$) y $E = \frac{1}{2}kx^2 = \frac{1}{2}kA^2$, que es la energía total del sistema. En la posición central ($x = 0$), la energía total es toda energía cinética ($E = \frac{1}{2}mv^2_{\text{máx}}$, donde m es la masa del bloque). ¿Cómo se divide la energía total entre $x = 0$ y $x = \pm A$?

La ecuación 13.5 nos permite expresar la velocidad de un objeto que oscila en un resorte en función de la posición:

$$E = K + U \qquad \text{o bien,} \qquad \tfrac{1}{2}kA^2 = \tfrac{1}{2}mv^2 + \tfrac{1}{2}kx^2$$

Despejando v^2 y considerando la raíz cuadrada, obtenemos:

$$v = \pm\sqrt{\frac{k}{m}(A^2 - x^2)} \quad \textit{velocidad de un objeto en MAS} \tag{13.6}$$

donde los signos positivo y negativo indican la dirección de la velocidad. Observe que en $x = \pm A$, la velocidad es cero porque el objeto está instantáneamente en reposo en su desplazamiento máximo respecto al equilibrio.

Ilustración 16.3 Energía y movimiento armónico simple

Vemos que cuando el objeto oscilante pasa por su posición de equilibrio ($x = 0$), su energía potencial es cero. En ese instante, toda la energía es cinética, y el objeto viaja con su rapidez máxima $v_{\text{máx}}$. La expresión para la energía en este caso es

$$E = \tfrac{1}{2}kA^2 = \tfrac{1}{2}mv_{\text{máx}}^2$$

así que,

$$v_{\text{máx}} = \sqrt{\frac{k}{m}}A \quad \textit{rapidez maxima de una masa en un resorte} \tag{13.7}$$

Nota: este análisis se limitará a resortes ligeros, cuya masa puede considerarse insignificante.

En el siguiente ejemplo, y en la sección Aprender dibujando, podremos visualizar el intercambio continuo de energías cinética y potencial.

Ejemplo 13.1 ■ Un bloque y un resorte: movimiento armónico simple

Un bloque con masa de 0.25 kg descansa sobre una superficie sin fricción y está conectado a un resorte ligero cuya constante es de 180 N/m (véase la figura 13.1). Si el bloque se desplaza 15 cm respecto a su posición de equilibrio y se suelta, *a*) ¿qué energía total tendrá el sistema y *b*) qué rapidez tendrá el bloque cuando esté a 10 cm de su posición de equilibrio?

Razonamiento. La energía total depende de la constante del resorte (k) y de la amplitud (A), que se dan. En $x = 10$ cm, la rapidez debería ser menor que la máxima. (¿Por qué?)

Solución. Primero hacemos una lista de los datos y de lo que se pide. El desplazamiento inicial es la amplitud. (¿Por qué?)

Dado: $m = 0.25$ kg, $k = 180$ N/m, $A = 15$ cm $= 0.15$ m, $x = 10$ cm $= 0.10$ m

Encuentre: *a*) E (energía total), *b*) v (rapidez)

a) La energía total está dada por la ecuación 13.5:

$$E = \tfrac{1}{2}kA^2 = \tfrac{1}{2}(180\ \text{N/m})(0.15\ \text{m})^2 = 2.0\ \text{J}$$

b) La rapidez instantánea del bloque a una distancia de 10 cm de la posición de equilibrio está dada por la ecuación 13.6, sin signos direccionales:

$$v = \sqrt{\frac{k}{m}(A^2 - x^2)} = \sqrt{\frac{180\ \text{N/m}}{0.25\ \text{kg}}[(0.15\ \text{m})^2 - (0.10\ \text{m})^2]} = \sqrt{9.0\ \text{m}^2/\text{s}^2} = 3.0\ \text{m/s}$$

¿Qué rapidez tendría la masa en $x = -10$ cm?

Ejercicio de refuerzo. En el inciso *b* de este ejemplo, el bloque en $x = 10$ cm está a dos tercios, o 67%, de su desplazamiento máximo. ¿Es entonces su rapidez en ese punto el 67% de su rapidez máxima? Compruebe matemáticamente su respuesta. (*Las respuestas de todos los Ejercicios de refuerzo se dan al final del libro.*)

APRENDER DIBUJANDO — OSCILACIÓN EN UN POZO PARABÓLICO DE POTENCIA

En la figura 1 se muestra una forma de visualizar la conservación de la energía en el movimiento armónico simple. La energía potencial de un sistema masa-resorte puede graficarse como una curva de energía (E) contra posición (x). Puesto que $U = \frac{1}{2}kx^2 \propto x^2$, la curva es una *parábola*.

En ausencia de fuerzas no conservativas, la energía total del sistema, E, es constante. Sin embargo, E es la suma de las energías cinética y potencial. Durante las oscilaciones, hay un intercambio continuo entre las dos formas de energía, aunque su suma continúa siendo constante. Matemáticamente, esta relación se escribe como $E = K + U$. En la figura 2, U (indicada con una flecha azul) está representada por la distancia vertical respecto al eje x.

Puesto que E es constante e independiente de x, se grafica como una línea horizontal. La energía cinética es la parte de la energía total que *no* es energía potencial; es decir, $K = E - U$; la podemos interpretar gráficamente (flecha gris) como la distancia vertical entre la parábola de energía potencial y la línea horizontal de la energía total. Durante la oscilación del objeto sobre el eje x, los intercambios de energía pueden visualizarse como los cambios de longitud de las dos flecha.

En la figura 2 se muestra una posición general, x_1. Ni la energía cinética ni la potencial están en su valor máximo de E ahí. En cambio, los valores máximos se dan en $x = 0$ y $x = \pm A$, respectivamente. El movimiento no puede exceder $x = \pm A$ porque ello implicaría una energía cinética negativa, lo cual es físicamente imposible. (¿Por qué?) Las posiciones de amplitud también se denominan *extremos* del movimiento, ya que son los puntos donde la rapidez es instantáneamente cero y se invierte la dirección del objeto.

Intente contestar las siguientes preguntas (y redacte algunas más) empleando este enfoque gráfico: ¿qué hay que hacer a E para aumentar la amplitud de oscilación, y cómo podría hacerse? ¿Qué sucede con la amplitud de un sistema del mundo real en MAS, en presencia de una fuerza como la fricción, que hace que E disminuya con el tiempo?

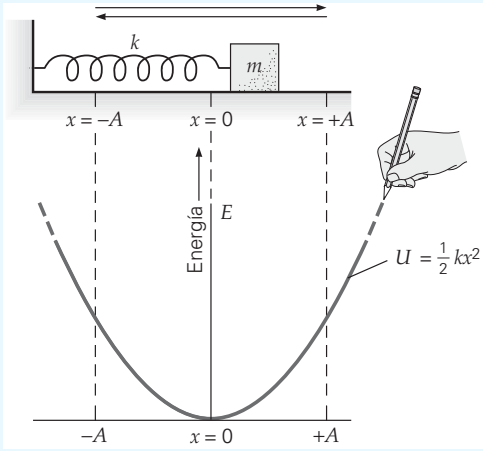


FIGURA 1 "Pozo" de energía potencial de un sistema masa-resorte La energía potencial de un resorte que se estira o comprime respecto a su posición de equilibrio ($x = 0$) es una parábola, porque $U \propto x^2$. En $x = \pm A$, toda la energía del sistema es potencial.

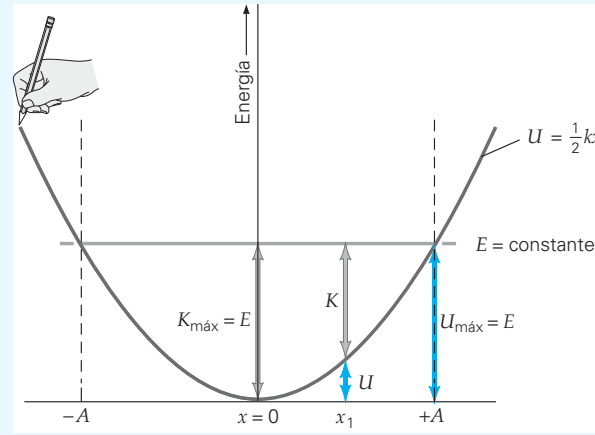
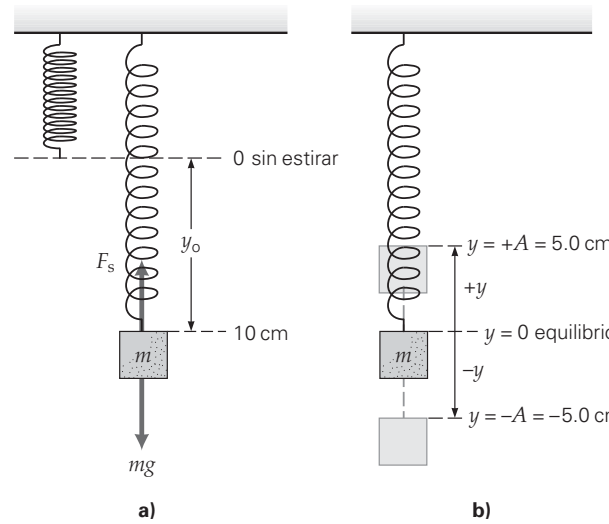


FIGURA 2 Transferencias de energía cuando oscila el sistema masa-resorte La distancia vertical del eje x a la parábola es la energía potencial del sistema. El resto (la distancia vertical entre la parábola y la línea horizontal que representa la energía total constante del sistema E) es la energía cinética del sistema (K).

La constante de un resorte suele determinarse colocando un objeto de masa conocida en el extremo de un resorte y dejando que se estabilice verticalmente en una nueva posición de equilibrio. El siguiente ejemplo muestra algunos resultados representativos.



▲ **FIGURA 13.3 Determinación de la constante del resorte** ***a)*** Cuando un objeto colgado de un resorte está en equilibrio, se anulan las dos fuerzas sobre el objeto, de manera que $F_s = w$, o bien, que $ky_o = mg$. Por lo tanto, es posible calcular la constante del resorte: $k = mg/y_o$. ***b)*** Conviene tomar como punto de referencia cero de un objeto en MAS suspendido de un resorte la nueva posición de equilibrio, pues el movimiento es simétrico en torno a ese punto. (Véase el ejemplo 13.2.)

Ejemplo 13.2 ■ La constante de resorte: determinación experimental

Cuando una masa de 0.50 kg se cuelga de un resorte, éste se estira 10 cm hasta una nueva posición de equilibrio (▲figura 13.3a). *a*) Calcule la constante del resorte. *b*) Luego, se tira de la masa hacia abajo desplazándola 5.0 cm, y se suelta. ¿Qué altura máxima alcanzará la masa oscilante?

Razonamiento. En la posición de equilibrio, la fuerza neta sobre la masa es cero porque $a = 0$. En el inciso *b*, usaremos y negativa para indicar "hacia abajo", como se suele hacer en problemas de movimiento vertical.

Solución.

Dado: $m = 0.50$ kg
$y_o = 10$ cm $= 0.10$ m
$y = -5.0$ cm $= -0.050$ m
(nuevo punto de referencia)

Encuentre: *a*) k (constante de resorte)
b) A (amplitud)

a) Cuando la masa suspendida está en equilibrio (figura 13.3a), la fuerza neta sobre la masa es cero. Por consiguiente, el peso de la masa y la fuerza del resorte son iguales y opuestos. Si igualamos sus magnitudes,

$$F_s = w$$

o bien,

$$ky_o = mg$$

Por lo tanto,

$$k = \frac{mg}{y_o} = \frac{(0.50\text{ kg})(9.8\text{ m/s}^2)}{0.10\text{ m}} = 49\text{ N/m}$$

b) Una vez puesta en movimiento, la masa oscila verticalmente en torno a la posición de equilibrio. Puesto que el movimiento es simétrico en torno a este punto, lo designamos como punto de referencia cero de la oscilación (figura 13.3b). El desplazamiento inicial es $-A$, así que la posición más alta de la masa será 5.0 cm arriba de la posición de equilibrio ($+A$).

Ejercicio de refuerzo. ¿Cuánta energía potencial más tiene el resorte de este ejemplo en la posición más baja de la oscilación, en comparación con la posición más alta?

13.2 Ecuaciones de movimiento

OBJETIVOS: *a*) Entender la ecuación del MAS y *b*) explicar qué significan fase y diferencias de fase.

La **ecuación de movimiento** de un objeto es la ecuación que da la posición del objeto en función del tiempo. Por ejemplo, la ecuación de movimiento con una aceleración rectilínea constante es $x = x_o + v_o t + \frac{1}{2}at^2$, donde v_o es la velocidad inicial (capítulo 2). Sin embargo, en el movimiento armónico simple la aceleración no es constante, así que las ecuaciones de cinemática del capítulo 2 no son válidas para este caso.

Podemos obtener la ecuación de movimiento para un objeto en MAS, a partir de una relación entre los movimientos armónico simple y circular uniforme. Simulamos el MAS con un componente del movimiento circular uniforme, como se ilustra en la ▼figura 13.4. Mientras el objeto iluminado se mueve con movimiento circular uniforme (con rapidez angular constante ω) en un plano vertical, su sombra se mueve hacia arriba y hacia abajo, siguiendo el mismo camino que el objeto en el resorte, que tiene movimiento armónico simple. Puesto que la sombra y el objeto tienen la misma posición en cualquier momento, se sigue que la ecuación de movimiento de la sombra del objeto en movimiento circular es la ecuación de movimiento del objeto que oscila en el resorte.

PHYSLET®

Ilustración 16.1 Representaciones del movimiento armónico simple

Del círculo de referencia de la figura 13.4b, la coordenada y (posición) del objeto está dada por

$$y = A \operatorname{sen} \theta$$

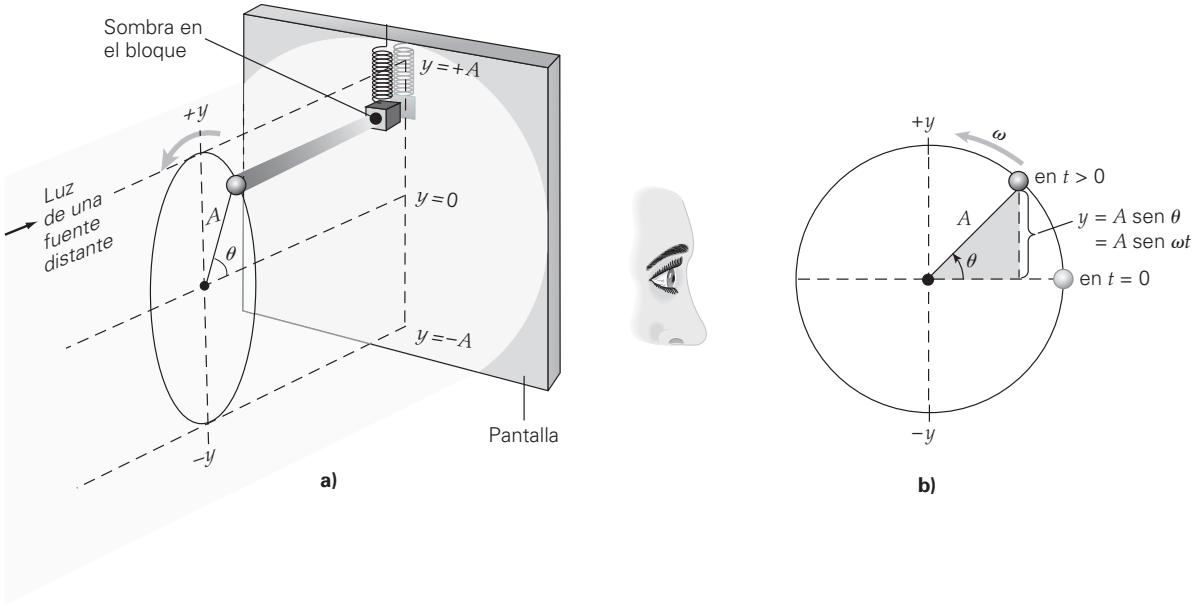
Sin embargo, el objeto se mueve con velocidad angular constante de magnitud ω. En términos de la distancia angular θ, suponiendo que $\theta = 0°$ en $t = 0$, tenemos $\theta = \omega t$, así que

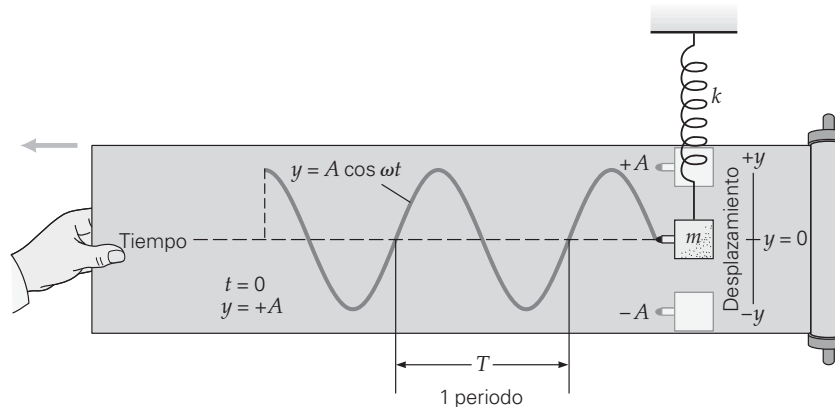
$$y = A \operatorname{sen} \omega t \quad \textit{(MAS para } y_o = 0\textit{, movimiento inicial hacia arriba)} \tag{13.8}$$

Vemos que, al aumentar t desde cero, y aumenta en la dirección positiva, de manera que la ecuación describe el movimiento inicial hacia arriba.

Con la ecuación 13.8 como ecuación de movimiento, la masa *siempre* debe estar inicialmente en $y_o = 0$. Sin embargo, ¿qué tal si la masa colgada del resorte estuviera inicialmente en la posición de amplitud $+A$? En ese caso, la ecuación del seno no describiría

▼ **FIGURA 13.4 Círculo de referencia para el movimiento vertical** ***a)*** La sombra de un objeto en movimiento circular uniforme tiene el mismo movimiento vertical que un objeto que oscila en movimiento armónico simple en un resorte. ***b)*** Por lo tanto, el movimiento puede describirse con $y = A \operatorname{sen} \theta = A \operatorname{sen} \omega t$ (suponiendo $y = 0$ en $t = 0$).





▶ **FIGURA 13.5 Ecuación de movimiento senoidal** Al paso del tiempo, el objeto oscilante traza una curva senoidal sobre el papel móvil. En este caso, $y = A \cos \omega t$, porque el desplazamiento inicial del objeto es $y_o = +A$.

el movimiento, porque *no* describe la *condición inicial*, $y_o = +A$ en $t = 0$. Por lo tanto, necesitamos otra ecuación de movimiento: $y = A \cos \omega t$. Con esta ecuación, en $t_o = 0$, la masa está en $y_o = A \cos \omega t = A \cos \omega(0) = +A$, así que la ecuación del coseno sí describe correctamente las condiciones iniciales (▲figura 13.5):

$$y = A \cos \omega t \quad \textit{(movimiento inicial hacia abajo con } y_o = +A\textit{)} \tag{13.9}$$

Aquí, el movimiento inicial es hacia abajo porque, momentos poco después de $t_o = 0$, el valor de y disminuye. Si la amplitud fuera $-A$, la masa estaría inicialmente en esa posición inferior y el movimiento inicial sería hacia arriba.

Por lo tanto, la ecuación de movimiento de un objeto oscilante puede ser una función seno o coseno. Ambas funciones se describen como *senoidales*. Es decir, el movimiento armónico simple se describe con una función senoidal del tiempo.

La rapidez angular ω (en rad/s) del *objeto en el círculo de referencia* (figura 13.4) es la *frecuencia angular* del objeto oscilante, porque $\omega = 2\pi f$, donde f es la frecuencia de revolución o rotación del objeto (sección 7.2). La figura 13.4 muestra que la frecuencia del objeto "en órbita" es igual a la frecuencia de oscilación del objeto colgado del resorte. De manera que si usamos $f = 1/T$, escribimos la ecuación 13.8 como:

$$y = A \operatorname{sen}(2\pi f t) = A \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \quad \textit{(MAS para } y_o = 0\textit{, movimiento inicial hacia arriba)} \tag{13.10}$$

Note que esta ecuación corresponde al movimiento inicial hacia arriba porque, después de $t_o = 0$, el valor de y aumenta en dirección positiva. Si el movimiento inicial es hacia abajo, el término de amplitud sería $-A$.

Las ecuaciones 13.8 y 13.10 dan tres formas equivalentes de la ecuación de movimiento para un objeto en MAS. Podemos usar la más conveniente de ellas, dependiendo de los parámetros que conozcamos. Por ejemplo, si nos dan el tiempo t en términos del periodo T (digamos, $t_o = 0$, $t_1 = T/4$ y $t_2 = 3T/4$) y nos piden calcular la posición de un objeto en MAS en esos instantes. En un caso así, nos conviene usar la ecuación 13.10:

$$t_o = 0 \qquad y_o = A \operatorname{sen}[2\pi(0)/T] = A \operatorname{sen} 0 = 0$$

$$t_1 = \frac{T}{4} \qquad y_1 = A \operatorname{sen}[2\pi(T/4)/T] = A \operatorname{sen} \pi/2 = A$$

$$t_2 = \frac{3T}{4} \qquad y_2 = A \operatorname{sen}[2\pi(3T/4)/T] = A \operatorname{sen} 3\pi/2 = -A$$

Los resultados nos indican que el objeto estaba inicialmente en $y = 0$ (equilibrio), lo cual ya sabíamos. Un cuarto de periodo después, estaba en $y = A$, la amplitud de su oscilación; y después de tres cuartos de periodo ($3T/4$) estaba en la posición $-A$, lo cual se esperaba, pues se trata de un movimiento periódico. (¿Dónde estaría el objeto en $T/2$ y en T?)

Por lo tanto, en general, escribimos,

$$y = \pm A \operatorname{sen} \omega t = \pm A \operatorname{sen}(2\pi f t) = \pm A \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \qquad \begin{array}{l}(+ \textit{ para movimiento inicial hacia arriba con } y_o = 0;\\ - \textit{ para movimiento inicial hacia abajo con } y_o = 0)\end{array} \tag{13.8a}$$

Por un desarrollo similar, la ecuación 13.9 tiene la forma general

$$y = \pm A \cos \omega t = \pm A \cos(2\pi f t) = \pm A \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \qquad \begin{array}{l}(+ \textit{ para movimiento inicial hacia abajo con } y_o = +A;\\ - \textit{ para movimiento inicial hacia arriba con } y_o = -A)\end{array} \tag{13.9b}$$

Para constatar lo útil que es el círculo de referencia, usémoslo para calcular el periodo del sistema resorte-objeto. Note que el tiempo en que el objeto del círculo de referencia tarda en efectuar una "órbita" completa es exactamente el tiempo que tarda el objeto en oscilación en completar un ciclo. (Véase la figura 13.4.) Por lo tanto, si conocemos el tiempo de una órbita en el círculo de referencia, tendremos el periodo de oscilación. Puesto que el objeto "en órbita" en el círculo de referencia está en movimiento circular uniforme con rapidez constante igual a la rapidez máxima de oscilación $v_{máx}$, el objeto recorre una distancia de una circunferencia en un periodo. Entonces, $t = d/v$, donde $t = T$, d es la circunferencia y v es $v_{máx}$, dada por la ecuación 13.7; es decir,

$$T = \frac{d}{v_{máx}} = \frac{2\pi A}{\sqrt{k/m}\,A}$$

o bien,

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \qquad \begin{array}{l}\textit{periodo de un objeto}\\ \textit{que oscila en un resorte}\end{array} \tag{13.11}$$

Como las amplitudes se cancelan en la ecuación 13.11, *el periodo y la frecuencia son independientes de la amplitud del movimiento.* Esta afirmación es una característica general de los osciladores armónicos simples, es decir, los osciladores impulsados por una fuerza restauradora lineal, como la de un resorte que se rige por la ley de Hooke.

Nota: el periodo y la frecuencia son Independientes de la amplitud en MAS.

La ecuación 13.11 nos indica que cuanto mayor sea la masa, más largo será el periodo; y que cuanto mayor sea la constante de resorte (resorte más rígido), más corto será el periodo. Es la *razón* masa/rigidez lo que determina el periodo. Por lo tanto, un aumento en la masa se compensa utilizando un resorte más rígido.

Puesto que $f = 1/T$,

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}} \qquad \begin{array}{l}\textit{frecuencia de la masa}\\ \textit{que oscila en un resorte}\end{array} \tag{13.12}$$

Así, cuanto mayor sea la constante de resorte (resorte más rígido), con mayor frecuencia vibrará el sistema, como era de esperarse.

Ilustración 16.2 Movimiento de resorte y de péndulo simple

Exploración 16.1 Movimiento de resorte y de péndulo

También, observe que como $\omega = 2\pi f$, escribimos

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \qquad \begin{array}{l}\textit{frecuencia angular de una masa}\\ \textit{que oscila en un resorte}\end{array} \tag{13.13}$$

Como ejemplo adicional, un péndulo simple (un objeto pequeño y pesado colgado de un cordel) estará en movimiento armónico simple, si el ángulo de oscilación es pequeño. Una buena aproximación del periodo de un péndulo simple con ángulo de oscilación pequeño $\theta \lesssim 10°$ está dada por

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}} \qquad \textit{periodo de un péndulo simple} \tag{13.14}$$

donde L es la longitud del péndulo y g es la aceleración debida a la gravedad. Un reloj de péndulo al que se le está acabando la cuerda sigue marcando correctamente el tiempo porque el periodo no cambia al disminuir la amplitud. Como muestra la ecuación 13.14, el periodo es independiente de la amplitud.

Una diferencia importante entre el periodo del sistema masa-resorte y el del péndulo es que este último es independiente de la masa de la pesa. (Véase las ecuaciones 13.11 y 13.14.) ¿Puede usted explicar por qué? Piense en lo que proporciona la fuerza restauradora para las oscilaciones del péndulo: la gravedad. Por lo tanto, cabe esperar que la aceleración (junto con la velocidad y el periodo) sea independiente de la masa.

Es decir, la fuerza gravitacional automáticamente imparte la misma aceleración a pesas de diferente masa, en péndulos de la misma longitud. Ya vimos que se observan efectos similares en caída libre (capítulo 2) y con bloques que se deslizan y cilindros que ruedan pendiente abajo (capítulos 4 y 8, respectivamente). El siguiente ejemplo demuestra el uso de la ecuación de movimiento para MAS.

Ejemplo 13.3 ■ Una masa oscilante: aplicación de la ecuación de movimiento

Una masa en un resorte oscila verticalmente con una amplitud de 15 cm, una frecuencia de 0.20 Hz y la ecuación de movimiento está dada por la ecuación 13.8, con $y_o = 0$ en $t_o = 0$ y movimiento inicial hacia arriba. *a*) ¿Cuál es la posición y la dirección de movimiento de la masa en $t = 3.1$ s. *b*) ¿Cuántas oscilaciones (ciclos) efectúa la masa en un tiempo de 12 s?

Razonamiento. El inciso *a* es una aplicación directa de la ecuación 13.8. En el inciso *b*, el número de oscilaciones es el número de ciclos, y recuerde que la frecuencia a veces se expresa como ciclos por segundo. Por lo tanto, si multiplicamos la frecuencia por el tiempo, obtendremos el número de ciclos u oscilaciones.

Solución.

Dado: $A = 15$ cm $= 0.15$ m ***Encuentre:*** *a*) y (posición y dirección del movimiento)
$f = 0.20$ Hz *b*) n (número de oscilaciones o ciclos)
$y = A \operatorname{sen} \omega t$ (ecuación 13.8)
a) $t = 3.1$ s ***b***) $t = 12$ s

a) En primer lugar, como nos dan la frecuencia f, nos conviene usar la ecuación de movimiento en la forma $y = A \operatorname{sen} 2\pi ft$ (ecuación 13.10). Por la ecuación, es evidente que, en $t_o = 0$, $y_o = 0$, así que inicialmente la masa está en la posición cero (de equilibrio). Después, en $t = 3.1$ s,

$$\begin{aligned} y &= A \operatorname{sen} 2\pi ft \\ &= (0.15\text{ m}) \operatorname{sen}[2\pi(0.20\text{ s}^{-1})(3.1\text{ s})] \\ &= (0.15\text{ m}) \operatorname{sen}(3.9\text{ rad}) = -0.10\text{ m} \end{aligned}$$

Por lo tanto, la masa está en $y = -0.10$ m en $t = 3.1$ s. ¿Qué dirección tiene su movimiento? Examinemos el periodo (T) para saber en qué parte del ciclo está la masa. Por la ecuación 13.2,

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{0.20\text{ Hz}} = 5.0\text{ s}$$

En $t = 3.1$ s, la masa ha pasado por 3.1 s/5.0 s = 0.62, o bien, 62% de un periodo o ciclo, así que se está moviendo hacia abajo [subió $\left(\frac{1}{4}\text{ciclo}\right)$ y regresó $\left(\frac{1}{4}\text{ ciclo}\right)$ a $y_o = 0$ en $\frac{1}{2}$, o 50%, y seguirá hacia abajo durante el siguiente $\frac{1}{4}$ de ciclo].

b) El número de oscilaciones (ciclos) es igual al producto de la frecuencia (ciclos/s) y el tiempo transcurrido (s), y nos dan ambos datos:

$$n = ft = (0.20\text{ ciclos/s})(12\text{ s}) = 2.4\text{ ciclos}$$

o con $f = 1/T$,

$$n = \frac{t}{T} = \frac{12\text{ s}}{5.0\text{ s}} = 2.4\text{ ciclo}$$

(Observe que *ciclo* no es una unidad y que sólo se usa por claridad.)

Por lo tanto, la masa ha pasado por dos ciclos completos y 0.4 de un tercero, lo cual significa que está regresando hacia $y_o = 0$ desde su posición de amplitud $+A$. (¿Por qué?)

Ejercicio de refuerzo. Obtenga lo que se pide en este ejemplo con los tiempos 1) $t = 4.5$ s y 2) $t = 7.5$ s.

Sugerencia para resolver problemas

Note que en el cálculo del inciso *a* del ejemplo 13.3, donde tenemos sen 3.9, el ángulo está en radianes, no grados. *No* olvide ajustar su calculadora a radianes (en vez de grados) para obtener el valor de una función trigonométrica en ecuaciones de movimiento armónico simple o circular.

Ejemplo 13.4 ■ Diversión con un péndulo: frecuencia y periodo

Un joven dinámico lleva a su hermanita a jugar en los columpios del parque. La empuja por atrás en cada retorno. Suponiendo que el columpio se comporta como péndulo simple con una longitud de 2.50 m, *a*) ¿qué frecuencia tendrán las oscilaciones y *b*) qué intervalo habrá entre los impulsos impartidos por el joven?

Razonamiento. *a*) El periodo está dado por la ecuación 13.14, y hay una relación inversa entre la frecuencia y el periodo: $f = 1/T$. *b*) Puesto que el hermano empuja desde un lado en cada retorno, deberá empujar una vez por cada ciclo completo, así que el intervalo entre sus impulsos es igual al periodo del columpio.

Solución.

Dado: $L = 2.50$ m

Encuentre: *a*) f (frecuencia)
b) T (periodo)

a) Podemos obtener el recíproco de la ecuación 13.14 para despejar directamente la frecuencia:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{L}} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{9.80\ \text{m/s}^2}{2.50\ \text{m}}} = 0.315\ \text{Hz}$$

b) De manera que calculamos el periodo a partir de la frecuencia:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{0.315\ \text{Hz}} = 3.17\ \text{s}$$

El hermano debe empujar cada 3.17 s para mantener una oscilación constante (y que su hermanita no le reclame).

Ejercicio de refuerzo. En este ejemplo, el hermano mayor, que es aficionado a la física, mide con cuidado el periodo del columpio y obtiene 3.18 s en vez de 3.17 s. Si la longitud de 2.50 m es exacta, ¿qué valor tendrá la aceleración debida a la gravedad en el lugar donde está el parque? Considerando este valor exacto de g, ¿cree usted que el parque esté en el nivel del mar?

Condiciones iniciales y fase

Tal vez el lector se esté preguntando cómo decidir si usará una función seno o coseno para describir un caso específico de movimiento armónico simple. En general, la forma de la función depende del desplazamiento y la velocidad iniciales del objeto: las *condiciones iniciales* del sistema. Estas condiciones iniciales son los valores del desplazamiento y la velocidad en $t = 0$; juntos, nos indican cómo se puso en movimiento inicialmente el sistema.

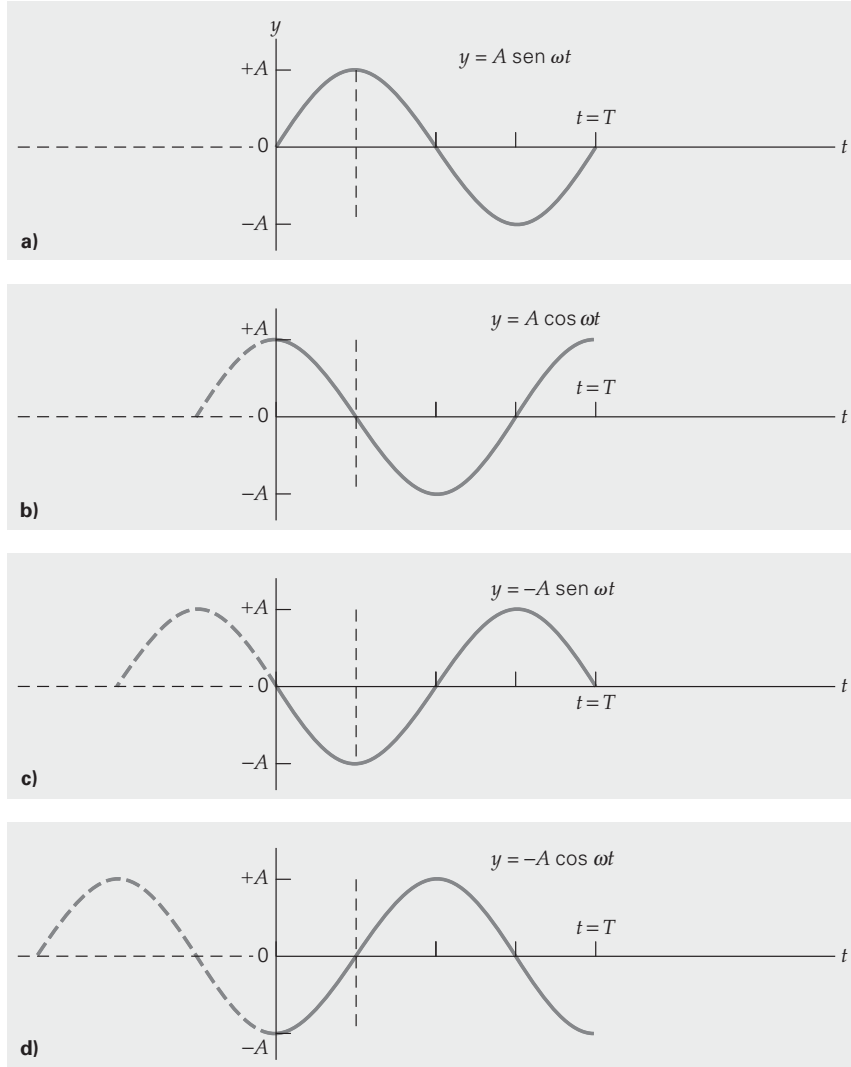
Examinemos cuatro casos especiales. Si un objeto en MAS vertical tiene un desplazamiento inicial de $y = 0$ en $t = 0$ y se mueve inicialmente hacia arriba, la ecuación de movimiento será $y = A \operatorname{sen} \omega t$ (▾figura 13.6a). Observe que $y = A \cos \omega t$ no satisface la condición inicial, porque $y_o = A \cos \omega t = A \cos \omega(0) = A$, ya que $\cos 0 = 1$.

Nota: las condiciones iniciales incluyen tanto el desplazamiento y_o como la velocidad v_o en $t = 0$.

Suponga que el objeto se suelta inicialmente ($t = 0$) desde su posición de amplitud positiva ($+A$), como el caso de un objeto en un resorte que se muestra en la figura 13.5. Aquí, la ecuación de movimiento es $y = A \cos \omega t$ (figura 13.6b). Esta expresión satisface la condición inicial: $y_o = A \cos \omega(0) = A$.

Los otros dos casos son 1) $y = 0$ en $t = 0$, con el movimiento inicialmente hacia abajo (para un objeto en un resorte) o en la dirección negativa (para MAS horizontal); y 2) $y = -A$ en $t = 0$, es decir, el objeto está inicialmente en su posición de amplitud negativa. Estos movimientos se describen con $y = -A \operatorname{sen} \omega t$ y $y = -A \cos \omega t$, respectivamente, como se ilustra en las figuras 13.6c y 13.6d.

Sólo consideraremos aquí estas cuatro condiciones iniciales. Si yo tiene un valor distinto de 0 o $\pm A$, la ecuación de movimiento es algo complicada. Note que en la figura 13.6 vemos que si las curvas se extienden en la dirección negativa del eje horizontal (líneas punteadas), tienen la misma forma pero se han "desplazado", por decirlo de alguna manera. En *a* y *b*, una curva está 90° ($\frac{1}{4}$ de ciclo) adelante de la otra; es decir, las curvas están desplazadas entre sí un cuarto de ciclo. Decimos que las oscilaciones tienen una *diferencia de fase* de 90°. En *a* y *c*, las curvas están desplazadas (desfasadas) 180°. (En este caso las oscilaciones son opuestas: cuando una masa está subiendo, la otra está bajando.) ¿Y las oscilaciones en *a* y en *d*?



▶ **FIGURA 13.6 Condiciones iniciales y ecuaciones de movimiento** Las condiciones iniciales (y_o y t_o) determinan la forma de la ecuación de movimiento que, para los casos que se muestran aquí, es un seno o un coseno. Para $t_o = 0$, los desplazamientos iniciales son ***a)*** $y_o = 0$, ***b)*** $y_o = +A$, ***c)*** $y_o = 0$ y ***d)*** $y_o = -A$. Las ecuaciones de movimiento deben ser congruentes con las condiciones iniciales. (Véase la descripción en el texto.)

No mostramos una figura con un desfasamiento de 360° (o 0°) porque sería igual a la del inciso *a*. Cuando dos objetos en MAS tienen la misma ecuación de movimiento, decimos que están oscilando *en fase*, lo cual significa que oscilan juntos con movimientos idénticos. Los objetos con un desplazamiento o diferencia de fase de 180° están *totalmente desfasados*, y siempre irán en direcciones opuestas y estarán en amplitudes opuestas al mismo tiempo.

Velocidad y aceleración en MAS

También podemos obtener expresiones para la velocidad y la aceleración de un objeto en MAS. Utilizando cálculo, es posible demostrar que $v = \Delta y/\Delta t = \Delta(A \text{ sen } \omega t)/\Delta t$, en el límite conforme Δt se aproxima a cero, da la siguiente expresión para la velocidad instantánea:

Nota: Rapidez máxima $v = \omega A$.

$$v = \omega A \cos \omega t \quad \begin{pmatrix} \textit{velocidad vertical si } v_o \textit{ es hacia arriba} \\ t_o = 0, y_o = 0 \end{pmatrix} \tag{13.15}$$

Aquí, los signos que indican dirección están dados por la función coseno.

La aceleración puede obtenerse aplicando la segunda ley de Newton a la fuerza del resorte $F_s = -ky$:

$$a = \frac{F_s}{m} = \frac{-ky}{m} = -\frac{k}{m} A \operatorname{sen} \omega t$$

Puesto que $\omega = \sqrt{k/m}$,

$$a = -\omega^2 A \operatorname{sen} \omega t = -\omega^2 y \quad \begin{matrix}\textit{(aceleración vertical si } v_o \textit{ es} \\ \textit{hacia arriba en } t_o = 0,\ y_o = 0)\end{matrix} \tag{13.16}$$

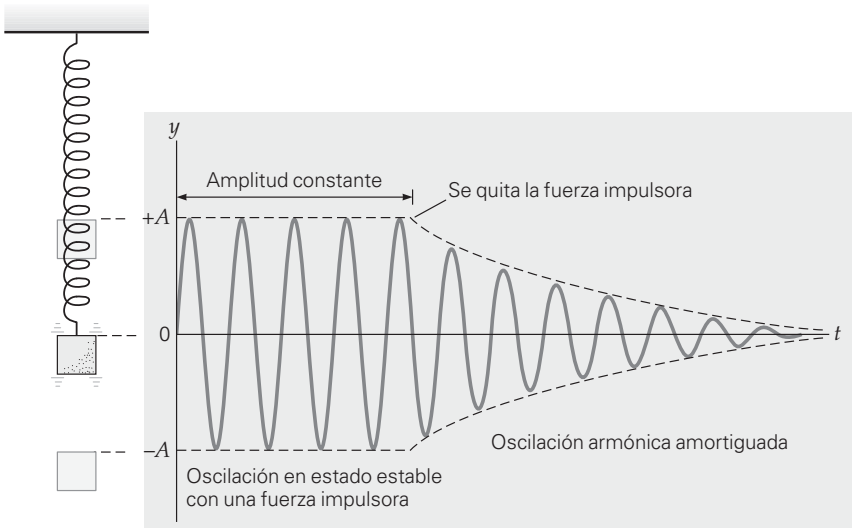
Nota: magnitud máxima de la aceleración $a = \omega^2 A$.

Observe que las funciones de la velocidad y la aceleración están desfasadas respecto a la del desplazamiento. Puesto que la velocidad está desfasada 90° respecto al desplazamiento, la rapidez es máxima cuando $\cos \omega t = \pm 1$ en $y = 0$, es decir, cuando el objeto oscilante está pasando por su posición de equilibrio. La aceleración está desfasada 180° respecto al desplazamiento (como indica el signo menos en el miembro derecho de la ecuación 13.16). Por lo tanto, la magnitud de la aceleración es máxima cuando $\operatorname{sen} \omega t = \pm 1$ en $y = \pm A$, es decir, cuando el desplazamiento es máximo o el objeto está en una posición de amplitud. En cualquier posición, excepto la de equilibrio, el signo de dirección de la aceleración es opuesto al del desplazamiento, como debe ser para una aceleración que es resultado de una fuerza restauradora. En la posición de equilibrio, tanto el desplazamiento como la aceleración son cero. (¿Puede el lector ver por qué?)

Vemos también que la aceleración en MAS no es constante con el tiempo. Por lo tanto, *no podemos* usar las ecuaciones de cinemática para la aceleración (capítulo 2), pues describen una aceleración constante.

Movimiento armónico amortiguado

Un movimiento armónico simple con amplitud constante implica que no hay pérdidas de energía, aunque en las aplicaciones prácticas siempre hay pérdidas por fricción. Entonces, para mantener un movimiento de amplitud constante, es preciso agregar energía al sistema con alguna fuerza impulsora externa, como alguien que empuje el columpio. Sin fuerza impulsora, la amplitud y energía de un oscilador disminuyen con el tiempo y dan pie a un **movimiento armónico amortiguado** (▼figura 13.7a). El



a)

b)

▼ **FIGURA 13.7** Movimiento armónico amortiguado ***a)*** Cuando una fuerza impulsora agrega a un sistema una energía igual a la que el sistema pierde, la oscilación tiene amplitud constante. Cuando se quita la fuerza impulsora, las oscilaciones decaen (se amortiguan) y la amplitud disminuye de forma no lineal con el tiempo. ***b)*** En algunas aplicaciones, la amortiguación es deseable e incluso se busca, como en los sistemas de suspensión de los automóviles. De lo contrario, los pasajeros sufrirían constantes sacudidas.

Ilustración 16.4 Movimiento forzado y amortiguado

tiempo que las oscilaciones tardan en parar depende de la magnitud y del tipo de la fuerza amortiguadora (como la resistencia del aire).

En muchas aplicaciones en las que interviene un movimiento periódico continuo, la amortiguación es indeseable y hace necesario un aporte de energía. En cambio, hay otras situaciones en que la amortiguación es deseable. Por ejemplo, la lectura de una báscula de resorte casera oscila brevemente antes de detenerse en un peso dado. Si estas oscilaciones no se amortiguaran debidamente, continuarían durante un tiempo y tendríamos que esperar un rato para conocer nuestro peso. Los amortiguadores de los sistemas de suspensión de los automóviles amortiguan las oscilaciones producidas por sacudidas (figura 13.7b; véase también la figura 9.9b). Sin estos dispositivos para disipar la energía después de rodar sobre una irregularidad del pavimento, los pasajeros rebotarían continuamente. En California, muchos edificios nuevos incluyen mecanismos de amortiguación (amortiguadores gigantes) para frenar los movimientos oscilatorios causados por ondas sísmicas.

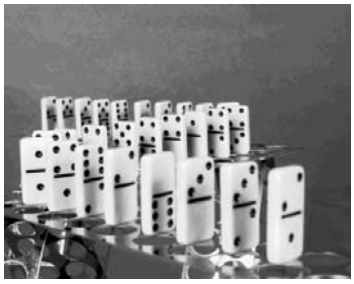
Ilustración 18.1 Representación de ondas bidimensionales

13.3 Movimiento ondulatorio

OBJETIVOS: *a*) Describir el movimiento ondulatorio en términos de diversos parámetros y *b*) identificar diferentes tipos de ondas.

El mundo está lleno de ondas de diversos tipos, como las olas del mar, las ondas sonoras, las ondas sísmicas e incluso la luz. Todas las ondas son resultado de una perturbación: la fuente de la onda. En este capítulo nos ocuparemos de las ondas mecánicas: aquellas que se propagan en algún medio. (Las ondas luminosas, que no requieren un medio para propagarse, se verán con mayor detalle en capítulos posteriores.)

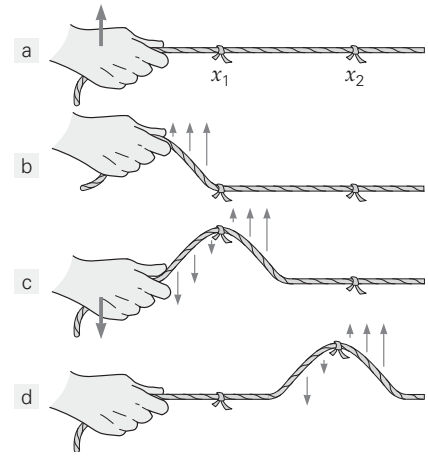
Cuando se perturba un medio, se le imparte energía. Suponga que se añade mecánicamente energía a un material, digamos por impacto o (en el caso de un gas) por compresión. La adición de esa energía pone a vibrar a algunas partículas del medio. Puesto que las partículas están enlazadas por fuerzas intermoleculares, la oscilación de cada partícula afecta la de sus vecinas. La energía añadida se propaga mediante interacciones de las partículas del medio. En la ◂figura 13.8, se muestra una analogía de este proceso, con fichas de dominó como "partículas". Al caer cada ficha, tumba la que está junto a ella y se transfiere energía de una ficha a otra. La perturbación se propaga por el medio.



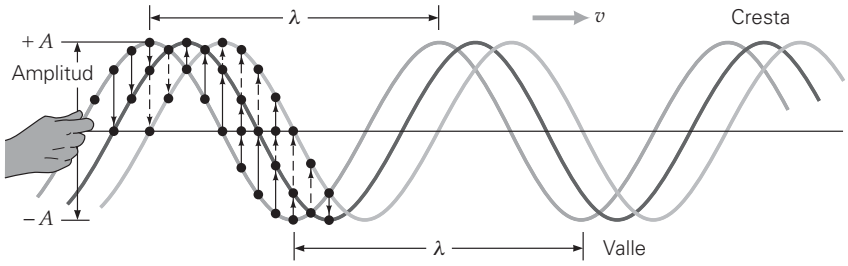
▲ **FIGURA 13.8 Transferencia de energía** La propagación de una perturbación, que transfiere energía por el espacio, se observa en una fila de fichas de dominó que caen.

En este caso, no hay fuerza restauradora entre las fichas, por lo que no oscilan, como hacen las partículas de un medio material continuo. Por ello, la perturbación se desplaza en el espacio, pero no se repite con el tiempo en un lugar dado.

Asimismo, si damos una sacudida rápida al extremo de una cuerda estirada, la perturbación transfiere energía de la mano a la cuerda, como se ilustra en la ▾figura 13.9. Las fuerzas que actúan entre las "partículas" de la cuerda hacen que se muevan en res-



▶ **FIGURA 13.9 Pulsación ondulatoria** La mano perturba la cuerda estirada con un movimiento vertical rápido, en tanto que una pulsación ondulatoria se propaga por la cuerda. (Las flechas representan las velocidades de la mano y de partes de la cuerda en diferentes tiempos y lugares.) Las "partículas" de la cuerda suben y bajan al pasar la pulsación. Por lo tanto, la energía de la pulsación es *tanto* cinética (elástica) *como* potencial (gravitacional).



◀ **FIGURA 13.10** Onda periódica Una perturbación armónica continua puede establecer una onda senoidal en una cuerda estirada, y la onda viajará por la cuerda con una rapidez v. Note que las "partículas" de la cuerda oscilan verticalmente en movimiento armónico simple. La distancia entre dos puntos sucesivos que están en fase (por ejemplo, dos crestas) en la forma de onda es la longitud de onda λ de la onda. ¿Puede el lector determinar el tiempo transcurrido, como fracción del periodo T, entre la primera onda y la última?

puesta al movimiento de la mano, y una *pulsación ondulatoria* viaja por la cuerda. Cada "partícula" sube y baja al pasar el pulso. Este movimiento de partículas individuales y la propagación de la pulsación ondulatoria en su totalidad puede observarse atando trozos de listón a la cuerda (en x_1 y x_2 en la figura). Cuando la perturbación pasa por el punto x_1, el listón sube y luego baja, junto con las "partículas" de la cuerda. Posteriormente, sucede lo mismo con el listón en x_2, el cual indica que la perturbación energética se está propagando (desplazando) a lo largo de la cuerda.

En un medio material continuo, las partículas interactúan con sus vecinas, y fuerzas restauradoras hacen que las partículas oscilen cuando se les perturba. Así, cualquier perturbación no sólo se propaga por el espacio, sino que podría repetirse una y otra vez en el tiempo en cada posición. Semejante perturbación regular y rítmica, tanto en el tiempo como en el espacio, se llama **onda**, y decimos que la transferencia de energía se efectúa por **movimiento ondulatorio**.

Un movimiento ondulatorio continuo, u *onda periódica*, requiere una perturbación producida por una fuente oscilante (▲figura 13.10). En este caso, las partículas se mueven hacia arriba y hacia abajo continuamente. Si la fuerza impulsora es tal que mantiene una amplitud constante (la fuente oscila en movimiento armónico simple), el movimiento resultante de las partículas también es armónico simple.

Nota: una onda es una combinación de oscilaciones en el espacio y el tiempo.

Semejante movimiento ondulatorio periódico tiene formas senoidales (seno o coseno) tanto en el tiempo como en el espacio. Un movimiento *senoidal* en el espacio implica que, si tomamos una fotografía de la onda en cualquier instante (para "congelarla" en el tiempo), veremos una forma de onda senoidal (como una de las curvas de la figura 13.10). En cambio, si observáramos un solo punto en el espacio al paso de una onda, veríamos una partícula del medio oscilando hacia arriba y hacia abajo *senoidalmente con el tiempo*, como la masa en un resorte que vimos en la sección 13.2. (Por ejemplo, imaginemos que vemos a través de una ranura delgada un punto fijo del papel en movimiento de la figura 13.5. Veríamos el rastro de la onda subir y bajar como una partícula.)

Características de las ondas

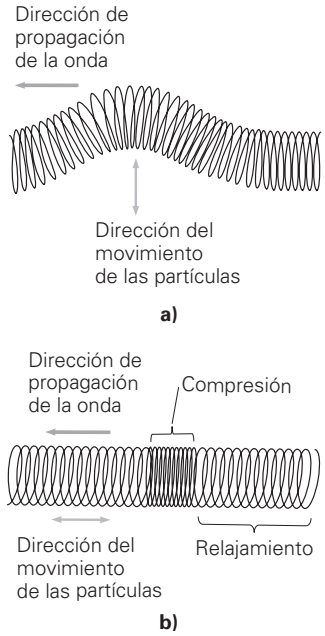
Usamos cantidades específicas para describir las ondas senoidales. Como en el caso de una partícula en movimiento armónico simple, la **amplitud (A)** de una onda es la magnitud del desplazamiento máximo, es decir, la distancia máxima respecto a la posición de equilibrio de la partícula (figura 13.10). Esta cantidad corresponde a la altura de una cresta de la onda o la profundidad de un valle. En la sección 13.2 vimos que, en MAS, la energía total del oscilador es proporcional al cuadrado de la amplitud. Asimismo, la energía *transportada* por una onda es proporcional al cuadrado de su amplitud ($E \propto A^2$). No obstante, hay una diferencia importante: una onda es una forma de *transmitir* energía a través del espacio, mientras que la energía de un oscilador está localizada en el espacio.

En el caso de una onda periódica, la distancia entre dos crestas (o valles) sucesivas se llama **longitud de onda (λ)** (figura 13.10). En realidad, es la distancia entre dos partes sucesivas cualesquiera que estén en fase (es decir, en puntos idénticos de la forma de onda); suelen usarse las posiciones de cresta y valle por conveniencia. Observe que la longitud de onda corresponde espacialmente a un ciclo. Debemos tener presente que lo que viaja es la onda, no el medio ni el material.

La **frecuencia (f)** de una onda periódica es el número de ciclos por segundo; esto es, el número de formas de onda completas, o longitudes de onda, que pasan por un punto dado durante cada segundo. La frecuencia de la onda es la misma que la frecuencia de la fuente en MAS que la creó.

PHYSLET®

Ilustración 17.2 Funciones ondulatorias



▲ **FIGURA 13.11 Ondas transversales y longitudinales** (Se muestran pulsaciones ondulatorias por sencillez) ***a)*** En una onda transversal, el movimiento de las partículas es perpendicular a la dirección de la velocidad de la onda, como se muestra aquí en un resorte donde una onda viaja hacia la izquierda. Las ondas transversales también se llaman *ondas de corte*, porque suministran una fuerza que tiende a cizallar el medio. Las ondas de corte transversales sólo pueden propagarse en los sólidos. (¿Por qué?) ***b)*** En una onda longitudinal, el movimiento de las partículas es paralelo a (*a lo largo de*) la dirección de la velocidad de la onda. Aquí también una pulsación ondulatoria se mueve hacia la izquierda. Las ondas longitudinales también se denominan *ondas de compresión*, ya que la fuerza tiende a comprimir el medio. Las ondas longitudinales de compresión se pueden propagar en todos los medios: sólidos, líquidos y gases. ¿Puede usted explicar el movimiento de la fuente de ambos tipos de ondas?

Decimos que una onda periódica tiene un **periodo (*T*)**. El periodo $T = 1/f$ es el tiempo que tarda una forma de onda completa (una longitud de onda) en pasar por un punto dado. Como las ondas se mueven, tienen una **rapidez de onda (*v*)** (o velocidad, si se especifica la dirección de la onda). Cualquier punto dado de la onda (digamos, una cresta) recorre una distancia de una longitud de onda l en un tiempo de un periodo T. Entonces, ya que $v = d/t$ y $f = 1/T$, tenemos

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda f \qquad \textit{rapidez de onda} \tag{13.17}$$

Vemos que las dimensiones de v son correctas (longitud/tiempo). En general, la rapidez de onda depende de la naturaleza del medio, además de la frecuencia f de la fuente.

Ejemplo 13.5 ■ El muelle de la bahía: cálculo de la rapidez de las olas

Una persona en un muelle observa un conjunto de olas que tienen forma senoidal y una distancia de 1.6 m entre las crestas. Si una ola baña el muelle cada 4.0 s, calcule *a*) la frecuencia y *b*) la rapidez de las olas.

Razonamiento. Conocemos el periodo y la longitud de onda, así que podemos usar la definición de la frecuencia, y la ecuación 13.17 para la rapidez de una onda.

Solución. La distancia entre crestas es la longitud de onda, así que tenemos la siguiente información:

Dado: $\lambda = 1.6$ m, $T = 4.0$ s ***Encuentre:*** *a*) f (frecuencia), *b*) v (rapidez de onda)

a) El bañado del muelle indica la llegada de una cresta de onda; por lo tanto, 4.0 s es el periodo de la onda: el tiempo que tarda en recorrer una longitud de onda (la distancia de cresta a cresta). Entonces,

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{4.0\ \text{s}} = 0.25\ \text{s}^{-1} = 0.25\ \text{Hz}$$

b) Podemos usar la frecuencia o el periodo en la ecuación 13.17 para calcular la rapidez de la onda:

$$v = \lambda f = (1.6\ \text{m})(0.25\ \text{s}^{-1}) = 0.40\ \text{m/s}$$

o bien,

$$v = \frac{\lambda}{T} = \frac{1.6\ \text{m}}{4.0\ \text{s}} = 0.40\ \text{m/s}$$

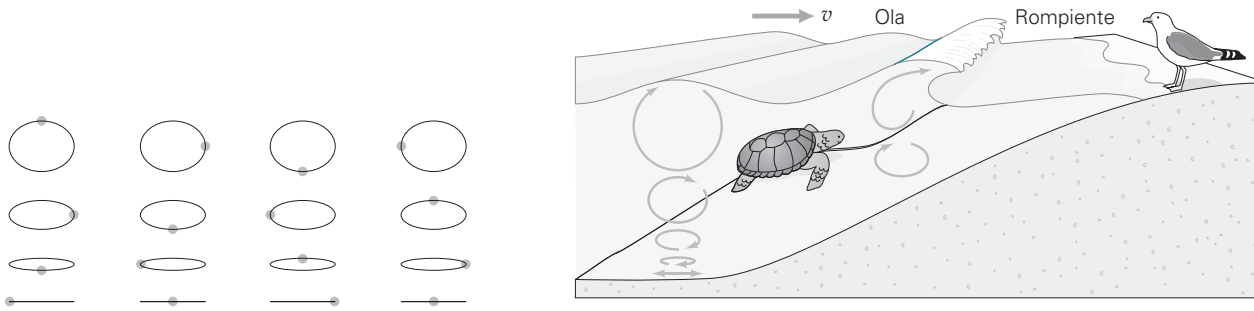
Ejercicio de refuerzo. Otro día, la misma persona mide la rapidez de las olas senoidales y obtiene 0.25 m/s. *a*) ¿Qué distancia recorre una cresta de onda en 2.0 s? *b*) Si la distancia entre crestas sucesivas es de 2.5 m, ¿qué frecuencia tienen estas ondas?

Tipos de onda

En general, las ondas se pueden dividir en dos tipos, dependiendo de la dirección en que oscilan las partículas relativas a la velocidad de la onda. En una **onda transversal**, el movimiento de las partículas es perpendicular a la dirección de la velocidad de la onda. La onda producida en una cuerda estirada (figura 13.10) es un ejemplo de onda transversal, lo mismo que la onda que se muestra en la ◂figura 13.11a. Las ondas transversales también se conocen como *ondas de corte*, porque la perturbación suministra una fuerza que tiende a cortar o cizallar el medio: separar perpendicularmente capas del medio a la dirección de la velocidad de la onda. Las ondas de corte sólo pueden propagarse en sólidos, pues los líquidos y gases no se cortan. Es decir, los líquidos y gases no tienen fuerzas restauradoras de magnitud suficiente entre sus partículas, como para propagar una onda transversal.

En una **onda longitudinal**, la oscilación de las partículas es paralela a la dirección de la velocidad de la onda. Se produce una onda longitudinal en un resorte estirado moviendo las espirales hacia adelante y hacia atrás, a lo largo del eje del resorte (figura 13.11b). Pulsaciones alternantes de compresión y relajamiento viajan a lo largo del resorte. Las ondas longitudinales también se denominan *ondas de compresión*.

Las ondas sonoras en aire son otro ejemplo de ondas longitudinales. Una perturbación periódica produce compresiones en el aire. Entre las compresiones hay *enrarecimientos*: regiones en que se reduce la densidad del aire. Por ejemplo, un altavoz que oscila hacia adelante y hacia atrás puede crear tales compresiones y enrarecimientos, que viajan por el aire como ondas sonoras. (Estudiaremos el sonido con detalle en el capítulo 14.)



a) b)

▲ **FIGURA 13.12 Ondas en agua** Las olas son una combinación de movimientos longitudinal y transversal. ***a)*** En la superficie, las partículas de agua describen círculos; pero su movimiento se vuelve más longitudinal conforme aumenta la profundidad. ***b)*** Cuando una ola se acerca a la costa, las partículas inferiores deben describir trayectorias cada vez más empinadas, hasta que la ola se desploma para formar una rompiente.

Las ondas longitudinales se pueden propagar en sólidos, líquidos y gases, ya que todas las fases de la materia se pueden comprimir en mayor o menor medida. La propagación de ondas transversales y longitudinales en diferentes medios proporciona información acerca de la estructura interior de la Tierra, como se explica en la sección A fondo 13.1 de la p. 450 sobre terremotos, ondas sísmicas y sismología.

El perfil senoidal de las olas en el agua podría hacernos pensar que son ondas transversales. En realidad, reflejan una combinación de movimientos longitudinal y transversal (▲figura 13.12). El movimiento de las partículas podría ser casi circular en la superficie y hacerse más elíptico a mayores profundidades, hasta volverse longitudinal. A unos 100 m de profundidad en un cuerpo grande de agua, las perturbaciones de las olas casi no tienen efecto. Por ejemplo, un submarino a esas profundidades no siente las olas grandes en la superficie del océano. Cuando una ola se acerca a aguas poco profundas cerca de la costa, las partículas de agua tienen dificultad para completar sus trayectorias elípticas. Cuando el agua se vuelve demasiado superficial, las partículas ya no pueden seguir la parte inferior de su trayectoria, y la ola rompe. Su cresta cae hacia adelante para formar rompientes conforme la energía cinética de las olas se transforma en energía potencial: una "colina" de agua que finalmente se desploma.

PHYSLET®
Ilustración 17.1 Tipos de ondas

13.4 Propiedades de las ondas

OBJETIVO: Explicar diversas propiedades de las ondas y los fenómenos a los que dan origen.

Entre las propiedades que exhiben las ondas se incluyen superposición, interferencia, reflexión, refracción, dispersión y difracción.

Superposición e interferencia

Cuando dos o más ondas se encuentran o pasan por la misma región de un medio, se atraviesan mutuamente y continúan sin alteración. Mientras están en la misma región, decimos que las ondas se interfieren.

¿Qué sucede durante la interferencia? Es decir, ¿qué aspecto tiene la forma de onda combinada? La relativamente sencilla respuesta nos la da el **principio de superposición**:

> En cualquier momento, la forma de onda combinada de dos o más ondas en interferencia está dada por la suma de los desplazamientos de las ondas individuales en cada punto del medio.

El principio de **interferencia** se ilustra en la ▼figura 13.13. El desplazamiento de la forma de onda combinada en cualquier punto es $y = y_1 + y_2$, donde y_1 y y_2 son los desplazamientos de las pulsaciones individuales en ese punto. (Indicamos direcciones con signos de más y menos.) La interferencia, entonces, es la suma física de las ondas. Al sumar ondas, debemos tomar en cuenta la posibilidad de que estén generando perturbaciones en direcciones opuestas. En otras palabras, debemos tratar las perturbaciones en términos de suma de vectores.

A FONDO 13.1 TERREMOTOS, ONDAS SÍSMICAS Y SISMOLOGÍA

La estructura del interior de la Tierra aún encierra misterios. Los pozos de minas y las perforaciones más profundas sólo se extienden unos cuantos kilómetros hacia el interior, en comparación con el centro de la Tierra que está a unos 6400 km de la superficie. Una forma de investigar más a fondo la estructura del planeta es con ondas. Las ondas generadas por terremotos han resultado especialmente útiles en tales investigaciones. La sismología es el estudio de estas ondas, llamadas *ondas sísmicas*.

La causa de los terremotos es la repentina liberación de esfuerzos acumulados a lo largo de grietas y fallas, como la famosa falla de San Andrés en California (figura 1). Según la teoría geológica de la tectónica de placas, la capa superior del planeta consiste en placas rígidas: enormes planchas de roca que se mueven muy lentamente unas respecto a otras. Continuamente se acumulan tensiones, sobre todo en los límites entre placas.

Cuando por fin las placas resbalan, la energía de este suceso liberador de esfuerzos viaja hacia afuera en forma de ondas (sísmicas), desde un punto bajo la superficie llamado *foco.* El punto en la superficie que está directamente sobre el foco se llama *epicentro* y recibe el mayor impacto del terremoto. Las ondas sísmicas son de dos tipos generales: ondas de superficie y ondas de cuerpo. Las *ondas de superficie,* que viajan por la superficie terrestre, causan la mayor parte de los daños de los terremotos (figura 2). Las *ondas de cuerpo* viajan a través de la Tierra y son tanto longitudinales como transversales. Las ondas de compresión (longitudinales) se llaman *ondas P*; y las de corte (transversales), *ondas S* (figura 3).

Las letras P y S provienen de las palabras *primaria* y *secundaria,* e indican la relativa rapidez de las ondas (en realidad, sus tiempos de llegada a las estaciones de monitoreo). En general, las ondas primarias viajan a través de los materiales con mayor rapidez que las secundarias, y son las que primero se detectan. La intensidad de un terremoto en la escala Richter se relaciona con la energía liberada en forma de ondas sísmicas.

Estaciones sísmicas en todo el mundo monitorean las ondas P y S con instrumentos de detección muy sensibles llamados *sismógrafos.* Con base en los datos recabados, es posible elaborar mapas de las trayectorias de las ondas a través de la Tierra y así conocer mejor el interior de nuestro planeta. Al parecer, el interior de la Tierra se divide en tres regiones generales: la corteza, el manto y el núcleo, que a su vez tiene una región interior sólida y una región exterior líquida.*

*En la mayoría de los lugares, la corteza tiene un espesor de 24-30 km (15-20 mi), el manto tiene un espesor de 2900 km (1800 mi), y el núcleo tiene un radio de 3450 km (2150 mi). El núcleo interior sólido tiene un radio aproximado de 1200 km (750 mi).

FIGURA 1 La falla de San Andrés Aquí vemos una pequeña sección de la falla, que cruza el área de la bahía de San Francisco, así como regiones rurales de California, como la que se presenta aquí.

FIGURA 2 Malas vibraciones Daños causados por el fuerte terremoto que asoló Kobe, Japón, en enero de 1995.

La ubicación de las fronteras de estas regiones se determina en parte con base en *zonas de sombra:* regiones donde no se detectan ondas de un tipo dado. Se dan esas zonas porque, si bien las ondas longitudinales pueden viajar por sólidos *o* líquidos, las transversales sólo pueden viajar a través de sólidos. Cuando ocurre un terremoto, ondas P se detectan en el otro lado del planeta, opuesto al foco, pero no ondas S. (Véase la figura 3.) La ausencia de ondas S en una zona de sombra indica que la Tierra debe tener cerca de su centro una región que está en la fase líquida.

Cuando las ondas P transmitidas entran en la región líquida y salen de ella, se refractan (flexionan). Esta refracción crea una zona de sombra de ondas P, lo cual indica que sólo la parte exterior del núcleo es líquida. Como veremos en el capítulo 19, la combinación de un núcleo exterior líquido y la rotación terrestre podría ser el origen del campo magnético de la Tierra.

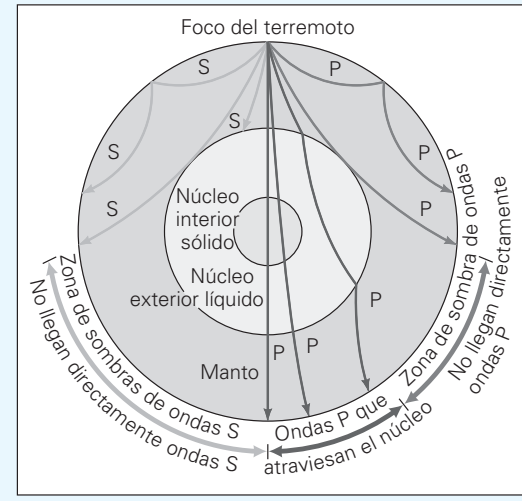
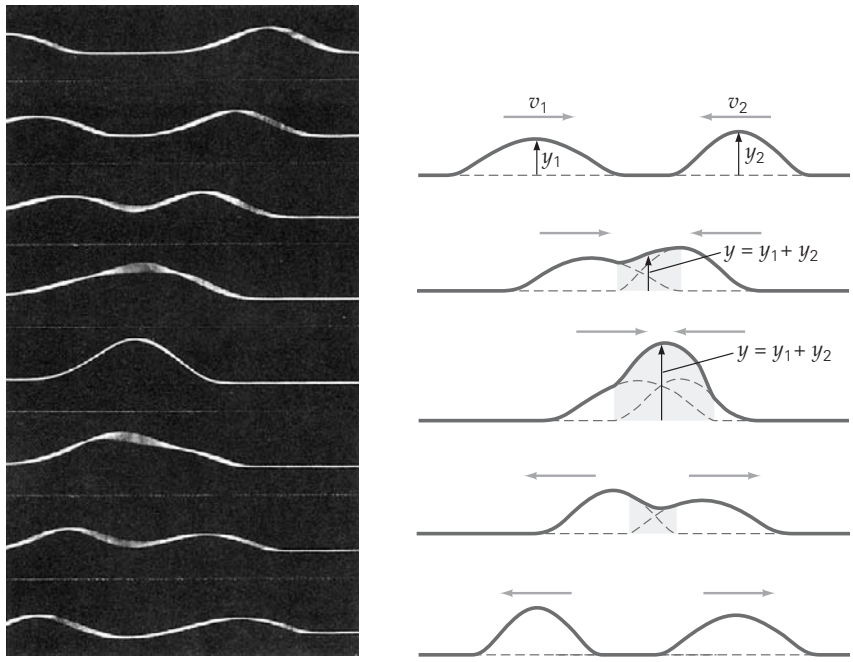


FIGURA 3 Ondas de compresión y corte Los terremotos producen ondas que viajan a través de la Tierra. Dado que las ondas transversales (S) no se detectan en el lado opuesto del planeta, los científicos creen que al menos una parte del núcleo terrestre es un líquido viscoso sometido a elevadas presiones y temperaturas. Las ondas se flexionan (refractan) continuamente, porque su rapidez varía con la profundidad.



a) b)

◀ **FIGURA 13.13 Principio de superposición** ***a)*** Cuando dos ondas se encuentran, se interfieren (véase la imagen). ***b)*** El sombreado marca el área donde ambas ondas, que viajan en direcciones opuestas, se traslapan y combinan. El desplazamiento en cualquier punto de la onda combinada es igual a la suma de los desplazamientos de las ondas individuales: $y = y_1 + y_2$.

PHYSLET®

Ilustración 17.3 Superposición de pulsaciones

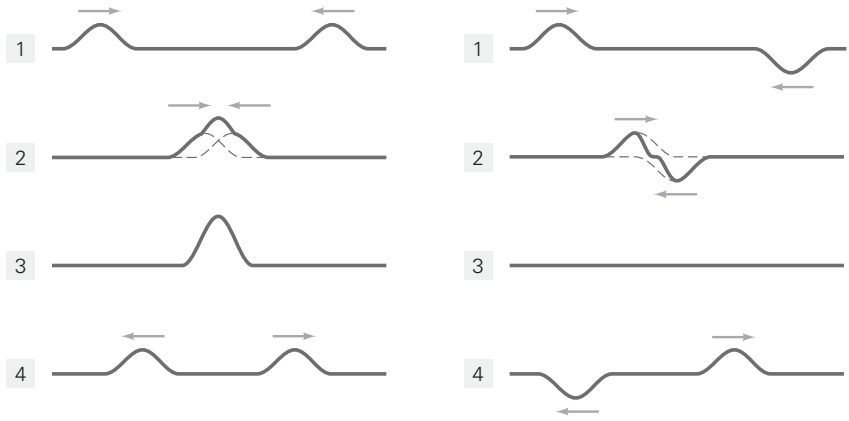
En la figura, los desplazamientos verticales de las dos pulsaciones tienen la misma dirección, y la amplitud de la forma de onda combinada es mayor que la de cualquiera de las pulsaciones. Esta situación se denomina **interferencia constructiva**. En cambio, si una pulsación tiene desplazamiento negativo, las dos pulsaciones tienden a anularse entre sí cuando se traslapan, y la amplitud de la forma de onda combinada es menor que la de cualquiera de las pulsaciones. Esta situación se denomina **interferencia destructiva**.

En la ▼figura 13.14 se muestran los casos especiales de interferencia constructiva y destructiva totales, para pulsaciones de onda viajera con la misma anchura y amplitud. En el instante en que estas ondas en interferencia se traslapan exactamente (la cresta coincide con la cresta), la amplitud de la forma de onda combinada es el doble de la de cualquier onda individual. Este caso se llama **interferencia constructiva total**. Cuando los pulsos que interfieren tienen desplazamientos opuestos y se superponen exactamente (la cresta coincide con el valle), las formas de onda desaparecen momentáneamente; es decir, la amplitud de la onda combinada es cero. Este caso se llama **interferencia destructiva total**.

Por desgracia, la palabra *destructiva* parece implicar que la energía y la forma de la onda se destruyen. Pero éste no es el caso. En el punto de interferencia destructiva total,

PHYSLET®

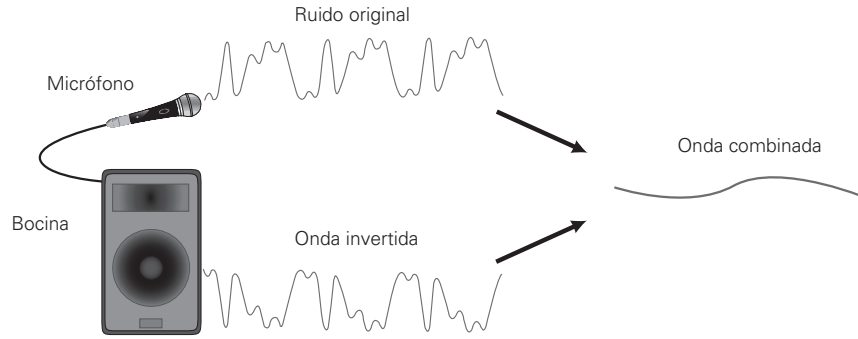
Exploración 17.1 Superposición de dos pulsaciones



a) Interferencia constructiva total b) Interferencia destructiva total

◀ **FIGURA 13.14 Interferencia** ***a)*** Cuando dos pulsaciones de onda de la misma amplitud se encuentran y están en fase, se interfieren constructivamente. Cuando las pulsaciones se superponen exactamente (3), hay interferencia constructiva total. ***b)*** Cuando las pulsaciones en interferencia tienen amplitudes opuestas y se superponen exactamente (3), hay interferencia destructiva total.

a)

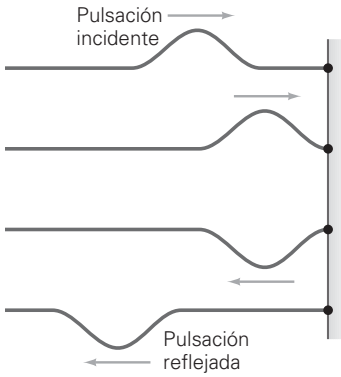


b)

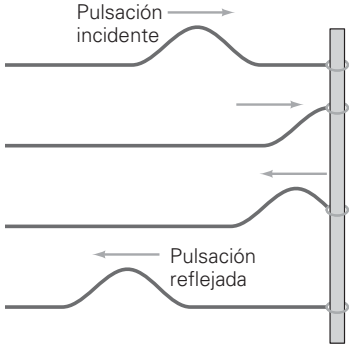
▶ **FIGURA 13.15 Interferencia destructiva en acción** ***a)*** Los pilotos utilizan auriculares conectados a un micrófono que recoge el ruido de baja frecuencia del motor. ***b)*** Se genera una onda que es inversa a la del ruido del motor. Cuando se reproduce a través de los auriculares, la interferencia destructiva hace que se reduzca el ruido del motor. Este proceso se llama "cancelación activa del ruido".

PHYSLET®

Exploración 17.3 Pulsaciones que viajan y obstáculos



a) Frontera fija: el pulso se invierte al reflejarse



b) Frontera libre (móvil): el pulso no se invierte al reflejarse

▲ **FIGURA 13.16 Reflexión** ***a)*** Cuando una onda (pulsación) en una cuerda se refleja en una frontera fija, se invierte la onda reflejada. ***b)*** Si la cuerda está en libertad de moverse en la frontera, la fase de la onda reflejada no se desplaza respecto a la de la onda incidente.

donde la forma de onda neta y, por lo tanto, la energía potencial son cero, la energía de la onda se almacena totalmente en el medio en forma de energía cinética; es decir, la cuerda recta tiene una velocidad instantánea.

Hay varias aplicaciones prácticas de la interferencia destructiva. Una de éstas es el silenciador de los automóviles. Los gases de escape del motor que pasan de una alta presión en los cilindros a una presión atmosférica normal producirían fuertes ruidos. Pero los silenciadores los reducen. Normalmente, un silenciador consiste en un dispositivo metálico que contiene tubos y cámaras perforados. Los tubos y las cámaras están dispuestos de tal manera que las ondas de presión de los gases de escape se reflejan hacia atrás y hacia delante, aumentado la interferencia destructiva. Esto reduce considerablemente el ruido que proviene del tubo de escape.

Otras aplicaciones se conocen como "control activo del ruido" o "cancelación activa del ruido". Ello implica la modificación del sonido, particularmente la cancelación del sonido por medios electro-acústicos. Existe una aplicación particularmente útil para los pilotos de aviones o helicópteros, quienes necesitan escuchar lo que sucede a su alrededor por encima del ruido del motor. Los pilotos utilizan auriculares especiales conectados a un micrófono que recoge el ruido de baja frecuencia del motor. Entonces, un componente en los auriculares genera una onda inversa al ruido del motor. Esto se reproduce a través de los auriculares y la interferencia destructiva produce un entorno menos ruidoso. (▲figura 13.15). Así el piloto puede escuchar mejor los sonidos de mediana y alta frecuencia, como las conversaciones y los sonidos de advertencia de los instrumentos.

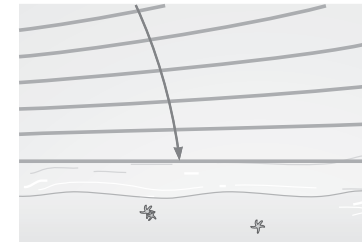
Reflexión, refracción, dispersión y difracción

Además de encontrarse con otras ondas, las ondas pueden encontrarse con objetos o con fronteras entre medios distintos. En tales casos, podrían ocurrir varias cosas. Una de ellas es la **reflexión**, que se da cuando una onda choca contra un objeto, o llega a una frontera con otro medio y se desvía, al menos en parte, otra vez hacia el medio original. Un eco es la reflexión de ondas sonoras, y los espejos reflejan las ondas de luz.

En la ◂figura 13.16 se ilustran dos casos de reflexión. Si el extremo de la cuerda está fijo, la pulsación reflejada se invierte (figura 13.16a). Ello se debe a que la pulsación hace que la cuerda ejerza una fuerza hacia arriba sobre la pared, y la pared

ejerce una fuerza igual y opuesta (hacia abajo) sobre la cuerda (por la tercera ley de Newton). La fuerza hacia abajo crea la pulsación reflejada hacia abajo (o invertida). Si el extremo de la cuerda puede moverse libremente, entonces no se invertirá la pulsación reflejada. (No hay desplazamiento de fase.) Esto se ilustra en la figura 13.16b, donde la cuerda está sujeta a un anillo ligero que puede moverse libremente sobre el poste liso. El frente de la pulsación incidente acelera al anillo hacia arriba y luego el anillo baja, creando así un pulso reflejado no invertido.

En términos más generales, cuando una onda choca con una frontera, la onda no se refleja totalmente. Más bien, una parte de la energía de la onda se refleja y una parte se transmite o absorbe. Cuando una onda cruza una frontera y penetra en otro medio, por lo general su rapidez cambia porque el nuevo material tiene distintas características. Si la onda transmitida ingresa oblicuamente (angulada) en el nuevo medio, se moverá en una dirección distinta de la de la onda incidente. Este fenómeno se denomina **refracción** (▸figura 13.17).



▲ **FIGURA 13.17** Refracción
La refracción de olas acuáticas se muestra desde arriba. Al acercarse las crestas a la playa, su borde izquierdo se frena porque entra primero en aguas poco profundas. Así, toda la cresta gira y llega a la playa casi de frente.

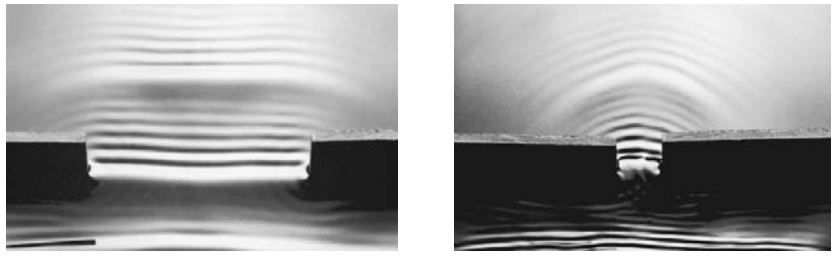
Puesto que la refracción depende de cambios en la rapidez de la onda, podríamos preguntarnos qué parámetros físicos determinan esa rapidez. En general, hay dos tipos de situaciones. El tipo más sencillo de onda es una cuya rapidez *no* depende de su longitud de onda (o su frecuencia). Todas esas ondas viajan con la misma rapidez, la cual depende exclusivamente de las propiedades del medio. Estas ondas se denominan *ondas no dispersivas* porque no se dispersan, es decir, no se separan entre sí. Un ejemplo de onda no dispersiva es una onda en una cuerda, cuya rapidez, como veremos, depende únicamente de la tensión y de la densidad de masa de la cuerda (sección 13.5). El sonido es una onda longitudinal no dispersiva; la rapidez del sonido (en aire) depende únicamente de la compresibilidad y la densidad del aire. De hecho, si la rapidez del sonido dependiera de la frecuencia, al fondo de una sala de conciertos se podrían oír los violines antes que los clarinetes, aunque ambas ondas sonoras estuvieran perfectamente sincronizadas cuando salieron del foso de la orquesta.

Cuando la rapidez *sí* depende de la longitud de onda (o la frecuencia), decimos que las ondas tienen **dispersión**: ondas de distinta frecuencia se separan unas de otras. Aunque la luz no se dispersa en el vacío, cuando entra en algún medio sus ondas sí se separan. Por ello los prismas separan la luz solar para dar un espectro de color, y es la base para la formación de los arcoiris, como veremos en el capítulo 22. La dispersión es muy importante en el estudio de la luz; no obstante debemos recordar que otras ondas también se pueden dispersar en las condiciones adecuadas.

La **difracción** se refiere a la flexión de las ondas en torno al borde de un objeto y no está relacionada con la refracción. Por ejemplo, si nos paramos junto a la pared de un edificio cerca de una esquina, podemos escuchar a gente que habla en la otra calle. Suponiendo que no hay reflexiones y que el aire no se mueve (no hay viento), esto no sería posible si las ondas viajaran en línea recta. Cuando las ondas pasan por la esquina, en vez de cortarse abruptamente, "envuelven" el borde; por ello, escuchamos el sonido.

En general, los efectos de la difracción sólo son evidentes cuando el tamaño del objeto o la abertura que difracta es aproximadamente igual o menor que la longitud de onda. La dependencia de la difracción, de la longitud de onda y el tamaño del objeto o la abertura, se ilustra en la ▾figura 13.18. Para muchas ondas, la difracción es insignificante en circunstancias normales. Por ejemplo, la luz visible tiene longitudes de onda del orden de 10^{-6} m. Tales longitudes de onda son demasiado pequeñas para exhibir difracción cuando pasan por aberturas de tamaño común, como las lentes de unos anteojos.

Estudiaremos más a fondo la reflexión, la refracción, la dispersión y la difracción cuando estudiemos las ondas luminosas en los capítulos 22 y 24.



a) **b)**

◀ **FIGURA 13.18** Difracción
Los efectos de difracción son máximos cuando la abertura (o el objeto) tiene aproximadamente el mismo tamaño o es más pequeña que la longitud de onda de las ondas. ***a)*** Con una abertura mucho mayor que la longitud de onda de estas ondas planas en agua, la difracción sólo se percibe cerca de los bordes. ***b)*** Si la abertura tiene aproximadamente el tamaño de la longitud de onda, la difracción produce ondas casi semicirculares.

PHYSLET

Ilustración 17.4 Superposición de ondas que viajan

13.5 Ondas estacionarias y resonancia

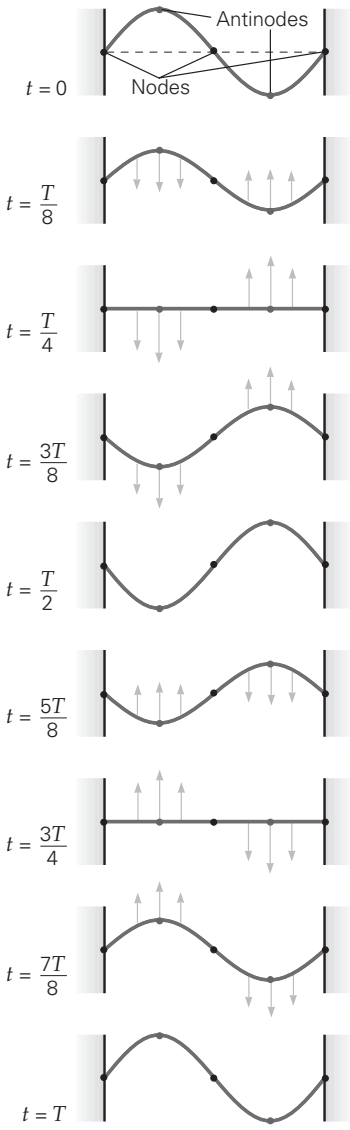
OBJETIVOS: *a*) Describir la formación y las características de las ondas estacionarias y *b*) explicar el fenómeno de resonancia.

Si sacudimos un extremo de una cuerda estirada, viajarán ondas a lo largo de la cuerda y se reflejarán en el otro extremo. Las ondas que van y las que vuelven se interfieren. En la mayoría de los casos, las formas de onda combinadas tienen una apariencia cambiante, irregular; pero si la cuerda se sacude con la frecuencia exacta, puede verse una forma de onda constante, o una serie de curvaturas uniformes que no cambian de lugar en la cuerda. Este fenómeno, que tiene el nombre adecuado de **onda estacionaria** (▼figura 13.19), se debe a interferencia con las ondas reflejadas, que tienen las mismas longitud de onda, amplitud y rapidez que las ondas incidentes. Puesto que las dos ondas idénticas viajan en direcciones opuestas, el flujo neto de energía por la cuerda es cero. Efectivamente, la energía se mantiene estacionaria en las curvas.

Algunos puntos de la cuerda permanecen inmóviles en todo momento y se llaman **nodos**. En tales puntos, los desplazamientos de las ondas en interferencia *siempre* son iguales y opuestos. Por el principio de superposición, las ondas en interferencia se cancelan totalmente en esos puntos y la cuerda no se desplaza ahí. En todos los demás puntos, la cuerda oscila hacia arriba y hacia abajo con la misma frecuencia. Los puntos de máxima amplitud, donde se da la mayor interferencia constructiva, se llaman **antinodos**. Como se aprecia en la figura 13.19a, antinodos adyacentes están separados por media longitud de onda ($\lambda/2$) o una curvatura; dos nodos adyacentes también están a una distancia de media longitud de onda.

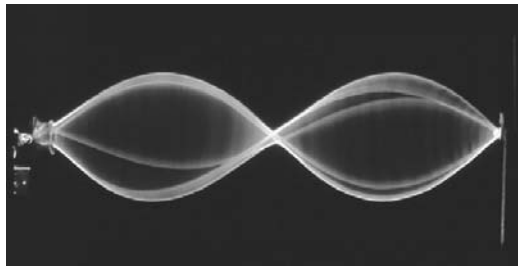
Se pueden generar ondas estacionarias en una cuerda con más de una frecuencia impulsora; cuanto mayor sea la frecuencia, más curvaturas oscilantes de media longitud de onda habrá en la cuerda. El único requisito es que las medias longitudes de onda "quepan" en la longitud de la cuerda. Las frecuencias con que se producen ondas estacionarias de gran amplitud se denominan **frecuencias naturales** o **frecuencias resonantes**. Los patrones resultantes de ondas estacionarias se llaman *modos de vibración normales* o *resonantes*. En general, todos los sistemas que oscilan tienen una o más frecuencias naturales, que dependen de factores como masa, elasticidad o fuerza restauradora, y geometría (condiciones de frontera). Las frecuencias naturales de un sistema también se describen como sus frecuencias *características*.

Podemos analizar una cuerda estirada para determinar sus frecuencias naturales. La condición de frontera es que los extremos están fijos, así que debe haber un nodo en cada uno. El número de segmentos cerrados o curvaturas de una onda estacionaria que caben entre los nodos de los extremos (en la longitud de la cuerda) es igual a un

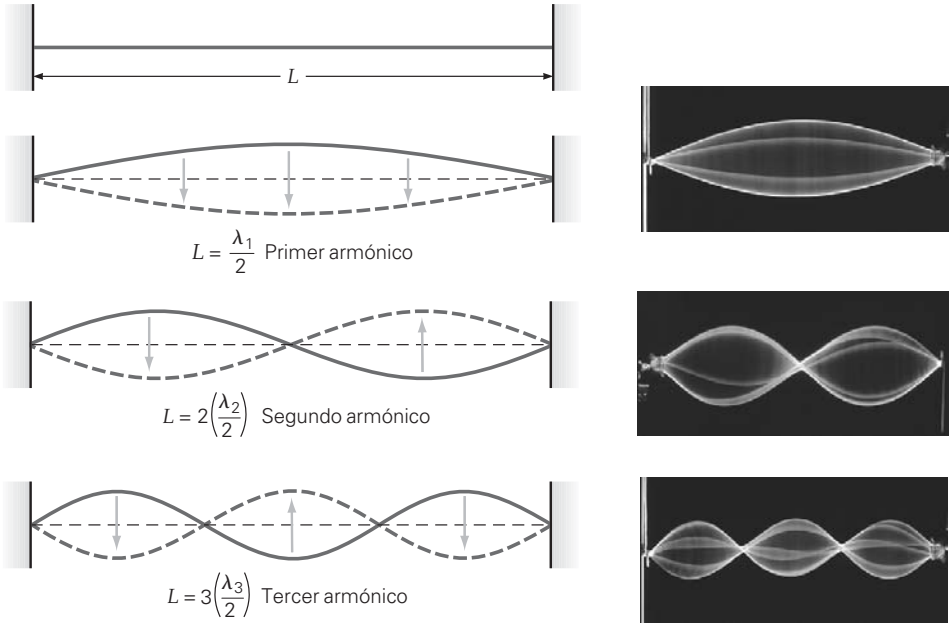


(a)

▼ **FIGURA 13.19 Ondas estacionarias** ***a)*** Se repiten condiciones de interferencias destructiva y constructiva cuando cada onda recorre una distancia de $\lambda/4$ en un tiempo $t = T/4$. Las velocidades de las partículas de la cuerda se indican con las flechas. Este movimiento produce ondas estacionarias con nodos inmóviles y antinodos de amplitud máxima. ***b)*** Se forman ondas estacionarias por interferencia de ondas que viajan en direcciones opuestas.



(b)



▲ **FIGURA 13.20 Frecuencias naturales** Una cuerda estirada sólo puede tener ondas estacionarias a ciertas frecuencias. Éstas corresponden a los números de medias longitudes de onda que caben en la longitud de la cuerda entre los nodos en lo extremos fijos.

número entero de *medias* longitudes de onda (▲figura 13.20). Vemos que $L = \lambda_1/2$, $L = 2(\lambda_2/2)$, $L = 3(\lambda_3/2)$, $L = 4(\lambda_4/2)$, y así sucesivamente. En general,

$$L = n\left(\frac{\lambda_n}{2}\right) \qquad \text{o} \qquad \lambda_n = \frac{2L}{n} \qquad (\text{para } n = 1, 2, 3, \ldots)$$

De manera que las frecuencias naturales de oscilación son

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} = n\left(\frac{v}{2L}\right) = nf_1 \qquad \text{para } n = 1, 2, 3, \ldots \qquad \textit{frecuencias naturales de una cuerda estirada} \qquad (13.18)$$

donde v es la rapidez de las ondas en la cuerda. La frecuencia natural más baja ($f_1 = v/2L$ para $n = 1$) se llama **frecuencia fundamental**. Todas las demás frecuencias naturales son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental: $f_n = nf_1$ (para $n = 1, 2, 3, \ldots$). El conjunto de frecuencias $f_1, f_2 = 2f_1, f_3 = 3f_1, \ldots$ se llama **serie armónica**: f_1 (la frecuencia fundamental) es el *primer armónico*, f_2 es el *segundo armónico*, etcétera.

Encontramos cuerdas fijas en ambos extremos en los instrumentos musicales de cuerda como violines, pianos y guitarras. Cuando excitamos tales cuerdas, la vibración producida generalmente incluye varios armónicos, además de la frecuencia fundamental. El número de armónicos depende de cómo y dónde se excite la cuerda, es decir, de si se puntea, se golpea o se frota con un arco. Es la combinación de frecuencias armónicas lo que confiere a un instrumento dado la calidad característica de su sonido (hablaremos más al respecto en el capítulo 14). Como muestra la ecuación 13.18, la frecuencia fundamental de una cuerda estirada, así como los demás armónicos, dependen de la longitud de la cuerda. ¿Sabe usted cómo se obtienen diferentes notas con una cuerda dada de un violín o una guitarra (▸figura 13.21).

▲ **FIGURA 13.21 Frecuencias fundamentales** Los ejecutantes de instrumentos de cuerda, como violines o guitarras, usan sus dedos para "acortar" las cuerdas. Al oprimir una cuerda contra un traste o el batidor, el ejecutante reduce la longitud de cuerda que puede vibrar. Esta reducción altera la frecuencia resonante de la cuerda y, por lo tanto, el tono del sonido que produce.

Las frecuencias naturales también dependen de otros parámetros, como masa y fuerza, que afectan la rapidez de la onda en la cuerda. En el caso de una cuerda estirada, puede demostrarse que la rapidez de la onda (v) es

$$v = \sqrt{\frac{F_T}{\mu}} \quad \textit{rapidez de una onda en una cuerda estirada} \tag{13.19}$$

donde F_T es la tensión en la cuerda y μ es la densidad lineal de masa (masa por unidad de longitud, $\mu = m/L$). (Usamos F_T, en vez de la T de capítulos anteriores, para no confundir la tensión con el periodo T.) Así, escribimos la ecuación 13.18 como

$$f_n = n\left(\frac{v}{2L}\right) = \frac{n}{2L}\sqrt{\frac{F_T}{\mu}} = nf_1 \qquad (\text{para } n = 1, 2, 3, \ldots) \tag{13.20}$$

Observe que cuanto mayor sea la densidad de masa lineal de una cuerda, menores serán sus frecuencias naturales. Como seguramente sabe el lector, las cuerdas de notas bajas de un violín o una guitarra son más gruesas (más masivas) que las cuerdas de notas altas. Al tensar una cuerda, aumentamos todas sus frecuencias. Al modificar la tensión en sus cuerdas, los violinistas, por ejemplo, afinan sus instrumentos antes de un concierto.

Ejemplo 13.6 ■ Una cuerda de piano: frecuencia fundamental y armónicos

Una cuerda de piano de 1.15 m de longitud y masa de 20.0 g está sometida a una tensión de 6.30×10^3 N. *a*) ¿Qué frecuencia fundamental tendrá la cuerda cuando se golpee? *b*) ¿Qué frecuencia tienen los dos primeros armónicos?

Razonamiento. Tenemos la tensión y podemos calcular la densidad lineal de masa a partir de los datos. Esto nos permitirá calcular la frecuencia fundamental y, con ella, los armónicos.

Solución.

Dado: $L = 1.15$ m; $m = 20.0$ g $= 0.0200$ kg; $F_T = 6.30 \times 10^3$ N

Encuentre: *a*) f_1 (frecuencia fundamental); *b*) f_2 y f_3 (frecuencias de los siguientes dos armónicos)

a) La densidad lineal de masa de la cuerda es

$$\mu = \frac{m}{L} = \frac{0.0200 \text{ kg}}{1.15 \text{ m}} = 0.0174 \text{ kg/m}$$

Entonces, aplicando la ecuación 13.20, tenemos

$$f_1 = \frac{1}{2L}\sqrt{\frac{F_T}{\mu}} = \frac{1}{2(1.15 \text{ m})}\sqrt{\frac{6.30 \times 10^3 \text{ N}}{0.0174 \text{ kg/m}}} = 262 \text{ Hz}$$

Ésta es aproximadamente la frecuencia del do medio (C_4) en un piano.

b) Puesto que $f_2 = 2f_1$ y $f_3 = 3f_1$, se sigue que

$$f_2 = 2f_1 = 2(262 \text{ Hz}) = 524 \text{ Hz}$$

y

$$f_3 = 3f_1 = 3(262 \text{ Hz}) = 786 \text{ Hz}$$

El segundo armónico corresponde aproximadamente a C_5 (do de la quinta octava) en un piano ya que, por definición, la frecuencia aumenta al doble con cada octava (cada octava tecla blanca).

Ejercicio de refuerzo. Las notas musicales toman como referencia la frecuencia fundamental de vibración o primer armónico. En música, el segundo armónico es el primer sobretono, el tercer armónico es el segundo sobretono y así sucesivamente. Si un instrumento tiene un tercer sobretono con frecuencia de 880 Hz, ¿qué frecuencia tendrá el primer sobretono?

Nota: no debemos confundirnos con el lenguaje. El *primer* sobretono significa la primera frecuencia arriba de la frecuencia fundamental, es decir, el *segundo* armónico.

Ejemplo integrado 13.7 ■ Afinación: aumentar la frecuencia de una cuerda de guitarra

Suponga que quiere aumentar la frecuencia fundamental de una cuerda de guitarra. *a*) ¿Usted 1) aflojaría la cuerda para reducir su tensión a la mitad, 2) apretaría la cuerda para duplicar su tensión, 3) usaría otra cuerda del mismo material pero con la mitad del diámetro, sometida a la misma tensión o 4) usaría otra cuerda del mismo material pero con el doble del diámetro, sometida a la misma tensión? *b*) Usted quiere ir de la nota la (220 Hz) abajo del do medio, a la nota la (440 Hz) arriba del do medio. Si las cuerdas de la guitarra son de acero ($\rho = 7.8 \times 10^3$ kg/m^3, tabla 9.2), y una cuerda inicial más gruesa tiene un diámetro de 0.30 cm, demuestre que una cuerda cuyo diámetro es de la mitad tiene una frecuencia fundamental del doble.

a) Razonamiento conceptual. La frecuencia fundamental de una cuerda estirada está dada por la ecuación 13.20:

$$f = \frac{1}{2L}\sqrt{\frac{F_T}{\mu}} \qquad (para\ n = 1)$$

Por lo tanto, la frecuencia de la cuerda es proporcional a la *raíz cuadrada* de la fuerza de tensión F_T, así que si aflojamos la cuerda —es decir, si reducimos F_T— no aumentaremos la frecuencia. Un aumento al doble de la tensión tampoco aumenta la frecuencia al doble (porque $\sqrt{2F_T} \neq 2\sqrt{F_T}$). Así, ni 1 ni 2 son la respuesta correcta.

Al usar otra cuerda, la pregunta es entonces ¿cómo varía la frecuencia con la densidad lineal de masa μ de la cuerda? Si las cuerdas son del mismo material (misma densidad ρ), entonces, cuanto mayor sea el diámetro de la cuerda, mayor será su masa por unidad de longitud (mayor μ). Por lo tanto, una cuerda más delgada, con μ más pequeña, vibrará a una mayor frecuencia, y la respuesta es 3.

b) Razonamiento cuantitativo y solución. Lo primero que se nos podría ocurrir es calcular directamente las frecuencias, empleando la ecuación 13.20. Sin embargo, no podemos hacerlo porque no tenemos suficientes datos, y esto generalmente implica el uso de cocientes. Para mostrar la diferencia en las frecuencias con cuerdas de diferente diámetro, necesitamos expresar la ecuación de frecuencia en términos del diámetro de la cuerda. Al examinar la ecuación 13.20, vemos que el diámetro de la cuerda no depende de la longitud L (que suponemos constante entre el puente y el cuello de la guitarra) ni de la fuerza de tensión constante F_T (suponiendo que el estiramiento es insignificante). Esto nos lleva a considerar la densidad lineal de masa $\mu = m/L$.

Recuerde que la masa de una cuerda depende de su densidad y su volumen; es decir, $\rho = m/V$, o bien, $m = \rho V$. Podemos determinar el volumen V de una longitud dada (L) de cuerda, que sería un cilindro largo con sección transversal A, con $V = AL$. El área circular es proporcional al cuadrado del diámetro de la cuerda, así que ésta es la clave de nuestra demostración.

Dado: $f = \frac{1}{2L}\sqrt{\frac{F_T}{\mu}}$ (para $n = 1$, ec. 13.20)
$\rho = 7.8 \times 10^3$ kg/m^3 (acero)
$d_1 = 0.30$ cm
$d_2 = d_1/2 = 0.15$ cm

Encuentre: Demostrar que una cuerda con diámetro d_2 que es la mitad del de una cuerda más gruesa (diámetro d_1) tiene una frecuencia fundamental que es el doble de la de la cuerda más gruesa.

Como señalamos en la sección Razonamiento cuantitativo y solución, la densidad lineal de masa de la cuerda puede expresarse en términos de su densidad y su volumen, siendo este último proporcional al cuadrado del diámetro de la cuerda:

$$\mu = \frac{m}{L} = \frac{\rho V}{L} = \frac{\rho AL}{L} = \rho\left(\frac{\pi d^2}{4}\right)$$

Sustituimos esto en la ecuación 13.20 para obtener

$$f = \frac{1}{2L}\sqrt{\frac{F_T}{\mu}} = \frac{1}{2L}\sqrt{\frac{4F_T}{\rho\pi d^2}} = \left(\frac{1}{L}\sqrt{\frac{F_T}{\rho\pi}}\right)\frac{1}{d}$$

(continúa en la siguiente página)

Las cantidades encerradas en los paréntesis son constantes, de modo que $f \propto 1/d$, así que, en forma de razón,

$$\frac{f_2}{f_1} = \frac{d_1}{d_2} = \frac{0.30\text{ cm}}{0.15\text{ cm}} = 2 \qquad \text{y} \qquad f_2 = 2f_1$$

Ejercicio de refuerzo. La frecuencia fundamental de una cuerda de violín es la de abajo del do medio (220 Hz). ¿Cómo afinaríamos esta cuerda al do medio (264 Hz) sin cambiar de cuerda, como se hizo en este ejemplo?

PHYSLET®

Ilustración 17.5 Comportamiento de resonancia de una cuerda

Cuando el sistema oscilante se impulsa con una de sus frecuencias naturales o resonantes, se le transfiere el máximo de energía. Las frecuencias naturales de un sistema son las frecuencias con que el sistema "quiere" vibrar, por decirlo de alguna manera. La condición de impulsar un sistema con una frecuencia natural se denomina **resonancia**.

Un ejemplo común de sistema en resonancia mecánica es el de una persona en un columpio que está siendo empujada. Básicamente, un columpio es un péndulo simple y

A FONDO 13.2 RESONANCIAS DESEABLES E INDESEABLES

Cuando nos colocamos una concha de caracol marino grande al oído, oímos un sonido parecido al del mar. La causa de este sonido es un efecto de resonancia. Los sonidos del entorno entran en la concha, que actúa como cavidad de resonancia.

El aire del interior de la concha resuena con las frecuencias naturales de la concha. Las variaciones del sonido surgen de los diferentes sonidos del entorno y de la aparición y desaparición de diferentes frecuencias resonantes. "El ir y venir de estas frecuencias resonantes produce la ilusión de escuchar el ir y venir de las olas del mar."* Básicamente, el cerebro procesa el sonido y busca en él un patrón que ya haya experimentado antes. Casi todos hemos oído antes las olas del mar, así que esto es lo que asociamos con el sonido que escuchamos en una concha marina. Podemos escuchar un sonido "de mar" similar colocándonos al oído un vaso vacío o la mano curveada.

Cuando un gran número de soldados cruza marchando un puente pequeño, generalmente se les ordena romper el paso. El motivo es que la frecuencia con que marchan podría coincidir con una de las frecuencias naturales del puente y ponerlo a vibrar en resonancia; la vibración podría llegar a derrumbarlo. Esto sucedió realmente en un puente colgante en Inglaterra, en 1831. El puente estaba debilitado y ya le hacían falta reparaciones, pero las vibraciones de resonancia inducida por soldados que lo cruzaron marchando hicieron que se derrumbara. Hubo algunos heridos.

En otro incidente, las vibraciones de un puente se debieron, no a la marcha de soldados, sino a la fuerza impulsora del viento. El 7 de noviembre de 1940, vientos con rapideces entre 65 y 72 km/h (40 a 45 mi/h) pusieron a vibrar el tramo principal del puente Tacoma Narrows (en el estado de Washington). Este puente, de 855 m (2800 ft) de longitud y 12 m (39 ft) de anchura, apenas se había abierto al tránsito hacía sólo cuatro meses.

Durante el primer mes de uso del puente, se habían observado pequeños modos transversales de vibración; pero el 7 de noviembre los efectos especiales del viento empujaron al puente con una frecuencia cercana a la de resonancia y el tramo principal vibró con una frecuencia de 36 vib/min y una amplitud de casi medio metro (1.5 ft). A las 10 A.M., el tramo principal comenzó a vibrar en un modo torsional de dos segmentos, con una frecuencia de 14 vib/min. El viento siguió empujando al puente en resonancia, y la amplitud de vibración aumentó. Poco después de las 11 A.M., el tramo principal se derrumbó (figura 1).†

Se volvió a construir el "Galloping Gertie" ("Gertrudis Galopante", el mote que se dio al puente) sobre los mismos cimientos de las torres; sin embargo, el nuevo diseño hizo más rígida la estructura para aumentar su frecuencia de resonancia, de manera que los vientos no pudieran producir una resonancia indeseable.

**The Flying Circus of Physics*, por J. Walker. (Nueva York: Wiley, 1977.)

†Y es dudoso que las ráfagas de viento hayan puesto a vibrar el puente. La velocidad del viento era más o menos constante, y las fluctuaciones por ráfagas suelen ser aleatorias. Una explicación en cuanto a la fuente impulsora de las oscilaciones es que se formaron vórtices al pasar el viento sobre el puente. Los vórtices son como los remolinos que se forman en el agua en la punta de los remos al remar una lancha. El viento, al soplar por arriba y por debajo del puente, habría formado vórtices que giraban en direcciones opuestas. La formación y "separación" de vórtices (como los remolinos que se separan de los remos) habría impartido energía al puente, y si la frecuencia de esta acción fuera aproximadamente la de una frecuencia natural, se habría establecido una onda estacionaria.

FIGURA 1 Gertrudis Galopante El colapso del puente Tacoma Narrows el 7 de noviembre de 1940 fue captado con una cámara de cine. Vemos una imagen de cuadro de esa película.

tiene una sola frecuencia resonante para una longitud dada $\left[f = 1/T = 1/(2\pi)\sqrt{g/L}\right]$. Si empujamos el columpio con esta frecuencia y lo hacemos en fase con su movimiento, aumentarán su amplitud y energía (▸figura 13.22). Si empujamos con una frecuencia un poco distinta, la transferencia de energía ya no será máxima. (¿Qué cree el lector que suceda si empuja el columpio con la frecuencia de resonancia, pero desfasada 180° respecto al movimiento del columpio?)

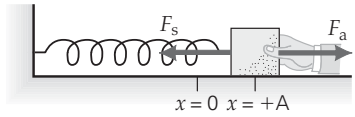
A diferencia de los péndulos simples, las cuerdas estiradas tienen muchas frecuencias naturales. Casi cualquier frecuencia impulsora causa una perturbación en la cuerda. Sin embargo, si la frecuencia de la fuerza impulsora no es igual a una de las frecuencias naturales, la onda resultante será relativamente pequeña e irregular. En cambio, cuando la frecuencia de la fuerza impulsora coincide con una de las frecuencias naturales, se transfiere el máximo de energía a la cuerda. El resultado es un patrón constante de onda estacionaria, y la amplitud en los antinodos se vuelve relativamente grande.

La resonancia mecánica no es el único tipo de resonancia. Cuando sintonizamos una radio, modificamos la frecuencia de resonancia de un circuito eléctrico (capítulo 21) para que sea impulsado por una señal cuya frecuencia es la de la estación transmisora deseada; así, la radio "capta" esa estación. En la sección A fondo 13.2 se describen otros ejemplos de la resonancia deseable y la indeseable.

▲ **FIGURA 13.22** **Resonancia en el patio de juegos** El columpio se comporta como un péndulo en MAS. Para transferir energía de forma eficiente, el hombre debe sincronizar sus empujones con la frecuencia natural del columpio.

Repaso del capítulo

- El **movimiento armónico simple (MAS)** requiere una fuerza restauradora directamente proporcional al desplazamiento, como una fuerza de resorte ideal, que está dada por la ley de Hooke



Ley de Hooke:

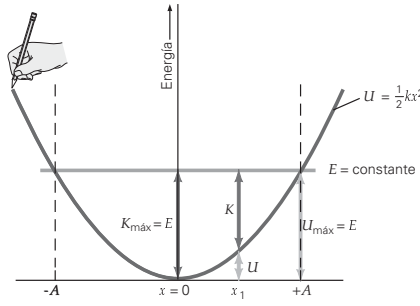
$$F_s = -kx \tag{13.1}$$

- La **frecuencia (f)** y el **periodo (T)** del MAS son recíprocos.

Frecuencia y periodo para MAS:

$$f = \frac{1}{T} \tag{13.2}$$

- En general, la energía total de un objeto en MAS es directamente proporcional al cuadrado de la amplitud.



Energía total de un resorte y una masa en MAS:

$$E = \tfrac{1}{2}kA^2 = \tfrac{1}{2}mv^2 + \tfrac{1}{2}kx^2 \tag{13.4–5}$$

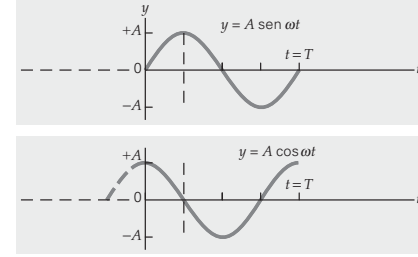
- La forma de la ecuación de movimiento para un objeto en MAS depende del desplazamiento inicial (y_o) del objeto.

Ecuaciones de movimiento para MAS:

$$y = \pm A \operatorname{sen} \omega t = \pm A \operatorname{sen}(2\pi f t) = \pm A \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \tag{13.8a}$$

+ para movimiento inicial hacia arriba con $y_o = 0$

− para movimiento inicial hacia abajo con $y_o = 0$



$$y = \pm A \cos \omega t = \pm A \cos(2\pi f t) = \pm A \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \tag{13.9a}$$

para movimiento inicial hacia arriba con $y_o = +A$

para movimiento inicial hacia abajo con $y_o = -A$

Velocidad de una masa que oscila en un resorte:

$$v = \pm\sqrt{\frac{k}{m}(A^2 - x^2)} \tag{13.6}$$

Periodo de una masa que oscila en un resorte:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \tag{13.11}$$

Frecuencia angular de una masa que oscila en un resorte:

$$\omega = 2\pi f = \sqrt{\frac{k}{m}} \qquad (13.13)$$

Periodo de un péndulo simple (aproximación con ángulo pequeño):

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}} \qquad (13.14)$$

Velocidad de una masa en MAS:

$$v = \omega A \cos \omega t \quad \begin{matrix}\textit{(velocidad vertical si } v_o \\ \textit{es hacia arriba en } t_o = 0,\ y_o = 0)\end{matrix} \qquad (13.15)$$

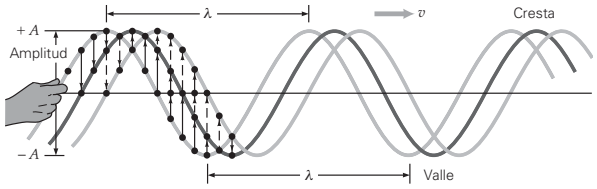
Aceleración de una masa en MAS:

$$a = -\omega^2 A \operatorname{sen} \omega t = -\omega^2 y \quad \begin{matrix}\textit{(aceleración vertical si } v_o \\ \textit{es hacia arriba en } t_o = 0,\ y_o = 0)\end{matrix} \qquad (13.16)$$

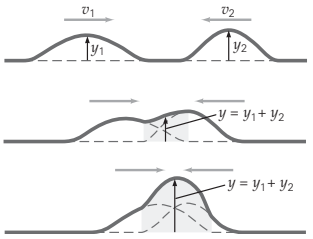
- Una onda es una perturbación en el tiempo y el espacio; un movimiento ondulatorio transfiere o propaga energía.

Rapidez de una onda:

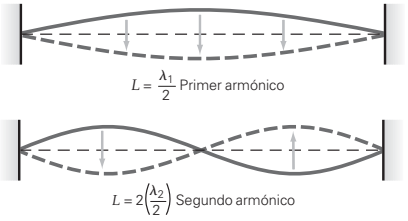
$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda f \qquad (13.17)$$



- En cualquier instante, la forma de onda combinada de dos o más ondas que se interfieren es la suma de los desplazamientos de las ondas individuales en cada punto del medio.



- En las frecuencias naturales, se pueden formar **ondas estacionarias** en una cuerda como resultado de la interferencia de dos ondas con longitud de onda, amplitud y rapidez idénticas, que viajan en direcciones opuestas por una cuerda.



Frecuencias naturales de una cuerda estirada:

$$f_n = n\left(\frac{v}{2L}\right) = \frac{n}{2L}\sqrt{\frac{F_T}{\mu}} = nf_1 \quad (\text{para } n = 1, 2, 3, \ldots) \qquad (13.20)$$

Ejercicios

Los ejercicios designados **OM** *son preguntas de opción múltiple; los* **PC** *son preguntas conceptuales; y los* **EI** *son ejercicios integrados. A lo largo del texto, muchas secciones de ejercicios incluirán ejercicios "apareados". Estos pares de ejercicios, que se identifican con* números subrayados, *pretenden ayudar al lector a resolver problemas y aprender. El primer ejercicio de cada pareja (el de número par) se resuelve en la Guía de estudio, que puede consultarse si se necesita ayuda para resolverlo. El segundo ejercicio (de número impar) es similar, y su respuesta se da al final del libro.*

13.1 Movimiento armónico simple

1. **OM** Una partícula en MAS tiene *a*) amplitud variable, *b*) una fuerza restauradora que sigue la forma de la ley de Hooke, *c*) una frecuencia directamente proporcional a su periodo o *d*) una posición que se representa gráficamente con $x(t) = at + b$.

2. **OM** La energía cinética máxima de un sistema masa-resorte en MAS es igual a *a*) A, *b*) A^2, *c*) kA, *d*) $kA^2/2$.

3. **OM** Si se aumenta al doble el periodo de un sistema en MAS, la frecuencia del sistema *a*) se duplica, *b*) se reduce a la mitad, *c*) aumenta al cuádruple o *d*) se reduce a la cuarta parte.

4. **OM** Cuando una partícula en MAS horizontal está en la posición de equilibrio, la energía potencial del sistema es *a*) cero, *b*) máxima, *c*) negativa o *d*) nada de lo anterior.

5. **PC** Si se duplica la amplitud de una masa en MAS, ¿cómo afectará eso *a*) la energía y *b*) la rapidez máxima?

6. **PC** ¿Cómo cambia la rapidez de una masa en MAS a medida que la masa se acerca a su posición de equilibrio? Explique.

7. **PC** Un sistema masa-resorte en MAS tiene amplitud A y periodo T. ¿Cuánto tarda la masa en recorrer una distancia A? ¿Y una $2A$?

8. **PC** Un tenista usa una raqueta para botar una pelota con un periodo constante. ¿Se trata de un movimiento armónico simple? Explique por qué.

9. ● Una partícula oscila en MAS con amplitud A. ¿Qué *distancia* total recorre la partícula en un periodo?

10. ● Un juguete de 0.75 kg que oscila en un resorte efectúa un ciclo cada 0.60 s. ¿Qué frecuencia tiene esta oscilación?

11. ● Una partícula en movimiento armónico simple tiene una frecuencia de 40 Hz. ¿Qué periodo tiene su oscilación?

12. ● La frecuencia de un oscilador armónico simple se duplica, de 0.25 a 0.50 Hz. ¿Cómo cambia su periodo?

13. ● ¿Qué constante de resorte tiene una báscula de resorte que se estira 6.0 cm cuando una canasta de verduras cuya masa es de 0.25 kg se cuelga de ella?

14. ● Un objeto con una masa de 0.50 kg se sujeta a un resorte cuya constante es de 10 N/m. Si se tira del objeto para bajarlo 0.050 m respecto a su posición de equilibrio y se le suelta, ¿qué rapidez máxima alcanzará?

15. ●● Los átomos de un sólido están en movimiento vibratorio continuo debido a su energía térmica. A temperatura ambiente, la amplitud típica de estas vibraciones atómicas suele ser de aproximadamente 10^{-9} cm, y su frecuencia es del orden de 10^{12} Hz. *a*) ¿Qué periodo aproximado de oscilación tiene un átomo representativo? *b*) ¿Qué rapidez máxima tiene semejante átomo?

16. **El** ●● *a*) ¿En qué posición es mínima la magnitud de la fuerza sobre la masa de un sistema masa-resorte? 1) $x = 0$, 2) $x = -A$ o 3) $x = +A$. ¿Por qué? *b*) Con $m = 0.500$ kg, $k = 150$ N/m y $A = 0.150$ m, calcule la magnitud de la fuerza sobre la masa y la aceleración de la masa en $x = 0$, 0.050 m y 0.150 m.

17. **El** ●● *a*) ¿En qué posición es máxima la rapidez de una masa de un sistema masa-resorte? 1) $x = 0$, 2) $x = -A$ o 3) $x = +A$. ¿Por qué? *b*) Con $m = 0.250$ kg, $k = 100$ N/m y $A = 0.10$ m, ¿cuál es la rapidez máxima?

18. ●● Un sistema masa-resorte está en MAS en la dirección horizontal. La masa es de 0.25 kg, la constante de resorte es de 12 N/m y la amplitud es de 15 cm. *a*) Calcule la rapidez máxima de la masa y *b*) la posición donde ocurre. *c*) ¿Qué rapidez tendrá en la posición de media amplitud?

19. ●● En el ejercicio 18, *a*) ¿qué rapidez tiene la masa en $x = 10$ cm? *b*) ¿Qué magnitud tiene la fuerza ejercida por el resorte sobre la masa?

20. ●● Un resorte horizontal en un riel de aire nivelado que no ejerce fricción tiene atado un objeto de 150 g; el resorte se estira 6.50 cm. Luego se imprime al objeto una velocidad inicial hacia fuera de 2.20 m/s. Si la constante de resorte es de 35.2 N/m, determine qué tanto se estira el resorte.

21. ●● Un bloque de 350 g que se mueve hacia arriba verticalmente choca con un resorte vertical ligero y lo comprime 4.50 cm antes de llegar al reposo. Si la constante de resorte es de 50.0 N/m, ¿cuál fue la rapidez inicial del bloque? (Ignore las pérdidas de energía debidas al sonido y a otros factores durante el choque.)

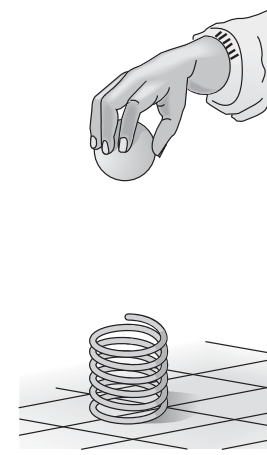
22. ●● Un objeto de 0.25 kg suspendido de un resorte ligero se suelta desde una posición 15 cm arriba de la posición de equilibrio del resorte estirado. La constante del resorte es de 80 N/m. *a*) Calcule la energía total del sistema. (Desprecie la energía potencial gravitacional.) *b*) ¿Esta energía depende de la masa del objeto? Explique.

23. ●● ¿Qué rapidez tiene el objeto del ejercicio 22 cuando está *a*) 5.0 cm arriba y *b*) 5.0 cm abajo de su posición de equilibrio? *c*) Calcule la rapidez máxima del objeto y la posición donde esta ocurre.

24. ●●● Un cirquero de 75 kg salta desde una altura de 5.0 m a un trampolín y lo estira hacia abajo 0.30 m. Suponiendo que el trampolín obedece la ley de Hooke, *a*) ¿qué tanto se estirará si el cirquero salta desde una altura de 8.0 m? *b*) ¿Qué tanto se estirará el trampolín si el cirquero se para en él mientras agradece los aplausos?

25. ●●● Un resorte vertical está atado a una masa de 200 g. La masa se suelta desde el reposo y cae 22.3 cm antes de detenerse. *a*) Determine la constante de resorte. *b*) Determine la rapidez de la masa cuando ha caído solamente 10.0 cm.

26. ●●● Una esfera de 0.250 kg se deja caer desde una altura de 10.0 cm sobre un resorte, como se ilustra en la ▼figura 13.23. Si la constante del resorte es de 60.0 N/m, *a*) ¿qué distancia se comprimirá el resorte? (Desprecie la pérdida de energía durante el choque.) *b*) Al rebotar hacia arriba, ¿qué altura alcanzará la esfera?



▲ **FIGURA 13.23 ¿Qué tanto baja?** Véase el ejercicio 26.

13.2 Ecuaciones de movimiento

27. **OM** La ecuación de movimiento para una partícula en MAS *a*) siempre es una función coseno, *b*) refleja la acción amortiguadora, *c*) es independiente de las condiciones iniciales o *d*) da la posición de la partícula en función del tiempo.

28. **OM** Para la ecuación de MAS $y = A \operatorname{sen} \omega t$, la posición inicial y_o es *a*) $+A$, *b*) $-A$, *c*) 0 o *d*) ninguna de las anteriores.

29. **OM** Para la ecuación de MAS $y = A \operatorname{sen}(2\pi t/T)$, la posición y del objeto en tres cuartos del periodo es *a*) $+A$, *b*) $-A$, *c*) $A/2$, *d*) 0.

30. **PC** Si se duplica la longitud de un péndulo, ¿qué relación habrá entre el nuevo periodo y el anterior?

31. **PC** El aparato de la figura 13.5 demuestra que el movimiento de una masa en un resorte se puede describir con una función senoidal del tiempo. ¿Cómo podría demostrarse esta misma relación para un péndulo?

32. **PC** ¿El movimiento armónico simple podría describirse con una función tangente? Explique por qué.

33. **PC** El periodo de un péndulo en un elevador que acelera hacia arriba aumentará o disminuirá, en comparación con su periodo en un elevador que no acelera? Explique por qué.

34. **PC** Si un sistema masa-resorte se lleva a la Luna, ¿cambiará su periodo? ¿Y el periodo de un péndulo llevado a la Luna? Explique por qué.

35. ● ¿Qué masa en un resorte cuya constante es de 100 N/m oscilará con un periodo de 2.0 s?

36. ● Una masa de 0.50 kg oscila en movimiento armónico simple en un resorte con una constante de 200 N/m. Calcule *a*) el periodo y *b*) la frecuencia de la oscilación.

37. ● El péndulo simple de un reloj tiene 0.75 m de longitud. Calcule *a*) su periodo y *b*) su frecuencia.

38. ● Una brisa pone a oscilar una lámpara suspendida. Si el periodo es de 1.0 s, ¿qué distancia habrá entre el techo y la lámpara en el punto más bajo? Suponga que la lámpara actúa como péndulo simple.

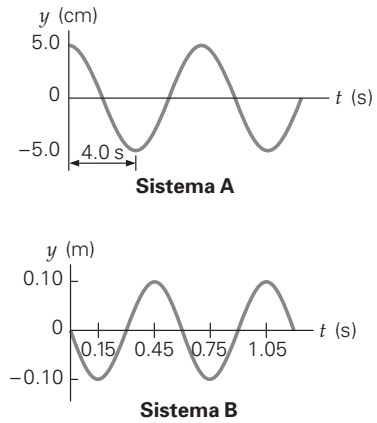
39. ● Escriba la ecuación general de movimiento para una masa que descansa en una superficie horizontal sin fricción y está conectada a un resorte en equilibrio, *a*) si la masa recibe inicialmente un empujón rápido que estira el resorte y *b*) si se tira de la masa para estirar el resorte y luego se suelta.

40. ● La ecuación de movimiento para un oscilador en MAS vertical está dada por $y = (0.10\text{ m})\,\text{sen}(100)t$. Calcule *a*) la amplitud, *b*) la frecuencia y *c*) el periodo de este movimiento.

41. ● El desplazamiento de un objeto está dado por $y = (5.0\text{ cm})\,\text{sen}(20\pi)t$. Calcule *a*) la amplitud, *b*) la frecuencia y *c*) el periodo de oscilación del objeto.

42. ● Si el desplazamiento de un oscilador en MAS se describe con la ecuación $y = (0.25\text{ m})\cos(314)t$, donde y está en metros y t en segundos, ¿qué posición tendrá el oscilador en *a*) $t = 0$, *b*) $t = 5.0$ s y *c*) $t = 15$ s?

43. **EI** ●● En la ▸figura 13.24 se grafican las oscilaciones de dos sistemas masa-resorte. La masa del sistema A es cuatro veces mayor que la del sistema B. *a*) En comparación con el sistema B, el sistema A tiene 1) más, 2) la misma o 3) menos energía. ¿Por qué? *b*) Calcule la razón de energía entre el sistema B y el sistema A.



▲ **FIGURA 13.24 Energía de ondas y ecuación de movimiento** Véanse los ejercicios 43, 56 y 57.

44. ●● Demuestre que la energía total de un sistema masa-resorte en movimiento armónico simple está dada por $\frac{1}{2}m\omega^2A^2$.

45. ●● La velocidad de un sistema masa-resorte que oscila verticalmente está dada por $v = (0.750\text{ m/s})\,\text{sen}(4t)$. Determine *a*) la amplitud y *b*) la aceleración máxima de este oscilador.

46. **EI** ●● *a*) Si se duplica la masa de un sistema masa-resorte, el nuevo periodo será 1) 2, 2) $\sqrt{2}$, 3) $1/\sqrt{2}$ veces el antiguo periodo. ¿Por qué? *b*) Si el periodo inicial es de 3.0 s y la masa se reduce a 1/3 de su valor inicial, calcule el nuevo periodo.

47. **EI** ●● *a*) Si se triplica la constante de resorte de un sistema masa-resorte, el nuevo periodo será 1) 3, 2.) $\sqrt{3}$, 3) $1/\sqrt{3}$ veces el antiguo periodo. ¿Por qué? *b*) Si el periodo inicial es de 2.0 s y la constante de resorte se reduce a la mitad, calcule el nuevo periodo.

48. ●● Demuestre que, para que un péndulo oscile con la misma frecuencia que una masa en un resorte, la longitud del péndulo debe ser $L = mg/k$.

49. ●● Puesto que la gravedad es débil en el espacio exterior, los astronautas no pueden medir su masa con una báscula de resorte como hacemos en la Tierra. *a*) ¿Puede diseñar un método para medir la masa con una báscula de resorte en el espacio? *b*) Si el periodo de oscilación de un astronauta en un resorte de 3000 N/m es de 1.0 s, ¿qué masa tiene el astronauta?

50. ●● Ciertos estudiantes usan un péndulo simple de 36.90 cm de longitud para medir la aceleración debida a la gravedad en su escuela. Si el periodo del péndulo es de 1.220 s, ¿qué valor experimental tiene g en esa escuela?

51. ●● ¿Cuál es la máxima energía cinética de un oscilador horizontal simple constituido por masa-resorte, cuya ecuación de movimiento está dada por $x = (0.350\text{ m})\,\text{sen}(7t)$? La masa al final del resorte es de 900 g.

52. ●● La ecuación de movimiento de una partícula en MAS vertical está dada por $y = (10\text{ cm})\,\text{sen}(0.50)t$. ¿Cuál es *a*) el desplazamiento, *b*) la velocidad y *c*) la aceleración de la partícula cuando $t = 1.0$ s?

53. ●● Por algunos segundos durante un terremoto, el piso de un edificio de apartamentos osciló, según las mediciones, aproximadamente en movimiento armónico simple con un periodo de 1.95 segundos y una amplitud de 8.65 cm. Determine la rapidez y aceleración máximas del piso durante este movimiento. Exprese la aceleración como una fracción de g.

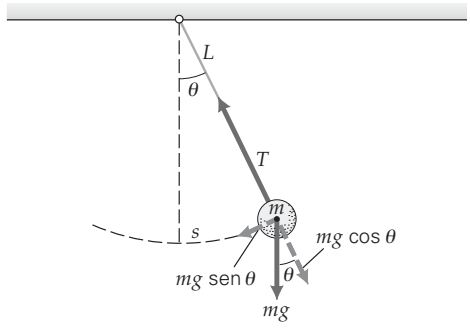
54. ●● Dos masas iguales oscilan en resortes ligeros; la constante de resorte del segundo es el doble de la del primero. ¿Cuál sistema tiene la mayor frecuencia y por cuánto es mayor?

55. **El**●● *a*) Si un reloj de péndulo se llevara la Luna, donde la aceleración de la gravedad es apenas una sexta parte (suponga que la cifra es exacta) de la que hay en la Tierra, ¿el periodo de vibración 1) aumentaría, 2) permanecería igual o 3) disminuiría? ¿Por qué? *b*) Si el periodo en la Tierra es de 2.0 s, ¿cuál sería el periodo en la Luna?

56. ●● El movimiento de una partícula se describe mediante la curva para el sistema A en la figura 13.24. Escriba la ecuación de movimiento en términos de una función coseno.

57. ●● El movimiento de una masa oscilatoria de 0.25 kg en un resorte ligero se describe mediante la curva para el sistema B en la figura 13.24. *a*) Escriba la ecuación para el desplazamiento de la masa como una función del tiempo. *b*) ¿Cuál es la constante del resorte?

58. ●●● En la ▼figura 13.25 se muestran las fuerzas que actúan sobre un péndulo simple. *a*) Demuestre que, para la aproximación de ángulo pequeño (sen $\theta \approx \theta$), la fuerza que produce el movimiento tiene la misma forma que la ley de Hooke. *b*) Demuestre, por analogía con una masa en un resorte, que el periodo de un péndulo simple está dado por $T = 2\pi\sqrt{L/g}$. [*Sugerencia:* piense en la constante de resorte eficaz.]



▲ **FIGURA 13.25 MAS de un péndulo** Véase el ejercicio 58.

59. ●●● Un péndulo simple se pone en movimiento angular pequeño, haciendo un ángulo máximo con la vertical de 5°. Su periodo es de 2.21 s. *a*) Determine su longitud. *b*) Determine su rapidez máxima. *c*) ¿Cuál será su rapidez angular máxima?

60. ●●● Un reloj usa un péndulo de 75 cm de longitud. El reloj sufre un accidente y, durante la reparación, la longitud del péndulo se acorta en 2.0 mm. Considerándolo como un péndulo simple, *a*) ¿el reloj reparado se adelantará o se atrasará? *b*) ¿Cuánto diferirá la hora indicada por el reloj reparado, de la hora correcta (que se toma como el tiempo determinado por el péndulo original en 24 h)? *c*) Si el cordel del péndulo fuera metálico, ¿la temperatura ambiente afectará la exactitud del reloj? Explique por qué.

13.3 Movimiento ondulatorio

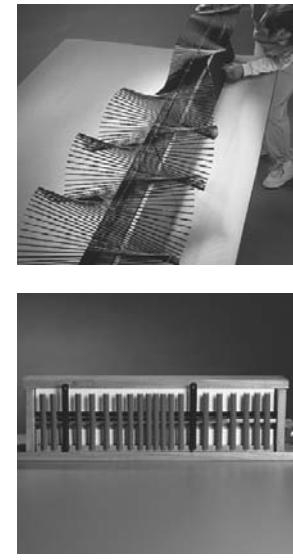
61. **OM** El movimiento ondulatorio en un medio material implica *a*) la propagación de una perturbación, *b*) interacciones de partículas, *c*) transferencia de energía o *d*) todo lo anterior.

62. **OM** La relación siguiente se cumple para una onda periódica que se propaga con rapidez v: *a*) $\lambda = v/f$, *b*) $v = \lambda/f$, *c*) $v = \lambda f_2$ o *d*) $f = \lambda/v$.

63. **OM** Una onda en agua es *a*) transversal, *b*) longitudinal, *c*) una combinación de transversal y longitudinal o *d*) nada de lo anterior.

64. **PC** ¿Qué tipo(s) de onda(s), transversales o longitudinales, se propagan por *a*) sólidos, *b*) líquidos y *c*) gases?

65. ● La ▼figura 13.26 muestra fotografías de dos ondas mecánicas. Identifique cada una como transversal o longitudinal.



▲ **FIGURA 13.26 ¿Transversales o longitudinales?** Véase el ejercicio 65.

66. Parados en una colina mirando un maizal crecido, vemos una hermosa "ola" que recorre el campo cuando hay una brisa. ¿De qué tipo de onda se trata? Explique por qué.

67. ● Una onda sonora longitudinal tiene una rapidez de 340 m/s en aire. Esta onda produce un tono con una frecuencia de 1000 Hz. ¿Qué longitud de onda tiene?

68. ● Una onda transversal tiene una longitud de onda de 0.50 m y una frecuencia de 20 Hz. ¿Qué rapidez tiene?

69. ● Un estudiante que lee su libro de física en el muelle de un lago nota que la distancia entre dos crestas de olas es de aproximadamente 0.75 m, y luego mide el tiempo entre que llegan dos crestas, obteniendo 1.6 s. ¿Qué rapidez aproximada tienen las olas?

70. ● Las ondas de luz viajan en el vacío con una rapidez de 300 000 km/s. La frecuencia de la luz visible es de aproximadamente 5×10^{14} Hz. ¿Qué longitud de onda aproximada tiene la luz?

71. ●● La gama de frecuencias sonoras que el oído humano puede captar se extiende de cerca de 20 Hz a 20 kHz. La rapidez del sonido en el aire es de 345 m/s. Exprese en longitudes de onda los límites de este intervalo audible.

72. ● Cierto láser emite luz con una longitud de onda de 633×10^{-9} m. ¿Cuál sería la frecuencia de esta luz en el vacío?

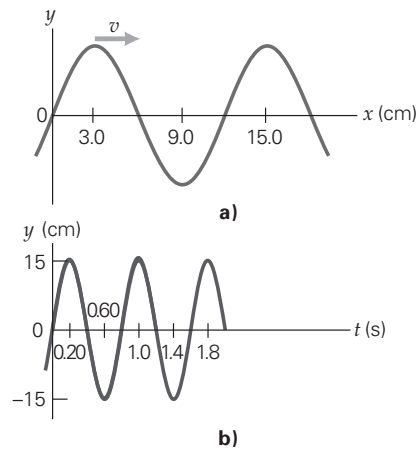
73. ●● Un láser emite una onda luminosa con una longitud de onda de 500 nm a una frecuencia de 4.00×10^{14} Hz. ¿Esta luz está viajando en el vacío? Compruebe su respuesta.

74. **El** ●● Las frecuencias de A.M. de una radio van desde 550 hasta 1600 kHz; y las de F.M., de 88.0 hasta 108 MHz. Todas estas ondas de radio viajan con una rapidez de 3.00×10^{8} m/s (rapidez de la luz). *a*) En comparación con las frecuencias de F.M., las de A.M. tienen longitudes de onda 1) más largas, 2) iguales o 3) más cortas. ¿Por qué? *b*) ¿Qué intervalos de longitud de onda tienen la banda de A.M. y la de F.M.?

75. ●● Un generador de sonar de un submarino produce ondas ultrasónicas periódicas con una frecuencia de 2.50 MHz. La longitud de onda de esas ondas en agua de mar es de 4.80×10^{-4} m. Cuando el generador se dirige hacia abajo, un eco reflejado por el suelo marino se recibe 10.0 s después. ¿Qué profundidad tiene el océano en ese punto? (Suponga que la longitud de onda es constante a todas las profundidades.)

76. ●● En la ▸figura 13.27a se muestra una onda que viaja en la dirección $+x$. El desplazamiento de la partícula en cierto punto del medio por el que la onda viaja se muestra en la figura 13.27b. *a*) ¿Qué amplitud tiene la onda viajera? *b*) ¿Qué rapidez tiene la onda?

77. ● Suponga que las ondas P y S (primarias y secundarias) de un terremoto con foco cercano a la superficie terrestre atraviesan la Tierra con rapidez promedio casi constante de 8.0 y 6.0 km/s, respectivamente. Suponga que las ondas no se desvían ni refractan. *a*) ¿Qué retraso hay entre las llegadas de ondas sucesivas a una estación de monitoreo sísmico, situada a una latitud de 90° respecto al epicentro (el punto en la superficie que está directamente sobre el foco) del terremoto? *b*) ¿Las ondas cruzan la frontera del manto? *c*) ¿Cuánto tardan las olas en llegar a una estación de monitoreo en el lado opuesto de la Tierra?



▲ **FIGURA 13.27 ¿Qué altura y qué rapidez?** Véase el ejercicio 76.

78. ●●● La rapidez de ciertas ondas longitudinales que viajan por una varilla sólida larga está dada por $v = \sqrt{Y/\rho}$, donde Y es el módulo de Young y ρ es la densidad del sólido. Si una perturbación tiene una frecuencia de 40 Hz, ¿qué longitud de onda tienen las ondas que produce en *a*) una varilla de aluminio y *b*) una varilla de cobre? [*Sugerencia:* véase las tablas 9.1 y 9.2.]

79. ●●● Fred golpea un riel de acero con un martillo, con una frecuencia de 2.50 Hz, y Vilma pega la oreja al riel a 1.0 km de distancia. *a*) ¿Cuánto tiempo después del primer golpe Vilma escuchará el sonido? *b*) ¿Qué tiempo transcurre entre que escucha dos pulsaciones sonoras sucesivas? [*Sugerencia:* véase las tablas 9.1 y 9.2 y el ejercicio 78.]

80. ●●● Una onda viajera transversal senoidal de una cuerda tiene una frecuencia de 10.0 Hz y viaja a 25.0 m/s a lo largo del eje x. *a*) Localice los puntos en la cuerda que tienen rapidez máxima en un momento dado. *b*) Determine la rapidez máxima y *c*) la distancia entre los puntos altos y bajos sucesivos en la cuerda.

13.4 Propiedades de las ondas

81. **OM** Cuando dos ondas se encuentran y se interfieren, la forma de onda resultante depende *a*) de la reflexión, *b*) de la refracción, *c*) de la difracción o *d*) de la superposición.

82. **OM** La refracción *a*) implica interferencia constructiva, *b*) se refiere a un cambio de dirección en las fronteras entre medios, *c*) es idéntica a la difracción o *d*) sólo se da en medios sólidos u ondas mecánicas.

83. **OM** Podemos escuchar personas que hablan a la vuelta de la esquina, gracias primordialmente *a*) a la reflexión, *b*) a la refracción, *c*) a la interferencia o *d*) a la difracción.

84. **PC** ¿Qué se destruye cuando hay interferencia destructiva? ¿Qué sucede con la energía? Explique.

85. **PC** Los delfines y los murciélagos conocen la ubicación de sus presas emitiendo ondas ultrasónicas. ¿Qué fenómeno ondulatorio interviene?

86. **PC** Si las ondas sonoras fueran dispersivas (es decir, si la rapidez del sonido dependiera de su frecuencia), ¿qué consecuencias percibiríamos al escuchar una orquesta en una sala de conciertos?

13.5 Ondas estacionarias y resonancia

87. **OM** Para que dos ondas viajeras formen ondas estacionarias, deben tener la misma *a*) frecuencia, *b*) amplitud, *c*) rapidez o *d*) todo lo anterior.

88. **OM** Los puntos de máxima amplitud en una cuerda con forma de onda estacionaria se llaman *a*) nodos, *b*) antinodos, *c*) fundamentales, *d*) puntos de resonancia.

89. **OM** Cuando una cuerda de violín estirada oscila en su tercer modo armónico, la onda estacionaria en la cuerda muestra *a*) 3 longitudes de onda, *b*) 1/3 de longitud de onda, *c*) 3/2 de longitud de onda o *d*) 2 longitudes de onda.

90. **PC** Un columpio infantil (un péndulo) sólo tiene una frecuencia natural f_1, pero se le puede impulsar o empujar sin sacudidas con frecuencias de $f_1/2$, $f_1/3$, $2f_1$ y $3f_1$. ¿Cómo es esto posible?

91. **PC** Al frotar la boca circular de una copa de cristal delgado con un dedo húmedo, es posible hacer que el cristal "cante". (Inténtelo.) *a*) ¿Qué causa esto? *b*) ¿Qué sucedería con la frecuencia del sonido si se agregara agua a la copa?

92. **PC** Una onda viaja por una cuerda que tiene tensión fija. ¿Cómo cambia la longitud de onda si se aumenta la frecuencia? ¿Cómo cambia la rapidez de la onda?

93. **PC** Dada la misma tensión y longitud, ¿qué cuerda de guitarra sonará más aguda (frecuencia más alta), una gruesa o una delgada?

94. ● La frecuencia fundamental de una cuerda estirada es de 150 Hz. Calcule las frecuencias de *a*) el segundo armónico y *b*) el tercer armónico.

95. ● Si la frecuencia del tercer armónico de una cuerda que vibra es de 450 Hz, ¿cuál es la frecuencia fundamental del primer armónico?

96. ● Se forma una onda estacionaria en una cuerda estirada de 3.0 m de longitud. ¿Qué longitud de onda tienen *a*) el primer armónico y *b*) el tercer armónico?

97. **EI** ●● Una fuerza estira un trozo de tubo de caucho. *a*) Si la fuerza aumenta al doble, la rapidez de una onda transversal 1) se duplica, 2) se reduce a la mitad, 3) aumenta en $\sqrt{2}$ o 4. se reduce en $\sqrt{2}$. ¿Por qué? *b*) Si la densidad de masa lineal de un tubo de 10.0 m de longitud es de 0.125 kg/m y lo estira una fuerza de 9.00 N, ¿qué rapidez tendrá la onda transversal en el tubo? *c*) Determine las frecuencias naturales de sus ondas.

98. ●● ¿Se formará una onda estacionaria en una cuerda estirada de 4.0 m de longitud, que transmite ondas con una rapidez de 12 m/s, si se le impulsa con una frecuencia de *a*) 15 Hz o *b*) 20 Hz?

99. ●● Dos ondas de la misma amplitud y con longitud de onda de 0.80 m viajan en direcciones opuestas con una rapidez de 250 m/s por una cuerda de 2.0 m de longitud. ¿Con qué modo armónico se establecerá la onda estacionaria en la cuerda?

100. ●● En un violín, una cuerda correctamente afinada en la nota musical la tiene una frecuencia de 440 Hz. Si una cuerda correspondiente a la nota la produce un sonido a 450 Hz bajo una tensión de 500 N, ¿cuál debería ser la tensión para producir la frecuencia correcta?

101. ●● El departamento de física de una universidad compra 1000 m de cuerda y calcula que su masa total es de 1.50 kg. Esta cuerda se utiliza para realizar una demostración en el laboratorio de una onda estacionaria entre dos postes colocados a 3.0 m uno de otro. Si la frecuencia del primer sobretono deseado (segundo armónico) es de 35 Hz, ¿cuál será la tensión de la cuerda que se requiere?

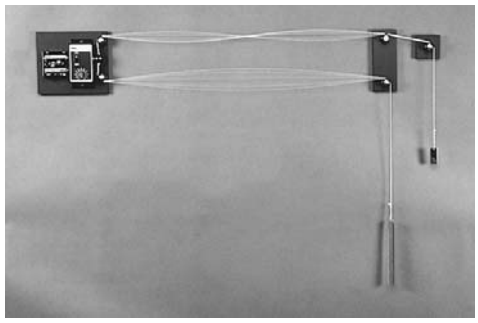
102. ●● Dos cuerdas estiradas, A y B, tienen la misma tensión y densidad lineal de masa. ¿Alguno de los seis primeros armónicos son iguales, si las longitudes de las cuerdas son *a*) 1.0 y 3.0 m o *b*) 1.5 y 2.0 m, respectivamente?

103. ●● Usted está generando dos ondas estacionarias en una cuerda. Cuenta con una cuerda uniforme de piano con una longitud de 3.0 m y una masa de 150 g. Usted corta la cuerda en dos (una parte mide 1.0 m de longitud, y la otra 2.0 m) y coloca ambas partes bajo tensión. ¿Cuál debería ser la razón de las tensiones (expresada de la menor con respecto a la mayor), de manera que sus frecuencias fundamentales sean iguales?

104. **EI** ●● Una cuerda de violín está afinada a cierta frecuencia (la frecuencia fundamental o primer armónico). *a*) Si un violinista quiere una frecuencia más alta, ¿la cuerda deberá 1) alargarse, 2) dejarse de la misma longitud o 3) acortarse? ¿Por qué? *b*) Si la cuerda está afinada a 520 Hz y el violinista pisa la cuerda a un octavo de su longitud midiendo desde el extremo del cuello del violín, ¿qué frecuencia tendrá la cuerda cuando el instrumento se toque así?

105. ●●● Una cuerda uniforme tirante con una longitud de 2.50 m se ata por sus dos extremos y se coloca bajo una tensión de 100 N. Cuando vibra en el modo de su segundo sobretono (trace un boceto), el sonido que emite tiene una frecuencia de 75.0 Hz. ¿Cuál será la masa de la cuerda?

106. ●●● En un experimento de laboratorio común sobre ondas estacionarias, se producen ondas en una cuerda estirada con un vibrador eléctrico que oscila a 60 Hz (▼figura 13.28). La cuerda pasa por una polea y tiene un gancho en su extremo. La tensión de la cuerda se varía colgando pesos del gancho. Si la longitud activa de la cuerda (la parte que vibra) es de 1.5 m, y este tramo de cuerda tiene una masa de 0.10 g, ¿qué masa deberá colgarse para producir los primeros cuatro armónicos en ese tramo?



▲ **FIGURA 13.28 Ondas estacionarias en cuerdas** Cuerdas vibratorias gemelas con ondas estacionaras. Este modelo para demostración permite variar la tensión, la longitud y el tipo (densidad lineal de masa) de la cuerda. También se puede ajustar la frecuencia de vibración. Véase el ejercicio 106.

Ejercicios adicionales

107. La velocidad de un sistema masa-resorte que oscila verticalmente está dada por $v = (-0.600\ \text{m/s})\ \text{sen}(6t)$. *a*) ¿Dónde se inicia el movimiento y en qué dirección se mueve el objeto inicialmente? Describa la fase inicial del movimiento. *b*) Calcule el periodo del movimiento. *c*) Determine la ecuación de movimiento (y). *d*) Calcule la aceleración máxima.

108. Un resorte vertical tiene una masa de 500 g atada a él y a la masa se le imprime una velocidad inicial hacia abajo de 1.50 m/s. La masa se desplaza hacia abajo 25.3 cm antes de detenerse y regresar. *a*) Determine la constante de resorte. *b*) ¿Cuál es su rapidez después de que cae 5.00 cm? *c*) ¿Cuál es la aceleración de la masa en el punto inferior del movimiento?

109. Un estudiante corta 5.00 m de cuerda de un carrete y calcula que su masa es de 10.0 g. Entonces, estira y "pellizca" un tramo de 2.00 m de esta cuerda. El primer sobretono o segundo armónico de la cuerda vibra a 25.0 Hz. *a*) Calcule la tensión a la que está sometida la cuerda. *b*) Calcule la frecuencia fundamental para esta cuerda. *c*) Si usted desea incrementar la frecuencia fundamental en un 25%, ¿dónde tendría que agarrar la cuerda y en qué parte la "pellizcaría"?

110. Durante un terremoto, la esquina de un edificio alto oscila con una amplitud de 20 cm a 0.50 Hz. Calcule las magnitudes de *a*) el desplazamiento máximo, *b*) la velocidad máxima y *c*) la aceleración máxima de la esquina del edificio. (Suponga MAS.)

111. Una masa que descansa en una superficie horizontal sin fricción está conectada a un resorte fijo. La masa se desplaza 16 cm respecto a su posición de equilibrio y luego se suelta. En $t = 0.50$ s, la masa está a 8.0 cm de su posición de equilibrio (y no ha pasado aún por ahí). Calcule el periodo de oscilación de la masa.

PHYSLET® Los siguientes problemas de física Physlet se pueden usar con este capítulo.
16.2, 16.3, 16.5, 16.6, 16.7, 16.8, 17.1, 17.2, 17.3, 17.4, 17.5, 17.6, 17.8

CAPÍTULO 14

SONIDO

14.1 Ondas sonoras 468

14.2 La rapidez del sonido 471

14.3 Intensidad del sonido y nivel de intensidad del sonido 474

14.4 Fenómenos acústicos 481

14.5 El efecto Doppler 484

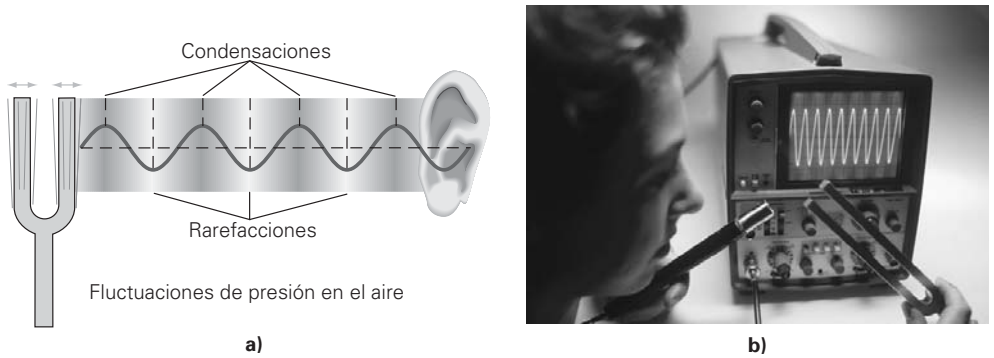
14.6 Instrumentos musicales y características del sonido 491

HECHOS DE FÍSICA

- El sonido es *a*) la propagación física de una perturbación (energía) en un medio, y *b*) la respuesta fisiológica y psicológica que, por lo general, se da a las ondas de presión en el aire. (Por ejemplo, considere el caso de un árbol que se cae en el bosque y al que nos referimos en la introducción de este capítulo.)
- Los seres humanos no escuchamos los sonidos con frecuencias por debajo de 20 Hz, que corresponden al infrasonido. Tanto los elefantes como los rinocerontes se comunican mediante infrasonido. Éste se produce por avalanchas, meteoros, tornados, terremotos y olas oceánicas. Algunas aves migratorias son capaces de escuchar los infrasonidos que se producen cuando se rompen las olas oceánicas, lo cual les permite orientarse con respecto a la costa.
- El rango normal de frecuencias que el ser humano puede oír va de 20 Hz a 20 kHz.
- La parte visible del oído externo es el pabellón auricular. Muchos animales pueden mover el pabellón para enfocar su audición en cierta dirección; los seres humanos no.
- El ultrasonido (frecuencia $>$ 20 kHz) se utiliza para obtener imágenes del feto, es decir, la "primera fotografía de un bebé".
- La exposición al sonido intenso —por ejemplo, de las bandas de rock— es una causa común del tinnitus o zumbido de oídos.

¡Muy buenas vibraciones! Mucho debemos a las ondas sonoras. No sólo nos proporcionan una de nuestras principales fuentes de esparcimiento en la música, sino que además nos ofrecen una gran cantidad de información vital sobre nuestro ambiente, desde el repicar de una campanilla de puerta, la estridente advertencia de una sirena policiaca, hasta el gorjeo de un jilguero. De hecho, las ondas sonoras son la base de nuestra forma principal de comunicación: el lenguaje. Ellas pueden también constituir una distracción sumamente irritante (el ruido). Pero las ondas sonoras se vuelven música, lenguaje, o ruido sólo cuando nuestros oídos las perciben. Físicamente, los sonidos tan sólo son ondas que se propagan en sólidos, líquidos y gases. Sin un medio no habría sonido; en el vacío, como en el espacio exterior, sólo hay silencio.

Esta distinción entre los significados sensoriales y físicos del sonido nos otorga una manera de responder la vieja pregunta filosófica: ¿si un árbol cae en el bosque donde nadie puede oír la caída, habría ahí sonido? La respuesta depende de cómo se define el sonido: sería "no" si pensamos en términos de oído sensorial; pero sería "sí" cuando consideramos sólo las ondas físicas. Como las ondas de sonido están alrededor de nosotros la mayoría del tiempo, estamos expuestos a muchos fenómenos interesantes derivados del sonido. En este capítulo exploraremos algunos de los más importantes.



▲ **FIGURA 14.1 Las vibraciones forman ondas** ***a)*** Un diapasón en vibración perturba el aire, produciendo regiones alternadas de alta presión (condensaciones) y regiones de baja presión (rarefacciones), que forman ondas sonoras. ***b)*** Después de ser recogidas por un micrófono, las variaciones de presión se convierten en señales eléctricas. Cuando esas señales se muestran en un osciloscopio, resulta evidente la forma senoidal de la onda.

PHYSLET®

Ilustración 18.2 Vista molecular de una onda sonora

14.1 Ondas sonoras

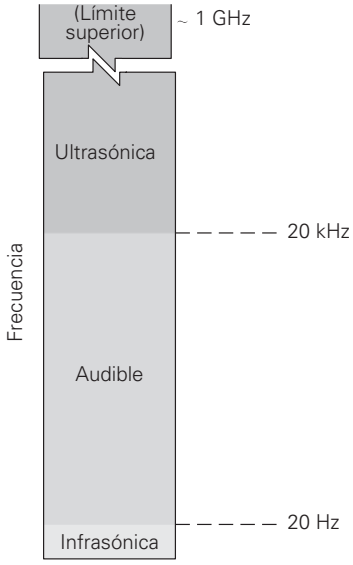
OBJETIVOS: *a*) Definir sonido y *b*) explicar el espectro de frecuencia del sonido.

Para que existan las ondas sonoras debe haber una perturbación o vibraciones en algún medio. Esta perturbación puede ser generada, por ejemplo, al aplaudir o cuando derrapan los neumáticos de un automóvil al detenerse súbitamente. Bajo el agua, usted puede oír el golpeteo de las rocas entre sí. Si pone el oído cerca de una pared delgada, escuchará los sonidos que provienen del otro lado de la pared. Las **ondas sonoras** en gases y líquidos (ambos son fluidos) son principalmente ondas longitudinales. Sin embargo, las perturbaciones sónicas que se mueven a través de sólidos pueden tener componentes tanto longitudinales como transversales. Las acciones intermoleculares en sólidos son mucho más fuertes que en los fluidos y permiten que se propaguen componentes transversales.

Las características de las ondas sonoras pueden visualizarse considerando aquellas producidas por un diapasón, esencialmente una barra metálica doblada en forma de U (▲figura 14.1). Los brazos del diapasón vibran al ser golpeados; éste vibra a su frecuencia fundamental (con un antinodo en el extremo de cada diente), y se oye entonces un tono único. (Un *tono* es un sonido con una frecuencia definida.) Las vibraciones perturban el aire produciendo regiones alternadas de alta presión llamadas *condensaciones* y regiones de baja presión llamadas *rarefacciones*. Si el diapasón vibra de manera constante, esas perturbaciones se propagan hacia el exterior, y una serie de ellas puede describirse mediante una onda senoidal.

Cuando las perturbaciones que viajan a través del aire llegan al oído, el tímpano (una pequeña membrana) se pone a vibrar por las variaciones de presión. Al otro lado del tímpano, pequeños huesos (el martillo, el yunque y el estribo) llevan las vibraciones al oído interno donde son recogidas por el nervio auditivo. (Véase la sección A fondo 14.2 sobre el oído en la p. 475.)

Las características del oído limitan la percepción del sonido. Sólo las ondas de sonido con frecuencias entre aproximadamente 20 Hz y 20 kHz (kilohertz) inician impulsos nerviosos que son interpretados como sonido por el cerebro humano. Este intervalo de frecuencias se conoce como **región audible del espectro de frecuencia del sonido** (◂figura 14.2). La audición es más precisa en el intervalo de 1000 a 10 000 Hz, con el habla principalmente en el intervalo de 1000 a 4000 Hz.



▲ **FIGURA 14.2 Espectro de frecuencia del sonido** La región audible del sonido para los seres humanos se encuentra entre aproximadamente 20 Hz y 20 kHz. Por debajo de este intervalo se tiene la región infrasónica, y arriba de él la región ultrasónica. El límite superior es aproximadamente de 1 GHz, debido a las limitaciones elásticas de los materiales.

Infrasonido

Las frecuencias menores de 20 Hz están en la **región infrasónica**. Las ondas en esta región, que los humanos no pueden oír, se encuentran en la naturaleza. Las ondas longitudinales generadas por sismos tienen frecuencias infrasónicas, y usamos esas ondas para estudiar el interior de la Tierra (véase sección A fondo 13.1, p. 450). Las ondas infrasónicas, o *infrasonido*, son también generadas por el viento y los patrones del clima. Los elefantes y el ganado tienen respuestas auditivas en la región infrasónica y pueden incluso advertir anticipadamente sobre sismos y perturbaciones climáticas, como los tornados.

(Los elefantes pueden detectar sonidos con frecuencias tan bajas como 1 Hz; pero si se trata de dar premios a la captación del infrasonido, las palomas obtienen el primer lugar, ya que son capaces de detectar frecuencias de sonido tan bajas como 0.1 Hz.) Se ha encontrado que el vórtice de un tornado produce infrasonido. Además, la frecuencia cambia, pues se registran bajas frecuencias cuando el vórtice es pequeño, y altas cuando el vórtice es grande. El infrasonido puede detectarse a varias millas de un tornado, de manera que hay formas de advertir cuando uno de estos fenómenos se aproxima.

Existen estaciones para captar el infrasonido. Las explosiones nucleares producen infrasonido, y después de que se firmó el Tratado para la Prohibición de las Pruebas Nucleares en 1963, se establecieron estaciones que captan el infrasonido para detectar posibles violaciones al tratado. Ahora, estas estaciones se utilizan también para detectar otras fuentes de infrasonido, como terremotos y tornados.

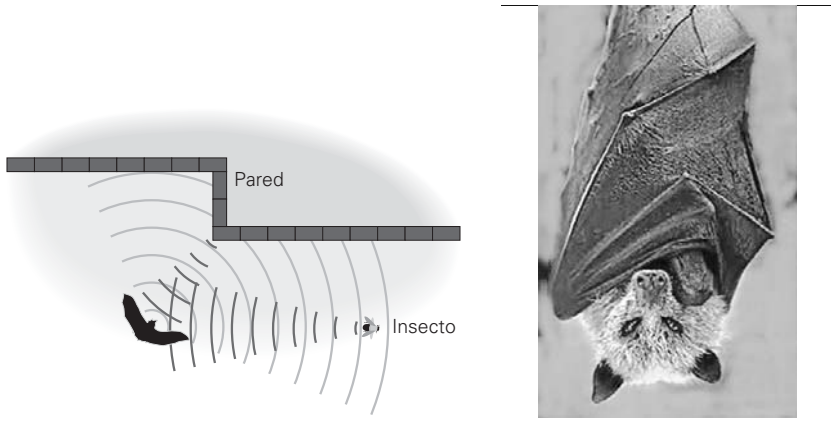
Ultrasonido

Por arriba de 20 kHz se tiene la **región ultrasónica**. Las ondas ultrasónicas pueden ser generadas por vibraciones de alta frecuencia en cristales. Las ondas ultrasónicas, o *ultrasonido*, no pueden ser detectadas por los seres humanos, pero pueden serlo por otros animales. La región audible para los perros se extiende a cerca de 45 kHz, por lo que se emplean silbatos ultrasónicos o "silenciosos" para llamarlos sin molestar a la gente. Los gatos y los murciélagos tienen rangos audibles aún mayores, hasta de aproximadamente 70 y 100 kHz, respectivamente.

Hay muchas aplicaciones prácticas del ultrasonido. Como el ultrasonido puede viajar varios kilómetros en el agua, se utiliza en el sonar para detectar objetos sumergidos y saber a que distancia están y, al igual que el radar, emplea ondas de radio. Los pulsos de sonido generados por aparatos de sonar son reflejados por objetos submarinos, y los ecos resultantes son recogidos por un detector. El tiempo requerido por un pulso de sonido para efectuar un viaje redondo, junto con la rapidez del sonido en el agua, da la distancia o alcance del objeto. Los pescadores también utilizan ampliamente el sonar para detectar los bancos de peces y, de manera similar, el ultrasonido se usa en las cámaras de autoenfoque. La medición de una distancia permite efectuar ajustes focales.

En la naturaleza hay buenos ejemplos de la aplicación del sonar ultrasónico. El sonar apareció en el reino animal bastante antes de que fuera desarrollado por los ingenieros. En sus vuelos nocturnos de cacería, los murciélagos usan un tipo de sonar natural para desplazarse hacia adentro y hacia afuera de sus cuevas, así como para localizar y atrapar insectos voladores (▼figura 14.3a). Los murciélagos emiten pulsaciones de ultrasonido y siguen a sus presas por medio de los ecos reflejados. Esta técnica se conoce como *localización por eco*. El sistema auditivo y las habilidades de procesamiento de datos de los murciélagos son en verdad sorprendentes. (Note el tamaño de las orejas del murciélago en la figura 14.3b.)

Con base en la intensidad del eco, un murciélago puede saber qué tan grande es un insecto: cuanto más pequeño sea el insecto, menos intenso será el eco. La dirección del movimiento de un insecto es sentida por la frecuencia del eco. Si un insecto se está alejando del murciélago, el eco tendrá una menor frecuencia. Si el insecto se está acercando hacia el murciélago, el eco tendrá una frecuencia mayor. El cambio de frecuencia se conoce como *efecto Doppler*, que se presenta con más detalle en la sección 14.5. los



◀ **FIGURA 14.3** Localización por eco ***a)*** Con ayuda de sus propios sistemas naturales de sonar, los murciélagos cazan insectos voladores. Los murciélagos emiten pulsos de ondas ultrasónicas, que se encuentran dentro de su región audible, y usan los ecos reflejados de sus presas para guiar los ataques. ***b)*** Observe el tamaño de las orejas: excelentes para la audición ultrasónica. ¿Sabe usted por qué los murciélagos descansan colgándose de cabeza? Lea el texto para conocer la respuesta.

A FONDO 14.1 EL ULTRASONIDO EN LA MEDICINA

Probablemente las aplicaciones mejor conocidas del ultrasonido se den en la medicina. Por ejemplo, el utrasonido se emplea para obtener la imagen de un feto evitando el uso de los rayos X potencialmente peligrosos. Generadores (transductores) ultrasónicos hechos de materiales piezoeléctricos producen pulsaciones de alta frecuencia que se utilizan para explorar la región deseada del cuerpo.* Las pulsaciones se reflejan cuando encuentran un límite entre dos tejidos cuyas densidades son distintas. Tales reflejos son monitoreados por un transductor de recepción, y una computadora construye una imagen a partir de las señales reflejadas. Las imágenes del feto se graban varias veces cada segundo conforme el transductor escanea el vientre de la madre. En la figura 1 se muestra una fotografía estática o "ecograma" de un feto. Un feto bien desarrollado, el cual está rodeado por un saco que contiene el fluido amniótico, puede distinguirse de otros órganos anatómicos, y se pueden detectar su posición, tamaño, sexo, e incluso algunas malformaciones.

El ultrasonido también se utiliza para evaluar el riesgo de sufrir un ataque de apoplejía. Sedimentos de placa podrían acumularse en las paredes internas de los vasos sanguíneos y limitar el flujo de sangre. Una de las principales cusas de la apoplejía es la obstrucción de la arteria carótida en el cuello, que afecta directamente el abasto de sangre al cerebro. La presencia y severidad de tales obstrucciones se puede detectar con el ultrasonido (figura 2). Un generador utrasónico se coloca en el cuello, de manera que los reflejos de las células sanguíneas que se mueven a través de la arteria son monitoreados, y se detecta la rapidez del flujo sanguíneo, lo cual sería indicativo de la gravedad de alguna obstrucción. Este procedimiento implica el cambio de frecuencia de las ondas

*Cuando un campo eléctrico se aplica a un material piezoeléctrico, experimenta distorsión mecánica. Las aplicaciones periódicas permiten la producción de ondas ultrasónicas. En cambio, cuando el material experimenta presión mecánica, desarrolla voltaje eléctrico. Esto permite la detección de ondas ultrasónicas.

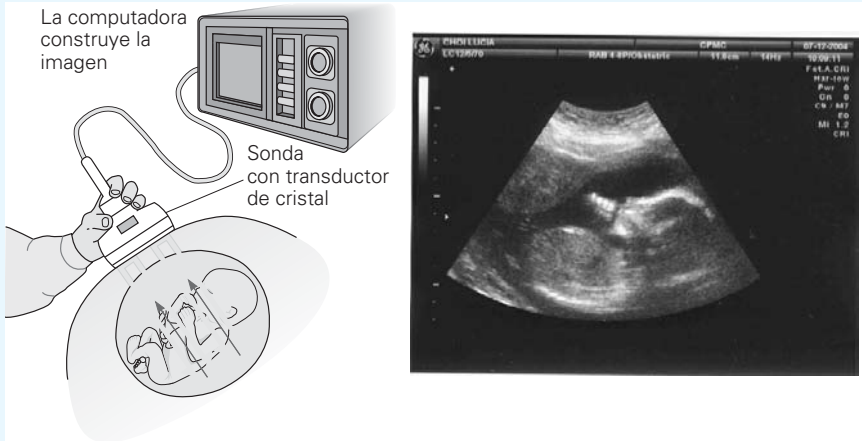


FIGURA 1 Ultrasonido en uso
El ultrasonido generado por transductores, que convierten oscilaciones eléctricas en vibraciones mecánicas y viceversa, se transmite a través de los tejidos y se refleja por las estructuras internas. Las ondas reflejadas son detectadas por los transductores, y sus señales se emplean para construir una imagen, o ecograma, como el que se muestra aquí para un feto bien desarrollado.

delfines también usan sonares ultrasónicos para localizar objetos, lo cual es muy eficiente ya que el sonido viaja casi cinco veces más rápido en el agua que en el aire.

El murciélago, único mamífero que ha desarrollado la capacidad de volar, es una criatura muy difamada y temida. Sin embargo, como los murciélagos se alimentan de toneladas de insectos al año, salvan al medio ambiente del uso de grandes cantidades de insecticidas. "Ciego como un murciélago" es una expresión común, aunque en realidad ellos tienen una visión bastante buena, que complementa su uso de la localización por medio del eco. Finalmente, ¿sabe usted por qué los murciélagos descansan colgados de cabeza (figura 14.13b)? Porque es su posición de despegue. A diferencia de las aves, no pueden despegar desde el suelo. Sus alas no producen suficiente fuerza de sustentación que les permita despegar directamente del suelo, y sus patas son tan pequeñas y subdesarrolladas que no podrían correr para generar una rapidez de despegue. Por ello usan sus garras para colgarse de los techos, y luego entran en vuelo cuando están listos para hacerlo.

En medicina, el ultrasonido se usa para limpiar dientes con cepillos dentales ultrasónicos. En aplicaciones industriales y caseras, se usan los baños ultrasónicos para limpiar partes metálicas de máquinas, dentaduras y joyería. Las vibraciones del ultrasonido de alta frecuencia (longitud corta de onda) aflojan las partículas en lugares inaccesibles. Quizá la aplicación médica mejor conocida del ultrasonido sea la revisión del feto sin exponerlo a los potencialmente nocivos rayos X. (Véase la sección A fondo 14.1 sobre el ultrasonido en la medicina.) Además el ultrasonido se utiliza en el diagnóstico de cálculos biliares y piedras en los riñones, así como para disolverlos mediante una técnica llamada *litotripsia* (palabra que se deriva del griego "demoler").

reflejadas, como en el caso del *efecto Doppler*. (Veremos más sobre esto en la sección 14.5, junto con el "flujómetro Dopler".)

Otro dispositivo muy conocido es el bisturí ultrasónico, el cual emplea energía ultrasónica tanto para que el corte sea preciso como para favorecer la coagulación. Con vibraciones de casi 55 kHz. El bisturí corta pequeñas incisiones y, al mismo tiempo, hace que se sellen los vasos sanguíneos: una especie de cirugía "sin sangre", digamos. El bisturí ultrasónico se utiliza en procedimientos ginecológicos, como la eliminación de tumores fibrosos, amigadalectomías y muchos otro tipos de cirugías.†

†Uno de los inventos más destacados y complicados de la naturaleza es la coagulación sanguínea. Puede salvar vidas: cuando se forma y tapa un sitio con hemorragia; o puede hacer peligrar la vida cuando bloquea arterias en el corazón o en el cerebro.

En el caso de pérdida incontrolable de sangre, como las heridas ocasionadas por accidentes automovilísticos o las recibidas en combate, la rápida hemostasis (cese de la hemorragia) es esencial. Las soluciones que se investigan y desarrollan incluyen el diagnóstico ultrasónico para detectar el lugar de la hemorragia y el ultrasonido enfocado de alta intensidad (UEAI) para inducir la hemostasis mediante la cauterización ultrasónica. Durante muchos años, en China el UEAI ha resultado exitoso y se ha vuelto el tratamiento preferido para muchos tipos de cáncer.

Nota: adaptada de la conferencia plenaria dada por el doctor Lawrence A. Crum en el 18º Congreso Internacional sobre Acústica en Kyoto, Japón, en el verano de 2004. El profesor Crums trabaja en el Laboratorio de Física Aplicada en la Universidad de Washington en Seattle.

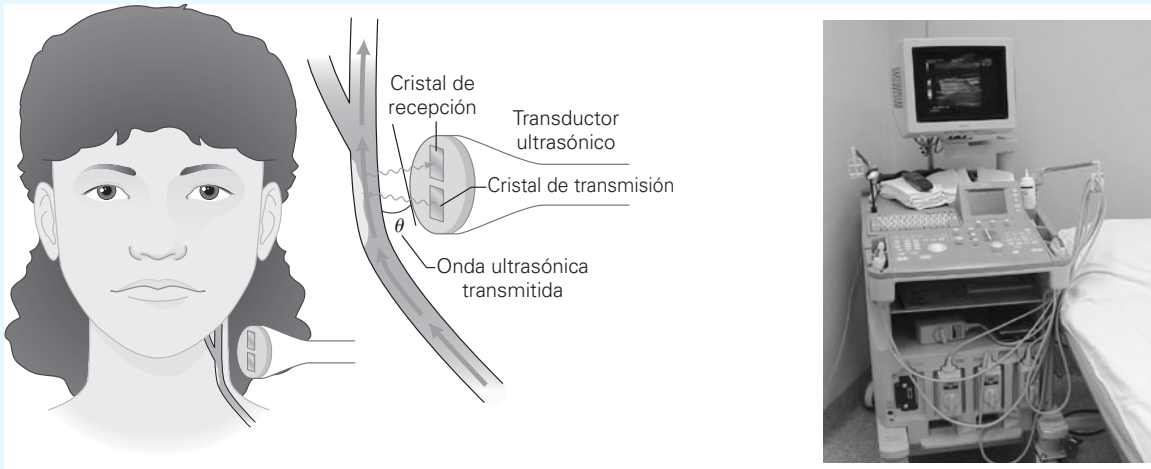


FIGURA 2 ¿Bloqueo de la arteria carótida? El ultrasonido se usa para medir el flujo de la sangre en la arteria carótida del cuello para detectar si hay alguna obstrucción. Véase el texto para la descripción.

Las frecuencias ultrasónicas se extienden hasta el intervalo de los megahertz (MHz); pero el espectro de frecuencias de sonidos no continúa indefinidamente. Hay un límite superior de aproximadamente 10^9 Hz, o 1 GHz (gigahertz), el cual se determina por el límite superior de la elasticidad de los materiales a través de los cuales se propaga el sonido.

14.2 La rapidez del sonido

OBJETIVOS: *a*) Explicar cómo la rapidez del sonido es diferente en medios diferentes y *b*) describir la dependencia de la temperatura de la rapidez del sonido en el aire.

En general, la rapidez con que una perturbación se mueve a través de un medio depende de la elasticidad y la densidad del medio. Por ejemplo, como aprendimos en el capítulo 13, la rapidez de una onda en una cuerda estirada está dada por $v = \sqrt{F_T/\mu}$, donde F_T es la tensión en la cuerda y μ es la densidad de masa lineal de la cuerda.

Expresiones similares describen la rapidez de las ondas en sólidos y líquidos, para los cuales la elasticidad se expresa en términos de módulos (capítulo 9). En general, la rapidez del sonido en un sólido y en un líquido está dada por $v = \sqrt{Y/\rho}$ y $v = \sqrt{B/\rho}$, respectivamente, donde U es el módulo de Young, B es el módulo volumétrico y r es la densidad. La rapidez del sonido en un gas es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la masa molecular; sin embargo, la ecuación correspondiente es más complicada y no se presentará aquí.

TABLA 14.1

Rapidez del sonido en varios medios (valores típicos)

Medio	*Rapidez* (m/s)
Sólidos	
Aluminio	5100
Cobre	3500
Hierro	4500
Vidrio	5200
Poliestireno	1850
Zinc	3200
Líquidos	
Alcohol etílico	1125
Mercurio	1400
Agua	1500
Gases	
Aire (0°C)	331
Aire (100°C)	387
Helio (0°C)	965
Hidrógeno (0°C)	1284
Oxígeno (0°C)	316

Los sólidos son, en general, más elásticos que los líquidos, que a la vez son más elásticos que los gases. En un material altamente elástico, las fuerzas restauradoras entre los átomos o las moléculas ocasionan que una perturbación se propague más rápido. Así, por lo general la rapidez del sonido es entre 2 y 4 veces más rápida en sólidos que en líquidos, y de entre 10 y 15 veces más rápida en sólidos que en gases como el aire (tabla 14.1).

Si bien no se expresa explícitamente en las ecuaciones anteriores, la rapidez del sonido depende generalmente de la temperatura del medio. Por ejemplo, en el aire seco la rapidez del sonido es de 331 m/s (aproximadamente 740 mi/h) a 0°C. Conforme aumenta la temperatura, lo mismo sucede con la rapidez del sonido. Para *temperaturas ambientales normales*, la rapidez del sonido en el aire aumenta en aproximadamente 0.6 m/s por cada grado Celsius arriba de 0°C. Así, una buena aproximación para la rapidez del sonido en el aire para una temperatura específica (ambiental) está dada por

$$v = (331 + 0.6T_C)\ \text{m/s} \qquad \textit{rapidez del sonido en aire seco} \qquad (14.1)$$

donde T_C es la temperatura del aire en grados Celsius.* Las unidades asociadas con el factor 0.6 son metros por segundo por grado Celsius $[\text{m}/(\text{s}\cdot\text{C}°)]$.

Comparemos la rapidez del sonido en medios diferentes.

Ejemplo 14.1 ■ Sólido, líquido, gas: rapidez del sonido en medios diferentes

De sus propiedades materiales, encuentre la rapidez del sonido en *a*) una varilla sólida de cobre, *b*) agua líquida y *c*) aire a temperatura normal en interiores (20°C).

Razonamiento. Sabemos que la rapidez del sonido en un sólido o un líquido depende del módulo de elasticidad, así como de la densidad del sólido o líquido. Esos valores están disponibles en las tablas 9.1 y 9.2. La rapidez del sonido en el aire está dada por la ecuación 14.1.

Solución.

Dado: $Y_{Cu} = 11 \times 10^{10}\ \text{N/m}^2$
$B_{H_2O} = 2.2 \times 10^9\ \text{N/m}^2$
$\rho_{Cu} = 8.9 \times 10^3\ \text{kg/m}^3$
$\rho_{H_2O} = 1.0 \times 10^3\ \text{kg/m}^3$
(valores tomados de las tablas 9.1 y 9.2)
$T_C = 20°\text{C}$ (para el aire)

Encuentre: *a*) v_{Cu} (rapidez en cobre)
b) v_{H_2O} (rapidez en agua)
c) v_{aire} (rapidez en aire)

a) Para encontrar la rapidez del sonido en una varilla de cobre, usamos la expresión $v = \sqrt{Y/\rho}$:

$$v_{Cu} = \sqrt{\frac{Y}{\rho}} = \sqrt{\frac{11 \times 10^{10}\ \text{N/m}^2}{8.9 \times 10^3\ \text{kg/m}^3}} = 3.5 \times 10^3\ \text{m/s}$$

b) Para agua, $v = \sqrt{B/\rho}$:

$$v_{H_2O} = \sqrt{\frac{B}{\rho}} = \sqrt{\frac{2.2 \times 10^9\ \text{N/m}^2}{1.0 \times 10^3\ \text{kg/m}^3}} = 1.5 \times 10^3\ \text{m/s}$$

c) Para el aire a 20°C, por la ecuación 14.1, tenemos

$$v_{aire} = (331 + 0.6T_C)\ \text{m/s} = [331 + 0.6(20)]\ \text{m/s} = 343\ \text{m/s} = 3.43 \times 10^2\ \text{m/s}$$

Ejercicio de refuerzo. En este ejemplo, ¿cuántas veces más rápida es la rapidez del sonido en cobre *a*) que en el agua y *b*) que en el aire (a temperatura ambiente)? Compare sus resultados con los valores dados al inicio de la sección. (*Las respuestas de todos los Ejercicios de refuerzo se dan al final del libro.*)

*Una mejor aproximación de éstas y temperaturas superiores está dada por la expresión

$$v = \left(331\sqrt{1 + \frac{T_C}{273}}\right)\ \text{m/s}$$

En la tabla 14.1, véase v para aire a 100°C, que está fuera del rango normal de la temperatura ambiente.

Un valor generalmente útil para la rapidez del sonido en el aire es $\frac{1}{3}$ km/s (o $\frac{1}{5}$ mi/s). Usando este valor, usted puede, por ejemplo, estimar qué tan lejos cae un relámpago, contando el número de segundos entre el tiempo en que se observa el destello y el tiempo en que se oye el estruendo asociado. Como la velocidad de la luz es tan grande, usted ve el destello casi instantáneamente. Las ondas sonoras del trueno viajan relativamente con poca rapidez, aproximadamente a $\frac{1}{3}$ km/s. Por ejemplo, si el intervalo entre los dos eventos se mide igual a 6 s, el relámpago cayó aproximadamente a 2 km $\left(\frac{1}{3}\text{ km/s} \times 6\text{ s} = 2\text{ km o } \frac{1}{5}\text{ mi/s} \times 6\text{ s} = 1.2\text{ mi}\right)$.

Usted habrá notado también la demora en la llegada del sonido en relación con la de la luz en un juego de béisbol. Si está sentado en las gradas de los jardines, usted ve al bateador pegarle a la pelota antes de oír el golpe del bate contra la pelota.

Ejemplo 14.2 ■ ¿Buenas aproximaciones?

a) Demuestre qué tan buenas son las aproximaciones de $\frac{1}{3}$km/s y $\frac{1}{5}$mi/s para referirse a la rapidez del sonido. Considere condiciones de temperatura ambiente y aire seco. *b*) Determine el porcentaje de error de cada una.

Razonamiento. Se toma la rapidez real del sonido de la ecuación 14.1 y se convierten $\frac{1}{3}$km/s y $\frac{1}{5}$mi/s a m/s, para hacer la comparación.

Solución. Se listan los datos, junto con el cálculo de la rapidez del sonido:

Dados:

$$T_C = 20°\text{C (temperatura ambiente)}$$
$$v = (331 + 0.6T_C)\text{ m/s} = [331 + 0.6(20)]\text{ m/s} = 343\text{ m/s}$$
$$v_{km} = \tfrac{1}{3}\text{ km/s}$$
$$v_{mi} = \tfrac{1}{5}\text{ mi/s}$$

Encuentre: *a*) Cómo se comparan las aproximaciones con el valor real
b) Porcentaje de error

a) Entonces, al efectuar las conversiones:

$$v_{km} = \tfrac{1}{3}\text{ km/s}\,(10^3\text{ m/km}) = 333\text{ m/s}$$
$$v_{mi} = \tfrac{1}{5}\text{ mi/s}\,(1609\text{ m/mi}) = 322\text{ m/s}$$

Las aproximaciones son razonables, pero v_{km} resulta mejor.

b) El porcentaje de error está dado por la diferencia absoluta de los valores, dividido por el valor aceptado y multiplicado por 100%. Así, (donde las unidades se cancelan)

$$v_{km} = \tfrac{1}{3}\text{ km/s} \qquad 1 = \%\text{ de error} = \frac{|343 - 333|}{343} \times 100\% = \frac{10}{343} \times 100\% = 2.9\%$$
$$v_{mi} = \tfrac{1}{5}\text{ mi/s} \qquad 1 = \%\text{ de error} = \frac{|343 - 322|}{343} \times 100\% = \frac{21}{343} \times 100\% = 6.1\%$$

de manera que la aproximación de kilómetros por segundo es considerablemente mejor.

Ejercicio de refuerzo. Suponga que ocurre una tormenta con relámpagos en un día muy caluroso con una temperatura de 38°C y aire seco. ¿Los porcentajes de error en el ejemplo aumentan o disminuyen? Justifique su respuesta.

La rapidez del sonido en el aire depende de varios factores. La temperatura es el más importante, pero hay otras consideraciones, como la homogeneidad y la composición del aire. Por ejemplo, la composición del aire puede no ser "normal" en una área contaminada. Esos efectos son relativamente pequeños y no se consideran, excepto conceptualmente en el siguiente ejemplo.

Ejemplo conceptual 14.3 ■ Rapidez del sonido: viaje del sonido a lo largo y ancho

Note que la rapidez del sonido en aire *seco* a cierta temperatura está dada con buena aproximación por la ecuación 14.1. Sin embargo, el contenido de humedad del aire varía, y esta variación afecta la rapidez del sonido. A la misma temperatura, ¿el sonido viaja más rápido *a*) en aire seco o *b*) en aire húmedo?

Razonamiento y respuesta. De acuerdo con un viejo refrán, "cuando el sonido viaja lejos y de forma ancha, se aproxima un día tormentoso". Este refrán implica que el sonido viaja más rápido en un día muy húmedo, cuando es probable que ocurra una tormenta o precipitación. Pero, ¿es cierto esto?

Cerca del principio de esta sección, aprendimos que la rapidez del sonido en un gas es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la masa molecular del gas. Entonces, a presión constante, ¿el aire húmedo es más o menos denso que el aire seco?

En un volumen de aire húmedo, un gran número de moléculas de agua (H_2O) ocupan el espacio normalmente ocupado por las moléculas de nitrógeno (N_2) o por las de oxígeno (O_2), que constituyen el 98% del aire. Las moléculas de agua son menos masivas que las moléculas de nitrógeno y de oxígeno. [De la sección 10.3, las masas moleculares (fórmula) son H_2O, 18 g; N_2, 28 g; y O_2, 32 g.] Así, la masa molecular promedio de un volumen de aire húmedo es menor que la de aire seco, en tanto que la rapidez del sonido es mayor en aire húmedo.

Podemos ver esta situación de otra manera: como las moléculas de agua son menos masivas, tienen menos inercia y responden a una onda sonora más rápidamente que como lo hacen las moléculas de nitrógeno o de oxígeno. Por lo tanto, las moléculas de agua propagan más rápidamente la perturbación.

Ejercicio de refuerzo. Considerando sólo masas moleculares, ¿dónde esperaría usted una mayor rapidez del sonido: en nitrógeno, en oxígeno o en helio (a la misma temperatura y presión)? Explíquelo.

Nota: la humedad fue incluida aquí como una interesante consideración para la rapidez del sonido en el aire. Sin embargo, de ahora en adelante, al calcular la rapidez del sonido en el aire a cierta temperatura, consideraremos sólo aire seco (ecuación 14.1), a menos que se indique lo contrario.

Recuerde siempre que nuestro análisis supone generalmente condiciones ideales para la propagación del sonido. En realidad, la rapidez del sonido depende de muchos factores, uno de los cuales es la humedad, como lo muestra el ejemplo conceptual previo. Una variedad de otras propiedades afectan la propagación del sonido. Por ejemplo, preguntemos ¿por qué las sirenas de niebla de los barcos tienen una frecuencia o tono tan bajo? La respuesta es que las ondas sonoras de baja frecuencia viajan más lejos que las de alta frecuencia bajo condiciones idénticas. Este efecto se explica con un par de características de las ondas sonoras. Primero, la ondas sonoras son atenuadas (esto es, pierden energía) por la viscosidad del aire (sección 9.5). Segundo, las ondas sonoras tienden a interactuar con las moléculas de oxígeno y de agua en el aire. El resultado combinado de esas dos propiedades es que la atenuación total del sonido en el aire depende de la frecuencia del sonido: a mayor frecuencia, habrá mayor atenuación y la distancia recorrida será menor. Entonces la atenuación incrementa como el *cuadrado* del múltiplo de la frecuencia. Por ejemplo, un sonido a 200 Hz viajará 16 veces más lejos que un sonido a 800 Hz. Por ello se usan sirenas de niebla de baja frecuencia. Según esta dependencia de la frecuencia, habrá notado que cuando el relámpago de una tormenta se localiza a gran distancia, el trueno asociado es un ruido sordo de baja frecuencia. (Para más sobre nuestro sentido del oído, véase la sección A fondo 14.2.)

14.3 Intensidad del sonido y nivel de intensidad del sonido

OBJETIVOS: *a*) Definir intensidad del sonido y explicar cómo varía con la distancia desde una fuente puntual y *b*) calcular niveles de intensidad del sonido con la escala de decibeles.

El movimiento ondulatorio implica la propagación de energía. La razón de la transferencia de energía se expresa en términos de **intensidad**, que es la energía transportada por tiempo unitario a través de un área unitaria. Como la energía dividida entre tiempo es potencia, la intensidad es potencia dividida entre área:

$$\text{intensidad} = \frac{\text{energía/tiempo}}{\text{área}} = \frac{\text{potencia}}{\text{área}} \qquad \left[I = \frac{E/t}{A} = \frac{P}{A} \right]$$

Las unidades estándar de la intensidad (potencia/área) son watts por metro cuadrado (W/m^2).

A FONDO 14.2 LA FISIOLOGÍA Y LA FÍSICA DEL OÍDO Y DE LA AUDICIÓN

El oído consiste en tres partes básicas: el oído externo, el oído medio y el oído interno (figura 1). La parte visible del oído es el *pabellón auricular* (oreja) y recoge las ondas sonoras y se enfoca en ellas. Muchos animales pueden mover sus orejas para enfocar mejor su audición hacia una dirección específica; en general, los seres humanos no tienen esta habilidad y deben mover su cabeza. Los sonidos entran por el oído y viajan a través del *canal auditivo* hasta el *tímpano* del oído medio.

El tímpano es una membrana que vibra en respuesta a la presión de las ondas sonoras que lo afectan. Las vibraciones se transmiten a través del oído medio por un intrincado conjunto de huesos, llamados comúnmente el *martillo*, el *yunque* y el *estribo*. Estos huesos forman una conexión con la *ventana ovalada*, la abertura hacia el oído interno. El tímpano transmite vibraciones sonoras a los huesos del oído medio, los cuales a la vez transmiten las vibraciones a través de la ventana ovalada hacia el fluido del oído interno.

El oído interno incluye los *canales semicirculares*, la *cóclea* y el *nervio auditivo*. Los canales semicirculares y la cóclea se llenan con un líquido como el agua, el cual, junto con las células nerviosas en el canal semicircular, no juega ningún papel en el proceso de la audición, sino que son importantes para detectar movimientos rápidos y ayuda a controlar el equilibrio.

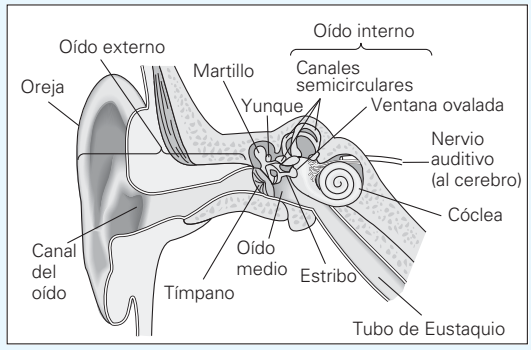


FIGURA 1 Anatomía del oído humano El oído convierte la presión en el aire en impulsos nerviosos eléctricos que el cerebro interpreta como sonidos.

La superficie interna de la cóclea, un órgano con forma de caracol, está conectada con más de 25 000 células nerviosas capilares. Éstas son ligeramente diferentes entre sí y tienen distintos niveles de resiliencia a las ondas de flujo que pasan a través de la cóclea. Diferentes células capilares tienen sensibilidad a frecuencias de onda específicas. Cuando la frecuencia de una onda de compresión coincide con la frecuencia natural de las células capilares, las células resuenan (sección 13.5) con una mayor amplitud de vibración. Esto origina la emisión de impulsos eléctricos desde las células nerviosas, que se transmiten hacia el nervio auditivo, el cual a la vez lleva las señales hacia el cerebro, donde se interpretan como sonido.

Las células capilares de la cóclea son muy importantes para la audición y el daño a tales células podría originar *tinnitus* o "zumbido de oídos". La exposición a ruidos muy fuertes es una causa común del tinnitus y a menudo también origina pérdida auditiva. Después de un concierto de rock estridente en un recinto cerrado, con frecuencia la gente escucha un zumbido temporal y pierde ligeramente su capacidad para escuchar. Las células capilares pueden dañarse temporal o permanentemente por ruidos fuertes. Con el tiempo, los ruidos fuertes pueden ocasionar lesiones permanentes porque se pierden células capilares. Como éstas tienen una frecuencia (resonancia) específica, una persona sería incapaz de escuchar sonidos a frecuencias particulares.

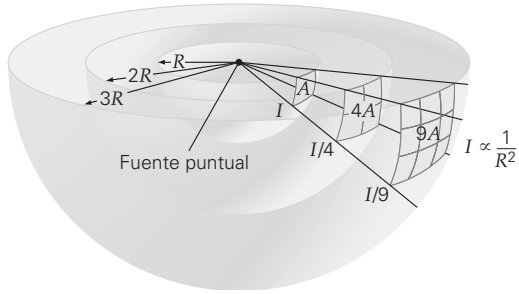
En una habitación silenciosa, coloque ambos pulgares en sus oídos, con una presión constante, y escuche. ¿Oye pulsaciones de sonido bajas? Está escuchando el sonido, a aproximadamente 25 Hz, hecho por las contracciones y el relajamiento de las fibras musculares de sus manos y sus brazos. Aunque en el intervalo audible, tales sonidos se escuchan con normalidad, ya que el oído humano es relativamente insensible a sonidos de baja frecuencia.

El oído medio está conectado con la garganta por el tubo de Eustaquio, cuyo extremo por lo general está cerrado. Se abre durante la deglución y en los bostezos para permitir que el aire entre y salga, de manera que se igualen las presiones interna y externa. Quizás usted haya experimentado la sensación de "tener los oídos tapados", cuando hay un cambio repentino en la presión atmosférica (por ejemplo, durante ascensos o descensos rápidos en un elevador o en un avión). La deglución abre los tubos de Eustaquio y alivia la diferencia de presión en el oído medio. (Véase la sección A fondo 9.2 sobre la presión atmosférica y los dolores de oído.)

Considere una fuente puntual que emite ondas esféricas de sonido, como se muestra en la ▾figura 14.4. Si no hay pérdidas, la intensidad del sonido a una distancia R desde la fuente es

$$I = \frac{P}{A} = \frac{P}{4\pi R^2} \quad \textit{(sólo fuente puntual)} \tag{14.2}$$

donde P es la potencia de la fuente y $4\pi R^2$ es el área de una esfera de radio R, a través de la cual la energía del sonido pasa perpendicularmente.



◀ **FIGURA 14.4 Intensidad de una fuente puntual** La energía emitida por una fuente puntual se dispersa igualmente en todas direcciones. Como la intensidad es potencia dividida entre el área, $I = P/A = P/(4\pi R^2)$, donde el área es la de una superficie esférica. Por lo tanto, la intensidad decrece con la distancia desde la fuente según $1/R^2$ (la figura no está a escala).

La intensidad de una fuente puntual de sonido es por lo tanto *inversamente proporcional al cuadrado de la distancia desde la fuente* (relación de cuadrado inverso). Dos intensidades a diferentes distancias desde una fuente de potencia constante pueden compararse como una razón:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{P/(4\pi R_2^2)}{P/(4\pi R_1^2)} = \frac{R_1^2}{R_2^2}$$

o bien,

$$\frac{I_2}{I_1} = \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^2 \quad \textit{(sólo fuente puntual)} \tag{14.3}$$

Suponga que se duplica la distancia desde una fuente puntual; esto es, $R_2 = 2R_1$, o $R_1/R_2 = \frac{1}{2}$. Entonces,

$$\frac{I_2}{I_1} = \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^2 = \left(\frac{1}{2}\right)^2 = \frac{1}{4}$$

e

$$I_2 = \frac{I_1}{4}$$

Como la intensidad decrece por un factor de $1/R^2$, al duplicarse la distancia, la intensidad decrece a un cuarto de su valor original.

Una buena forma de entender intuitivamente esta relación de cuadrado inverso consiste en fijarse en la geometría de la situación. Como lo muestra la figura 14.4, cuanto mayor sea la distancia desde la fuente, mayor será el área sobre la cual se dispersa una cantidad dada de energía sónica, y entonces menor será su intensidad. (Imagine que tiene que pintar dos paredes de áreas diferentes. Si tuviese la misma cantidad de pintura para usar en cada una, tendría que aplicarla menos espesamente sobre la pared mayor.) Como esta área aumenta como el cuadrado del radio R, la intensidad decrece correspondientemente, esto es, según $1/R^2$.

Umbral de audición: $I_o = 10^{-12}$ W/m^2

Umbral de dolor: $I_p = 1.0$ W/m^2

La intensidad del sonido es percibida por el oído como **sonoridad** o **intensidad sonora**. En promedio, el oído humano puede detectar ondas sonoras (a 1 kHz) con una intensidad tan baja como 10^{-12} W/m^2. A la intensidad (I_o) se le refiere como *umbral de audición*. Así, para oír un sonido, éste debe no sólo tener una frecuencia en el intervalo audible, sino también ser de intensidad suficiente. Cuando se incrementa la intensidad, el sonido percibido se vuelve más fuerte. A una intensidad de 1.0 W/m^2, el sonido es desagradablemente alto y podría causar dolor al oído. Esta intensidad (I_p) se llama *umbral de dolor*.

Note que los umbrales de dolor y audición difieren por un factor de 10^{12}:

$$\frac{I_p}{I_o} = \frac{1.0\ \text{W/m}^2}{10^{-12}\ \text{W/m}^2} = 10^{12}$$

Esto es, la intensidad en el umbral de dolor es un *billón* de veces mayor que en el umbral de audición. Dentro de este enorme intervalo, la sonoridad percibida no es directamente proporcional a la intensidad. Así, si se duplica la intensidad, la sonoridad percibida no se duplicará. De hecho, una duplicación de la sonoridad percibida corresponde aproximadamente a un incremento en intensidad por un factor de 10. Por ejemplo, un sonido con una intensidad de 10^{-5} W/m^2 sería percibido como dos veces tan alto como otro con una intensidad de 10^{-6} W/m^2. (Cuanto menor sea el exponente negativo, mayor será la intensidad.)

Nivel de intensidad del sonido: el bel y el decibel

Es conveniente comprimir el gran intervalo de intensidades del sonido usando una escala logarítmica (base 10) para expresar *niveles de intensidad*. El nivel de intensidad de un sonido debe ser referido a una intensidad estándar, que se toma como la del umbral de audición, $I_o = 10^{-12}$ W/m^2. Entonces, para cualquier intensidad I, el nivel de inten-

sidad es el logaritmo (o log) de la razón de I a I_o, esto es, $\log I/I_o$. Por ejemplo, si un sonido tiene una intensidad de $I = 10^{-6}\ \mathrm{W/m^2}$,

$$\log \frac{I}{I_o} = \log \frac{10^{-6}\ \mathrm{W/m^2}}{10^{-12}\ \mathrm{W/m^2}} = \log 10^6 = 6\ \mathrm{B}$$

(Recuerde que $\log_{10} 10^x = x$.)* Se considera que el exponente de la potencia de 10 en el término final del logaritmo tiene una unidad llamada **bel (B)**. Así, un sonido con una intensidad de $10^{-6}\ \mathrm{W/m^2}$ tiene un nivel de intensidad de 6 B en esta escala. De esta manera, el rango de intensidad desde 10^{-12} a $1.0\ \mathrm{W/m^2}$ se comprime en una escala de niveles de intensidad que va desde 0 hasta 12 B.

Nota: el bel fue nombrado así en honor del inventor del teléfono, Alexander Graham Bell.

Una escala más fina de la intensidad se obtiene usando una unidad más pequeña, llamada **decibel (dB)**, que es una décima del bel. El rango de 0 a 12 B corresponde a de 0 a 120 dB. En este caso, la ecuación para el **nivel de intensidad del sonido** relativo, o **nivel decibel** ($\boldsymbol{\beta}$), es

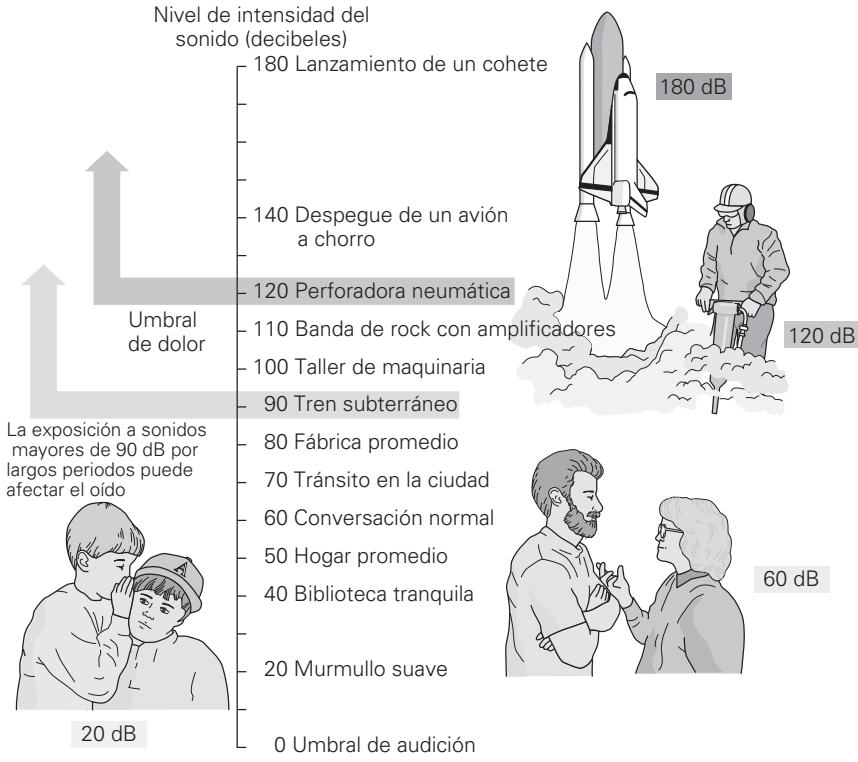
$$\beta = 10 \log \frac{I}{I_o} \qquad (\text{donde } I_o = 10^{-12}\ \mathrm{W/m^2}) \tag{14.4}$$

Nivel de intensidad del sonido en decibeles

Note que el nivel de intensidad del sonido (en decibeles, que no tienen dimensiones) *no* es lo mismo que la intensidad del sonido (en watts por metro cuadrado).

En la ▼figura 14.5 se muestran la escala decibel de intensidades y algunos sonidos familiares con sus niveles de intensidad. Las intensidades de sonido pueden tener efectos perjudiciales en la audición y, debido a esto, el gobierno de Estados Unidos ha establecido límites ocupacionales de la exposición al ruido.

▼ **FIGURA 14.5 Niveles de la intensidad del sonido y la escala en decibeles** Niveles de intensidad de algunos sonidos comunes en la escala de decibeles (dB).



*En el apéndice I se presenta un repaso de los logaritmos.

Ejemplo 14.4 ■ Niveles de la intensidad del sonido: uso de logaritmos

¿Cuáles son los niveles de intensidad de los sonidos con intensidades de *a*) 10^{-12} W/m^2 y *b*) $5.0 \times 1Q^{-6}$ W/m^2?

Razonamiento. Los niveles de intensidad del sonido se pueden encontrar usando la ecuación 14.4.

Solución.

Dado: *a*) $I = 10^{-12}$ W/m^2
b) $I = 5.0 \times 10^{-6}$ W/m^2

Encuentre: *a*) β (nivel de intensidad del sonido)
b) β

a) Usando la ecuación 14.4, tenemos

$$\beta = 10 \log \frac{I}{I_o} = 10 \log\left(\frac{10^{-12}\ \text{W/m}^2}{10^{-12}\ \text{W/m}^2}\right) = 10 \log 1 = 0\ \text{dB}$$

La intensidad 10^{-12} W/m^2 es la misma que en el umbral de audición. (Recuerde que log 1 = 0, ya que $1 = \log 10^0$ y $\log 10^0 = 0$.) Observe que un nivel de intensidad de 0 dB no significa que no hay sonido.

b) $$\beta = 10 \log \frac{I}{I_o} = 10 \log\left(\frac{5.0 \times 10^{-6}\ \text{W/m}^2}{10^{-12}\ \text{W/m}^2}\right)$$

$$= 10 \log(5.0 \times 10^6) = 10(\log 5.0 + \log 10^6) = 10(0.70 + 6.0) = 67\ \text{dB}$$

Ejercicio de refuerzo. Note en este ejemplo que la intensidad de 5.0×10^{-6} W/m^2 está a la mitad entre 10^{-6} y 10^{-5} (o 60 y 70 dB) y, sin embargo, esta intensidad no corresponde a un valor medio de 65 dB. *a*) ¿Por qué? *b*) ¿Qué intensidad corresponde a 65 dB? (Calcúlelo con tres cifras significativas.)

Ejemplo 14.5 ■ Diferencias de nivel de intensidad: uso de razones

a) ¿Cuál es la diferencia en los niveles de intensidad si se duplica la intensidad de un sonido? *b*) Por qué factores aumenta la intensidad para *diferencias* de niveles de intensidad de 10 y 20 dB?

Razonamiento. *a*) Si se duplica la intensidad, entonces $I_2 = 2I_1$ o $I_2/I_1 = 2$. De manera que usamos la ecuación 14.4 para encontrar la diferencia de intensidades. Recuerde que $\log a - \log b = \log a/b$. *b*) Aquí es importante notar que esos valores son *diferencias* de nivel de intensidad, $\Delta\beta = \beta_2 - \beta_1$, *no niveles* de intensidad. La ecuación desarrollada en *a* funcionará. (¿Por qué?)

Solución. Haciendo una lista de los datos, tenemos:

Dado: *a*) $I_2 = 2I_1$
b) $\Delta\beta = 10$ dB
$\Delta\beta = 20$ dB

Encuentre: *a*) $\Delta\beta$ (diferencia de nivel de intensidad)
b) I_2/I_1 (factores de aumento)

a) Usando la ecuación 14.4 y la relación $\log a - \log b = \log a/b$, tenemos, para la diferencia, $\Delta\beta = \beta_2 - \beta_1 = 10[\log(I_2/I_o) - \log(I_1/I_o)] = 10 \log[(I_2/I_o)/(I_1/I_o)] = 10 \log I_2/I_1$. Entonces,

$$\Delta\beta = 10 \log \frac{I_2}{I_1} = 10 \log 2 = 3\ \text{dB}$$

Así, duplicando la intensidad aumenta el nivel de intensidad en 3 dB (por ejemplo, un incremento de 55 a 58 dB).

b) Para una diferencia de 10 dB,

$$\Delta\beta = 10\ \text{dB} = 10 \log \frac{I_2}{I_1} \qquad \text{y} \qquad \log \frac{I_2}{I_1} = 1.0$$

Como $\log 10^1 = 1$, la razón de intensidades es 10:1 porque

$$\frac{I_2}{I_1} = 10^1 \qquad \text{e} \qquad I_2 = 10\, I_1$$

Asimismo, para una diferencia de 20 dB,

$$\Delta\beta = 20 \text{ dB} = 10 \log \frac{I_2}{I_1} \qquad \text{y} \qquad \log \frac{I_2}{I_1} = 2.0$$

Como $\log 10^2 = 2$,

$$\frac{I_2}{I_1} = 10^2 \qquad \text{e} \qquad I_2 = 100\, I_1$$

Así, una diferencia de nivel de intensidad de 10 dB corresponde a un cambio (aumento o decremento) de la intensidad por un factor de 10. Una diferencia de nivel de intensidad de 20 dB corresponde a un cambio de la intensidad por un factor de 100.

Usted debería saber estimar el factor que corresponde a una diferencia de nivel de intensidad de 30 dB. En general, el factor del cambio de intensidad es $10^{\Delta\beta}$, donde $\Delta\beta$ es la diferencia en niveles de bels. Como 30 dB = 3 B y $10^3 = 1000$, la intensidad cambia por un factor de 1000 para una diferencia de nivel de intensidad de 30 dB.

Ejercicio de refuerzo. Una $\Delta\beta$ de 20 $\Delta\beta$ y una $\Delta\beta$ de 30 dB corresponden a factores de 100 y 1000, respectivamente, en cambios de intensidad. ¿Una Δb de 25 dB corresponde a un factor de cambio de intensidad de 500? Explíquelo.

Ejemplo 14.6 ■ Niveles combinados de sonido: suma de intensidades

Usted está sentado en una mesa de acera en un restaurante, conversando con un amigo a un volumen normal de 60 dB. Al mismo tiempo, el nivel de intensidad del sonido del tránsito de la calle que le llega es también de 60 dB. ¿Cuál será el nivel total de la intensidad de los sonidos combinados?

Razonamiento. Se vuelve tentador simplemente sumar los dos niveles de intensidad del sonido y decir que el total es 120 dB. Pero los niveles de intensidad en decibeles son logarítmicos, por lo que no se pueden sumar en la manera normal. Sin embargo, las intensidades (I) sí se pueden sumar aritméticamente, ya que la energía y la potencia son cantidades escalares. El nivel de intensidad combinada puede entonces encontrarse con la suma de las intensidades.

Solución. Tenemos la siguiente información:

Dado: $\beta_1 = 60$ dB $\qquad$ ***Encuentre:*** total β

$\beta_2 = 60$ dB

Encontremos las intensidades asociadas con los niveles de intensidad:

$$\beta_1 = 60 \text{ dB} = 10 \log \frac{I_1}{I_o} = 10 \log\left(\frac{I_1}{10^{-12}\text{ W/m}^2}\right)$$

Por inspección, tenemos

$$I_1 = 10^{-6}\text{ W/m}^2$$

Asimismo, $I_2 = 10^{-6}\text{ W/m}^2$, ya que ambos niveles de intensidad son de 60 dB. Por lo tanto, la intensidad total es

$$I_{\text{total}} = I_1 + I_2 = 1.0 \times 10^{-6}\text{ W/m}^2 + 1.0 \times 10^{-6}\text{ W/m}^2 = 2.0 \times 10^{-6}\text{ W/m}^2$$

Entonces, convirtiendo de nuevo a nivel de intensidad, obtenemos

$$\beta = 10 \log \frac{I_{\text{total}}}{I_o} = 10 \log\left(\frac{2.0 \times 10^{-6}\text{ W/m}^2}{10^{-12}\text{ W/m}^2}\right) = 10 \log(2.0 \times 10^6)$$

$$= 10(\log 2.0 + \log 10^6) = 10(0.30 + 6.0) = 63 \text{ dB}$$

Este valor está lejos de 120 dB. Note que las intensidades combinadas duplicaron el valor de la intensidad, y el nivel de intensidad aumentó 3 dB, de acuerdo con lo que encontramos en el inciso *a* del ejemplo 14.5.

Ejercicio de refuerzo. En este ejemplo, suponga que el ruido agregado dio un total que *triplicó* el nivel de intensidad de la conversación. ¿Cuál sería el nivel de intensidad combinado total en este caso?

▲ **FIGURA 14.6 Proteja su oído** Los sonidos altos continuos pueden dañar sus oídos, por lo que quizá necesite protegerlos como se muestra aquí. En la tabla 14.2 el nivel de intensidad de las podadoras de césped es del orden de 90 dB.

Proteja su oído

El oído puede dañarse por un ruido excesivo, por lo que a veces es necesario protegerlo de ruidos fuertes continuos (▲figura 14.6). El daño al oído depende del nivel de la intensidad del sonido (nivel decibel) y del tiempo de exposición. La combinación exacta varía para diferentes personas, aunque en la tabla 14.2 se muestra una guía general de los niveles de ruido. Estudios han demostrado que niveles de sonido de 90 dB y superiores dañan los nervios receptores del oído, lo cual ocasiona en una pérdida de la capacidad auditiva. A 90 dB, toma 8 horas o menos para que el daño ocurra. En general,

TABLA 14.2 Niveles de intensidad del sonido y tiempos de exposición que dañan el oído

	Decibeles (dB)	*Ejemplos*	*El daño puede ocurrir con exposición continua*
Débil	30	Biblioteca tranquila, murmullos	
Moderado	60	Conversación normal, máquina de coser	
Muy fuerte	80	Tránsito cargado, restaurante ruidoso, llanto de niño	10 horas
	90	Podadora, motocicleta, fiesta ruidosa	Menos de 8 horas
	100	Sierra de cadena, tren subterráneo, trineo motorizado	Menos de 2 horas
Extremadamente fuerte	110	Audífonos, estéreo a todo volumen, concierto de rock	30 minutos
	120	Clubes de baile, autoestéreos, algunos juguetes musicales	15 minutos
	130	Martillo perforador, juegos ruidosos de computadora, eventos deportivos	Menos de 15 minutos
Doloroso	140	Estampido en estéreos, explosión de un disparo, cohetes	Cualquier duración (por ejemplo, la pérdida del oído puede ocurrir por unos cuantos disparos de un cañón de alto calibre, si no se tiene protección adecuada)

Cortesía de la Fundación EAR.

si el nivel de sonido se incrementa en 5 dB, el tiempo seguro de exposición se reduce a la mitad. Por ejemplo, si un nivel de sonido de 95 dB (el de una podadora ruidosa o una motocicleta) toma 4 horas en dañar su oído, entonces un nivel de sonido de 105 dB toma sólo 1 hora causar el daño.

14.4 Fenómenos acústicos

OBJECTIVES: *a*) Explicar la reflexión, la refracción y la difracción del sonido y *b*) distinguir entre las interferencias constructiva y destructiva.

Reflexión, refracción y difracción

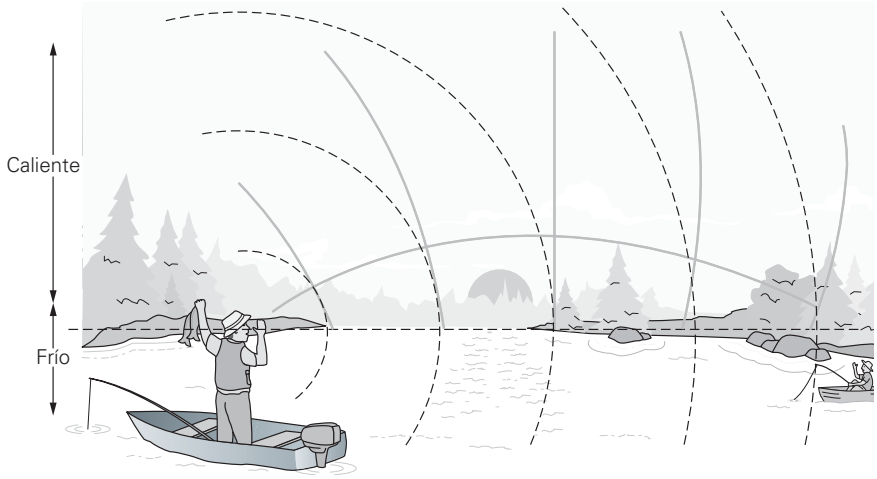
Un eco es un ejemplo familiar de la *reflexión* del sonido, esto es, sonido "que rebota" en una superficie. La *refracción* del sonido es menos común que la reflexión; sin embargo, usted tal vez la haya experimentado en una tarde tranquila de verano, cuando es posible oír voces distantes u otros sonidos que ordinariamente no serían audibles. Este efecto se debe a la refracción, o flexión (cambio de dirección), de las ondas sonora al pasar de una región a otra, donde la densidad del aire es diferente. El efecto es similar a lo que ocurre si el sonido pasa a otro medio.

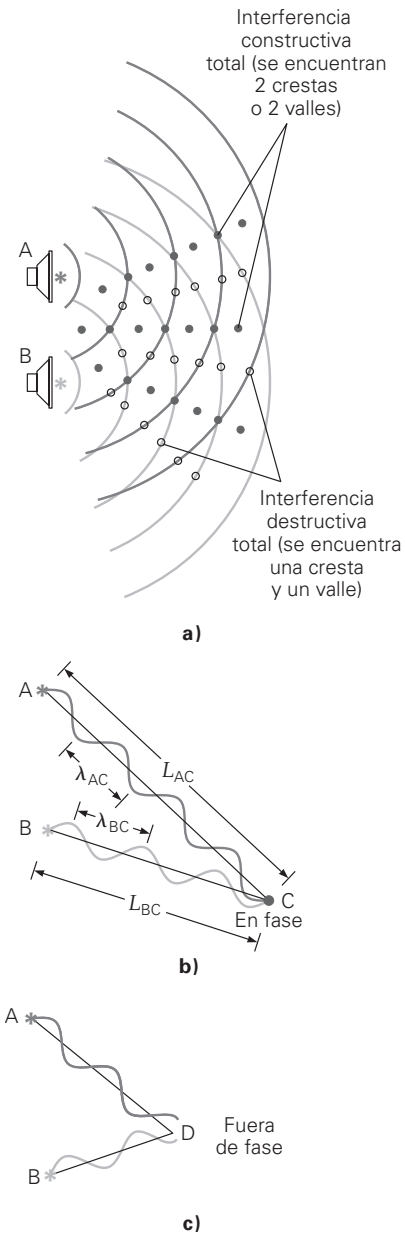
Las condiciones requeridas para que el sonido sea refractado son una capa de aire más frío cerca del suelo o el agua, y una capa de aire más caliente arriba de aquélla. Esas condiciones ocurren frecuentemente sobre cuerpos de agua, que se enfrían después de la puesta del sol (▼figura 14.7). Como resultado del enfriamiento, las ondas son refractadas según un arco que permite a una persona distante recibir una intensidad del sonido incrementada.

Otro fenómeno de flexión es la *difracción*, que se describe en la sección 13.4. El sonido puede ser difractado, o flexionado, alrededor de esquinas o alrededor de un objeto. Usualmente pensamos que las ondas viajan en línea recta. Sin embargo, usted puede oír a quien no puede ver cuando está a la vuelta de una esquina. Esta flexión es diferente de la refracción, en la que ningún obstáculo causa la flexión.

La reflexión, la refracción y la difracción se describen aquí en sentido general para el sonido. Esos fenómenos son consideraciones importantes también para las ondas de luz y los estudiaremos más ampliamente en los capítulos 22 y 24.

▼ **FIGURA 14.7 Refracción del sonido** El sonido viaja más lentamente en el aire frío cerca de la superficie del agua, que en el aire superior más caliente. Como resultado, las ondas se refractan o se flexionan. Esta flexión aumenta la intensidad del sonido a una distancia donde de otra manera no podría escucharse.





▲ **FIGURA 14.8** Interferencia
a) Las ondas sonoras de dos fuentes puntuales se dispersan e interfieren. ***b)*** En los puntos donde las ondas llegan en fase (con diferencia de fase cero), como el punto C, ocurre una interferencia constructiva. ***c)*** En puntos donde las ondas llegan completamente fuera de fase (con una diferencia de fase de 180°), como el punto D, ocurre una interferencia destructiva. La diferencia de fase en un punto específico depende de las longitudes de trayectoria que las ondas viajan para llegar a ese punto.

Interferencia

Al igual que las ondas de cualquier tipo, las ondas sonoras *interfieren* cuando se encuentran. Suponga que dos bocinas separadas cierta distancia emiten ondas sonoras en fase a la misma frecuencia. Si consideramos las bocinas como fuentes puntuales, entonces las ondas se dispersarán esféricamente y se interferirán (◂figura 14.8a). Las líneas de una bocina particular representan crestas de onda (o condensaciones), y los valles (o rarefacciones) se encuentran en las áreas blancas intermedias.

En regiones particulares de espacio, habrá interferencia constructiva o destructiva. Por ejemplo, si dos ondas se encuentran en una región donde estén exactamente en fase (si dos crestas o dos valles coinciden), habrá **interferencia constructiva** total (figura 14.8b). Note que las ondas tienen el mismo movimiento en el punto C de la figura. Si, por el contrario, las ondas se encuentran de manera que la cresta de una coincide con el valle de la otra (en el punto D), las dos ondas se cancelarán entre sí (figura 14.8c). El resultado será una **interferencia destructiva** total.

Es conveniente describir las longitudes de las trayectorias viajadas por las ondas en términos de longitud de onda (λ), para determinar si llegan en fase. Considere las ondas que llegan al punto C en la figura 14.8b. Las longitudes de las trayectorias en este caso son $L_{AC} = 4\lambda$ y $L_{BC} = 3\lambda$. La **diferencia de fase** $(\Delta\theta)$ está relacionada con la **diferencia de longitud de trayectoria** (ΔL) por la simple relación

$$\Delta\theta = \frac{2\pi}{\lambda}(\Delta L) \qquad \textit{diferencia de fase y diferencia de longitud de trayectoria} \tag{14.5}$$

Como 2π rad es equivalente, en términos angulares, a un ciclo completo de onda o longitud de onda, multiplicando la diferencia de longitud de trayectoria por $2\pi/\lambda$ se obtiene la diferencia de fase en radianes. Para el ejemplo ilustrado en la figura 14.8b, tenemos

$$\Delta\theta = \frac{2\pi}{\lambda}(L_{AC} - L_{BC}) = \frac{2\pi}{\lambda}(4\lambda - 3\lambda) = 2\pi \text{ rad}$$

Cuando $\Delta\theta = 2\pi$ rad, las ondas se desplazan una longitud de onda. Esto es lo mismo que $\Delta\theta = 0°$, por lo que las ondas están en fase. Así, las ondas interfieren constructivamente en la región del punto C, aumentando la intensidad, o volumen, del sonido detectado ahí.

De la ecuación 14.5 vemos que las ondas de sonido están en fase en cualquier punto donde la diferencia de longitud de trayectoria sea cero o un múltiplo entero de la longitud de onda. Esto es,

$$\Delta L = n\lambda \qquad (n = 0, 1, 2, 3, \ldots) \qquad \textit{condición para interferencia constructiva} \tag{14.6}$$

Un análisis similar de la situación en la figura 14.8c, donde $L_{AD} = 2\frac{3}{4}\lambda$ y $L_{BD} = 2\frac{1}{4}\lambda$, da

$$\Delta\theta = \frac{2\pi}{\lambda}\left(2\tfrac{3}{4}\lambda - 2\tfrac{1}{4}\lambda\right) = \pi \text{ rad}$$

o bien, $\Delta\theta = 180°$. En el punto D las ondas están completamente fuera de fase, y en esta región se presenta una interferencia destructiva.

Las ondas sonoras estarán fuera de fase en cualquier punto donde la diferencia de longitud de trayectoria sea un número impar de medias longitudes de onda $(\lambda/2)$, o

$$\Delta L = m\left(\frac{\lambda}{2}\right) \qquad (m = 1, 3, 5, \ldots) \qquad \textit{condición para interferencia destructiva} \tag{14.7}$$

En esos puntos se oirá o se detectará un sonido más suave o menos intenso. Si las amplitudes de las ondas son exactamente iguales, la interferencia destructiva es total y no se oye ningún sonido.

La interferencia destructiva de las ondas sonoras ofrece una manera de reducir los ruidos muy fuertes, que pueden distraer o incluso provocar incomodidad. El procedimiento consiste en tener una onda reflejada o una onda introducida con una dife-

rencia de fase que anule el sonido original tanto como sea posible. Idealmente debería estar desfasada 180° con respecto al ruido indeseable. Algunas de estas aplicaciones, como los escapes de los automóviles y los auriculares de los pilotos, se estudian en la sección 13.4.

Ejemplo 14.7 ■ Subir el volumen: interferencia del sonido

En un concierto al aire libre en un día caluroso (con temperatura del aire de 25°C), usted está sentado a 7.00 y 9.10 m, respectivamente, de un par de bocinas, una a cada lado del escenario. Un músico animado toca un solo tono a 494 Hz. ¿Qué tono escucha en términos de intensidad? (Considere las bocinas como fuentes puntuales.)

Razonamiento. Las ondas sonoras de las bocinas se interfieren. ¿Es una interferencia constructiva, destructiva o algo intermedio? Ello depende de la diferencia en la longitud de las trayectorias, que calculamos a partir de las distancias dadas.

Solución.

Dado: $d_1 = 7.00$ m y $d_2 = 9.10$ m
$f = 494$ Hz
$T = 25°C$

Encuentre: ΔL (diferencia de longitud de trayectoria en unidades de longitud de onda)

La diferencia de longitud de trayectoria (2.10 m) entre las ondas que llegan a su localidad deben expresarse en términos de la longitud de onda del sonido. Para hacer esto primero necesitamos conocer la longitud de onda. Dada la frecuencia podemos encontrar la longitud de onda a partir de la relación $\lambda = v/f$, siempre que conozcamos la rapidez del sonido, v, a la temperatura dada. La rapidez v puede encontrarse con la ecuación 14.1:

$$v = \left(331 + 0.6T_C\right) \text{ m/s} = [331 + 0.6(25)] \text{ m/s} = 346 \text{ m/s}$$

La longitud de onda del sonido es entonces

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{346 \text{ m/s}}{494 \text{ Hz}} = 0.700 \text{ m}$$

Así, las distancias en términos de longitud de onda son

$$d_1 = (7.00 \text{ m})\left(\frac{\lambda}{0.700 \text{ m}}\right) = 10.0\lambda \qquad \text{y} \qquad d_2 = (9.10 \text{ m})\left(\frac{\lambda}{0.700 \text{ m}}\right) = 13.0\lambda$$

La diferencia de longitud de trayectoria, en términos de longitudes de onda, es

$$\Delta L = d_2 - d_1 = 13.0\lambda - 10.0\lambda = 3.0\lambda$$

Éste es un número entero de longitudes de onda ($n = 3$), por lo que se presenta una interferencia constructiva. Los sonidos de las dos bocinas se refuerzan entre sí, y usted oye un tono intenso (fuerte) a 494 Hz.

Ejercicio de refuerzo. Suponga que en este ejemplo el tono viajó a una persona sentada a 7.00 y 8.75 m, respectivamente, desde las dos bocinas. ¿Cuál sería la situación en ese caso?

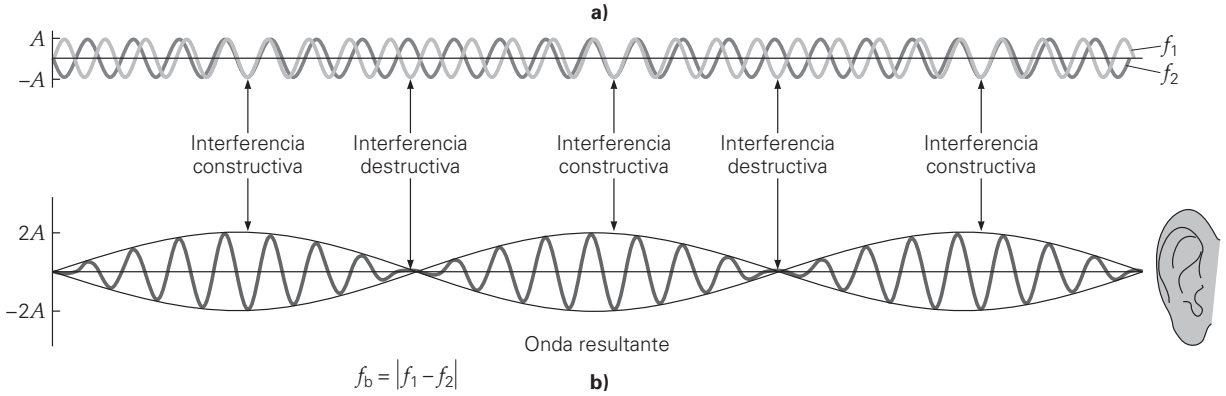
Otro interesante efecto de interferencia ocurre cuando dos tonos de aproximadamente la misma frecuencia ($f_1 \approx f_2$) se emiten simultáneamente. El oído siente pulsaciones en volumen conocidas como **pulsos**. El oído humano puede detectar hasta 7 pulsos por segundo antes de que suenen "uniformemente" (continuos, sin pulsaciones).

Suponga que dos ondas senoidales interfieren con la misma amplitud, pero ligeramente diferentes frecuencias (▼figura 14.9a). La figura 14.9b representa la onda sonora resultante. La amplitud de la onda combinada varía senoidalmente, como se muestra por las curvas en negro (conocidas como *envolventes*) que delinean la onda.

¿Qué significa esta variación en amplitud en términos de lo que el sujeto percibe? Oirá un sonido pulsante (pulsos) determinado por las envolventes. La amplitud máxima es $2A$ (en el punto donde los máximos de las dos ondas originales interfieren cons-

PHYSLET®

Ilustración 18.3 Interferencia en el tiempo y pulsaciones



▲ **FIGURA 14.9 Pulsos** Dos ondas viajeras de igual amplitud y frecuencias ligeramente diferentes interfieren y dan lugar a tonos pulsantes llamados pulsos. La frecuencia de pulso está dada por $f_b = |f_1 - f_2|$.

tructivamente). Matemática detallada muestra que un sujeto oirá los pulsos con una frecuencia llamada la **frecuencia de pulso** (f_b), dada por

$$f_b = |f_1 - f_2| \tag{14.8}$$

Se toma el valor absoluto porque la frecuencia f_b no puede ser negativa, aun si $f_2 > f_1$. Una frecuencia de pulso negativa no tendría sentido.

PHYSLET®

Exploración 18.3 Un micrófono entre dos altavoces

Los pulsos se pueden producir cuando diapasones de aproximadamente la misma frecuencia vibran al mismo tiempo. Por ejemplo, usando diapasones con frecuencias de 516 y 513 Hz, se puede generar una frecuencia de pulso de $f_b = 516\ \text{Hz} - 513\ \text{Hz} = 3\ \text{Hz}$, y se oirán tres pulsos cada segundo. Los músicos afinan dos instrumentos de cuerdas a la misma nota ajustando las tensiones en las cuerdas, hasta que los pulsos desaparecen ($f_1 = f_2$).

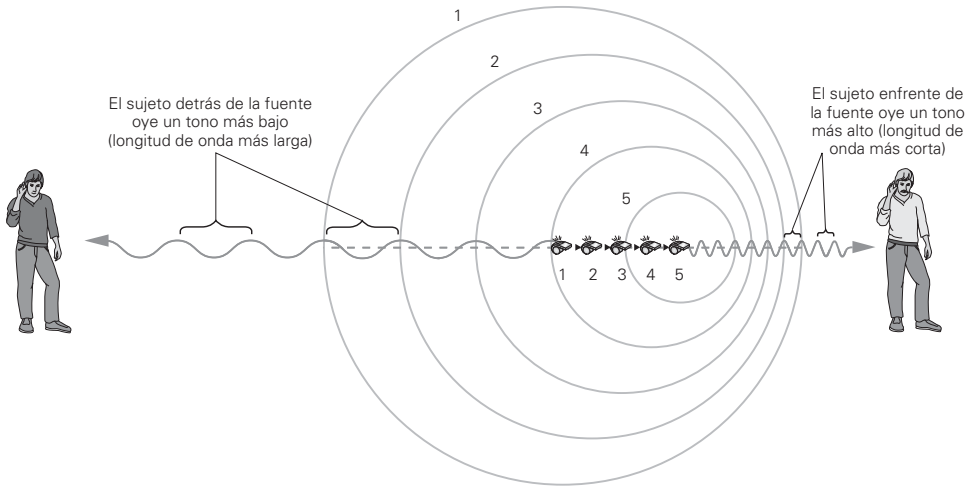
14.5 El efecto Doppler

OBJETIVOS: *a*) Describir y explicar el efecto Doppler y *b*) dar algunos ejemplos de sus manifestaciones y aplicaciones.

Si usted está junto a una autopista y un automóvil o un camión se acerca sonando su bocina, el **tono** (la frecuencia percibida) del sonido será mayor cuando el vehículo se acerca y menor cuando se aleja. Usted también puede oír variaciones en la frecuencia del ruido del motor, cuando observa un auto de carreras que viajando alrededor de una pista. Una variación en la frecuencia del sonido percibido debido al movimiento de la fuente es un ejemplo del **efecto Doppler**. (El físico austriaco Christian Doppler [1803-1853] fue el primero en describir dicho efecto.)

Como lo muestra la ▸figura 14.10 las ondas sonoras emitidas por una fuente móvil tienden a juntarse enfrente de la fuente, y a esparcirse atrás de ella. El corrimiento Doppler en frecuencia puede encontrarse suponiendo que el aire está en reposo en un marco de referencia como el que se muestra en la ▸figura 14.11. La rapidez del sonido en aire es v, y la rapidez de la fuente móvil es v_s. La frecuencia del sonido producido por la fuente es f_s. En un periodo, $T = 1/f_s$, una cresta de onda se mueve una distancia $d = vT = \lambda$. (La onda sonora viajaría esta distancia en aire quieto, independientemente de que la fuente se esté moviendo o no.) Sin embargo, en un periodo la fuente viaja una distancia $d_s = v_sT$ antes de emitir otra cresta de onda. La distancia entre las crestas sucesivas de ondas se acorta entonces a una longitud de onda λ':

$$\lambda' = d - d_s = vT - v_sT = (v - v_s)T = \frac{v - v_s}{f_s}$$



▲ **FIGURA 14.10 El efecto Doppler para una fuente en movimiento** Las ondas sonoras se juntan enfrente de una fuente móvil (el silbato) dando ahí una mayor frecuencia. Las ondas van detrás de la fuente, dando ahí una menor frecuencia. (La figura no está dibujada a escala. ¿Por qué?)

La frecuencia oída por el sujeto (f_o) está relacionada con la longitud de onda acortada por $f_o = v/\lambda'$, y sustituyendo λ' resulta

PHYSLET®
Ilustración 18.4 El efecto Doppler

$$f_o = \frac{v}{\lambda'} = \left(\frac{v}{v - v_s}\right) f_s$$

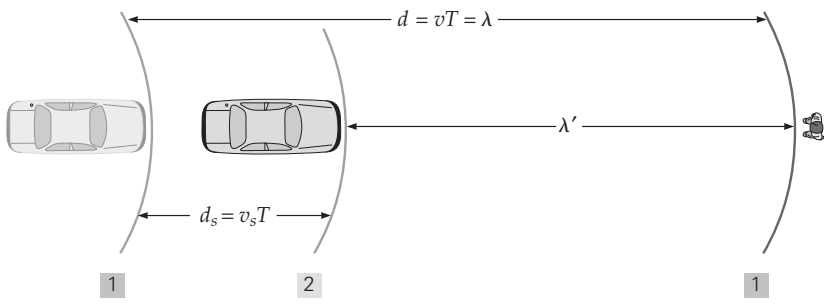
o

$$f_o = \left(\frac{1}{1 - \frac{v_s}{v}}\right) f_s \qquad \text{(14.9)}$$

(*la fuente se acerca a un sujeto estacionario, donde* v_s = *rapidez de la fuente* y v = *rapidez del sonido*)

Puesto que $1 - (v_s/v)$ es menor que 1, f_o es mayor que f_s en esta situación. Por ejemplo, suponga que la rapidez de la fuente es un décimo de la rapidez del sonido; esto es, $v_s = v/10$ o $v_s/v = \frac{1}{10}$. Entonces, por la ecuación 14.9, $f_o = \frac{10}{9} f_s$.

▼ **FIGURA 14.11 El efecto Doppler y la longitud de onda** El sonido de la bocina de un automóvil en movimiento viaja una distancia d en un tiempo T. En este tiempo, el automóvil (la fuente) viaja una distancia d_s antes de dar salida a un segundo pulso, acortando así la longitud de onda observada del sonido en la dirección de acercamiento.



Asimismo, cuando la fuente se aleja del sujeto ($\lambda' = d + d_s$), la frecuencia observada está dada por

$$f_o = \left(\frac{v}{v + v_s}\right) f_s = \left(\frac{1}{1 + \dfrac{v_s}{v}}\right) f_s \quad \textit{(la fuente se aleja de un sujeto estacionario)} \tag{14.10}$$

Aquí, f_o es menor que f_s. (¿Por qué?)

Combinando las ecuaciones 14.9 y 14.10 se obtiene una ecuación general para la frecuencia observada con una fuente móvil y un sujeto estacionario:

$$f_o = \left(\frac{v}{v \pm v_s}\right) f_s = \left(\frac{1}{1 \pm \dfrac{v_s}{v}}\right) f_s \quad \begin{cases} - \textit{ para una fuente acercándose hacia un sujeto estacionario;} \\ + \textit{ para una fuente alejándose de un observador estacionario} \end{cases} \tag{14.11}$$

Como podría usted esperar, el efecto Doppler también ocurre con un sujeto en movimiento y una fuente estacionaria, aunque esta situación es un poco diferente. Conforme el observador se mueve hacia la fuente, la distancia entre crestas sucesivas de ondas es la longitud de onda normal (o $\lambda = v/f_s$), aunque la rapidez de onda medida es diferente. Respecto al sujeto que se acerca, el sonido desde la fuente estacionaria tiene una rapidez de onda de $v' = v + v_o$, donde v_o es la rapidez del observador y v es la rapidez del sonido en aire en reposo. (El sujeto acercándose a la fuente se está moviendo en dirección opuesta a la de las ondas que se propagan y por ello encuentra más crestas de ondas en un tiempo dado.)

Con $\lambda = v/f_s$, la frecuencia observada es entonces

$$f_o = \frac{v'}{\lambda} = \left(\frac{v + v_o}{v}\right) f_s$$

o bien,

$$f_o = \left(1 + \frac{v_o}{v}\right) f_s \quad \textit{(sujeto moviéndose hacia una fuente estacionaria, donde } v_o = \textit{rapidez del sujeto y } v = \textit{rapidez del sonido)} \tag{14.12}$$

Asimismo, para un sujeto que se aleja de una fuente estacionaria, la rapidez de onda percibida es $v' = v - v_o$, y

$$f_o = \frac{v'}{\lambda} = \left(\frac{v - v_o}{v}\right) f_s$$

o bien,

$$f_o = \left(1 - \frac{v_o}{v}\right) f_s \quad \textit{(sujeto alejándose de una fuente estacionaria)} \tag{14.13}$$

Las ecuaciones 14.12 y 14.13 se combinan en una ecuación general para un sujeto móvil y una fuente estacionaria:

$$f_o = \left(\frac{v \pm v_o}{v}\right) f_s = \left(1 \pm \frac{v_o}{v}\right) f_s \quad \begin{cases} + \textit{ para el sujeto moviéndose hacia la fuente estacionaria;} \\ - \textit{ para el sujeto alejándose de la fuente estacionaria} \end{cases} \tag{14.14}$$

Sugerencia para resolver problemas

Usted podría encontrar difícil recordar si debe usarse un signo más (+) o un signo menos (−) en las ecuaciones generales para el efecto Doppler. Deje que su experiencia lo ayude. Para el caso común de un sujeto estacionario, la frecuencia del sonido aumenta conforme la fuente se acerca, por lo que el denominador en la ecuación 14.11 debe ser menor que el numerador. En este caso, de acuerdo con lo anterior, usted usa el signo menos. Cuando la fuente se aleja, la frecuencia es menor. El denominador en la ecuación 14.11 debe entonces ser mayor que el numerador, y usa el signo más. Un razonamiento similar le ayudará a escoger un signo más o un signo menos para el numerador en la ecuación 14.14. Véase la ecuación 14.14a en la nota al pie de página.

Ejemplo 14.8 ■ De nuevo en el camino: el efecto Doppler

Cuando un camión que viaja a 96 km/h se acerca y pasa a una persona situada a un lado de la autopista, el conductor hace sonar la bocina. Si la bocina tiene una frecuencia de 400 Hz, ¿cuáles serán las frecuencias de las ondas sonoras oídas por la persona: *a*) conforme el camión se acerca y *b*) después de que pasa? (Suponga que la rapidez del sonido es de 346 m/s.)

Razonamiento. Esta situación es una aplicación del efecto Doppler, ecuación 14.11, con una fuente móvil y un sujeto estacionario. En tales problemas, es importante identificar correctamente los datos.

Solución. En situaciones para el efecto Doppler, es importante hacer claramente la lista de lo que se debe encontrar.

Dado: $v_s = 96\ \text{km/h} = 27\ \text{m/s}$
$f_s = 400\ \text{Hz}$
$v = 346\ \text{m/s}$

Encuentre: *a*) f_o (frecuencia observada mientras se acerca el camión)
b) f_o (frecuencia observadas mientras se aleja el camión)

a) De la ecuación 14.11 con un signo menos (fuente acercándose, sujeto estacionario),

$$f_o = \left(\frac{v}{v - v_s}\right) f_s = \left(\frac{346\ \text{m/s}}{346\ \text{m/s} - 27\ \text{m/s}}\right)(400\ \text{Hz}) = 434\ \text{Hz}$$

b) En la ecuación 14.11 se usa un signo más cuando la fuente se aleja:

$$f_o = \left(\frac{v}{v + v_s}\right) f_s = \left(\frac{346\ \text{m/s}}{346\ \text{m/s} + 27\ \text{m/s}}\right)(400\ \text{Hz}) = 371\ \text{Hz}$$

Ejercicio de refuerzo. Suponga que el observador en este ejemplo está inicialmente moviéndose hacia una fuente estacionaria de 400 Hz y luego la pasa con una rapidez de 96 km/h. ¿Cuáles serían las frecuencias observadas? (¿Diferirían ellas de las del caso de una fuente móvil?)

PHYSLET®

Exploración 18.5 Una ambulancia pasa con su sirena encendida

Hay también casos en que la fuente y el sujeto están en movimiento, ya sea acercándose o alejándose entre sí. No consideraremos matemáticamente aquí tal caso; pero lo haremos conceptualmente en el siguiente ejemplo.*

Ejemplo conceptual 14.9 ■ Todo es relativo: fuente móvil y sujeto móvil

Suponga que una fuente de sonido y un sujeto se están alejando uno de otro en direcciones opuestas, moviéndose cada uno a la mitad de la rapidez del sonido en el aire. Entonces el observador *a*) recibirá el sonido con una frecuencia mayor que la frecuencia de la fuente, *b*) recibirá el sonido con una frecuencia menor que la frecuencia de la fuente, *c*) recibirá el sonido con la misma frecuencia que la frecuencia de la fuente o *d*) no recibirá sonido de la fuente.

(continúa en la siguiente página)

*En el caso de que tanto el sujeto como la fuente estén en movimiento,

$$f_o = \left(\frac{v \pm v_o}{v \mp v_s}\right) f_s \qquad (14.14a)$$

Sabemos por experiencia que habría un aumento de la frecuencia cuando el sujeto y la fuente se acercan mutuamente, y viceversa. Es decir, los signos de la parte superior en el numerador y en el denominado se aplican, si tanto el sujeto como la fuente se aproximan entre sí; y los signos de abajo se aplican cuando se alejan mutuamente. (Véase el ejercicio 71.)

Razonamiento y respuesta. Como sabemos, cuando una fuente se aleja de un sujeto estacionario, la frecuencia observada es menor (ecuación 14.10). Asimismo, cuando un sujeto se aleja de una fuente estacionaria, la frecuencia observada también es menor (ecuación 14.13). Si tanto la fuente como el observador se alejan entre sí en direcciones opuestas, el efecto combinado haría la frecuencia observada aún menor, por lo que ni *a* ni *c* son la respuesta.

Parecería que *b*) es la respuesta correcta; pero lógicamente debemos eliminar a *d* por conveniencia. Recuerde que la rapidez del sonido respecto al aire es constante. Por lo tanto, *d* sería correcta *sólo si el sujeto se moviera más rápido que la rapidez del sonido* respecto al aire. Como el observador se está moviendo a sólo la mitad de la rapidez del sonido, *b* es la respuesta correcta.

Ejercicio de refuerzo. En este ejemplo, ¿cuál sería la situación si tanto la fuente como el observador viajaran en la misma dirección con la misma rapidez subsónica? (*Subsónica*, opuesta a *supersónica*, se refiere a una rapidez que es menor que la rapidez del sonido en el aire.)

El efecto Doppler también se aplica a las ondas de luz, aunque las ecuaciones que describen el efecto son diferentes a las recién dadas. Cuando una fuente de luz distante, como la de una estrella, se aleja de nosotros, disminuye la frecuencia de la luz que recibimos de ella. Esto es, la luz se desplaza hacia el extremo rojo (longitud de onda larga) del espectro. Se trata de un efecto conocido como *corrimiento al rojo Doppler*. Asimismo, la frecuencia de la luz de un objeto que se acerca a nosotros aumenta: la luz se desplaza hacia el extremo azul (longitud de onda corta) del espectro, produciendo un *corrimiento al azul Doppler*. La magnitud del corrimiento está relacionado con la rapidez de la fuente.

El corrimiento Doppler de la luz de objetos astronómicos es muy útil a los astrónomos. La rotación de un planeta, de una estrella o de algún otro cuerpo puede establecerse observando los corrimientos Doppler de la luz en lados opuestos del objeto; debido a la rotación, un lado se aleja (y, por lo tanto, su corrimiento es al rojo), y el otro se acerca (y su corrimiento es al azul). Asimismo, los corrimientos Doppler de la luz de estrellas en diferentes regiones de nuestra galaxia, la Vía Láctea, indican que la galaxia está girando.

Usted ha sido sometido a una aplicación práctica del efecto Doppler, si alguna vez ha sido sorprendido en su automóvil por el radar de la policía, el cual usa ondas de radio reflejadas. (*Radar* significa *ra*dio *d*etecting *a*nd *r*anging y es similar al sonar bajo el agua, que usa ultrasonido.) Si las ondas de radio se reflejan desde un vehículo estacionado, las ondas reflejadas regresan a la fuente con la misma frecuencia. Pero para un automóvil que se mueve hacia una patrulla de policía, las ondas reflejadas tienen una frecuencia superior, o tienen un corrimiento Doppler. En realidad, se tiene un doble corrimiento Doppler. Al recibir la onda, el automóvil en movimiento actúa como un observador en movimiento (el primer corrimiento Doppler), y al reflejar la onda, el automóvil actúa como una fuente en movimiento que emite una onda (el segundo corrimiento Doppler). Las magnitudes de los corrimientos dependen de la rapidez del automóvil. Una computadora calcula rápidamente esta rapidez y la muestra al oficial de policía.

Para conocer otras importantes aplicaciones médicas y climáticas del efecto Doppler, véase la sección A fondo 14.3 sobre células sanguíneas y gotas de lluvia, en la p. 490.

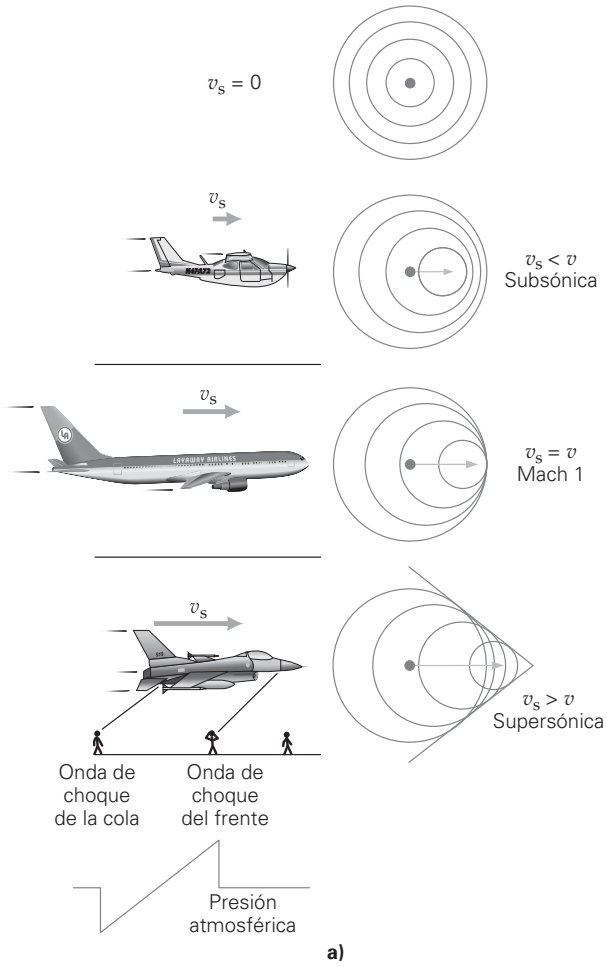
Estampidos sónicos

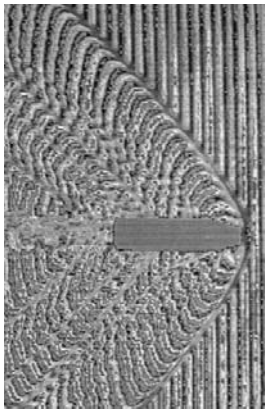
PHYSLET®

Exploración 18.4 Efecto Doppler y velocidad de la fuente

Considere un avión a chorro que puede viajar a rapideces supersónicas. Conforme la rapidez de una fuente móvil de sonido se acerca a la rapidez del sonido, las ondas por delante de la fuente se juntan entre sí (▸figura 14.12a). Cuando un avión viaja a la rapidez del sonido, las ondas no pueden sobrepasarlo y se apilan al frente. A rapideces supersónicas, las ondas se traslapan. Este traslape de un gran número de ondas produce muchos puntos de interferencia constructiva, formando una gran cresta de presión, u *onda de choque*. Este tipo de onda a veces se denomina *onda de proa*, porque es similar a la onda producida por la proa de un buque que se mueve a través del agua con una rapidez mayor que la rapidez de las ondas del agua. La figura 14.12b muestra la onda de choque de una bala que viaja a 500 m/s.

En el caso del avión que viaja con rapidez supersónica, las ondas de choque se desvían hacia los lados y hacia abajo. Cuando esta cresta de presión pasa sobre un observa-





◀ **FIGURA 14.12 Ondas de proa y estampidos sónicos** ***a)*** Cuando un avión excede la rapidez del sonido en aire, v_s, las ondas sonoras forman una cresta de presión, u onda de choque. Cuando la onda de choque pasa por el suelo, los observadores oyen un estampido sónico (en realidad dos, porque las ondas de choque se forman al frente y en la cola del avión). ***b)*** Una bala que viaja con una rapidez de 500 m/s. Note las ondas de choque producidas (y la turbulencia detrás de la bala). La imagen fue hecha usando interferometría con luz polarizada y un láser pulsante, con tiempo de exposición de 20 ns.

dor en el suelo, la gran concentración de energía produce lo que se conoce como **estampido sónico**. En realidad hay un doble estampido, porque las ondas de choque se forman en ambos extremos del avión. En ciertas condiciones, las ondas de choque pueden romper ventanas y causar otros daños a estructuras en el terreno. (Los estampidos sónicos ya no se oyen tan frecuentemente como en el pasado. Ahora a los pilotos se les entrena para volar supersónicamente sólo a elevadas altitudes y lejos de áreas pobladas.)

A pequeña escala, tal vez haya oído un "mini" estampido sónico. El chasquido de un látigo en realidad es un estampido sónico creado por la rapidez transónica de la punta del látigo. ¿Cómo sucede esto? Los látigos generalmente disminuyen su grosor desde el mango hasta la punta, que en ocasiones se separa en varias hebras. Cuando la muñeca de quien sujeta el látigo lo chasquea, éste recibe un pulso de onda que lo recorre a todo lo largo. Al considerar el pulso del látigo como un pulso de onda de una cuerda, recuerde que la rapidez del pulso depende inversamente de la densidad de masa lineal que disminuye hacia la punta. Por lo tanto, la rapidez del pulso se incrementa hasta el grado de que, en la punta, es mayor que la rapidez del sonido. El chasquido se produce porque el aire se precipita de regreso hacia la región de presión reducida, que crea la vuelta final de la punta del látigo, de manera similar a como el estampido va detrás de un avión a reacción supersónico.

Un error común es creer que un estampido sónico sólo ocurre cuando un avión rompe la barrera del sonido. Cuando un avión se acerca a la rapidez del sonido, la cresta de presión enfrente de él es esencialmente una barrera que debe ser vencida con potencia adicional. Sin embargo, una vez que se alcanza la rapidez supersónica, la barrera ya no está ahí, y las ondas de choque, creadas continuamente, van detrás del avión, produciendo estampidos a lo largo de su trayectoria en el terreno.

PHYSLET®

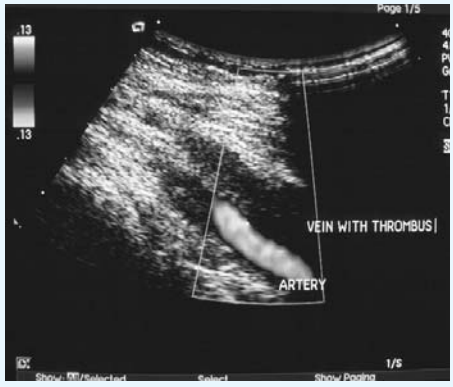
Ilustración 18.5 Ubicación de un avión supersónico

A FONDO 14.3 APLICACIONES DOPPLER: CÉLULAS SANGUÍNEAS Y GOTAS DE LLUVIA

Células sanguíneas

Como vimos en la sección A fondo 14.1 "El ultrasonido en la medicina", en la p. 470, el ultrasonido ofrece una variedad de usos en el campo de la medicina. Como el efecto Doppler se usa para detectar y proporcionar información sobre objetos en movimiento, también es útil para examinar y medir la rapidez del flujo sanguíneo en las principales arterias, así como en las venas de brazos y piernas (figura 1a). En esta aplicación el efecto Doppler se utiliza para medir la rapidez del flujo sanguíneo. El ultrasonido se refleja desde los glóbulos rojos con un cambio en la frecuencia de acuerdo con la rapidez de las células. La rapidez general del flujo ayuda a los médicos a diagnosticar coágulos, oclusiones arteriales e insuficiencia venosa. Los procedimientos con ultrasonido ofrecen una alternativa menos invasiva a otros procedimientos de diagnóstico, como la arteriografía (imágenes con rayos X de una arteria después de la inyección de una tintura).

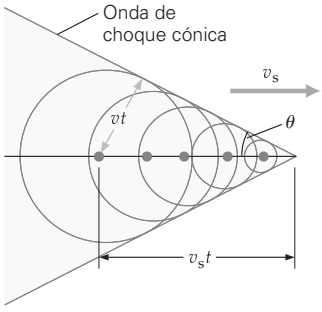
Otro uso médico del ultrasonido es el electrocardiograma, que es un examen del corazón. En un monitor, este procedimiento ultrasónico puede exhibir los movimientos de las pulsaciones del corazón, y el médico puede ver las cámaras y las válvulas del corazón, así como el flujo sanguíneo conforme entra y sale de este órgano (figura 1b).



a)

b)

FIGURA 1 ***a*) Flujo sanguíneo y obstrucciones** Este escaneo ultrasónico Doppler muestra trombosis venosa profunda en la pierna de un paciente. El coágulo que bloquea la vena está en el área oscura a la derecha. El flujo sanguíneo en una arteria adyacente es más lento debido al coágulo. En casos extremos el coágulo puede desprenderse y llegar a los pulmones, donde puede bloquear una arteria y provocar una embolia pulmonar potencialmente mortal (obstrucción de los vasos sanguíneos). ***b*) Electrocardiograma** Este procedimiento ultrasónico puede mostrar los latidos del corazón, ventrículos y aurículas, válvulas y el flujo sanguíneo conforme la sangre entra y sale del órgano. (Véase el pliego a color al final del libro.)



▲ **FIGURA 14.13 Cono de la onda de choque y número de Mach** Cuando la rapidez de la fuente (v_s) es mayor que la rapidez del sonido en aire (v), las ondas sonoras esféricas que interfieren forman una onda de choque cónica, la cual se ve como una cresta de presión en forma de V cuando se observa en dos dimensiones. El ángulo θ está dado por $\operatorname{sen}\theta = v/v_s$, y la razón inversa v_s/v se llama número de Mach.

Idealmente, las ondas sonoras producidas por un avión supersónico forman una onda de choque en forma de cono (◂figura 14.13). Las ondas viajan hacia afuera con una rapidez v, y la rapidez de la fuente (el avión) es v_s. Note en la figura que el ángulo entre una línea tangente a las ondas esféricas y la línea a lo largo de la cual el avión se mueve está dado por

$$\operatorname{sen}\theta = \frac{vt}{v_s t} = \frac{v}{v_s} = \frac{1}{M} \tag{14.15}$$

La razón inversa de las rapideces se llama **número de Mach** (M), en honor del físico austriaco Ernst Mach (1838-1916), quien lo usó en el estudio de rapideces supersónicas, y está dada por

$$M = \frac{v_s}{v} = \frac{1}{\operatorname{sen}\theta} \tag{14.16}$$

Si v es igual a v_s, el avión vuela a la rapidez del sonido, y el número de Mach es 1 (esto es, $v_s/v = 1$). Por lo tanto, un número de Mach menor que 1 indica una rapidez subsó-

Gotas de lluvia

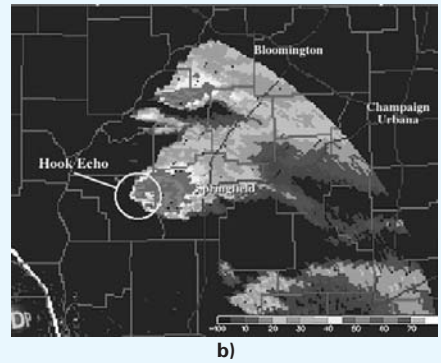
Desde los inicios de la década de 1940 el radar se ha utilizado para suministrar información sobre tormentas y otras formas de precipitación. Esta información se obtiene a partir de la intensidad de la señal reflejada. Además, tales radares convencionales pueden detectar la "firma" rotativa de un tornado, pero sólo después de que la tormenta se desarrolle bien.

Un adelanto considerable en el pronóstico del tiempo se logró con el desarrollo de un sistema de radar que pudo medir el corrimiento de la frecuencia Doppler, además de la magnitud de la señal de eco reflejada por la precipitación (usualmente gotas de lluvia). El corrimiento Doppler se relaciona con la velocidad de la precipitación soplada por el viento.

Un sistema de radar Doppler (figura 2a) puede penetrar una tormenta y monitorear las rapideces de sus vientos. La dirección de una lluvia impulsada por el viento de una tormenta da un mapa de "campo" del viento de la región afectada. Estos mapas brindan fuertes indicios de tornados en desarrollo y los meteorólogos pueden detectarlos con mucha anticipación (figura 2b). Con el radar Doppler es posible predecir tornados hasta 20 minutos antes de que toquen tierra, en comparación con los 2 minutos del radar convencional. El radar Doppler ha logrado salvar muchas vidas gracias al mayor tiempo de advertencia. El Servicio Meteorológico Nacional de Estados Unidos tiene una red de radares Doppler por todo el país y sus escaneos son ahora comunes en la predicción del clima tanto en la televisión como en Internet.

Los radares Doppler instalados en los aeropuertos principales tienen otra aplicación: detectar cizalladuras del viento. Varios accidentes de aviones consumados y potenciales se han atribuido a ráfagas de viento hacia abajo (conocidas también como microráfagas y ráfagas hacia abajo), las cuales causan vientos cortantes que pueden originar accidentes durante el aterrizaje de los aviones. Las ráfagas de viento generalmente resultan de ráfagas hacia abajo de alta velocidad en la turbulencia de las tormentas, pero también pueden ocurrir en aire tranquilo cuando la lluvia se evapora a gran altura sobre el suelo. Como el radar Doppler puede detectar la rapidez del viento y la dirección de las gotas de lluvia en las nubes, así como el polvo y otros objetos que floten en el aire, ofrece advertencias anticipadas contra las condiciones peligrosas del viento cortante. Dos o tres sitios con radar son necesarios para detectar movimientos en dos o tres direcciones (dimensiones), respectivamente.

a)



b)

FIGURA 2 Radar Doppler
a) Instalación de radar Doppler. ***b)*** Un radar Doppler delinea la precipitación dentro de una tormenta. Un eco es una señal de un posible tornado.

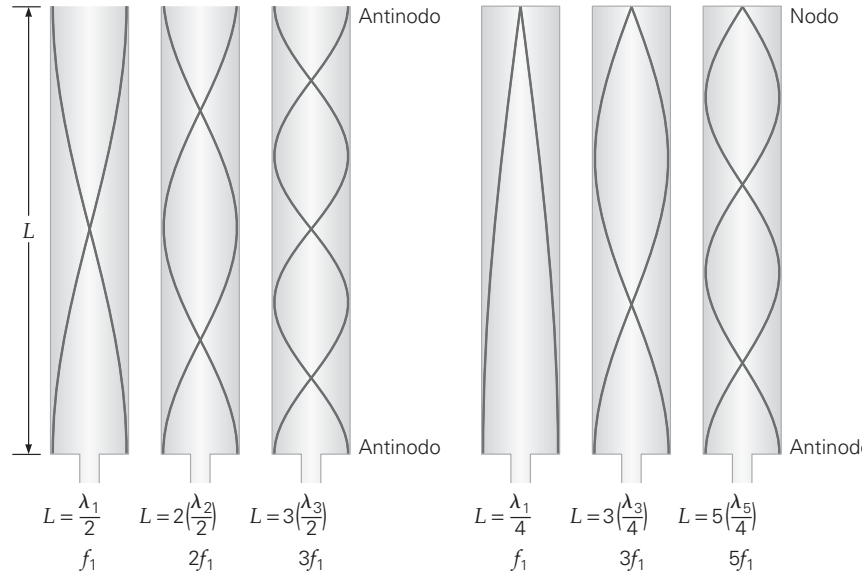
nica, y un número de Match mayor que 1 indica una rapidez supersónica. En el último caso, el número de Mach nos da la rapidez del avión en términos de un múltiplo de la rapidez del sonido. Por ejemplo, un número de Mach igual a 2 indica una rapidez del doble de la rapidez del sonido. Observe que puesto que sen $\theta \leq 1$, ninguna onda de choque puede existir a menos que $M \geq 1$.

14.6 Instrumentos musicales y características del sonido

OBJETIVO: Explicar algunas de las características del sonido de instrumentos musicales en términos de física.

Los instrumentos musicales ofrecen buenos ejemplos de ondas estacionarias y condiciones de frontera. Sobre algunos instrumentos de cuerdas, se producen notas diferentes usando la presión de los dedos para variar las longitudes de las cuerdas (▸ figura 14.14). Como vimos en el capítulo 13, las frecuencias naturales de una cuerda estirada (fija en cada extremo, como en el caso de las cuerdas de un instrumento) son $f_n = n(v/2L)$, de

▲ **FIGURA 14.14 Una cuerda en vibración más corta, da una frecuencia mayor** Notas diferentes se producen en instrumentos de cuerda, como guitarras, violines o violonchelos, colocando un dedo sobre una cuerda para cambiar su longitud efectiva o de vibración.

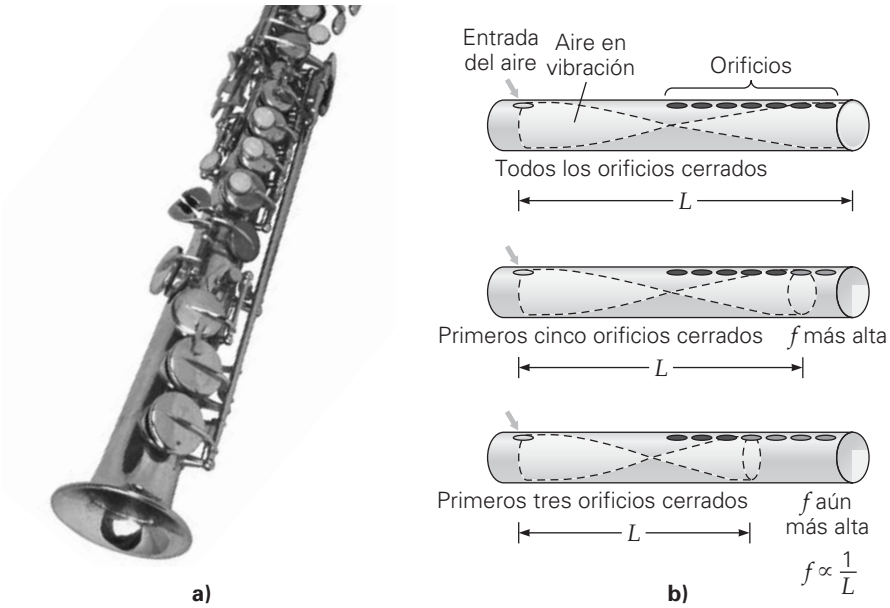


c)

▲ **FIGURA 14.15 Tubos de órgano** Ondas longitudinales estacionarias (ilustradas aquí como curvas senoidales) se forman en columnas de aire en vibración en tubos. ***a)*** Un tubo abierto tiene antinodos en ambos extremos. ***b)*** Un tubo cerrado tiene un extremo cerrado (nodo) y un extremo abierto (antinodo). ***c)*** Un moderno órgano de tubos. Los tubos pueden ser abiertos o cerrados.

la ecuación 13.20, donde la rapidez de la onda en la cuerda está dada por $v = \sqrt{F_T/\mu}$. Ajustando inicialmente la tensión en una cuerda, ésta queda afinada a una frecuencia específica (fundamental). La longitud efectiva de la cuerda se modifica entonces por la posición y la presión de los dedos.

Las ondas estacionarias también se forman en instrumentos de viento. Por ejemplo, considere un órgano de tubos con longitudes fijas, que pueden ser abiertos o cerrados (▲figura 14.15). Un tubo abierto está abierto en ambos extremos, en tanto que un tubo cerrado está cerrado en un extremo y abierto en el otro (el extremo con un antinodo). Un análisis similar al del capítulo 13, para una cuerda estirada con las condiciones de frontera adecuadas, muestra que las frecuencias naturales de los tubos son



▲ **FIGURA 14.16 Instrumentos de viento** ***a)*** Los instrumentos de viento son esencialmente tubos abiertos. ***b)*** La longitud efectiva de la columna de aire y, por lo tanto, el tono del sonido, varía al abrir y cerrar los orificios a lo largo del tubo. La frecuencia f es inversamente proporcional a la longitud efectiva L de la columna de aire.

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} = n\left(\frac{v}{2L}\right) = nf_1 \qquad (n = 1, 2, 3, \ldots)$$ (*frecuencias naturales para un tubo abierto: abierto en ambos extremos*) (14.17)

y

$$f_m = \frac{v}{\lambda_m} = m\left(\frac{v}{4L}\right) = mf_1 \qquad (m = 1, 3, 5, \ldots)$$ (*frecuencias naturales para un tubo cerrado: cerrado en un extremo*) (14.18)

donde v es la rapidez del sonido en el aire. Note que las frecuencias naturales dependen de la longitud del tubo. Ésta es una consideración importante en un órgano de tubos (figura 14.15c), particularmente al seleccionar la frecuencia dominante o fundamental. (El diámetro del tubo es también un factor, pero no se considera en este análisis sencillo.)

Los mismos principios físicos se aplican a los instrumentos de viento y de metal. En todos ellos, el aliento humano se utiliza para crear ondas estacionarias en un tubo abierto. La mayoría de tales instrumentos permiten al ejecutante variar la longitud efectiva del tubo y por ello el tono producido, ya sea con la ayuda de correderas o válvulas que varíen la longitud real del tubo en la cual puede resonar el aire, como en la mayoría de los metales, o abriendo y cerrando orificios en el tubo, como en los instrumentos de viento de madera (▲figura 14.16).

Recuerde del capítulo 13 que una nota musical o un tono es referido a la frecuencia de vibración fundamental de un instrumento. En términos musicales, el primer sobretono es el segundo armónico, el segundo sobretono es el tercer armónico, y así sucesivamente. Note que para un tubo cerrado de órgano (ecuación 14.18) faltan los armónicos pares.

Ejemplo 14.10 ■ Tubos acústicos: frecuencia fundamental

Un tubo abierto de órgano tiene una longitud de 0.653 m. Tomando la rapidez del sonido en el aire como 345 m/s, ¿cuál será la frecuencia fundamental de este tubo?

Razonamiento. La frecuencia fundamental ($n = 1$) de un tubo abierto está dada directamente por la ecuación 14.17. Físicamente hay media longitud de onda ($\lambda/2$) en la longitud del tubo, de manera que $\lambda = 2L$.

Solución.

Dado: $L = 0.653$ m
$v = 345$ m/s (rapidez del sonido)

Encuentre: f_1 (frecuencia fundamental)

Con $n = 1$,

$$f_1 = \frac{v}{2L} = \frac{345 \text{ m/s}}{2(0.653 \text{ m})} = 264 \text{ Hz}$$

Esta frecuencia es la de un (Cdo) medio (C_4).

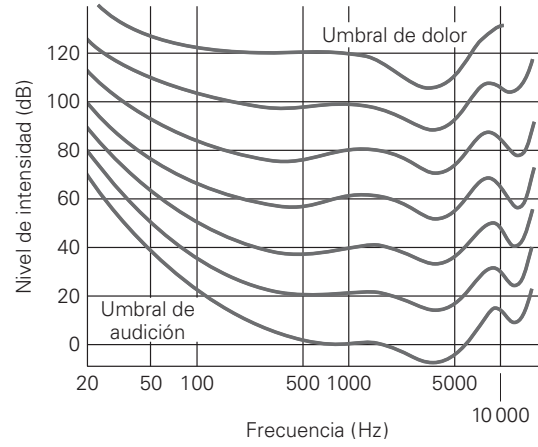
Ejercicio de refuerzo. Un tubo cerrado de órgano tiene una frecuencia fundamental de 256 Hz. ¿Cuál será la frecuencia de su primer sobretono? ¿Es audible esta frecuencia?

Los sonidos percibidos se describen en términos cuyos significados son similares a los usados para describir las propiedades físicas de las ondas sonoras. Físicamente, una onda por lo general se caracteriza por su intensidad, frecuencia y forma de la onda (armónicos). Los términos correspondientes utilizados para describir las sensaciones del oído son sonoridad, tono y timbre. Esas correlaciones generales se muestran en la tabla 14.3. Sin embargo, la correspondencia no es perfecta. Las propiedades físicas son objetivas y pueden medirse directamente. Los efectos sensoriales son subjetivos y varían de un individuo a otro. (Considere que la temperatura se mide con un termómetro y con el sentido del tacto.)

La intensidad del sonido y su medición en la escala de decibeles se trataron en la sección 14.3. La sonoridad está relacionada con la intensidad, aunque el oído humano responde de forma diferente a sonidos de frecuencias distintas. Por ejemplo, dos tonos con la misma intensidad (en watts por metro cuadrado), pero con frecuencias diferentes, el oído podría evaluarlos como de sonoridad diferente.

La *frecuencia* y el *tono* suelen utilizarse como sinónimos, pero de nuevo hay una diferencia tanto objetiva como subjetiva: si el mismo tono de baja frecuencia se hace sonar a dos niveles de intensidad distintos, la mayoría de las personas creerá que el sonido más intenso tiene un tono, o una frecuencia percibida, más bajos.

Las curvas de la gráfica de nivel de intensidad contra frecuencia, que se muestran en la ▼figura 14.17 se llaman *contornos de igual sonoridad* (o curvas de Fletcher-Munson, en honor a los investigadores que las generaron). Dichos contornos unen los puntos que representan combinaciones de intensidad-frecuencia que un individuo con audición promedio juzgaría como igual de sonoridad. La curva superior muestra que el nivel de decibeles del umbral de dolor (de 120 dB) no varía mucho, sin importar la frecuencia del sonido. En cambio, el umbral de audición, representado por el contorno más bajo, si varía



▶ **FIGURA 14.17 Contornos de igual sonoridad** Las curvas indican tonos que se consideran de igual sonoridad, aunque tienen diferentes frecuencias y niveles de intensidad. Por ejemplo, en el contorno más bajo, un tono de 1000 Hz a 0 dB suena tan fuerte como un tono de 50 Hz a 40 dB. Note que la escala de frecuencias es logarítmica para comprimir el rango de frecuencias grandes.

TABLA 14.3 Correlación general entre características preceptuales y físicas del sonido

Efecto sensorial	*Propiedades física de la onda*
Sonoridad	Intensidad
Tono	Frecuencia
Timbre	Forma de onda (armónicos)

ampliamente con la frecuencia. Para un tono con una frecuencia de 2000 Hz, el umbral de audición es 0 dB, pero un tono de 20 Hz debería tener un nivel de intensidad de más de 70 dB (el extrapolado intercepto-y de la curva más baja) para apenas poder ser oído.

Es interesante notar los valles (o mínimos) en las curvas. Las curvas de audición muestran un mínimo significativo en el intervalo de 2000 a 5000 Hz e indican que el oído es más sensitivo a sonidos con frecuencias alrededor de 4000 Hz. Un tono con una frecuencia de 4000 Hz puede escucharse a niveles de intensidad *debajo* de 0 dB. La alta sensibilidad en la región de 2000 a 5000Hz es muy importante para el entendimiento del habla. (¿Por qué?) Otro valle en las curvas, o región de sensibilidad, ocurre a aproximadamente 12 000 Hz.

Los mínimos ocurren como resultado de la resonancia en una cavidad cerrada en el canal auditivo (similar a un tubo cerrado). La longitud de la cavidad es tal que tiene una frecuencia fundamental de resonancia de aproximadamente 4000 Hz, que resulta en una sensitividad adicional. Como en una cavidad cerrada, la próxima frecuencia natural es el tercer armónico (véase la ecuación 14.18), que es tres veces la frecuencia fundamental, o cerca de 12 000 Hz.

Ejemplo 14.11 ■ El canal auditivo humano: ondas estacionarias

Considere que el canal auditivo del ser humano es un tubo cilíndrico de 2.54 cm de largo (1.0 in; véase la figura 1 en la sección A fondo 14.2 de la p. 475). ¿Cuál sería la frecuencia más baja de resonancia del sonido? Considere que la temperatura del aire en el canal auditivo es de 37°C.

Razonamiento. Como se describió, el canal auditivo es, en esencia, un tubo abierto por un lado (el canal auditivo externo) y cerrado por el otro (el tímpano). La onda estacionaria de resonancia de frecuencia más baja que cabe en el tubo es $L = \lambda/4$ (véase la figura 14.15), y $\lambda = 4L$. Entonces, la frecuencia está dada por $f_1 = v/\lambda_1 = v/4L$ (ecuación 14.18), donde v es la rapidez del sonido en el aire.

Solución.

Dado: $L = 2.54$ cm $= 0.0254$ m
$T = 37°$C (temperatura corporal normal)

Encuentre: la frecuencia de resonancia más baja, f_1

Primero se calcula la rapidez del sonido a 37°C,

$$v = (331 + 0.6T_C)\ \text{m/s} = [331 + 0.6(37.0)]\ \text{m/s} = 353\ \text{m/s}$$

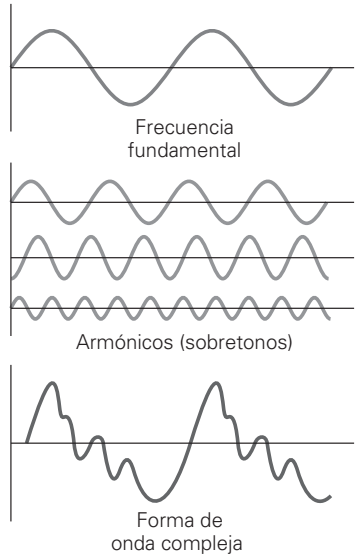
y

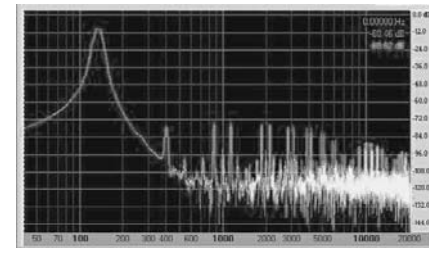
$$f_1 = \frac{v}{4L} = \frac{353\ \text{m/s}}{4(0.0254\ \text{m})} = 3.47 \times 10^3\ \text{Hz} = 3.47\ \text{kHz}$$

Compare con las curvas en la figura 14.17 y observe el valle en estas últimas aproximadamente a esa frecuencia. ¿Qué sucede con el otro valle justo por encima de los 10 kHz? Investigue la siguiente frecuencia natural para el canal auditivo, f_3.

Ejercicio de refuerzo. Los niños tienen canales auditivos más pequeños que los adultos, aproximadamente de 1.30 cm de largo. ¿Cuál es la frecuencia fundamental más baja para el canal auditivo de un niño? Utilice la misma temperatura del aire que en el ejemplo. (*Nota*: con el crecimiento, el canal auditivo se alarga, y experimentalmente se ha determinado que alrededor de los siete años alcanza la longitud del canal de un adulto y la frecuencia fundamental más baja.)

La **calidad** de un tono es la característica que permite distinguir entre sonidos básicamente con la misma intensidad y frecuencia. La calidad del tono depende de la forma de la onda, específicamente del número de armónicos (sobretonos) presentes y de





▲ **FIGURA 14.18** Forma de la onda y timbre ***a)*** La superposición de sonidos de frecuencias y amplitudes diferentes da una forma de onda compleja. Los armónicos, o sobretonos, determinan el timbre del sonido. ***b)*** La forma de la onda de un tono de violín se muestra en un osciloscopio.

sus intensidades relativas (▲figura 14.18). El tono de una voz depende en gran parte de las cavidades vocales de resonancia. Una persona puede cantar en un tono con la misma frecuencia e intensidad básicas que otra; pero las diferentes combinaciones de sobretonos dan a las dos voces timbres diferentes.

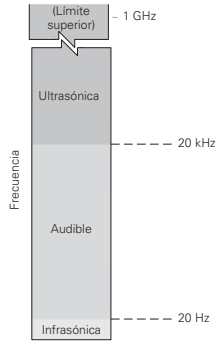
Las notas de una escala musical corresponden a ciertas frecuencias; como vimos en el ejemplo 14.10, el do medio tiene una frecuencia de 264 Hz. Cuando una nota se toca en un instrumento, su frecuencia asignada es la del primer armónico, que es la frecuencia fundamental. (El segundo armónico es el primer sobretono, el tercer armónico es el segundo sobretono, y así sucesivamente.) La frecuencia fundamental es dominante sobre los sobretonos acompañantes que determinan la calidad del sonido del instrumento. Recuerde del capítulo 13 que los sobretonos producidos dependen de cómo se toque un instrumento. Por ejemplo, si la cuerda de un violín se puntea o se rasga, se pueden discernir del timbre de notas idénticas.

PHYSLET®

Exploración 18.2 Creación de sonidos mediante la adición de armónicos

Repaso del capítulo

- El espectro de frecuencia del sonido se divide en regiones de frecuencia infrasónica ($f < 20$ Hz), audible (20 Hz $< f <$ 20 kHz) y ultrasónica ($f > 20$ kHz).

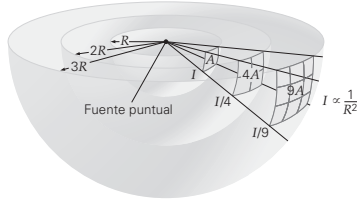


- La rapidez del sonido en un medio depende de la elasticidad y de la densidad del medio. En general, $v_{\text{sólidos}} > v_{\text{líquidos}} > v_{\text{gases}}$.

Rapidez del sonido en aire (metros por segundo):

$$v = (331 + 0.6T_C)\ \text{m/s} \tag{14.1}$$

- La intensidad de una fuente puntual es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia a la fuente.



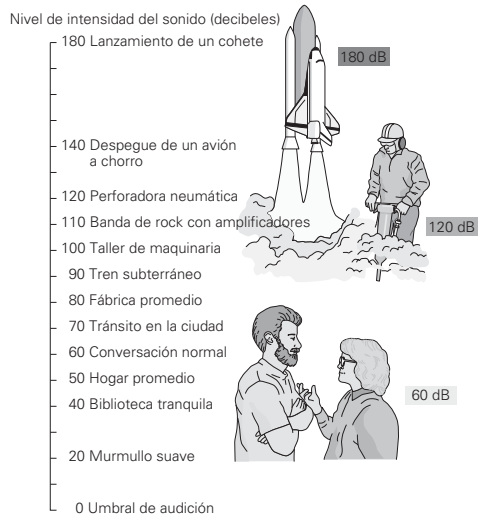
Intensidad de una fuente puntual:

$$I = \frac{P}{4\pi R^2} \qquad \text{e} \qquad \frac{I_2}{I_1} = \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^2 \tag{14.2, 14.3}$$

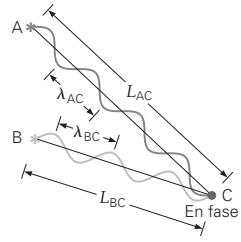
- El nivel de intensidad del sonido es una función logarítmica de la intensidad del sonido, y se expresa en decibeles (dB).

Nivel de intensidad (en decibeles, dB):

$$\beta = 10 \log \frac{I}{I_o} \qquad \text{donde} \qquad I_o = 10^{-12}\ \text{W/m}^2 \tag{14.4}$$



- La interferencia de ondas sonoras de dos fuentes puntuales depende de la diferencia de fase relacionada con la diferencia de la longitud de las trayectorias. Las ondas sonoras que llegan en fase a un punto se refuerzan entre sí (interferencia constructiva); las ondas sonoras que llegan desfasadas a un punto se anulan entre sí (interferencia destructiva).



Diferencia de fase (donde ΔL es la diferencia de longitud de las trayectorias):

$$\Delta\theta = \frac{2\pi}{\lambda}(\Delta L) \tag{14.5}$$

Condición para interferencia constructiva:

$$\Delta L = n\lambda \qquad (n = 0, 1, 2, 3, \ldots) \tag{14.6}$$

Condición para interferencia destructiva:

$$\Delta L = m\left(\frac{\lambda}{2}\right) \qquad (m = 1, 3, 5, \ldots) \tag{14.7}$$

Frecuencia de un pulso:

$$f_b = |f_1 - f_2| \tag{14.8}$$

- El efecto Doppler depende de las velocidades de la fuente de sonido y del observador respecto al aire en reposo. Cuando el movimiento relativo de la fuente y el observador es de mutuo acercamiento, se incrementa el tono observado; cuando el movimiento relativo de la fuente y el observador es de mutuo alejamiento, disminuye el tono observado.

Efecto Doppler:

Fuente en movimiento, observador en reposo

$$f_o = \left(\frac{v}{v \pm v_s}\right) f_s = \left(\frac{1}{1 \pm \dfrac{v_s}{v}}\right) f_s \tag{14.11}$$

$$\begin{cases} - \text{ para fuente acercándose hacia el observador estacionario;} \\ + \text{ para fuente alejándose del observador estacionario} \end{cases}$$

donde v_s = rapidez de la fuente
y v = rapidez del sonido

Observador en movimiento, fuente en reposo

$$f_o = \left(\frac{v \pm v_o}{v}\right) f_s = \left(1 \pm \frac{v_o}{v}\right) f_s \tag{14.14}$$

$$\begin{cases} + \text{ para observador acercándose hacia la fuente estacionaria;} \\ - \text{ para observador alejándose de la fuente estacionaria} \end{cases}$$

donde v_0 = rapidez del observador
y v = rapidez del sonido

Observador en movimiento y fuente en movimiento

$$f_o = \left(\frac{v \pm v_o}{v \mp v_s}\right) f_s \tag{14.14a}$$

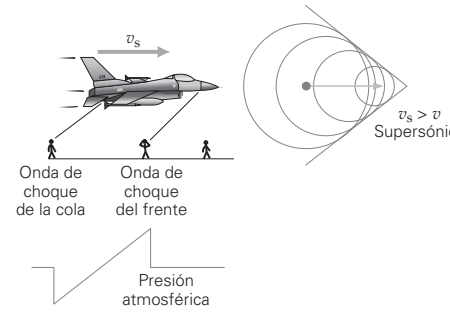
Los signos de la parte superior se aplican cuando ambos se acercan entre sí
Los signos de la parte inferior se aplican cuando ambos se alejan entre sí

Ángulo de la onda de choque cónica:

$$\text{sen}\ \theta = \frac{vt}{v_s t} = \frac{v}{v_s} = \frac{1}{M} \tag{14.15}$$

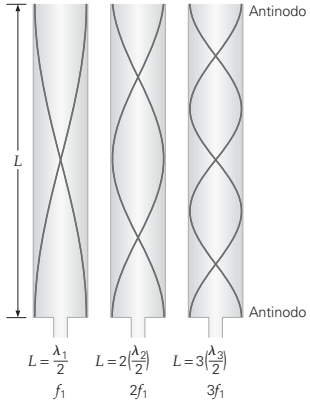
Número de Mach:

$$M = \frac{v_s}{v} = \frac{1}{\text{sen}\ \theta} \tag{14.16}$$



Frecuencias naturales de tubos de órganos abiertos en ambos extremos:

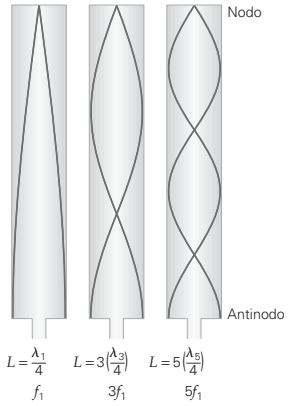
$$f_n = n\left(\frac{v}{2L}\right) = nf_1 \qquad (n = 1, 2, 3, \ldots) \qquad (14.17)$$



Tubo abierto de órgano

Frecuencias naturales de tubos de órganos cerrados en un extremo:

$$f_m = m\left(\frac{v}{4L}\right) = mf_1 \qquad (m = 1, 3, 5, \ldots) \qquad (14.18)$$



Tubo cerrado de órgano

Ejercicios

Los ejercicios designados **OM** *son preguntas de opción múltiple; los* **PC** *son preguntas conceptuales; y los* **EI** *son ejercicios integrados. A lo largo del texto, muchas secciones de ejercicios incluirán ejercicios "apareados". Estos pares de ejercicios, que se identifican con* números subrayados*, pretenden ayudar al lector a resolver problemas y aprender. El primer ejercicio de cada pareja (el de número par) se resuelve en la Guía de estudio, que puede consultarse si se necesita ayuda para resolverlo. El segundo ejercicio (de número impar) es similar, y su respuesta se da al final del libro.*

14.1 Ondas sonoras *y* 14.2 La rapidez del sonido

1. **OM** ¿En qué región del espectro de sonido está una onda sonora que tiene una frecuencia de 15 Hz: *a*) audible, *b*) infrasónica, *c*) ultrasónica o *d*) supersónica.

2. **OM** Una onda sonora en el aire *a*) es longitudinal, *b*) es transversal, *c*) tiene componentes longitudinales y transversales o *d*) viaja más rápido que una onda sonora a través de un líquido.

3. **OM** La rapidez del sonido es generalmente mayor *a*) en sólidos, *b*) en líquidos, *c*) en gases o *d*) en el vacío.

4. **OM** La rapidez del sonido en el aire *a*) es aproximadamente de 1/3 km/s, *b*) es aproximadamente de 1/5 mi/s, *c*) depende de la temperatura o *d*) todas las anteriores.

5. **PC** Sugiera una posible explicación de por qué algunos insectos voladores producen zumbidos y otros no.

6. **PC** Explique por qué el sonido viaja más rápido en aire caliente que en aire frío.

7. **PC** Dos sonidos que difieren en frecuencia son emitidos por un mismo altoparlante. ¿Qué sonido llegará primero a su oído, el de menor o el de mayor frecuencias?

8. **PC** La rapidez del sonido en el aire depende de la temperatura. ¿Qué efecto, si hubiera alguno, tiene la humedad en ella?

9. ● El sonido de un relámpago es escuchado por un observador 3.0 s después de que ve el destello. ¿Cuál será la distancia aproximada al lugar en que cae el relámpago en *a*) kilómetros y *b*) millas?

10. ● ¿Cuál es la rapidez del sonido en aire *a*) a 10°C y *b*) a 20°C?

11. ● La rapidez del sonido en el aire en un día de verano es de 350 m/s. ¿Cuál será la temperatura del aire?

12. ● El sonar se usa para "mapear" el lecho oceánico. Si una señal ultrasónica se recibe 2.0 s después de su emisión, ¿qué tan profundo es el lecho oceánico en ese lugar?

13. ● La rapidez de una onda en un líquido está dada por $v = \sqrt{B/\rho}$, donde B es el módulo volumétrico del líquido y r es su densidad. Demuestre que esta ecuación es dimensionalmente correcta. ¿Lo es también la ecuación $v = \sqrt{Y/\rho}$ para un sólido? (U es el módulo de Young.)

14. ●● Una cuerda de 1.00 m de longitud y una masa de 15.0 g se somete a una tensión de 35.0 N. Se tira de ella de manera que vibra en el modo fundamental de onda estacionaria. ¿Cuáles serán *a*) la frecuencia y *b*) la longitud de onda del sonido? Suponga temperatura ambiental normal.

15. **El** ●● Un diapasón vibra con una frecuencia de 256 Hz. *a*) Cuando aumenta la temperatura del aire, la longitud de onda del sonido del diapasón 1) aumenta, 2) permanece igual o 3) decrece. ¿Por qué? *b*) Si la temperatura aumenta de 0 a 20°C, ¿cuál será el cambio en la longitud de onda?

16. ●● Partículas de aproximadamente 3.0×10^{-2} cm de diámetro se deben desprender de partes de una máquina en un baño acuoso de limpieza ultrasónica. ¿Arriba de qué frecuencia debe operarse el baño para producir longitudes de onda de este tamaño y menores?

17. ●● El ultrasonido médico usa una frecuencia de aproximadamente 20 MHz para diagnosticar condiciones y enfermedades humanas. *a*) Si la rapidez del sonido en un tejido es de 1500 m/s, ¿cuál será el objeto detectable más pequeño? *b*) Si la profundidad de penetración es de aproximadamente 200 longitudes de onda, ¿a qué profundidad penetrará este instrumento?

18. ●● El latón es una aleación de cobre y zinc. ¿Agregar zinc al cobre causa un aumento o una disminución de la rapidez del sonido en las varillas de latón, respecto a la rapidez en las varillas de cobre? Explique por qué.

19. ●● La rapidez del sonido en el acero es de aproximadamente 4.50 km/s. Se golpea un riel de acero con un martillo, y un observador a 0.400 km tiene un oído pegado al riel. *a*) ¿Cuánto tiempo pasará desde que el sonido se escucha a través del riel, hasta el momento en que se escucha a través del aire? Suponga que la temperatura del aire es de 20°C y que no sopla el viento. *b*) ¿Cuánto tiempo transcurrirá si el viento sopla hacia el observador a 36.0 km/h desde donde el riel fue golpeado?

20. ●● Una persona sostiene un rifle horizontalmente y lo dispara hacia un blanco. La bala tiene una rapidez inicial de 200 m/s y la persona escucha que la bala golpea el blanco 1.00 s después de que se disparó. La temperatura del aire es de 72°F. ¿Cuál será la distancia al blanco?

21. ●● Un delfín de agua dulce envía sonidos ultrasónicos para localizar una presa. Si el eco emitido por la presa es recibido por el delfín 0.12 s después de ser enviado, ¿qué tan lejos estará la presa del delfín?

22. ●● Un submarino en la superficie oceánica detecta un eco del sonar que indica que hay un objeto bajo el agua. El eco regresa a un ángulo de 20° por encima de la horizontal y tarda 2.32 s en regresar al submarino. ¿Cuál será la profundidad del objeto?

23. ●● La rapidez del sonido en el tejido humano es de aproximadamente 1500 m/s. Se utiliza una sonda de 3.50 MHz para efectuar un procedimiento ultrasónico. *a*) Si la profundidad física efectiva del ultrasonido es de 250 longitudes de onda, ¿cuál será la profundidad física en metros? *b*) ¿Cuál es el lapso de tiempo para que el ultrasonido haga un viaje completo, si se refleja en un objeto a la profundidad efectiva? *c*) El mínimo detalle susceptible de detección está en el orden de una longitud de onda del ultrasonido. ¿Cuál será ésta?

24. ●● El tamaño de su tímpano (véase la figura 1 de A fondo 14.2, p. 475) determina parcialmente el límite superior de la frecuencia de su región audible, usualmente entre 16 000 y 20 000 Hz. Si la longitud de onda es del orden del doble del diámetro del tímpano, y la temperatura del aire es de 20°C, ¿qué ancho tendrá su tímpano? ¿Es razonable su respuesta?

25. **El** ●●● Al escalar una montaña que tiene varios riscos en voladizo, un alpinista deja caer una piedra desde el primer risco, para determinar su altura midiendo el tiempo tarda en escuchar que la piedra golpee el suelo. *a*) En un segundo risco, que tiene el doble de altura que el primero, el tiempo medido del sonido de la piedra que se deja caer ahí es 1) menos que el doble, 2) el doble o 3) más que el doble del primero. ¿Por qué? *b*) Si el tiempo medido es de 4.8 s para la piedra que se deja caer desde el primer risco, y la temperatura del aire es de 20°C, ¿qué tan alto es el risco? *c*) Si la altura de un tercer risco es tres veces mayor que la del primero, ¿cuál será el tiempo medido para una piedra que se deja caer ahí hasta que toca el suelo?

26. ●●● Un murciélago que se desplaza a 15.0 m/s emite un sonido de alta frecuencia conforme se aproxima hacia una pared que está a 25.0 m. Suponiendo que el murciélago continúa en línea recta hacia la pared, ¿qué tan lejos estará cuando reciba el eco? La fría temperatura en la cueva del murciélago es de 8.0°C.

27. ●●● Un sonido que se propaga a través del aire a 30°C pasa por un frente frío vertical hacia aire que está a 4.0°C. Si el sonido tiene una frecuencia de 2500 Hz, ¿en qué porcentaje cambiará su longitud de onda al cruzar la frontera?

14.3 Intensidad del sonido y nivel de intensidad del sonido

28. **OM** ¿Si aumenta la temperatura del aire, la intensidad del sonido de una fuente puntual de salida constante *a*) aumentará, *b*) disminuirá o *c*) permanecerá sin cambio?

29. **OM** La escala de decibeles está referida a una intensidad estándar de *a*) 1.0 W/m^2, *b*) 10^{-12} W/m^2, *c*) una conversación normal o *d*) el umbral de dolor.

30. **OM** Si el nivel de intensidad de un sonido de 20 dB se incrementa a 40 dB, la intensidad aumentará por un factor de *a*) 10, *b*) 20, *c*) 40, *d*) 100.

31. **PC** ¿Dónde es mayor la intensidad y por qué factor? 1) En un punto a la distancia R de una fuente de energía P, o 2) en un punto a la distancia $2R$ de una fuente de energía de $2P$. Explique su respuesta.

32. **PC** La escala Richter, usada para medir el nivel de intensidad de los sismos, es una escala logarítmica, como lo es también la escala en decibeles. ¿Por qué se usan tales escalas?

33. **PC** ¿Hay niveles negativos de decibeles, por ejemplo, −10 dB? Si es así, ¿qué significan?

34. ● Calcule la intensidad generada por una fuente puntual de sonido de 1.0 W en un punto situado a *a*) 3.0 m y *b*) 6.0 m de ella.

35. **EI** ● a) Si se triplica la distancia desde una fuente puntual de sonido, la intensidad del sonido será 1) 3, 2) 1/3, 3) 9 o 4) 1/9 veces el valor original. ¿Por qué? *b*) ¿Cuántas veces debe incrementarse la distancia desde una fuente puntual para reducir a la mitad la intensidad del sonido?

36. ● Suponiendo que el diámetro de su tímpano es de 1 cm (véase el ejercicio 24), ¿cuál será la potencia del sonido recibida por el tímpano *a*) en el umbral de audición y *b*) en el umbral de dolor?

37. ● En un piano se toca el do central (262 Hz) para ayudar a afinar una cuerda de violín. Cuando la cuerda se pulsa, se escuchan nueve pulsaciones en 3.0 s. *a*) ¿Qué tanto estará desafinada la cuerda del violín? *b*) Para dar el do central, ¿la cuerda debería apretarse o aflojarse?

38. ● Calcule el nivel de intensidad para *a*) el umbral de audición y *b*) el umbral de dolor.

39. ● Encuentre los niveles de intensidad en decibeles para sonidos con intensidades de *a*) 10^{-2} W/m^2, *b*) 10^{-6} W/m^2 y *c*) 10^{-15} W/m^2.

40. **EI** ●● *a*) Si la potencia de una fuente de sonido se duplica, el nivel de intensidad a una cierta distancia de la fuente 1) se incrementa, 2) se duplica exactamente o 3) disminuye. ¿Por qué? *b*) ¿Cuáles son los niveles de intensidad a una distancia de 10 m desde fuentes de 5.0 y de 10 W, respectivamente?

41. ●● Los niveles de intensidad de dos personas que conversan son 60 y 70 dB, respectivamente. *a*) ¿Cuál será la intensidad de los sonidos combinados?

42. ●● Un individuo tiene una pérdida auditiva de 30 dB para una frecuencia específica. ¿Cuál será la intensidad del sonido que se escucha en esta frecuencia que tiene una intensidad del umbral del dolor?

43. ●● En la tabla 14.4 se dan los niveles de ruido de algunos aviones comunes. ¿Cuáles son las intensidades mínima y máxima, para *a*) el despegue y *b*) el aterrizaje?

44. **EI** ●● Si la distancia a una fuente sonora se reduce a la mitad, *a*) ¿el nivel de intensidad del sonido cambiará por un factor de 1) 2, 2) 1/2, 3) 4, 4) 1/4 o 5) ninguno de los factores anteriores? ¿Por qué? *b*) ¿Cuál es el cambio en el nivel de la intensidad del sonido?

45. ●● Una bocina compacta da 100 W de potencia de sonido. *a*) Ignorando las pérdidas provocadas por el aire, ¿a qué distancia estaría la intensidad del sonido en el umbral del dolor? *b*) Ignorando las pérdidas provocadas por el aire, ¿a qué distancia la intensidad del sonido sería la de la conversación normal? ¿Su respuesta parece razonable? Explique por qué.

46. ●● ¿Cuál es el nivel de intensidad de un sonido de 23 dB después de ser amplificado *a*) 10 mil veces, *b*) un millón de veces, *c*) mil millones de veces?

47. ●● En un concurso organizado en el vecindario para ver quién trepa un árbol más rápido, usted está listo para participar. Sus amigos están alrededor de usted formando un círculo como la sección de porristas; cada individuo provocará un nivel de intensidad de sonido de 80 dB en el lugar que usted ocupa. Si el nivel real del sonido en su lugar es de 87 dB, ¿cuántas personas lo están apoyando?

48. **EI** ●● El sonido del ladrido de un perro tiene un nivel de intensidad de 40 dB. *a*) Si dos de los mismos perros están ladrando, el nivel de intensidad es 1) menor que 40 dB, 2) entre 40 y 80 dB o 3) 80 dB. *b*) ¿Cuál es el nivel de intensidad?

49. ●● En un concierto de rock, el nivel promedio de intensidad del sonido para una persona en un asiento de la fila al frente es de 110 dB para una sola banda. Si cada una de las bandas programadas para tocar producen sonido de esa misma intensidad, ¿cuántas de ellas tienen que tocar simultáneamente para que el nivel del sonido esté en el umbral de dolor o arriba de éste?

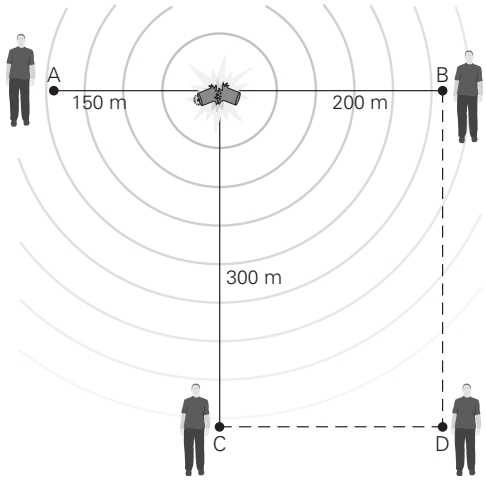
TABLA 14.4 Niveles de ruido en despegue y aterrizajes para algunos aviones comerciales comunes* (Véase el ejercicio 43.)

Avión	*Ruido de despegue (dB)*	*Ruido de aterrizaje (dB)*
737	85.7–97.7	99.8–105.3
747	89.5–110.0	103.8–107.8
DC-10	98.4–103.0	103.8–106.6
L-1011	95.9–99.3	101.4–102.8

*Las lecturas de los niveles de ruido se toman desde 198 m (650 ft). El rango depende del modelo de avión y del tipo de motor empleado.

50. ●● A una distancia de 12.0 m desde una fuente puntual, el nivel de intensidad es de 70 dB. ¿A qué distancia desde la fuente el nivel de intensidad será de 40 dB?

51. ●● Durante una celebración patria, un cohete explota (▼figura 14.19). Considerando el cohete como una fuente puntual, ¿cuáles son las intensidades escuchadas por los observadores en los puntos B, C y D, respecto a la escuchada por el observador en A?



▲ **FIGURA 14.19 Una gran explosión** Véase el ejercicio 51.

52. ●● Una oficina en una compañía de comercio electrónico tiene 50 computadoras, lo que genera un nivel de intensidad de sonido de 40 dB (por el ruido de los teclados). El gerente de la oficina trata de reducir el ruido a la mitad eliminando 25 computadoras. ¿Alcanzará su meta? ¿Cuál es el nivel de intensidad que generan 25 computadoras?

53. ●●● Un tono de 1000 Hz de una bocina tiene un nivel de intensidad de 100 dB a una distancia de 2.5 m. Si se supone que la bocina es una fuente puntual, ¿qué tan lejos de la bocina tendrá el sonido niveles de intensidad *a*) de 60 dB y *b*) apenas suficientemente alto para ser escuchado?

54. ●●● Durante la práctica, en el *huddle* un quarterback grita la jugada en anticipación al ruido de la multitud que habrá durante el juego real. Para un receptor que está a 0.750 m del quarterback en el *huddle*, el sonido parece tan fuerte como el llanto de un niño. Cuando todos se colocan en la formación de jugada, el quarterback grita al doble de la potencia de salida, aunque las instrucciones apenas tienen una intensidad tan fuerte como la de la conversación normal. Utilice los valores típicos de la tabla 14.2 para estimar qué tan lejos del quarterback está el receptor en la formación.

55. ●●● Una abeja produce un zumbido que es apenas audible para un individuo a 3.0 m de distancia. ¿Cuántas abejas tienen que zumbar, y a qué distancia, para producir un sonido con un nivel de intensidad de 50 dB?

14.4 Fenómenos acústicos y 14.5 El efecto Doppler

56. **OM** La interferencia constructiva y destructiva de las ondas sonoras depende de *a*) la rapidez del sonido, *b*) la difracción, *c*) la diferencia de fase, *d*) todas las anteriores.

57. **OM** Las pulsaciones son el resultado directo *a*) de la interferencia, *b*) de la refracción, *c*) de la difracción o *d*) del efecto Doppler.

58. **OM** El radar de la policía utiliza *a*) refracción, *b*) el efecto Doppler, *c*) interferencia o *d*) estampido sónico.

59. **PC** ¿Tienen algo que ver los pulsos de interferencia con el compás de la música? Explique por qué.

60. **PC** *a*) Hay un efecto Doppler si una fuente de sonido y un observador se mueven con la misma velocidad? *b*) ¿Cuál sería el efecto, si una fuente móvil acelerara hacia un observador estacionario?

61. **PC** Cuando una persona camina *entre* un par de altavoces que producen tonos de la misma amplitud y frecuencia, escucha una intensidad variable del sonido. Explique por qué.

62. **PC** ¿Cómo puede un radar Doppler usado en el pronóstico del tiempo atmosférico medir tanto la posición como el movimiento de las nubes?

63. ● Dos fuentes puntuales adyacentes, A y B, están directamente enfrente de un observador y emiten tonos idénticos a 1000 Hz. ¿A qué distancia mínima detrás de la fuente B tendría que moverse la fuente A, para que el observador no oyera ningún sonido? (Suponga que la temperatura del aire es de 20°C e ignore la disminución de la intensidad con la distancia.)

64. ● Un violinista y un pianista suenan simultáneamente notas con frecuencias de 436 y 440 Hz, respectivamente. ¿Qué frecuencia pulsante escucharán los músicos?

65. **EI** ● Una violinista que afina su instrumento con una nota de piano de 264 Hz detecta tres pulsos por segundo. *a*) La frecuencia del violín podría ser 1) menor que 264 Hz, 2) igual a 264 Hz, 3) mayor que 264 Hz o 4) tanto 1 como 3. ¿Por qué? *b*) ¿Cuáles son las frecuencias posibles del tono del violín?

66. ● ¿Cuál es la frecuencia escuchada por una persona que viaja directamente a 60 km/h hacia el silbato de una fábrica (f = 800 Hz), si la temperatura del aire es de 0°C?

67. **EI** ● En un día con temperatura de 20°C y sin viento, una persona en movimiento escucha una frecuencia de 520 Hz proveniente de una sirena estacionaria de 500 Hz. *a*) La persona 1) se acerca, 2) se aleja o 3) está estacionaria respecto a la sirena. ¿Por qué? *b*) ¿Cuál es la rapidez de la persona?

68. ●● Mientras está de pie junto al cruce del ferrocarril, usted escucha el silbato de un tren. La frecuencia emitida es de 400 Hz. Si el tren viaja a 90.0 km/h y la temperatura del aire es de 25°C, ¿cuál será la frecuencia que usted escucha *a*) cuando el tren se aproxima y *b*) después de que pasa?

69. ●● Dos cuerdas idénticas en violonchelos diferentes están afinadas con la nota do (A) de 440 Hz. La clavija que sostiene una de las cuerdas se afloja, por lo que su tensión disminuye 1.5%. ¿Cuál será la frecuencia del pulso escuchado cuando las cuerdas se tocan juntas?

70. ●● ¿Qué tan rápido, en kilómetros por hora, debe moverse una fuente de sonido hacia usted, para hacer la frecuencia observada 5.0% mayor que la frecuencia verdadera? (Suponga que la rapidez del sonido es de 340 m/s.)

71. **EI** ●● Usted va manejando hacia el este a 25.0 m/s, mientras nota que una ambulancia viaja con dirección oeste hacia usted a 35.0 m/s. El sonido de las sirenas que detecta tiene una frecuencia de 300 Hz. *a*) ¿La frecuencia real de las sirenas es 1) mayor que 300 Hz, 2) menor que 300 Hz o 3) exactamente de 300 Hz? *b*) Determine la frecuencia real de las sirenas. Suponga que la temperatura es la ambiental normal.

72. ●● La frecuencia de la sirena de una ambulancia es de 700 Hz. ¿Cuáles serán las frecuencias que escucha un peatón que está en reposo, conforme la ambulancia se aproxima y se aleja de él con una rapidez de 90.0 km/h? (Suponga que la temperatura del aire es de 20°C.)

73. ●● Un avión a reacción vuela con una rapidez de Mach 2.0. ¿Cuál será el ángulo medio de la onda de choque cónica que forma la aeronave? ¿Podría decir cuál es la rapidez de la onda de choque?

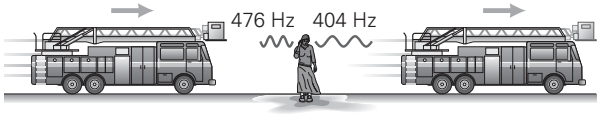
74. **EI** ●● Un avión caza vuela con una rapidez Mach 1.5. *a*) Si el avión volara más rápido que Mach 1.5, el semiángulo de la onda de choque cónica 1) aumentaría, 2) permanecería igual o 3) disminuiría. ¿Por qué? *b*) ¿Cuál es semiángulo de la onda de choque cónica formada por el avión que vuela a Mach 1.5?

75. ●● El semiángulo de la onda de choque cónica formada por un avión supersónico es de 30°. ¿Cuáles son *a*) el número de Mach del avión y *b*) la rapidez real del avión si la temperatura del aire es de −20°C?

76. ●●● Dos altavoces de fuente puntual están a una cierta distancia entre sí y una persona está a 12.0 m enfrente de uno de ellos, sobre una línea perpendicular a la línea base de los altavoces. Si las bocinas emiten tonos idénticos de 1000 Hz, ¿cuál será su separación mínima diferente de cero para que el observador escuche poco o ningún sonido? (Considere la rapidez del sonido igual a exactamente 340 m/s.)

77. ●● Un observador viaja entre dos fuentes idénticas de sonido (cuya frecuencia es de 100 Hz). Su rapidez es de 10.0 m/s conforme se aproxima a una fuente y se aleja de la otra. *a*) ¿Qué tono de frecuencia escucha de ambas fuentes combinadas? *b*) ¿Cuántas pulsaciones por segundo escucha? Suponga que la temperatura es la ambiental normal.

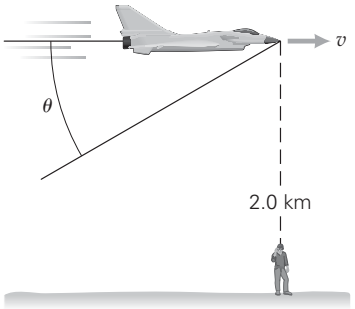
78. ●●● Un peatón escucha una sirena variar en frecuencia desde 476 hasta 404 Hz, cuando un camión de bomberos se acerca, pasa y se aleja por una calle recta (▸figura 14.20). ¿Cuál es la rapidez del camión? (Considere que la rapidez del sonido en el aire es de 343 m/s.)



▲ **FIGURA 14.20 El ulular de una sirena** Véase el ejercicio 78.

79. ●●● Los murciélagos emiten sonidos con frecuencias de aproximadamente 35.0 kHz y usan localización por eco para encontrar a sus presas. Si un murciélago se mueve con una rapidez de 12.0 m/s hacia un insecto suspendido en aire, *a*) ¿qué frecuencia escuchará el insecto si la temperatura del aire es de 20.0°C? *b*) ¿Qué frecuencia escucha el murciélago del sonido reflejado? *c*) Si el insecto inicialmente se estuviera alejando del murciélago, ¿afectaría esto las frecuencias?

80. ●●● Un avión a reacción supersónico pasa directamente por encima de un observador, a una altura de 2.0 km (▾figura 14.21). Cuando el sujeto escucha el primer estampido sónico, el avión ha volado una distancia horizontal de 2.5 km a rapidez constante. *a*) ¿Cuál será el ángulo del cono de la onda de choque? *b*) ¿A qué número de Mach vuela el avión? (Suponga que la rapidez del sonido es a una temperatura promedio constante de 15°C.)



▲ **FIGURA 14.21 Más rápido que una bala** Véase el ejercicio 80.

14.6 Instrumentos musicales y características del sonido

81. **OM** Si se tienen un tubo abierto y otro cerrado con la misma longitud, ¿cuál tendrá la frecuencia natural más baja? *a*) el tubo abierto, *b*) el tubo cerrado o *c*) ambos tienen la misma baja frecuencia.

82. **OM** El oído humano puede escuchar mejor los tonos *a*) a 1000 Hz, *b*) a 4000 Hz, *c*) a 6000 Hz o *d*) a todas las frecuencias.

83. **OM** Curvas de igual sonoridad varían *a*) con la calidad, *b*) con los armónicos, *c*) con la forma de onda, *d*) con el tono del sonido.

84. **OM** La calidad del sonido depende *a*) de su forma de onda, *b*) de su frecuencia, *c*) de su rapidez o *d*) de su intensidad.

85. PC *a*) Después de una nevada, ¿por qué todo se ve particularmente tranquilo? *b*) ¿Por qué los cuartos vacíos suenan huecos? *c*) ¿Por qué las voces de la gente suenan más llenas o más ricas cuando cantan en la ducha?

86. PC ¿Por qué los trastes de una guitarra no están uniformemente espaciados?

87. PC ¿Es posible para un tubo abierto de órgano y un tubo de órgano cerrado en un extremo, cada uno de la misma longitud, producir notas de la misma frecuencia? Justifique su respuesta.

88. PC Cuando usted sopla sobre la boca de una botella vacía, se produce un tono específico. Si la botella se llena hasta un tercio de su altura, ello afectaría el tono?

89. PC ¿Por qué no se tienen armónicos pares en un tubo cerrado en un extremo?

90. ● Las tres primeras frecuencias naturales de un tubo de órgano son 126 Hz, 378 Hz y 630 Hz. *a*) ¿El tubo es abierto o cerrado? *b*) Si la rapidez del sonido en el aire es de 340 m/s, encuentre la longitud del tubo.

91. ● Un tubo de órgano cerrado tiene una frecuencia fundamental de 528 Hz (la nota do) a 20°C. ¿Cuál será la frecuencia fundamental del tubo cuando la temperatura sea de 0°C?

92. ● El canal auditivo humano es de aproximadamente 2.5 cm de largo, y está abierto en un extremo y cerrado en el otro. (Véase la figura 1 de la sección A fondo 14.2 de la p. 495.) *a*) ¿Cuál será la frecuencia fundamental del canal auditivo a 20°C? *b*) ¿A qué frecuencia es más sensible el oído? *c*) Si el canal auditivo de una persona es más largo que 2.5 cm, ¿la frecuencia fundamental es mayor o menor que en el inciso *a*? Explique por qué.

93. ●● Un tubo de órgano que está cerrado en un extremo tiene una longitud de 0.80 m. A 20°C, ¿cuál será la distancia entre un nodo y un antinodo adyacente para *a*) el segundo armónico y *b*) el tercer armónico?

94. ●● Un tubo de órgano abierto y un tubo de órgano cerrado en un extremo tienen ambos longitudes de 0.52 m a 20°C. ¿Cuál será la frecuencia fundamental de cada tubo?

95. ●● *a*) Para tener un tubo abierto de órgano con una frecuencia de primer sobretono de 512 Hz en el exterior cuando hace frío (−10°C), ¿cuál sería la longitud requerida del tubo? *b*) ¿Cuál sería la frecuencia fundamental de este tubo si se llevara dentro de una pista de hockey, donde se registra una temperatura de +10°C? Ignore los cambios en la longitud del tubo que provoca la expansión térmica.

96. ●● Un tubo de órgano cerrado en un extremo mide 1.10 m de longitud. Está orientado verticalmente y se llena con gas de dióxido de carbono (que es más denso que el aire y que, por lo tanto, permanecerá en el tubo). Para generar una onda estacionaria en el modo fundamental, se utiliza un diapasón con una frecuencia de 60.0 Hz. ¿Cuál será la rapidez del sonido en el dióxido de carbono?

97. ●● Un tubo abierto de órgano de 0.750 m de largo tiene su primer sobretono a una frecuencia de 441 Hz. ¿Cuál será la temperatura del aire en el tubo?

98. **EI** ●● Cuando todos sus orificios están cerrados, una flauta es esencialmente un tubo abierto en ambos extremos, con longitud de la embocadura al extremo lejano (como en la figura 14.16b). Si un agujero está abierto, entonces la longitud del tubo es la distancia desde la boquilla al orificio, *a*) ¿La posición de la boquilla es 1) un nodo, 2) un antinodo o 3) ni un nodo ni un antinodo? ¿Por qué? *b*) Si la frecuencia fundamental más baja en una flauta es de 262 Hz, ¿cuál será la longitud mínima de la flauta a 20°C? *c*) Si debe tocarse una nota de frecuencia igual a 440 Hz, ¿qué orificio debería abrirse? Exprese su respuesta como una distancia desde el orificio hasta la boquilla.

99. ●●● En una demostración en clase, el profesor aspira algo de gas helio y, cuando habla, su voz se parece a la del pato Donald. (Esto también ocurre con los buzos que se sumergen a grandes profundidades y que respiran una mezcla de helio, nitrógeno y oxígeno.) Considerando de manera simplista que el tracto vocal es un tubo cerrado de 15.0 cm (con la glotis en uno de sus extremos) y que la rapidez del sonido en el aire es de 331 m/s y en el helio de 965 m/s, explique cómo ocurre el "efecto del pato Donald".

100. ●●● Un tubo de órgano cerrado en un extremo está lleno con helio. El tubo tiene una frecuencia fundamental de 660 Hz en aire a 20°C. ¿Cuál será la frecuencia fundamental del tubo con helio en él?

101. ●●● Un tubo abierto de órgano tiene una longitud de 50.0 cm. Mientras está en su modo fundamental, un segundo tubo, cerrado en uno de sus extremos, también está en su modo fundamental. Se escucha una frecuencia de pulsación de 2.00 Hz. Determine las posibles longitudes del tubo cerrado. Suponga que la temperatura es la ambiental normal.

Ejercicios adicionales

102. En un concierto de rock hay dos bocinas principales, cada una de las cuales da 500 W de potencia de sonido. Usted está a 5.00 m de uno de ellos y a 10.0 m del otro. *a*) ¿Cuáles son las intensidades del sonido provenientes de cada bocina en el lugar donde usted se encuentra y la intensidad total del sonido? *b*) ¿Cuáles son los niveles de intensidad en su lugar que se deben a cada bocina y cuál es el nivel total de intensidad del sonido? *c*) ¿Durante cuánto tiempo puede sentarse ahí sin riesgo de sufrir daño permanente en los oídos?

103. Por lo general, los murciélagos emiten un sonido de ultra alta frecuencia de unos 50 000 Hz. Si el murciélago se aproxima a un objeto estacionario a 18.0 m/s, ¿cuál será la frecuencia reflejada que detecta? (Suponga que el aire en la cueva está a 5°C.) [*Sugerencia:* necesitará aplicar dos veces las ecuaciones Doppler. ¿Por qué?]

104. Usted escucha el sonido proveniente de dos tubos de órgano que están equidistantes hacia usted. El tubo A está abierto por un extremo y cerrado por el otro, mientras que el tubo B está abierto por los dos extremos. Cuando ambos oscilan en su modo de primer sobretono, usted escucha una frecuencia de pulsación de 5.0 Hz. Suponga que la temperatura es la ambiental normal. *a*) Si la longitud del tubo A es de 1.00 m, calcule las posibles longitudes del tubo B. *b*) Suponiendo su menor longitud para el tubo B, ¿cuál sería la frecuencia de pulsación (si ambos están aún en sus modos de primer sobretono), en un desierto durante un caluroso día de verano con una temperatura de 40°C?

105. **EI** Un tubo abierto de órgano con una longitud de 50.0 cm oscila en el modo de su segundo sobretono o tercer armónico. Suponga que el aire está a la temperatura ambiental y que el tubo está en reposo en aire quieto. Una persona se mueve hacia el tubo a 2.00 m/s y, al mismo tiempo, se aleja de una pared altamente reflejante. *a*) ¿El observador escuchará pulsaciones? 1) sí, 2) no o 3) no se puede decir a partir de los datos. *b*) Calcule la frecuencia de pulsación que escuchará. [*Sugerencia:* Hay dos frecuencias, una que proviene directamente del tubo y la otra de la pared.]

PHYSLET®

Los siguientes problemas de física Physlet pueden utilizarse con este capítulo.
18.1, 18.2, 18.3, 18.4, 18.5, 18.7, 18.8, 18.9, 18.10, 18.11, 18.12, 18.13, 18.14, 18.15, 18.16

CAPÍTULO 15

CARGAS, FUERZAS Y CAMPOS ELÉCTRICOS

15.1 Carga eléctrica 506
15.2 Carga electrostática 508
15.3 Fuerza eléctrica 512
15.4 Campo eléctrico 517
15.5 Conductores y campos eléctricos 526
*15.6 Ley de Gauss para campos eléctricos: un enfoque cualitativo 528

HECHOS DE FÍSICA

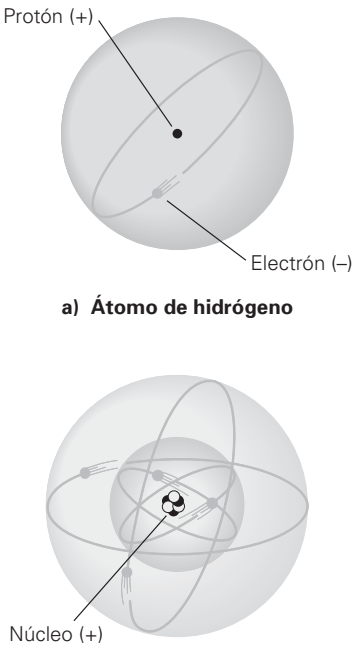
- Charles Augustin de Coulomb (1736-1806), un científico francés y el descubridor de la ley de la fuerza entre objetos cargados, tuvo una carrera muy diversificada: hizo contribuciones significativas a la reforma hospitalaria, la limpieza de la red de suministro de agua de París, el magnetismo terrestre, la ingeniería de suelos y la construcción de fuertes, estas dos últimas mientras sirvió en el ejército.
- La pistola paralizante Taser, que utilizan los cuerpos de seguridad pública, funciona generando una gran separación de carga eléctrica y aplicándola a diferentes partes del cuerpo; el arma interrumpe las señales eléctricas normales y provoca inmovilidad temporal. La pistola paralizante necesita hacer contacto físico con el cuerpo con sus dos electrodos, y el choque actúa incluso a través de ropa gruesa. Una versión de la Taser a larga distancia funciona disparando electrodos punzantes que permanecen unidos a la pistola mediante cables.
- La anguila eléctrica (que puede llegar a medir hasta 1.82 m de largo y que en realidad es un pez) actúa eléctricamente de manera similar a una pistola Taser. Más del 80% del cuerpo de la anguila corresponde a la cola; sus órganos vitales están localizados detrás de su pequeña cabeza. Con el campo eléctrico que crea es capaz de localizar y paralizar a sus presas antes de comérselas.
- Los purificadores de aire domésticos utilizan la fuerza eléctrica para reducir el polvo, bacterias y otras partículas en el aire. La fuerza eléctrica remueve los electrones de los contaminantes, convirtiéndolos en partículas con carga positiva. Estas partículas son atraídas hacia placas con carga negativa, donde permanecen hasta que se retiran manualmente. Cuando funcionan de forma adecuada, estos purificadores logran reducir el nivel de partículas en más del 99 por ciento.

Pocos procesos naturales liberan tanta cantidad de energía en una fracción de segundo como un relámpago. Sin embargo, poca gente ha experimentado su tremenda potencia a corta distancia; sólo unos cuantos cientos de personas son alcanzadas por relámpagos cada año en Estados Unidos.

Quizá le sorprenda saber que casi ha tenido una experiencia similar, por lo menos desde el punto de vista de la física. ¿Alguna vez ha caminado en un cuarto alfombrado y luego ha recibido una pequeña descarga al tratar de tocar la perilla metálica de una puerta? Aunque la escala es diferente, los procesos físicos implicados (una descarga de electricidad estática) son los mismos que se presentan en el hecho de ser alcanzado por un relámpago (digamos que se trata de un mini relámpago).

En ocasiones, la electricidad tiene efectos dramáticos, como cuando se produce un cortocircuito en los tomacorrientes o cuando los relámpagos dejan sentir su fuerza. Sabemos que la electricidad es peligrosa, pero también que puede ser "domesticada". En el hogar o en la oficina, su utilidad se da por sentada. De hecho, nuestra dependencia de la energía eléctrica sólo se hace evidente cuando de pronto "se va la luz", recordándonos de forma dramática el papel que juega en nuestra vida diaria. Sin embargo, hace menos de un siglo no había líneas de transmisión que cruzaran el país, ni alumbrado ni aparatos eléctricos: en resumen, ninguna de las aplicaciones de la electricidad que existen en la actualidad en nuestro entorno.

Sabemos ahora que la electricidad y el magnetismo están relacionados (véase el capítulo 20). En conjunto, se les llama "fuerza electromagnética", la cual constituye una de las cuatro fuerzas fundamentales en la naturaleza. (La gravedad [capítulo 7] y dos tipos de fuerzas nucleares [fuerte y débil] son las otras tres.) Aquí comenzamos por estudiar la fuerza eléctrica y sus propiedades. Más adelante (en el capítulo 20), se vincularán la fuerza eléctrica y la magnética.



▲ **FIGURA 15.1 Modelo simplificado de átomos** El llamado modelo de sistema solar de *a*) un átomo de hidrógeno y *b*) un átomo de berilio considera a los electrones (con carga negativa) orbitando el núcleo (con carga positiva), en forma análoga a como los planetas giran alrededor del Sol. La estructura electrónica de los átomos es en realidad mucho más complicada que esto.

15.1 Carga eléctrica

OBJETIVOS: *a*) Distinguir entre los dos tipos de carga eléctrica, *b*) enunciar la ley de carga-fuerza que opera entre objetos cargados y *c*) comprender y usar la ley de conservación de la carga.

¿Qué es la *electricidad*? Tal vez la respuesta más simple es que la electricidad es un término genérico que describe los fenómenos asociados con la electricidad doméstica. Pero, en realidad y sobre todo, implica el estudio de la interacción entre objetos *eléctricamente cargados*. Para demostrar esto, nuestro estudio empezará con la situación más simple, la de la electro*stática*, es decir, cuando los objetos eléctricamente cargados están *en reposo*.

Al igual que la masa, la **carga eléctrica** es una propiedad fundamental de la materia (capítulo 1). La carga eléctrica está asociada con partículas que constituyen el átomo: el electrón y el protón. El simplista modelo del sistema solar del átomo, mostrado en la ◂ figura 15.1, se asemeja en su estructura a los planetas que giran alrededor del Sol. Los *electrones* se consideran como partículas en órbita alrededor de un núcleo, que contiene la mayoría de la masa del átomo en la forma de *protones* y partículas eléctricamente neutras llamadas *neutrones*. Como vimos en la sección 7.5, la fuerza centrípeta que mantiene a los planetas en órbita alrededor del Sol es suministrada por la gravedad. De manera similar, la fuerza que mantiene los electrones en órbita alrededor del núcleo es la fuerza eléctrica. Sin embargo, hay distinciones importantes entre las fuerzas gravitacionales y eléctricas.

Una distinción básica es que sólo hay un tipo de masa en la naturaleza, y se sabe que las fuerzas gravitacionales son sólo atractivas. Sin embargo, la carga eléctrica existe en dos tipos, distinguidas por la nominación de positiva (+) y negativa (−). Los protones llevan una carga positiva, y los electrones llevan una carga negativa. Las diferentes combinaciones de los dos tipos de carga producen fuerzas eléctricas atractivas *o* repulsivas.

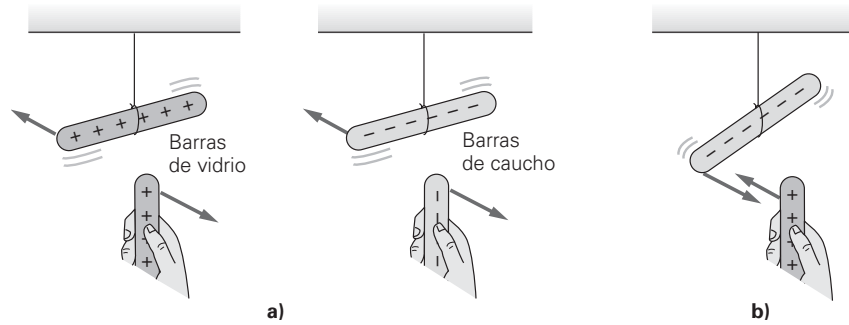
Las direcciones de las fuerzas eléctricas cuando las cargas interactúan entre sí están dadas por el siguiente principio, llamado **ley de las cargas** o **ley de carga-fuerza**:

> Cargas iguales se repelen y cargas desiguales se atraen.

Esto es, dos partículas cargadas negativamente o dos partículas cargadas positivamente se repelen entre sí, mientras que partículas con cargas contrarias se atraen entre sí (▾figura 15.2). Las fuerzas repulsiva y atractiva son iguales y opuestas, y actúan sobre objetos diferentes, de acuerdo con la tercera ley de Newton (acción-reacción).

La carga sobre un electrón y aquella sobre un protón son iguales en magnitud, pero contrarias en signo. La magnitud de la carga sobre un electrón se abrevia como e y es la unidad de carga fundamental, ya que es la carga más pequeña observada en la naturaleza.* La unidad SI de carga es el **coulomb (C)**, llamada así en honor del físico francés Charles A. Coulomb (1736-1806), quien descubrió una relación entre fuerza eléctrica y carga (sección 15.3). Las cargas y masas del electrón, protón y neutrón se indican en la

Nota: recuerde el análisis de la tercera ley de Newton en la sección 4.4.



▶ **FIGURA 15.2 La ley de carga-fuerza o ley de cargas** ***a*)** Cargas iguales se repelen, ***b*)** Cargas desiguales se atraen.

*Los protones, al igual que los neutrones y otras partículas, están constituidos por partículas llamadas *quarks*, que tienen cargas de $\pm\frac{1}{3}$ y $\pm\frac{2}{3}$ de la carga del electrón. Se tiene evidencia experimental de la existencia de quarks dentro del núcleo, pero no se han detectado quarks libres. La teoría actual implica que la detección directa de los quarks es imposible.

TABLA 15.1 **Partículas subatómicas y sus cargas eléctricas**

Partícula	*Carga eléctrica**	*Masa**
Electrón	-1.602×10^{-19} C	$m_e = 9.109 \times 10^{-31}$ kg
Protón	$+1.602 \times 10^{-19}$ C	$m_p = 1.673 \times 10^{-27}$ kg
Neutrón	0	$m_n = 1.675 \times 10^{-27}$ kg

*Aunque los valores están dados con cuatro cifras significativas, usaremos sólo dos o tres cifras en nuestros cálculos.

tabla 15.1, donde vemos que $e = 1.6 \times 10^{-19}$ C. Nuestro símbolo general para carga será q o Q. Así, la carga sobre un electrón se escribe como $q_e = -e = -1.602 \times 10^{-19}$ C y sobre un protón es $q_p = +e = +1.60 \times 10^{-19}$ C.

Con frecuencia usamos varios términos cuando analizamos objetos cargados. Decir que un objeto tiene una **carga neta** significa que el objeto tiene un exceso de cargas positivas o negativas. (Sin embargo, es común preguntar sobre la "carga" de un objeto, cuando en realidad nos referimos a la carga neta.) Como veremos en la sección 15.2, la carga en exceso comúnmente se produce por una transferencia de electrones, *no* de protones. (Los protones están ligados al núcleo y, en las situaciones más comunes, no salen de él.) Por ejemplo, si un objeto tiene una carga (neta) de $+1.6 \times 10^{-18}$ C, entonces se han removido electrones de él. Específicamente, tiene una deficiencia de *10* electrones, ya que $10 \times 1.6 \times 10^{-19}$ C $= 1.6 \times 10^{-18}$ C. Esto es, el número total de electrones en el objeto ya no cancela por completo la carga positiva de todos los protones, lo que da por resultado una carga neta positiva. En un nivel atómico, algunos de los átomos que constituyen el objeto serían deficientes en electrones. Los átomos cargados positivamente se llaman *iones positivos.* Los átomos con un exceso de electrones se llaman *iones negativos*.

Como la carga sobre el electrón es una minúscula fracción de un coulomb, un objeto que tiene una carga neta de un coulomb de carga neta rara vez se ve en situaciones cotidianas. Por lo tanto, es común expresar las cantidades de carga usando *microcoulombs* (μC o 10^{-6} C), *nanocoulombs* (*m*C o 10^{-9} C) y *picocoulombs* (pC o 10^{-12} C).

Puesto que la carga eléctrica (neta) sobre un objeto es el resultado de una deficiencia o de un exceso de electrones, siempre debe ser un múltiplo entero de la carga sobre un electrón. Un signo más o un signo menos indicará si el objeto tiene una deficiencia o un exceso de electrones, respectivamente. Así, para la carga (neta) de un objeto, podemos escribir

$$q = \pm ne \tag{15.1}$$

Unidad SI de carga: coulomb (C)

donde $n = 1, 2, 3, \ldots$ Algunas veces decimos que la carga está "cuantizada", lo que significa que ésta se presenta sólo en múltiplos enteros de la carga electrónica fundamental.

Al tratar con cualquier fenómeno eléctrico, otro importante principio es el de la **conservación de la carga**:

La carga neta de un sistema aislado permanece constante.

Esto es, la carga neta permanece constante, aunque puede ser diferente de cero. Suponga, por ejemplo, que un sistema consiste inicialmente en dos objetos eléctricamente neutros, y que un millón de electrones se transfieren de uno al otro. El objeto con los electrones agregados tendrá entonces una carga negativa neta, y el objeto con el número reducido de electrones tendrá una carga positiva neta de igual magnitud. (Véase el ejemplo 15.1.) Así, la carga neta del *sistema* permanece igual a cero. Si el universo se considera como un todo, la conservación de la carga significa que la carga neta *del universo* es constante.

Advierta que este principio no prohíbe la creación o destrucción de partículas cargadas. De hecho, los físicos han sabido desde hace mucho tiempo que es posible crear o destruir partículas cargadas en los niveles atómico y nuclear. Sin embargo, a causa de la conservación de la carga, las partículas son creadas o destruidas sólo en pares con cargas iguales y de signo contrario.

Ejemplo integrado 15.1 ■ Sobre la alfombra: conservación de la carga cuantizada

Usted arrastra los pies sobre un piso alfombrado en un día seco y la alfombra adquiere una carga positiva neta (para conocer detalles de este mecanismo, véase la sección 15.2). *a*) ¿Usted tendrá 1) una deficiencia o 2) un exceso de electrones? *b*) Si la carga adquirida tiene una magnitud de 2.15 nC, ¿cuántos electrones se transfirieron?

a) Razonamiento conceptual. *a*) Como la alfombra tiene una carga positiva neta, debe haber perdido electrones y usted debe haberlos ganado. Así, su carga es negativa, lo que indica un exceso de electrones, y la respuesta correcta es la 2.

b) Razonamiento cuantitativo y solución. Conociendo la carga en un electrón, es posible cuantificar el exceso de electrones. Exprese la carga en coulombs, y establezca qué debe encontrarse.

Dado: $q_c = +(2.15\ \text{nC})\left(\dfrac{10^{-9}\ \text{C}}{1\ \text{nC}}\right) = +2.15 \times 10^{-9}\ \text{C}$

$q_e = -1.60 \times 10^{-19}\ \text{C}$ (de la tabla 15.1)

Encuentre: n, número de electrones transferidos

La carga neta en usted es

$$q = -q_c = -2.15 \times 10^{-9}\ \text{C}$$

Por lo tanto,

$$n = \frac{q}{q_e} = \frac{-2.15 \times 10^{-9}\ \text{C}}{-1.60 \times 10^{-19}\ \text{C/electrones}} = 1.34 \times 10^{10}\ \text{electrones}$$

Como se observa, las cargas netas, en situaciones cotidianas, por lo general implican números enormes de electrones (aquí, más de 13 mil millones), porque la carga de cada electrón es muy pequeña.

Ejercicio de refuerzo. En este ejemplo, si su masa es de 80 kg, ¿en qué porcentaje ha aumentado su masa a causa de los electrones en exceso? (*Las respuestas de todos los ejercicios de refuerzo se incluyen al final del libro.*)

15.2 Carga electrostática

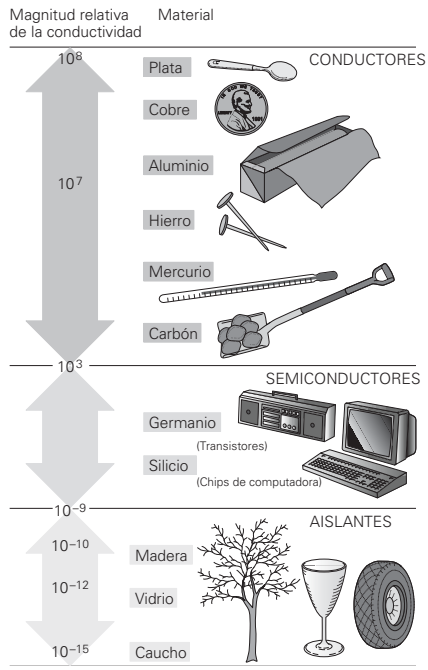
OBJETIVOS: *a*) Distinguir entre conductores y aislantes, *b*) explicar la operación del electroscopio y *c*) distinguir entre carga por fricción, conducción, inducción y polarización.

La existencia de dos tipos de carga eléctrica (y, por lo tanto, de fuerzas eléctricas atractivas y repulsivas) se demuestra fácilmente. Antes de aprender cómo se hace esto, veamos la distinción entre conductores y aislantes eléctricos. Lo que distingue a esos amplios grupos de sustancias es su capacidad para conducir, o transmitir, cargas eléctricas. Algunos materiales, particularmente los metales, son buenos **conductores** de carga eléctrica. Otros, como el vidrio, el caucho y la mayoría de los plásticos, son **aislantes**, o malos conductores eléctricos. Una comparación de las magnitudes relativas de las conductividades de algunos materiales se presenta en la ▸ figura 15.3.

En los conductores, los electrones de *valencia* de los átomos —o electrones localizados en las órbitas más exteriores—, están débilmente ligados. Como resultado, es fácil removerlos del átomo y que se muevan en el conductor; incluso es posible que abandonen este último por completo. Esto es, los electrones de valencia no están permanentemente ligados a un átomo particular. Sin embargo, en los aislantes, incluso los electrones que están menos ligados, lo están tan fuertemente, que es difícil removerlos de sus átomos. Así, la carga no se mueve con facilidad, ni se puede remover fácilmente de un aislante.

Como muestra la figura 15.3, también existe una clase de materiales "intermedios", llamados **semiconductores**. Su capacidad de conducir carga es intermedia entre la de los aislantes y los conductores. El movimiento de electrones en los semiconductores es mucho más difícil de describir que el simple enfoque para el electrón de valencia usado para aislantes y conductores. De hecho, los detalles de las propiedades de los semiconductores se comprenden sólo con la ayuda de la mecánica cuántica, que va más allá del alcance de este libro.

Sin embargo, es interesante notar que es posible ajustar la conductividad de los semiconductores agregando ciertos tipos de impurezas atómicas en concentraciones variables. Desde la década de los años 40, los científicos emprendieron investigaciones



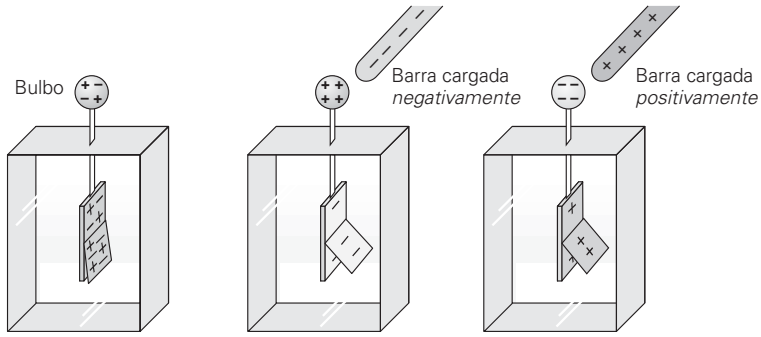
◀ **FIGURA 15.3 Conductores, semiconductores y aislantes** Una comparación de las magnitudes relativas de las conductividades eléctricas de varios materiales (el dibujo no está a escala).

sobre las propiedades de los semiconductores con el fin de crear aplicaciones para tales materiales. Los científicos usaron semiconductores para crear los transistores, luego circuitos de estado sólido y después los microchips para computadoras. El microchip es uno de los principales desarrollos responsables de la tecnología para computadoras de alta velocidad de que disponemos actualmente.

Ahora que ya sabemos un poco sobre conductores y aislantes, aprendamos sobre la manera de determinar el signo de la carga de un objeto. El *electroscopio* es uno de los dispositivos más sencillos usados para demostrar las características de la carga eléctrica (▼figura 15.4). En su forma más simple, consiste en una barra metálica con un bulbo metálico en un extremo. La barra está unida a una pieza metálica sólida, de forma rectangular, que tiene unida una "hoja", generalmente hecha de oro o de aluminio. Este conjunto está aislado de su recipiente protector de vidrio por medio de un marco aislante. Cuando los objetos cargados se acercan al bulbo, los electrones en éste son atraídos o repelidos por tales objetos. Por ejemplo, si una barra negativamente cargada se acerca al bulbo, los electrones en el bulbo son repelidos, y el bulbo se queda con una carga positiva. Los electrones son conducidos al rectángulo metálico y a la hoja unida a él, que se separará, ya que tienen carga del mismo signo (figura 15.4b). De forma similar, si una barra cargada positivamente se acerca al bulbo, la hoja también se alejará. (¿Podría explicar por qué?)

Note que la carga neta sobre el electroscopio permanece igual a cero en estos casos. Puesto que el dispositivo está aislado, sólo se altera la *distribución* de carga. Sin

Nota: un electroscopio no cargado sólo detectará si un objeto está eléctricamente cargado. Si el electroscopio está cargado con un signo conocido, también podrá determinar el signo de la carga en el objeto.



a) El electroscopio neutro tiene cargas uniformemente distribuidas; la hoja está en posición vertical.

b) Las fuerzas electrostáticas hacen que la hoja se separe (sólo se muestra el exceso o carga neta).

◀ **FIGURA 15.4 El electroscopio** Este dispositivo sirve para determinar si un objeto está cargado eléctricamente. Cuando un objeto cargado se acerca al bulbo, la hoja se aleja de la pieza metálica.

embargo, es posible dar a un electroscopio (y a otros objetos) una carga neta por diferentes métodos, aunque todos implican una **carga electrostática**. Considere los siguientes procesos que generan carga electrostática.

Nota: desde un punto de vista externo, no es posible decir si la barra de caucho ganó cargas negativas o si la piel ganó cargas positivas. En otras palabras, mover electrones a la barra de caucho da por resultado la misma situación física que mover cargas positivas a la piel. Sin embargo, como el caucho es un aislante y sus electrones están fuertemente ligados, podríamos sospechar que la piel perdió electrones y que el caucho los ganó. En los sólidos, los protones —que están en el núcleo de los átomos— no se mueven; sólo los electrones lo hacen. Solamente es cuestión de saber qué material pierde electrones con mayor facilidad.

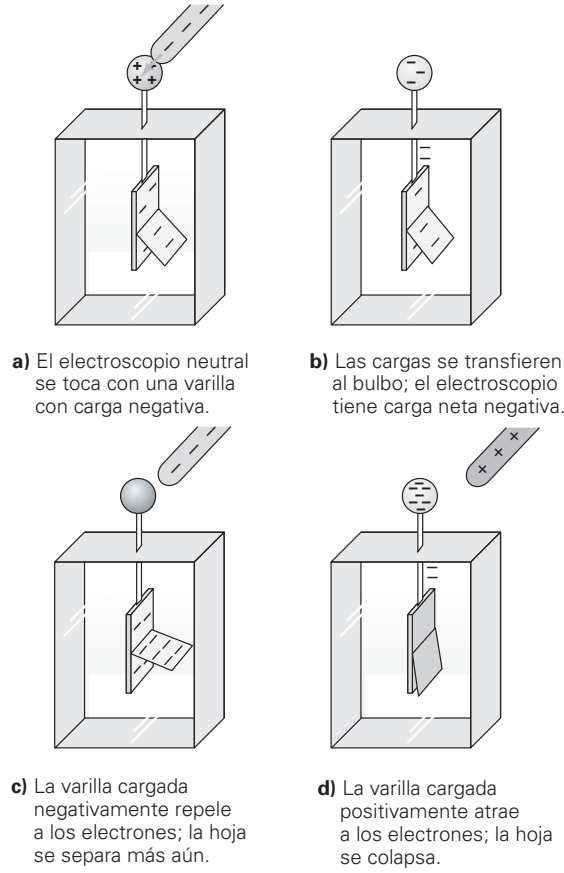
Carga por fricción

En el proceso de carga por fricción, al frotar ciertos materiales aislantes con tela o piel, resultan cargados eléctricamente mediante una transferencia de carga. Por ejemplo, si una barra de caucho duro se frota con piel, adquirirá una carga neta negativa; al frotar una barra de vidrio con seda, la barra adquirirá una carga neta positiva. Este proceso se llama **carga por fricción**. La transferencia de carga se debe al contacto entre los materiales, y la cantidad de carga transferida depende, como podría esperarse, de la naturaleza de los materiales implicados.

El ejemplo 15.1 fue realmente un ejemplo de carga por fricción, en el que usted recogió una carga neta de la alfombra. Si toca un objeto metálico, como la perilla de una puerta, es probable que sienta una chispa. Conforme su mano se aproxima, la perilla se carga positivamente y, por lo tanto, atrae los electrones de su mano. Conforme se desplazan, chocan con los átomos del aire y los excitan, emitiendo luz conforme pierden excitación (es decir, energía). Esta luz se ve como la chispa de un "mini relámpago" entre su mano y la perilla.

Carga por conducción (o contacto)

Al acercar una varilla cargada a un electroscopio, éste revelará que la varilla está cargada, pero no le indicará qué tipo de carga tiene esta última (positiva o negativa). Sin embargo, es posible determinar el signo de la carga si al electroscopio se le da primero un tipo conocido de carga (neta). Por ejemplo, los electrones pueden transferirse al electroscopio desde un objeto negativamente cargado, como se ilustra en la ▼figura 15.5a.



▶ **FIGURA 15.5** Carga por conducción *a)* El electroscopio es neutro inicialmente (pero las cargas están separadas), cuando una varilla cargada se pone en contacto con el bulbo. *b)* La carga es transferida al electroscopio. *c)* Cuando una varilla de la misma carga se acerca al bulbo, la hoja se separa aún más. *d)* Cuando se acerca una varilla con carga opuesta, la hoja se colapsa.

Los electrones en la varilla se repelen entre sí, y algunos serán transferidos hacia el electroscopio. Advierta que la hoja está ahora permanentemente separada de la pieza de metal. En este caso, decimos que el electroscopio se ha **cargado por contacto** o **por conducción** (figura 15.5b). "Conducción" se refiere al flujo de carga durante el corto periodo en que los electrones son transferidos.

Si una varilla cargada negativamente se acerca al electroscopio, ahora con carga negativa, la hoja se separará aún más conforme más electrones son repelidos por el bulbo (figura 15.5c). Una varilla con carga contraria (positiva) causará que la hoja se colapse al atraer algunos electrones al bulbo y alejarlos del área de la hoja (figura 15.5d).

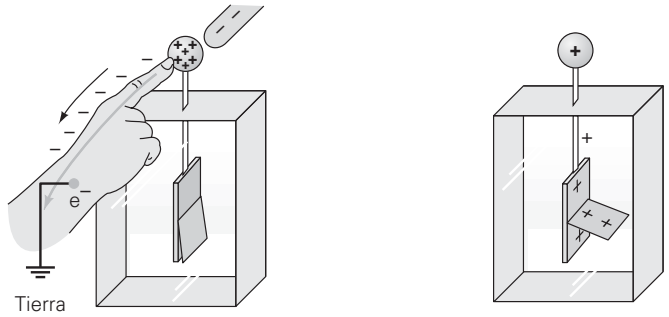
Carga por inducción

Usando una barra de caucho con carga negativa (cargada por fricción), cabe preguntar si es posible crear un electroscopio que esté positivamente cargado. La respuesta es sí, y hacerlo implica un proceso llamado **carga por inducción**. Comenzando con un electroscopio descargado, usted toca el bulbo con un dedo, lo que pone *a tierra* el electroscopio, esto es, ofrece una trayectoria por la cual los electrones pueden escapar del bulbo (▼figura 15.6). Entonces, cuando una barra cargada negativamente se acerca al bulbo (pero sin tocarlo), la barra repele electrones del bulbo al dedo y hacia abajo a tierra (de ahí el término *tierra*). Retirar su dedo *mientras la barra cargada se mantiene cerca*, deja el electroscopio con una carga neta positiva. Esto se debe a que cuando se retira la barra, los electrones que viajan a la Tierra (es decir, al suelo) no tienen manera de regresar porque ha desaparecido el camino para ello.

Separación de carga por polarización

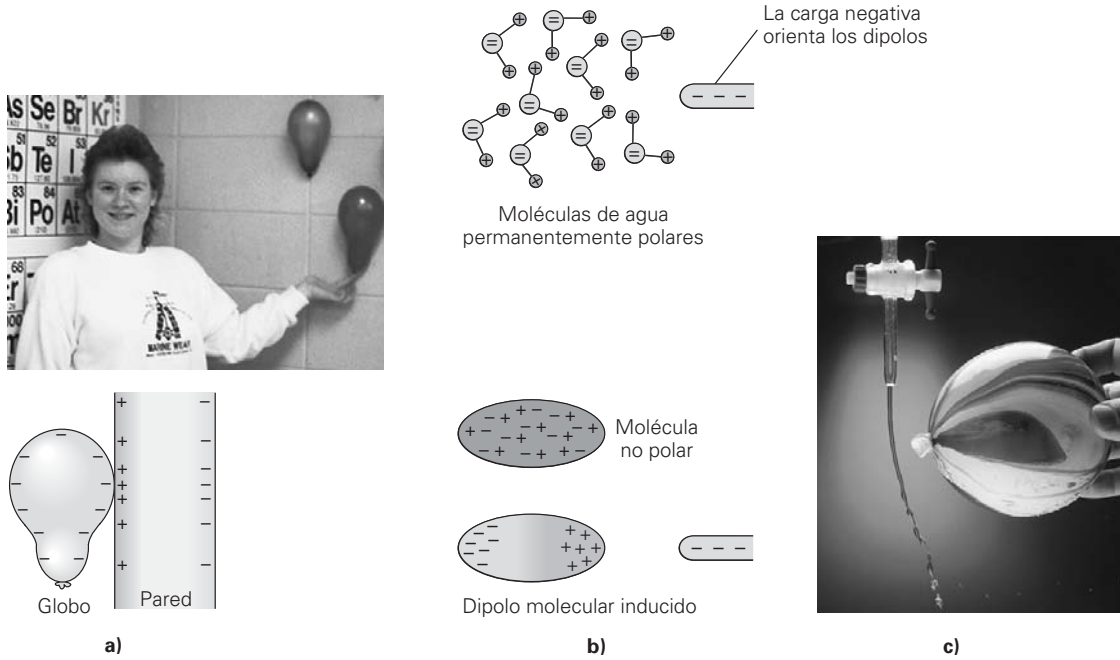
La carga por contacto y por inducción crean una carga neta mediante la remoción de carga de un objeto. Sin embargo, es posible que la carga se mueva *dentro del objeto* mientras la carga neta se mantiene en cero. En este caso, la inducción genera una **polarización**, o separación de la carga positiva y negativa. Si el objeto no es puesto a tierra, se volverá eléctricamente neutro, pero tendrá cantidades de carga en ambos extremos iguales pero de signo contrario. En esta situación, decimos que el objeto actúa como un *dipolo eléctrico* (véase la sección 15.4). En el nivel molecular, los dipolos eléctricos pueden ser permanentes; es decir, no necesitan tener cerca un objeto cargado para retener su separación de carga. Un buen ejemplo de esto es la molécula de agua. Ejemplos tanto de dipolos permanentes como de no permanentes, así como de las fuerzas que actúan sobre

▼ **FIGURA 15.6 Carga por inducción** ***a)*** Al tocar el bulbo con un dedo se forma una trayectoria hacia la tierra para la transferencia de carga. El símbolo e^- significa "electrón". ***b)*** Cuando se retira el dedo, el electroscopio tiene una carga positiva neta, contraria a la de la barra.



a) Repelidos por la barra negativamente cargada, los electrones son transferidos a tierra a través de la mano.

b) Al retirar primero el dedo y luego la barra, el electroscopio queda positivamente cargado.



▲ **FIGURA 15.7 Polarización** ***a)*** Cuando los globos se cargan por fricción y se ponen en contacto con la pared, ésta se polariza. Esto es, se induce una carga de signo contrario sobre la superficie de la pared, a la que los globos se adhieren por la fuerza de la atracción electrostática. Los electrones en el globo no lo abandonan porque su material (el caucho) es un conductor deficiente. ***b)*** Algunas moléculas, como las del agua, son de naturaleza polar; esto es, tienen regiones separadas de carga positiva y negativa. Pero incluso algunas moléculas que no son normalmente de naturaleza dipolar pueden polarizarse temporalmente por la presencia de un objeto cargado cercano. La fuerza eléctrica induce una separación de carga y, en consecuencia, la aparición de dipolos moleculares temporales. ***c)*** Una corriente de agua se dobla hacia un globo cargado. El globo cargado simplemente atrae los extremos de las moléculas de agua, haciendo que la corriente se doble.

ellos se presentan en la ▲figura 15.7. Ahora seguramente comprende por qué cuando frota un globo con un suéter, el globo puede quedar adherido a una pared. El globo se carga por fricción, y el hecho de acercarlo a la pared polariza esta última. La carga de signo contrario en la superficie más cercana de la pared crea una fuerza atractiva neta.

PHYSLET®

Ilustración 22.4 *Carga de objetos y adherencia estática*

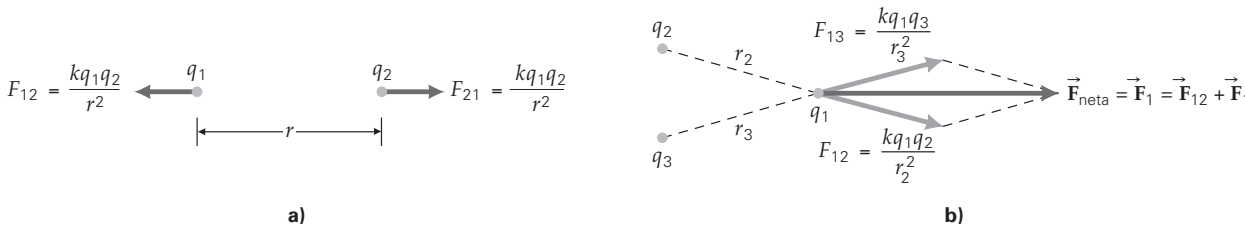
La carga electrostática en ocasiones resulta molesta —como cuando la adherencia estática ocasiona que la ropa y los papeles se adhieran entre sí— o incluso peligrosa —como cuando las descargas de chispas electrostáticas inician un incendio o causan una explosión en presencia de gas inflamable—. Para descargar la carga eléctrica, muchos camiones llevan cadenas de metal que cuelgan del chasis para que entren en contacto con la tierra. En las estaciones de gas hay letreros que advierten que hay que llenar los tanques de gas mientras éstos se encuentran sobre el suelo, no sobre la plataforma del camión ni sobre la superficie del portaequipaje del automóvil (¿por qué?).

Sin embargo, las cargas electrostáticas también resultan benéficas. Por ejemplo, el aire que respiramos es más limpio gracias a los precipitadores electrostáticos usados en las chimeneas. En esos dispositivos, las descargas eléctricas hacen que las partículas (productos secundarios de la quema de combustible) adquieran una carga neta. Entonces es posible retirar las partículas cargadas de los gases atrayéndolas a superficies eléctricamente cargadas. En menor escala, los purificadores de aire electrostático son accesibles para el hogar. (Véase la sección Hechos de física.)

15.3 Fuerza eléctrica

OBJETIVOS: *a*) Comprender la ley de Coulomb y *b*) usarla para calcular la fuerza eléctrica entre partículas cargadas.

Sabemos que las *direcciones* de las fuerzas eléctricas sobre cargas que interactúan están dadas por la ley carga-fuerza. Sin embargo, ¿qué sucede con sus *magnitudes*? Coulomb investigó esto y encontró que la magnitud de la fuerza eléctrica entre dos cargas "puntuales" (muy pequeñas) q_1 y q_2 depende directamente del producto de las cargas



▲ **FIGURA 15.8 La ley de Coulomb** ***a)*** Las fuerzas electrostáticas que ejercen entre sí dos cargas puntuales son iguales y de signo contrario. ***b)*** Para una configuración de dos o más cargas puntuales, la fuerza sobre una carga particular es la suma vectorial de las fuerzas sobre ella que provocan todas las demás cargas. (*Nota:* en cada una de esas situaciones, todas las cargas son del mismo signo. ¿Cómo podemos decir que esto es cierto? ¿Puede decir cuáles son sus *signos*? ¿Cuál es la dirección de la fuerza sobre q_2 que se debe a q_3?)

e inversamente del cuadrado de la distancia entre ellas. Esto es, $F_e \propto q_1q_2/r^2$. (q es la *magnitud* de la carga; por lo tanto, q_1 significa la magnitud de q_1.) Esta relación es matemáticamente similar a la de la fuerza gravitacional entre dos masas puntuales ($F_g \propto m_1m_2/r^2$); véase el capítulo 7.

Igual que las mediciones de Cavendish para determinar la constante de la gravitación universal G (sección 7.5), las mediciones de Coulomb dieron una constante de proporcionalidad, k, de manera que la fuerza eléctrica puede escribirse en forma de ecuación. Así, la magnitud de la fuerza eléctrica entre dos cargas puntuales se describe mediante una ecuación llamada **ley de Coulomb**:

$$F_e = \frac{kq_1q_2}{r^2} \quad \textit{(sólo cargas puntuales, q significa magnitud de la carga)} \tag{15.2}$$

Aquí, r es la distancia entre las cargas (▲figura 15.8a) y k es una constante con un valor de

$$k = 8.988 \times 10^9\ \mathrm{N \cdot m^2/C^2} \approx 9.00 \times 10^9\ \mathrm{N \cdot m^2/C^2}$$

La ecuación 15.2 determina la fuerza entre dos partículas cargadas; pero, en muchos casos, tratamos con fuerzas entre más de dos cargas. En tal situación, la fuerza eléctrica neta sobre cualquier carga particular es la suma vectorial de las fuerzas sobre esa carga que provocan todas las otras cargas (figura 15.8b). Para hacer un repaso de la suma de vectores, utilizando fuerzas eléctricas, veremos los dos siguientes ejemplos.

PHYSLET®
Ilustración 22.1 Carga y ley de Coulomb

PHYSLET®
Exploración 22.6 El guante de Coulomb

Nota: la ley de Coulomb da la fuerza eléctrica, pero sólo entre cargas puntuales, no entre objetos con áreas cargadas que se extienden.

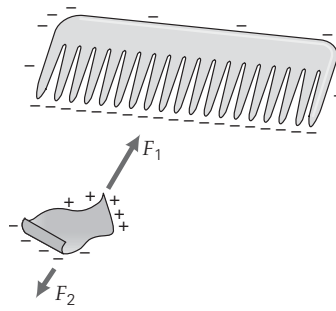
Nota: en los cálculos, consideraremos que k es exactamente igual a $9.00 \times 10^9\ \mathrm{N \cdot m^2/C^2}$ para fines de control de cifras significativas.

Ejemplo conceptual 15.2 ■ Libre de carga: fuerzas eléctricas

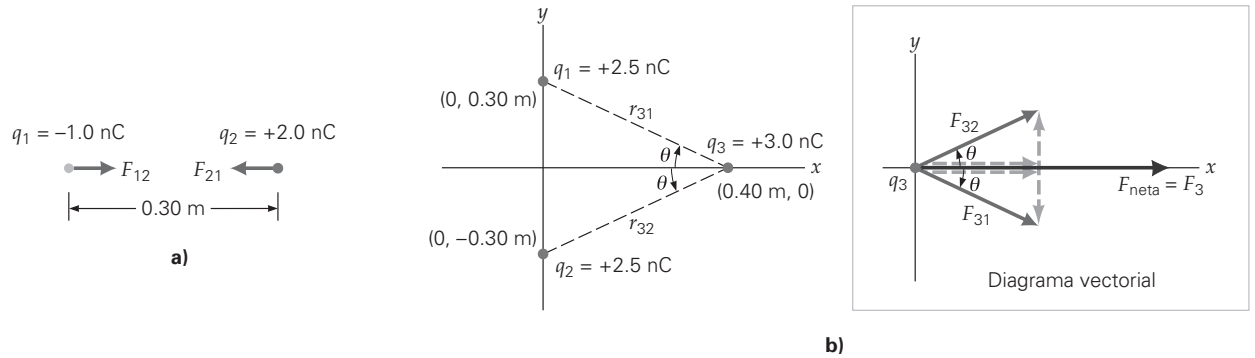
Seguramente usted ha hecho esto. Al peinar el cabello seco con un peine de caucho, el peine adquiere una carga neta negativa. Entonces, el peine cargado podrá usarse para atraer y recoger pequeños trozos de papel *no cargado*. Esto parecería violar la ley de la fuerza de Coulomb. Como el papel no tiene carga neta, cabría esperar que no hubiera fuerza eléctrica sobre él. ¿Qué mecanismo de carga explica este fenómeno, y cómo lo explica? *a*) La conducción, *b*) la fricción o *c*) la polarización.

Razonamiento y respuesta. Como el peine no toca al papel, éste no se carga por conducción ni por fricción, porque estos dos mecanismos requieren del contacto. Entonces, la respuesta correcta es la *c*. Cuando el peine cargado está cerca del papel, éste se polariza (▸figura 15.9). La clave para entender la atracción es notar que los extremos cargados del papel *no* están a la misma distancia del peine. El extremo positivo del papel está más cerca del peine que el extremo negativo. Como la fuerza eléctrica disminuye con la distancia, la atracción ($\vec{F}_1$) entre el peine y el extremo positivo del papel es mayor que la repulsión ($\vec{F}_2$) entre el peine y el extremo negativo del papel. Por lo tanto, después de sumar estas dos fuerzas vectorialmente, encontramos que la fuerza neta sobre el papel apunta hacia el peine, y si el papel es suficientemente ligero, se acelera en esa dirección.

Ejercicio de refuerzo. ¿El fenómeno antes descrito le indica el signo de la carga sobre el peine? Explique por qué.



▲ **FIGURA 15.9 Peine y papel** Véase el ejemplo conceptual 15.2.



▲ **FIGURA 15.10** Ley de Coulomb y fuerzas electrostáticas Véase el ejemplo 15.3.

PHYSLET®
Exploración 22.4 Simetría de dipolos

PHYSLET®
Exploración 22.1 Equilibrio

Ejemplo 15.3 ■ Ley de Coulomb: suma vectorial en relación con la trigonometría

a) Dos cargas puntuales de −1.0 nC y +2.0 nC están separadas 0.30 m (▲figura 15.10a). ¿Cuál es la fuerza eléctrica sobre cada partícula? *b*) En la figura 15.10a se ilustra una configuración de tres cargas. ¿Cuál es la fuerza electrostática sobre q_3?

Razonamiento. Sumar fuerzas eléctricas no es diferente que sumar cualquier otro tipo de fuerzas. La única diferencia aquí es que usamos la ley de Coulomb para calcular sus *magnitudes*. Luego, sólo se trata de calcular componentes. *a*) Para las dos cargas puntuales, usamos la ley de Coulomb (ecuación 15.2), notando que las fuerzas son atractivas. (¿Por qué?) *b*) Aquí debemos usar componentes para sumar vectorialmente las dos fuerzas que actúan sobre q_3 que se deben a q_1 y q_2. Podemos encontrar θ a partir de las distancias entre cargas. Este ángulo es necesario para calcular los componentes x y y de fuerza. (Véase la sugerencia para resolver problemas en la p. 515.)

Solución. Se listan los datos y se convierten nanocoulombs a coulombs:

Dado: *a*) $q_1 = -(1.0\text{ nC})\left(\dfrac{10^{-9}\text{ C}}{1\text{ nC}}\right) = -1.0 \times 10^{-9}\text{ C}$

$q_2 = +(2.0\text{ nC})\left(\dfrac{10^{-9}\text{ C}}{1\text{ nC}}\right) = +2.0 \times 10^{-9}\text{ C}$

$r = 0.30\text{ m}$

b) Los datos aparecen en la figura 15.10b. Convertimos las cargas a coulombs como en *a*.

Encuentre: *a*) $\vec{\mathbf{F}}_{12}$ y $\vec{\mathbf{F}}_{21}$ *b*) $\vec{\mathbf{F}}_3$

a) La ecuación 15.2 da la magnitud de la fuerza que actúa sobre cada carga puntual:

$$F_{12} = F_{21} = \frac{kq_1q_2}{r^2} = \frac{(9.00 \times 10^9\text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2)(1.0 \times 10^{-9}\text{ C})(2.0 \times 10^{-9}\text{ C})}{(0.30\text{ m})^2}$$
$$= 0.20 \times 10^{-6}\text{ N} = 0.20\ \mu\text{N}$$

Observe que la ley de Coulomb da sólo la magnitud de la fuerza. Sin embargo, como las cargas son de signo contrario, las fuerzas deben ser atractivas entre sí como es ilustra en la figura 15.10a.

b) Las fuerzas $\vec{\mathbf{F}}_{31}$ y $\vec{\mathbf{F}}_{32}$ deben sumarse vectorialmente, usando trigonometría y los componentes, para encontrar la fuerza neta. Como todas las cargas son positivas, las fuerzas son repulsivas, como se ilustra en el diagrama vectorial de la figura 15.10b. Como $q_1 = q_2$ y las cargas son equidistantes de q_3, se infiere que $\vec{\mathbf{F}}_{31}$ y $\vec{\mathbf{F}}_{32}$ tienen igual magnitud.

Note en la figura que $r_{31} = r_{32} = 0.50$ m. (¿Por qué?) Con datos de la figura, usamos de nuevo la ecuación 15.2:

$$F_{32} = \frac{kq_2q_3}{r_{32}^2} = \frac{(9.00 \times 10^9\text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2)(2.5 \times 10^{-9}\text{ C})(3.0 \times 10^{-9}\text{ C})}{(0.50\text{ m})^2}$$
$$= 0.27 \times 10^{-6}\text{ N} = 0.27\ \mu\text{N}$$

Tomando en cuenta las direcciones de $\vec{\mathbf{F}}_{31}$ y $\vec{\mathbf{F}}_{32}$, vemos por simetría que los componentes y de los vectores se cancelan. Así, $\vec{\mathbf{F}}_3$ (la fuerza neta sobre la carga q_3) actúa a lo largo del eje x positivo y tiene una magnitud de

$$F_3 = F_{31_x} + F_{32_x} = 2\,F_{31_x}$$

ya que $F_{31} = F_{32}$.

El ángulo θ se determina a partir de los triángulos; esto es, $\theta = \tan^{-1}\left(\frac{0.30\text{ m}}{0.40\text{ m}}\right) = 37°$. Entonces, $\vec{\mathbf{F}}_3$ tiene una magnitud de

$$\begin{aligned} F_3 &= 2\,F_{31_x} = 2\,F_{32}\cos\theta \\ &= 2(0.27\ \mu\text{N})\cos 37° = 0.43\ \mu\text{N} \end{aligned}$$

y actúa en la dirección x positiva (hacia la derecha).

Ejercicio de refuerzo. En el inciso *b* de este ejemplo, calcule la fuerza $\vec{\mathbf{F}}_1$ sobre q_1.

Las magnitudes de las cargas en el ejemplo 15.3 son típicas de cargas estáticas producidas por frotamiento; esto es, son diminutas. Así, las fuerzas implicadas son muy pequeñas para los estándares diarios, mucho más pequeñas que cualquier fuerza que hayamos estudiado hasta ahora. Sin embargo, en la escala atómica, incluso las fuerzas diminutas son capaces de producir enormes aceleraciones, porque las partículas (como los electrones y protones) tienen masas extremadamente pequeñas. Considere las respuestas en el ejemplo 15.4 en comparación con las respuestas en el ejemplo 15.3.

Sugerencia para resolver problemas

Los signos de las cargas pueden usarse explícitamente en la ecuación 15.2 con un valor positivo para F, para indicar una fuerza repulsiva, y un valor negativo para una fuerza atractiva. *Sin embargo, tal enfoque no se recomienda*, porque esta convención de signo sólo es útil en el caso de fuerzas unidimensionales, es decir, aquellas que tienen un solo componente, como en el ejemplo 15.3a. Cuando las fuerzas son bidimensionales, y tienen más de un componente, la ecuación 15.2 se usa para calcular la *magnitud* de la fuerza, considerando sólo la *magnitud* de las cargas (como en el ejemplo 15.3b). La ley de carga-fuerza se usa entonces para determinar la dirección de la fuerza entre cada par de cargas. (Elabore un bosquejo y marque en él los ángulos.) Finalmente calcule cada componente de fuerza usando trigonometría y combínelos apropiadamente. Este último enfoque será el que usaremos en este libro.

Ejemplo 15.4 ■ Dentro del núcleo: fuerzas electrostáticas repulsivas

a) ¿Cuál es la magnitud de la fuerza electrostática repulsiva entre dos protones en un núcleo? Considere la distancia de centro a centro de los protones nucleares igual a 3.0×10^{-15} m. *b*) Si los protones se liberan del reposo, ¿cuál es la magnitud de su aceleración inicial con respecto a la aceleración de la gravedad sobre la superficie de la Tierra, g?

Razonamiento. *a*) Debemos aplicar la ley de Coulomb para encontrar la fuerza repulsiva. *b*) Para encontrar la aceleración inicial, usamos la segunda ley de Newton ($F_{\text{neta}} = ma$).

Solución. Con las cantidades conocidas, tenemos lo siguiente:

Dado: $r = 3.00 \times 10^{-15}$ m

$q_1 = q_2 = +1.60 \times 10^{-19}$ C (de la tabla 15.1)

$m_p = 1.67 \times 10^{-27}$ kg (de la tabla 15.1)

Encuentre: *a*) F_e F_e (magnitud de la fuerza)

b) $\frac{a}{g}$ (magnitud de la aceleración comparada con g)

a) Usando la ley de Coulomb (ecuación 15.2), tenemos

$$F_e = \frac{kq_1q_2}{r^2} = \frac{(9.00 \times 10^9\ \text{N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2)(1.60 \times 10^{-19}\ \text{C})(1.60 \times 10^{-19}\ \text{C})}{(3.00 \times 10^{-15}\ \text{m})^2} = 25.6\ \text{N}$$

Esta fuerza es mucho mayor que la del ejemplo anterior y es equivalente al peso de un objeto con una masa de aproximadamente 2.5 kg. Entonces, con su pequeña masa, esperamos que el protón experimente una enorme aceleración.

b) Si esta fuerza actuara sola sobre un protón, produciría una aceleración de

$$a = \frac{F_e}{m_p} = \frac{25.6\ \text{N}}{1.67 \times 10^{-27}\ \text{kg}} = 1.53 \times 10^{28}\ \text{m/s}^2$$

Entonces

$$\frac{a}{g} = \frac{1.53 \times 10^{28}\ \text{m/s}^2}{9.8\ \text{m/s}^2} = 1.56 \times 10^{27}$$

(continúa en la siguiente página)

Esto es, $a \approx 10^{27}\,g$. El factor de 10^{27} es enorme. Para tener idea de qué tan grande es, si un átomo de uranio estuviera sujeto a esta aceleración, la fuerza neta requerida sería más o menos la misma que el peso de un oso polar (¡unos 450 kg!).

La mayoría de los átomos contienen más de dos protones en su núcleo. Con esas enormes fuerzas repulsivas, usted podría esperar que los núcleos se separaran. Como esto por lo general no ocurre, debe haber una fuerza atractiva más intensa que mantenga al núcleo unido. Ésta es la fuerza nuclear (o fuerte).

Ejercicio de refuerzo. Suponga que usted puede anclar un protón al suelo y que desea colocar otro directamente arriba del primero de manera que el segundo protón esté en equilibrio (esto es, que la fuerza de repulsión eléctrica que actúa sobre el segundo protón equilibre su peso). ¿Qué tan lejos deben estar uno de otro los protones?

Aunque hay una sorprendente similitud entre la forma matemática de las expresiones para las fuerzas eléctrica y gravitacional, hay una diferencia enorme en las intensidades relativas de las dos fuerzas, como se muestra en el siguiente ejemplo.

Ejemplo 15.5 ■ Dentro del átomo: fuerza eléctrica *versus* fuerza gravitacional

Determine la razón de la fuerza eléctrica y gravitacional entre un protón y un electrón. En otras palabras, ¿cuántas veces es mayor la fuerza eléctrica que la fuerza gravitacional?

Razonamiento. La distancia entre el protón y el electrón no se conoce. Sin embargo, la fuerza eléctrica y la fuerza gravitacional varían como el cuadrado inverso de la distancia, por lo que la distancia se cancela en una razón. Usando la ley de Coulomb y la ley de la gravitación de Newton (capítulo 7), es posible determinar la razón si se conocen las cargas, las masas y las constantes eléctrica y gravitacional apropiadas.

Solución. Se conocen las cargas y masas de las partículas (tabla 15.1), así como la constante eléctrica k y la constante gravitacional universal G.

Dado:
$$q_e = -1.60 \times 10^{-19}\ \text{C}$$
$$q_p = +1.60 \times 10^{-19}\ \text{C}$$
$$m_e = 9.11 \times 10^{-31}\ \text{kg}$$
$$m_p = 1.67 \times 10^{-27}\ \text{kg}$$

Encuentre: $\dfrac{F_e}{F_g}$ (razón de fuerzas)

Las expresiones para las fuerzas son

$$F_e = \frac{kq_eq_p}{r^2} \quad \text{y} \quad F_g = \frac{Gm_em_p}{r^2}$$

Formando una razón de magnitudes para fines de comparación (y para cancelar r) se obtiene

$$\frac{F_e}{F_g} = \frac{kq_eq_p}{Gm_em_p}$$
$$= \frac{(9.00 \times 10^9\ \text{N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2)(1.60 \times 10^{-19}\ \text{C})^2}{(6.67 \times 10^{-11}\ \text{N}\cdot\text{m}^2/\text{kg}^2)(9.11 \times 10^{-31}\ \text{kg})(1.67 \times 10^{-27}\ \text{kg})} = 2.27 \times 10^{39}$$

o

$$F_e = (2.27 \times 10^{39})F_g$$

La magnitud de la fuerza electrostática entre un protón y un electrón es más de 10^{39} veces mayor que la magnitud de la fuerza gravitacional. Mientras que un factor de 10^{39} es incomprensible para la mayoría, debería ser perfectamente claro que por este enorme valor, la fuerza gravitacional entre partículas cargadas generalmente se ignora en nuestro estudio de la electrostática.

Ejercicio de refuerzo. Con respecto a este ejemplo, demuestre que la gravedad es aún más insignificante comparada con la fuerza eléctrica repulsiva entre dos electrones. Explique por qué esto es así.

15.4 Campo eléctrico

OBJETIVOS: *a*) Comprender la definición del campo eléctrico y *b*) trazar líneas de campo eléctrico y calcular campos eléctricos para distribuciones simples de carga.

La fuerza eléctrica, como la fuerza gravitacional, es una fuerza con "acción a distancia". Como el rango de la fuerza eléctrica es infinito ($F_e \propto 1/r^2$ y tiende a cero sólo si r tiende a infinito), una configuración particular de cargas tendrá un efecto sobre una carga adicional colocada en cualquier parte cercana.

La idea de una fuerza que actúa a través del espacio fue difícil de aceptar por los primeros investigadores, y entonces se introdujo el concepto más moderno de *campo de fuerza* o simplemente campo. Un *campo eléctrico* se concibe como rodeando todo conjunto de cargas. Así, el campo eléctrico representa el *efecto físico* de una configuración particular de cargas sobre el espacio cercano. El campo es la manera de representar lo que es diferente acerca del espacio cercano por la presencia de las cargas. El concepto nos permite pensar en cargas que interactúan con el campo eléctrico creado por otras cargas, y no directamente con otras cargas "a cierta distancia". La idea central del concepto del campo eléctrico es la siguiente: una configuración de cargas crea un campo eléctrico en el espacio cercano. Si en este campo eléctrico se coloca otra carga, el *campo* ejercerá una fuerza eléctrica sobre ella. Por lo tanto:

Nota: las cargas generan un campo eléctrico, que actúa sobre otras cargas colocadas en ese campo.

> Las cargas crean campos, y éstos, a su vez, ejercen fuerzas sobre otras cargas.

Un campo eléctrico es un *campo vectorial* (tiene dirección y magnitud), lo que nos permite determinar la fuerza ejercida (incluida la dirección) sobre una carga en una posición particular en el espacio. *Sin embargo, el campo eléctrico no es una fuerza*. La magnitud (o intensidad) del campo eléctrico se define como la fuerza ejercida por carga unitaria. Determinar la fuerza de un campo eléctrico puede imaginarse teóricamente utilizando el siguiente procedimiento. Coloque una pequeña carga (llamada *carga de prueba*) en un punto de interés. Mida la fuerza que actúa sobre la carga de prueba, divida por la cantidad de carga, y encuentre así la fuerza que se ejercería *por coulomb*. Luego imagine que se retira la carga de prueba. La fuerza desaparece (¿por qué?), pero el campo permanece, porque es generado por las cargas cercanas, que permanecen. Cuando el campo eléctrico se determina en muchos puntos, tenemos un "mapa" de la fuerza de campo eléctrico, pero no de su dirección. Así que la descripción es incompleta.

PHYSLET®

Exploración 23.1 Campos y cargas de prueba

Puesto que la dirección del campo eléctrico se especifica mediante la dirección de la fuerza sobre la carga de prueba, depende de si la carga de prueba es positiva o negativa. La convención de signos es que se usa una *carga de prueba positiva* (q_+) para medir la dirección del campo eléctrico (véase la ▶figura 15.11). Esto es,

Nota: una *carga de prueba* (q_+) es pequeña y positiva.

> La dirección del campo eléctrico es en la dirección de la fuerza que experimenta una carga de prueba positiva.

Una vez que se conocen la magnitud y dirección del campo eléctrico que genera una configuración de cargas, es posible ignorar las cargas "fuente" y hablar sólo en términos del campo que éstas han generado. Este procedimiento de visualizar las interacciones eléctricas entre las cargas a menudo facilita los cálculos.

El **campo eléctrico** $\vec{\mathbf{E}}$ en cualquier punto se define como sigue

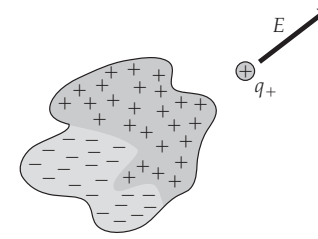
$$\vec{\mathbf{E}} = \frac{\vec{\mathbf{F}}_{\text{en } q_+}}{q_+} \tag{15.3}$$

Unidad SI del campo eléctrico: newton/coulomb (N/C)

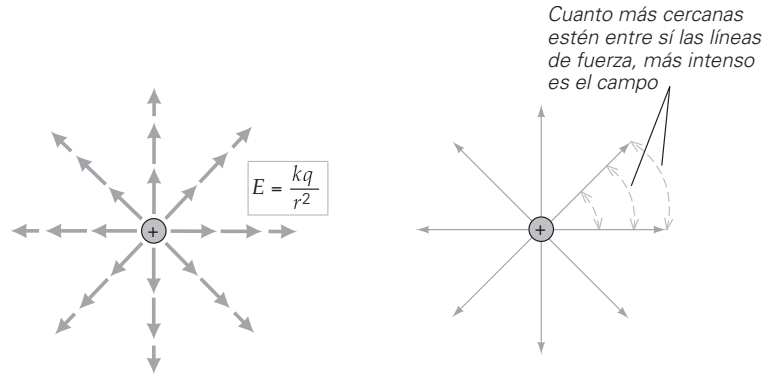
La dirección de $\vec{\mathbf{E}}$ es en la dirección de la fuerza sobre una pequeña carga de prueba *positiva* en ese punto.

Para el caso especial de una carga puntual, podemos usar la ley de fuerza de Coulomb. Para determinar la magnitud del campo eléctrico que se debe a una carga puntual a una distancia r de esa carga puntual, se utiliza la ecuación 15.3:

$$E = \frac{F_{\text{en } q_+}}{q_+} = \frac{(kqq_+/r^2)}{q_+} = \frac{kq}{r^2}$$



▲ **FIGURA 15.11 Dirección del campo eléctrico** Por convención, la dirección del campo eléctrico $\vec{\mathbf{E}}$ es la misma que la de la fuerza que experimenta por una carga de prueba imaginaria (positiva). Para ver la dirección, hay que preguntarse en qué dirección se acelera la carga de prueba si se libera. Aquí, el "sistema de cargas" produce un campo eléctrico (neto) hacia arriba y hacia la derecha en el lugar de la carga de prueba. En esta configuración particular, ¿podría explicar esta dirección observando los signos y lugares de las cargas en el sistema?



a) Vectores del campo eléctrico **b) Líneas del campo eléctrico (líneas de fuerza)**

▲ **FIGURA 15.12** Campo eléctrico ***a)*** El campo eléctrico se aleja de una carga puntual positiva, en el sentido en que una fuerza sería ejercida sobre una pequeña carga de prueba positiva. La magnitud del campo (la longitud de los vectores) disminuye conforme aumenta la distancia desde la carga, lo que refleja la relación de distancia de cuadrado inverso, característica del campo producido por una carga puntual. ***b)*** En este caso simple, los vectores se conectan fácilmente para dar un patrón de líneas de campo eléctrico de una carga puntual positiva.

PHYSLET®

Ilustración 23.2 Campos eléctricos desde cargas puntuales

Esto es,

$$E = \frac{kq}{r^2} \quad \text{(magnitud del campo eléctrico provocado por la carga puntual } q\text{)} \tag{15.4}$$

Es importante notar que en la obtención de la ecuación 15.4, q_+ se cancela. *Esto debe suceder siempre*, porque el campo es producido por las otras cargas, *no* por la carga de prueba q_+.

Algunos vectores de campo eléctrico en la vecindad de una carga positiva se ilustran en la ▲figura 15.12a. Note que sus direcciones están *alejándose de la carga positiva*, porque una carga de prueba positiva sentiría una fuerza en esta dirección. Advierta también que la magnitud del campo (la longitud de la fecha) disminuye conforme la distancia r aumenta.

Si hay más de una carga generando un campo eléctrico, entonces el campo eléctrico total o neto en cualquier punto se encuentra usando el **principio de superposición para campos eléctricos**, que se enuncia como sigue.

> Para una configuración de cargas, el campo eléctrico total o neto en cualquier punto es la suma vectorial de los campos eléctricos que se deben a las cargas individuales.

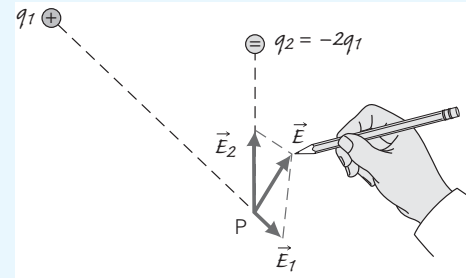
El uso de este principio se ilustra en los siguientes dos ejemplos, y una manera de determinar cualitativamente la dirección del campo eléctrico de un grupo de cargas se muestra en la sección Aprender dibujando referente al uso del principio de superposición para determinar la dirección del campo eléctrico.

Nota: considere que la definición del campo eléctrico es útil de la misma manera en que el precio por libra lo es para los artículos comestibles. Si se sabe cuánto se quiere de un artículo, es posible calcular cuánto costará si se conoce el precio por libra. De forma similar, dada la magnitud de una carga colocada en un campo eléctrico, es posible calcular la fuerza sobre ella si se conoce la intensidad del campo en newtons por coulomb.

APRENDER DIBUJANDO

USO DEL PRINCIPIO DE SUPERPOSICIÓN PARA DETERMINAR LA DIRECCIÓN DEL CAMPO ELÉCTRICO

Para determinar la dirección del campo eléctrico en cualquier punto P, simplemente dibuje los vector de los campos eléctricos individuales y súmelos, tomando en cuenta sus magnitudes relativas, si es posible. En la situación específica mostrada aquí, $\vec{E}_1$ es mucho más pequeño que $\vec{E}_2$ por los factores de distancia y carga. ¿Puede explicar por qué $\vec{E}_2$, si se dibuja con precisión, sería aproximadamente ocho veces más largo que $\vec{E}_1$? El paso final sería completar la suma vectorial.



Ejemplo 15.6 ■ Campos eléctricos en una dimensión: campo cero por superposición

Dos cargas puntuales se encuentran sobre el eje x, como se ilustra en la ▸figura 15.13. Identifique todos los lugares en el eje donde el campo eléctrico es cero.

Razonamiento. Cada carga puntual genera su propio campo. Por el principio de superposición, el campo eléctrico es la suma vectorial de los dos campos. Estamos buscando los lugares donde estos campos son iguales pero opuestos, de manera que se cancelen y den un campo eléctrico (*total* o *neto*) de cero.

Solución. Comenzamos por especificar el lugar a localizar como una distancia x a partir de q_1 (que se ubica en $x = 0$) y por convertir las cargas de microcoulombs a coulombs, como es costumbre.

Dado: $d = 0.60$ m (distancia entre las cargas)
$q_1 = +1.5\ \mu\text{C} = +1.5 \times 10^{-6}$ C
$q_2 = +6.0\ \mu\text{C} = +6.0 \times 10^{-6}$ C

Encontrar: x [el lugar o lugares donde E es cero]

Como ambas cargas son positivas, sus campos apuntan hacia la derecha en todos los lugares a la derecha de q_2. Por consiguiente, los campos no se cancelan en esa región. De manera similar, a la izquierda de q_1, ambos campos apuntan hacia la izquierda y no se cancelan. La única posibilidad de cancelación se da *entre* las cargas. En esa región, los dos campos se cancelarán si sus magnitudes son iguales, porque están en direcciones opuestas. Al igualar las magnitudes y despejar x:

$$E_1 = E_2 \qquad \text{o} \qquad \frac{kq_1}{x^2} = \frac{kq_2}{(d - x)^2}$$

Al reordenar esta expresión y cancelar la constante k, se obtiene

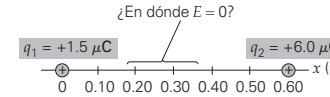
$$\frac{1}{x^2} = \frac{(q_2/q_1)}{(d - x)^2}$$

Con $q_2/q_1 = 4$, se saca la raíz cuadrada de ambos lados:

$$\sqrt{\frac{1}{x^2}} = \sqrt{\frac{q_2/q_1}{(d - x)^2}} = \sqrt{\frac{4}{(d - x)^2}} \qquad \text{o} \qquad \frac{1}{x} = \frac{2}{d - x}$$

Al resolver, $x = d/3 = 0.60\ \text{m}/3 = 0.20$ m. (¿Por qué no utilizamos la raíz cuadrada negativa? Inténtelo.) El hecho de que el resultado esté más cerca de q_1 tiene sentido desde el punto de vista físico. Como q_2 es la carga más grande, para que los dos campos sean iguales en magnitud, el lugar debe estar más cerca de q_1.

Ejercicio de refuerzo. Repita este ejemplo, cambiando el signo de la carga de la derecha.



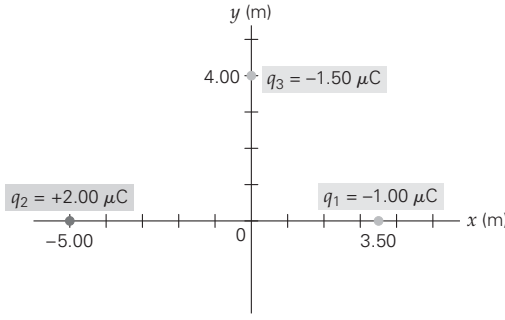
▲ **FIGURA 15.13 Campo eléctrico en una dimensión** Véase el ejemplo 15.6.

Nota: campo eléctrico total: $\vec{\mathbf{E}} = \Sigma\vec{\mathbf{E}}_i$.

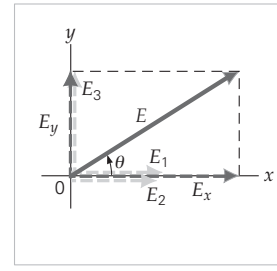
Ejemplo integrado 15.7 ■ Campos eléctricos en dos dimensiones: uso de componentes vectoriales y superposición

La ▾figura 15.14a muestra una configuración de tres cargas puntuales. ***a)*** ¿En qué cuadrante está el campo eléctrico? 1) en el primer cuadrante, 2) en el segundo cuadrante o 3) en el tercer cuadrante. Explique su razonamiento, usando el principio de superposición. ***b)*** Calcule la magnitud y dirección del campo eléctrico en el origen que se debe a esta configuración de cargas.

(continúa en la siguiente página)



a)



b)

◀ **FIGURA 15.14 Determinación del campo eléctrico** Véase el Ejemplo integrado 15.7.

a) Razonamiento conceptual. En general, el campo eléctrico apunta hacia cargas puntuales negativas y desde cargas puntuales positivas. Por lo tanto, $\vec{\mathbf{E}}_1$ y $\vec{\mathbf{E}}_2$ apuntan en el sentido x positivo y $\vec{\mathbf{E}}_3$ apunta a lo largo del eje y positivo. Como el campo eléctrico es la suma de esos vectores, sus dos componentes son positivos. Por lo tanto, $\vec{\mathbf{E}}$ debe estar en el primer cuadrante (figura 15.14b). Así, la respuesta correcta es la 1.

b) Razonamiento cuantitativo y solución. Las direcciones de los campos eléctricos individuales se muestran en el inciso *a*. De acuerdo con el principio de superposición, se requiere sumar los campos vectorialmente para encontrar el campo eléctrico ($\vec{\mathbf{E}} = \vec{\mathbf{E}}_1 + \vec{\mathbf{E}}_2 + \vec{\mathbf{E}}_3$).

Al listar los datos y convertir las cargas a coulombs, tenemos:

Dado: $q_1 = -1.00\ \mu\text{C} = -1.00 \times 10^{-6}\ \text{C}$
$q_2 = +2.00\ \mu\text{C} = +2.00 \times 10^{-6}\ \text{C}$
$q_3 = -1.50\ \mu\text{C} = -1.50 \times 10^{-6}\ \text{C}$
$r_1 = 3.50\ \text{m}$
$r_2 = 5.00\ \text{m}$
$r_3 = 4.00\ \text{m}$

Encuentre: $\vec{\mathbf{E}}$ (campo eléctrico total en el origen)

A partir del diagrama, $\mathbf{E}_y$ se debe enteramente a $\vec{\mathbf{E}}_3$ y E_x es la suma de las magnitudes de $\vec{\mathbf{E}}_1$ y $\vec{\mathbf{E}}_2$. Para calcular las magnitudes de los tres campos que forman el campo total, se emplea la ecuación 15.4. Estas magnitudes son

$$E_1 = \frac{kq_1}{r_1^2} = \frac{(9.00 \times 10^9\ \text{N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2)(1.00 \times 10^{-6}\ \text{C})}{(3.50\ \text{m})^2} = 7.35 \times 10^2\ \text{N/C}$$

$$E_2 = \frac{kq_2}{r_2^2} = \frac{(9.00 \times 10^9\ \text{N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2)(2.00 \times 10^{-6}\ \text{C})}{(5.00\ \text{m})^2} = 7.20 \times 10^2\ \text{N/C}$$

$$E_3 = \frac{kq_3}{r_3^2} = \frac{(9.00 \times 10^9\ \text{N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2)(1.50 \times 10^{-6}\ \text{C})}{(4.00\ \text{m})^2} = 8.44 \times 10^2\ \text{N/C}$$

Las magnitudes de los componentes x y y del campo total son

$$E_x = E_1 + E_2 = +7.35 \times 10^2\ \text{N/C} + 7.20 \times 10^2\ \text{N/C} = +1.46 \times 10^3\ \text{N/C}$$

y

$$E_y = E_3 = +8.44 \times 10^2\ \text{N/C}$$

En forma de componentes,

$$\vec{\mathbf{E}} = E_x\hat{\mathbf{x}} + E_y\hat{\mathbf{y}} = (1.46 \times 10^3\ \text{N/C})\hat{\mathbf{x}} + (8.44 \times 10^2\ \text{N/C})\hat{\mathbf{y}}$$

Usted debería demostrar que, en forma magnitud-ángulo, esto es

$E = 1.69 \times 10^3\ \text{N/C}$ en $\theta = 30.0°$ (θ está en el primer cuadrante respecto al eje x positivo)

Ejercicio de refuerzo. En este ejemplo, suponga que q_1 se movió al origen. Encuentre el campo eléctrico en su posición anterior.

PHYSLET®

Ilustración 23.3 Representación de líneas de campo de campos vectoriales

Líneas eléctricas de fuerza

Una manera conveniente de representar *gráficamente* el patrón del campo eléctrico es usando *líneas eléctricas de fuerza* o **líneas de campo eléctrico**. Para comenzar, considere los vectores de campo eléctrico cerca de una carga puntual positiva, como en la figura 15.12a. Los vectores están "conectados" en la figura 15.12b. Esto permite construir el *patrón de las líneas de campo eléctrico* generado por una carga puntual. Observe que el campo eléctrico es más intenso (su separación disminuye) conforme nos acercamos a la carga. También note que en cualquier punto sobre una línea de campo, la *dirección* del campo eléctrico es tangente a la línea. (Las líneas por lo regular tienen flechas unidas a ellas que indican la dirección general del campo.) Debe quedar claro que las líneas de campo eléctrico no pueden cruzarse. Si lo hicieran, esto significaría que en el lugar de cruce habría dos direcciones para la fuerza sobre una carga colocada ahí, lo cual sería un resultado no razonable desde el punto de vista de la física.

Las reglas generales para dibujar e interpretar líneas de campo eléctrico son las siguientes:

1. Cuanto más cerca están las líneas de campo, más intenso es el campo eléctrico.
2. En cualquier punto, la dirección del campo eléctrico es tangente a las líneas de campo.
3. Las líneas de campo eléctrico empiezan en cargas positivas y terminan en cargas negativas.
4. El número de líneas que salen o entran a una carga es proporcional a la magnitud de ésta.
5. Las líneas de campo eléctrico nunca se cruzan.

Estas reglas nos permiten hacer un "mapa" del patrón de líneas eléctricas de fuerza para varias configuraciones de carga. (Véase la sección Aprender dibujando referente al trazado de líneas eléctricas de fuerza en esta página.)

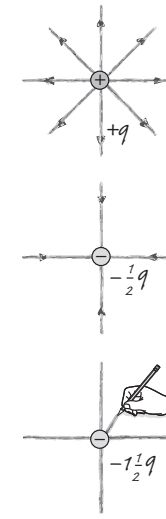
Apliquemos ahora esas reglas y el principio de superposición para hacer un mapa del patrón de líneas de campo eléctrico que genera un *dipolo eléctrico* en el ejemplo 15.8. Un **dipolo eléctrico** consiste en dos cargas eléctricas (o "polos", como se conocían anteriormente), iguales pero de signo contrario. Si bien la carga neta sobre el dipolo es cero, éste genera un campo eléctrico porque las cargas están separadas. Si no estuvieran separadas, sus campos se cancelarían en todos los lugares.

Además de aprender cómo determinar las líneas de campo eléctrico, es importante estudiar los dipolos, porque se presentan en la naturaleza. Por ejemplo, los dipolos eléctricos sirven como un modelo para las moléculas polarizadas importantes, como la molécula de agua. (Véase la figura 15.7.) También consulte la sección A fondo 15.2 sobre los campos eléctricos en las fuerzas policiacas y en la naturaleza: armas paralizantes y peces eléctricos, en la p. 524.

APRENDER DIBUJANDO

Trazado de líneas eléctricas de fuerza

Trazo de líneas eléctricas de fuerza



¿Cuántas líneas deberían dibujarse para $-1\frac{1}{2}q$, y cuáles deberían ser sus direcciones?

Ejemplo 15.8 ■ Construcción del patrón del campo eléctrico de un dipolo

Usando el principio de superposición y las reglas de las líneas de campo eléctrico, construya una línea típica de campo eléctrico para un dipolo eléctrico.

Razonamiento. La construcción implica la suma vectorial de los campos eléctricos individuales desde los dos extremos opuestos del dipolo.

Solución.

Dado: un dipolo eléctrico de dos cargas iguales y opuestas separadas una distancia d

Encuentre: una línea típica de campo eléctrico

En la figura ▼15.15a se ilustra un dipolo eléctrico. Para seguirle la pista a los dos campos, llamemos a la carga positiva q_+ y a la carga negativa q_-. Sus campos individuales, $\vec{\mathbf{E}}_+$ y $\vec{\mathbf{E}}_-$, se designarán con los mismos subíndices.

Como los campos eléctricos (y también las líneas de campo) comienzan en cargas positivas, comencemos en el punto A, cerca de la carga q_+. Como este punto está mucho más cerca de q_+, se infiere que $E_+ > E_-$. Sabemos que $\vec{\mathbf{E}}_+$ *siempre* apunta alejándose de q_+ y que $\vec{\mathbf{E}}_-$ *siempre* apunta hacia q_-. Tomando esto en cuenta, estamos en condiciones de dibujar cualitativamente los dos campos en A. El método del paralelogramo determina su suma vectorial: el campo eléctrico en A.

Como tratamos de hacer un mapa de la línea de campo eléctrico, la dirección general del campo eléctrico en A señala aproximadamente a nuestro nuevo punto, B. En B, se tiene una magnitud reducida (¿por qué?) y un ligero cambio direccional tanto en $\vec{\mathbf{E}}_+$ como en $\vec{\mathbf{E}}_-$. Por ahora usted debería ver cómo se determinan los campos en C y en D. El punto D es especial porque está sobre la bisectriz perpendicular del eje dipolar (la línea que conecta las dos cargas). El campo eléctrico apunta hacia abajo en cualquier parte sobre esta línea. Usted debe continuar la construcción en los puntos E, F y G.

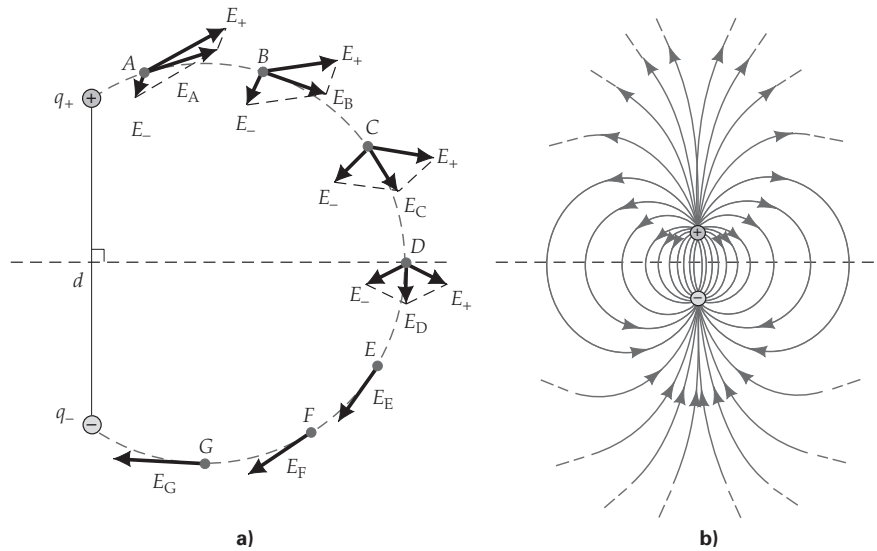
Por último, para construir la línea de campo eléctrico, comencemos en el extremo positivo del dipolo, porque las líneas de campo salen de ese extremo. Como los vectores de campo eléctrico son tangentes a las líneas de campo, dibujamos la línea para satisfacer este requisito. [Usted debe poder trazar las otras líneas y comprender el patrón completo del campo dipolar que se ilustra en la figura 15.15b.]

Ejercicio de refuerzo. Usando los procedimientos de este ejemplo, construya las líneas de campo que comienzan *a*) justo arriba de la carga positiva, *b*) justo abajo de la carga negativa y *c*) justo abajo de la carga positiva.

PHYSLET®

Exploración 23.2 Líneas de campo y trayectorias

Nota: recuerde que el nombre "líneas eléctricas de fuerza" es un término equivocado. Estas líneas de campo representan el campo eléctrico, no la fuerza eléctrica.



▶ **FIGURA 15.15 Mapa del campo eléctrico provocado por un dipolo** ***a)*** Se muestra la construcción de una línea de campo eléctrico de un dipolo. El campo eléctrico es la suma vectorial de los dos campos producidos por los dos extremos del dipolo. (Véase el ejemplo 15.8 para más detalles.) ***b)*** El campo total del dipolo eléctrico se determina siguiendo el procedimiento del inciso *a* en otros puntos cerca del dipolo.

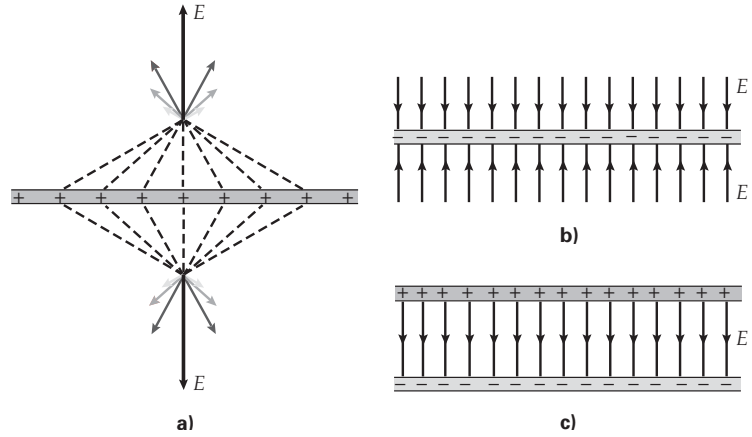
La ▼figura 15.16a muestra el uso del principio de superposición para construir las líneas de campo eléctrico que genera una sola placa grande cargada. Note que el campo apunta perpendicularmente alejándose de la placa en ambos lados. La figura 15.16b muestra el resultado si la placa tiene carga negativa, la única diferencia es la dirección del campo. Ahora estamos en condiciones de encontrar el campo entre dos placas con cargas espaciadas y contrarias. El resultado es el patrón de la figura 15.16c. A causa de la cancelación de los componentes horizontales del campo (mientras nos mantenemos alejados de las orillas de la placa), el campo eléctrico es uniforme y apunta de la carga positiva a la negativa. (Piense en la dirección de la fuerza que actúa sobre una carga de prueba positiva colocada entre las placas.)

La obtención de la expresión matemática para la magnitud del campo eléctrico entre dos placas está más allá del alcance de este libro. Sin embargo, el resultado es

$$E = \frac{4\pi kQ}{A} \quad \textit{(campo eléctrico entre placas paralelas)} \tag{15.5}$$

donde Q es la magnitud de la carga total sobre *una* de las placas y A es el área de *una* placa. Las placas paralelas son comunes en aplicaciones electrónicas. Por ejemplo, en el capítulo 16 veremos que un importante elemento de los circuitos eléctricos es un dispositivo llamado *condensador* (o *capacitor*), que, en su forma más simple, es precisamente un conjunto de placas paralelas. Los condensadores juegan un papel crucial en dispositivos que salvan vidas, tales como los *desfibriladores del corazón*, como veremos en el capítulo 16.

Los relámpagos que van de una nube a la tierra se consideran aproximadamente co-mo un sistema de placas paralelas muy cercanas entre sí como en el siguiente ejemplo. (Véase la sección A fondo sobre el tema de relámpagos y pararrayos en la siguiente página.)



▶ **FIGURA 15.16 Campo eléctrico provocado por placas paralelas muy grandes** ***a)*** Sobre una placa cargada positivamente, el campo eléctrico neto apunta hacia arriba. Aquí, los componentes horizontales de los campos eléctricos de varios lugares sobre la placa se cancelan. Debajo de la placa, $\vec{E}$ apunta hacia abajo. ***b)*** Para una placa con carga negativa, el sentido del campo eléctrico (mostrado en ambos lados de la placa) se invierte. ***c)*** La superposición de los campos de ambas placas da por resultado una cancelación fuera de las placas y en un campo aproximadamente uniforme entre ellas.

A FONDO 15.1 RELÁMPAGOS Y PARARRAYOS

Aunque la liberación violenta de energía eléctrica en forma de relámpagos es un suceso común, aún tenemos mucho que aprender acerca de cómo se forman. Sabemos que durante la formación de un cumulonimbo, o nube de tormenta, ocurre una separación de carga. No se comprende por completo cómo es que se realiza la separación de carga, pero es un fenómeno que debe estar asociado con el rápido movimiento vertical del aire y la humedad dentro de las nubes de tormenta. Cualquiera que sea el mecanismo, la nube adquiere diferentes cargas en distintas regiones y, por lo general, en la parte inferior hay carga negativa.

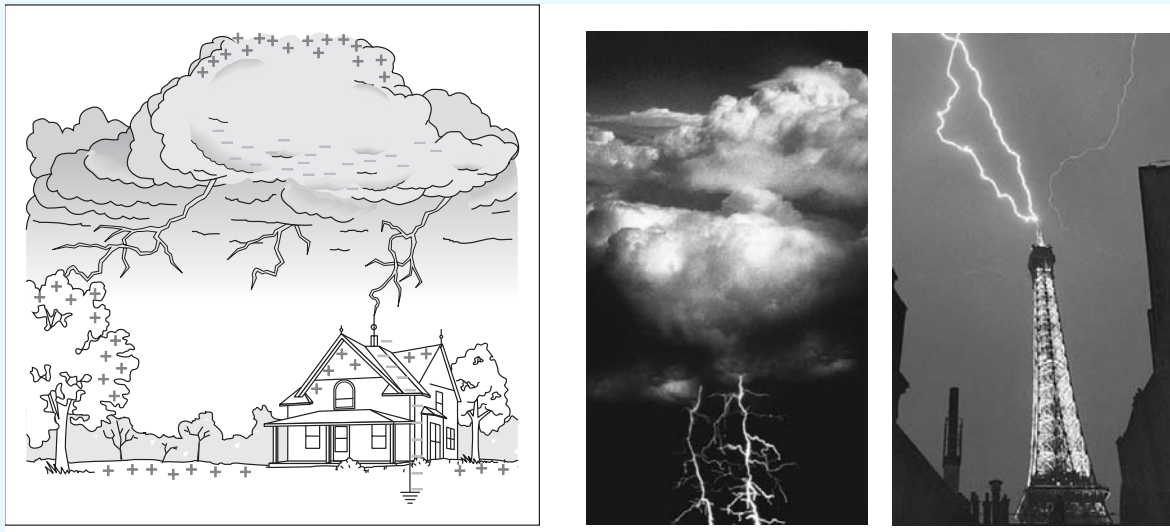
Como resultado, se induce una carga contraria en la superficie terrestre (figura 1a). En algún momento, el relámpago reduce esta diferencia de carga ionizando el aire y permitiendo que exista un flujo de carga entre la nube y la tierra. Sin embargo, el aire es un buen aislante, de manera que el campo eléctrico debe ser muy fuerte para que la ionización ocurra. (Véase el ejemplo 15.9 para una estimación cuantitativa de la carga en una nube.)

La mayor parte de los relámpagos ocurren enteramente dentro de la nube (descargas intranube) en donde no pueden verse directamente. Sin embargo, las descargas visibles ocurren entre dos nubes (descargas de nube a nube) y entre la nube y la Tierra (descarga de nube a tierra). Las fotografías de descargas de nube a tierra tomadas con cámaras especiales de alta velocidad revelan una trayectoria de ionización hacia abajo casi invisible. El relámpago descarga en una serie de etapas o saltos, por lo que se le conoce como *líder escalonado*. Conforme el líder se acerca a la tierra, los iones con carga positiva surgen de los árboles, los edificios altos o el suelo en forma de *serpentina* para encontrarse con él.

Cuando una serpentina y un líder hacen contacto, los electrones a lo largo del canal de este último fluyen hacia abajo. El flujo inicial tiene lugar cerca del suelo, y conforme continúa, los electrones que caen cada vez más arriba comienzan a migrar hacia abajo. Luego, la trayectoria del flujo de electrones se extiende hacia arriba en lo que se conoce como *descarga de retorno*. El surgimiento de un flujo de carga en la descarga de retorno provoca que la trayectoria conductiva se ilumine, produciendo el brillante relámpago que vemos y que se registra en las fotografías de exposición prolongada (figura 1b). La mayor parte de los destellos de los relámpagos tienen una duración de menos de 0.50 s. Por lo general, después de la descarga inicial, tiene lugar otra ionización a lo largo del canal original y ocurre otra descarga de retorno. La mayor parte de los relámpagos tienen tres o cuatro descargas de retorno.

Se dice con frecuencia que Benjamin Franklin fue el primero en demostrar la naturaleza eléctrica del relámpago. En 1750 sugirió un experimento en el que se utilizaría una varilla metálica sobre un edificio alto. Sin embargo, un francés llamado Thomas François d'Alibard realizó el experimento utilizando una varilla durante una tormenta (figura 1c). Más tarde, Franklin realizó un experimento similar con una cometa que hizo volar durante una tormenta.

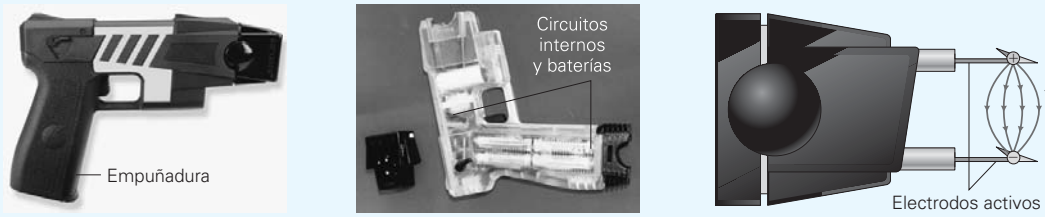
Un resultado práctico del trabajo de Franklin con los relámpagos fue el *pararrayos*, que consiste simplemente en una varilla metálica aguzada, conectada mediante un cable a una varilla de metal dirigida hacia el interior del suelo, es decir, puesta a tierra. La punta de la varilla elevada, con su densa acumulación de carga positiva inducida y gran campo eléctrico (véase la figura 15.19b), intercepta al líder escalonado ionizado de la nube en su trayecto hacia abajo, y lo descarga a tierra sin peligro antes de que llegue a la estructura o haga contacto con una serpentina dirigida hacia arriba. Esto evita la formación de las descargas eléctricas dañinas asociadas con la descarga de retorno.



a) b) c)

FIGURA 1 Relámpagos y pararrayos ***a)*** La polarización de la nube induce una carga en la superficie de la Tierra, ***b)*** Cuando el campo se vuelve suficientemente grande, suelta una descarga eléctrica, a la que llamamos relámpago, ***c)*** Un pararrayos, montado en la parte más alta de una estructura, ofrece una trayectoria hacia la tierra para evitar daños.

A FONDO 15.2 CAMPOS ELÉCTRICOS EN LAS FUERZAS POLICIACAS Y EN LA NATURALEZA: ARMAS PARALIZANTES Y PECES ELÉCTRICOS



a) b) c)

FIGURA 1 La pistola paralizante Taser ***a)*** El exterior de una pistola paralizante; observe la empuñadura y los dos electrodos. ***b)*** El interior: los circuitos necesarios para aumentar el campo eléctrico y la separación de carga a la fuerza requerida para interrumpir la comunicación entre los nervios. ***c)*** Una ilustración del campo eléctrico entre los electrodos. (Las cargas cambian de signo de forma periódica, produciendo un campo eléctrico oscilatorio.)

Las pistolas paralizantes y los peces eléctricos exhiben propiedades similares en sus campos eléctricos. Las pistolas paralizantes (Taser manual) generan una separación de carga utilizando baterías y circuitos internos. Estos circuitos producen una gran polarización de carga, es decir, cargas iguales y opuestas en los electrodos. Las figuras 1a y 1b muestran una Taser común. Las cargas en los electrodos cambian de signo, pero en cualquier instante, el campo está cercano al de un dipolo (figura 1c). Las Taser se utilizan para someter a los delincuentes, teóricamente sin provocar daños permanentes. Un oficial de la policía, al asir la empuñadura, aplica los electrodos al cuerpo, por ejemplo, al muslo. El campo eléctrico interrumpe las señales eléctricas en los nervios que controlan el gran músculo que forma el muslo, paralizándolo, lo que hace más fácil someter al delincuente.

El término *pez eléctrico* evoca una imagen de una anguila eléctrica (que en realidad es un pez con forma de anguila). Sin embargo, hay otros peces que también son "eléctricos". La anguila eléctrica y algunos otros, como el bagre eléctrico, son *peces fuertemente eléctricos*. Son capaces de generar grandes campos eléctricos para inmovilizar a sus presas, pero también utilizan estos campos para funciones de localización y comunicación. Los *peces débilmente eléctricos*, como el nariz de elefante (figura 2a), utilizan sus campos (figura 2b) sólo para localización y comunicación. Los peces que producen activamente campos eléctricos se llaman *peces electrogénicos*.

En un pez electrogénico, la separación de carga se realiza en el *órgano eléctrico* (señalado en el pez nariz de elefante de la figura 2b), que es un conjunto de *electroplacas* especializadas apiladas. Cada electroplaca es una estructura con forma de disco, que normalmente está descargada. Cuando el cerebro envía una señal, los discos se polarizan a través de un proceso químico similar al de la acción de los nervios y crean el campo eléctrico del pez.

Los peces débilmente eléctricos son capaces de generar campos eléctricos como los que producen las baterías. Esto sirve sólo para funciones de *electrocomunicación* y *electrolocalización*. Los peces fuertemente eléctricos producen campos cientos de veces más fuertes y pueden matar a sus presas si las tocan al mismo tiempo con las áreas de cargas contrarias. La anguila eléctrica tiene miles de electroplacas apiladas en el órgano eléctrico, que normalmente se extiende desde la parte posterior de la cabeza hasta la cola y que ocupa más del 50% de la longitud de su cuerpo (figura 2c).

Como un ejemplo de electrolocalización, considere el cambio en el patrón del campo eléctrico normal del pez nariz de elefante (figura 2b) cuando se aproxima a un pequeño objeto conductor (figura 3). Observe que las líneas del campo cambian para curvearse hacia el objeto; como este último es conductor, las líneas del campo deben orientarse en ángulos rectos con respecto a su superficie. Esto da por resultado un campo más fuerte en el área de la piel del pez más cercana al objeto. Los sensores epiteliales detectan este incremento y envían una señal correspondiente al cerebro. Un objeto que no es conductor, como una roca, provocaría el efecto contrario. La electrolocalización y la electrocomunicación están determinadas por una interacción del campo eléctrico y los órganos sensoriales. Las propiedades básicas de los campos electrostáticos nos dan una idea general de cómo funcionan esos peces.

Ejemplo 15.9 ■ Placas paralelas: estimación de la carga en nubes de tormenta

El campo eléctrico E (es decir, la magnitud) que se requiere para ionizar aire es aproximadamente 1.0×10^6 N/C. Cuando el campo alcanza este valor, los átomos más débilmente ligados comienzan a abandonar sus moléculas (ionización de las moléculas), lo que conduce a una descarga de relámpago. Suponga que el valor existente para E entre la superficie inferior negativamente cargada de la nube y el suelo positivamente cargado es el 1.00% del valor de ionización, o 1.0×10^4 N/C. (Véase la figura 1a de la sección A fondo 15.1 en la p. 523.) Considere las nubes como cuadrados de 10 millas por lado. Estime la magnitud de la carga negativa total sobre la superficie interior.

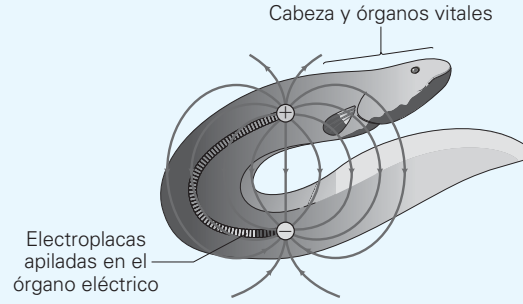
Razonamiento. El campo eléctrico está dado, por lo que la ecuación 15.5 servirá para estimar Q. Primero debemos convertir el área de la nube A (una de las "placas") a metros cuadrados.

Solución.

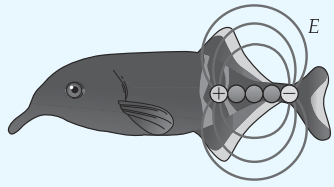
Dado: $E = 1.0 \times 10^4$ N/C
$d = 10$ mi $\approx 1.6 \times 10^4$ m

Encuentre: Q (la magnitud de la carga sobre la superficie inferior de las nubes)

a)



c)



b)

FIGURA 2 Peces eléctricos ***a)*** El pez nariz de elefante, que es débilmente eléctrico, utiliza su campo eléctrico para funciones de electrolocalización y comunicación. ***b)*** El campo eléctrico aproximado que genera el órgano eléctrico del pez nariz de elefante, localizado cerca de su cola, en un instante determinado. (En realidad, el campo eléctrico oscila.) ***c)*** El campo eléctrico aproximado que genera una anguila eléctrica en un instante determinado. El órgano eléctrico en la anguila es capaz de producir campos que le permiten paralizar y matar, pero también realizar funciones de localización y comunicación.

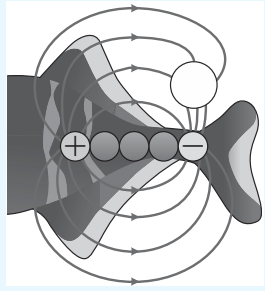


FIGURA 3 Electrolocalización El campo de un pez nariz de elefante con un objeto conductor cercano. Observe la disminución en el espacio entre las líneas del campo conforme entran en la capa superficial de la piel. Este incremento en la fuerza del campo es detectado por los órganos sensoriales en la piel, que envían una señal al cerebro del pez.

Usando la fórmula $A = d^2$ para obtener el área de un cuadrado, resolvemos la ecuación 15.5 para la magnitud de la carga (la superficie de la nube es negativa):

$$Q = \frac{EA}{4\pi k} = \frac{(1.0 \times 10^4\ \mathrm{N/C})(1.6 \times 10^4\ \mathrm{m})^2}{4\pi(9.0 \times 10^9\ \mathrm{N \cdot m^2/C^2})} = 23\ \mathrm{C}$$

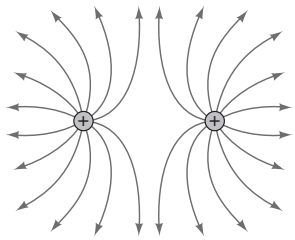
Esta expresión se justifica sólo si la distancia entre las nubes y el suelo es mucho menor que su tamaño. (¿Por qué?) Tal hipótesis es equivalente a suponer que las nubes de 10 millas de largo están a menos de varias millas de la superficie de la Tierra.

Esta cantidad de carga es enorme comparada con las cargas estáticas de fricción que provocamos al caminar sobre una alfombra. Sin embargo, como la carga de la nube está dispersa sobre una área muy grande, cualquier área pequeña de la nube no contiene mucha carga.

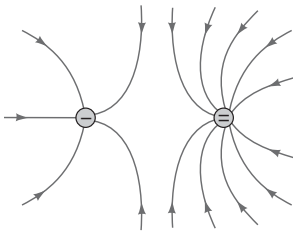
Ejercicio de refuerzo. En este ejemplo, *a*) ¿cuál es el sentido del campo eléctrico entre la nube y la Tierra? *b*) ¿Cuánta carga se requiere para ionizar el aire húmedo?

PHYSLET®

Ilustración 23.4 Usos prácticos de cargas y campos eléctricos



a) Cargas puntuales de mismo signo



b) Cargas puntuales de signos diferentes

▲ **FIGURA 15.17 Campos eléctricos** Campos eléctricos para: ***a)*** cargas puntuales de mismo signo, ***b)*** cargas puntuales de signos diferentes.

Los patrones completos de campo eléctrico para otras configuraciones comunes de carga se muestran en la ◂figura 15.17. Hay que poner atención a la forma como se dibujan cualitativamente. Note que las líneas de campo eléctrico comienzan sobre cargas positivas y terminan sobre cargas negativas (o en el infinito cuando no hay carga negativa cercana). Asegúrese de escoger el número de líneas que emanan desde una carga o que terminan en una, en proporción a la magnitud de esa carga. (Véase la sección Aprender dibujando referente al trazado de líneas eléctricas de fuerza, en la p. 521.)

15.5 Conductores y campos eléctricos

OBJETIVOS: *a*) Describir el campo eléctrico cerca de la superficie y en el interior de un conductor, *b*) determinar dónde se acumula la carga en un conductor cargado y *c*) dibujar el patrón de líneas del campo eléctrico fuera de un conductor cargado.

Los campos eléctricos asociados con conductores cargados tienen varias propiedades interesantes. Por definición, en electrostática, las cargas están en reposo. Como los conductores poseen electrones que están libres para moverse, y no lo hacen, los electrones no deben experimentar fuerza eléctrica y tampoco campo eléctrico. De ahí se concluye que

> El campo eléctrico es cero en todas partes dentro de un conductor cargado.

Las cargas en exceso sobre un conductor tienden a separarse una de otra tanto como es posible, ya que son sumamente móviles. Así,

> Cualquier carga en *exceso* sobre un conductor aislado reside enteramente sobre la superficie del conductor.

Otra propiedad de los campos eléctricos estáticos y conductores es que no puede haber ningún componente tangencial del campo en la superficie del conductor. De otra forma, las cargas se moverían *a lo largo* de la superficie, al contrario de nuestra hipótesis de una situación estática. Así,

> El campo eléctrico en la superficie de un conductor cargado es perpendicular a la superficie.

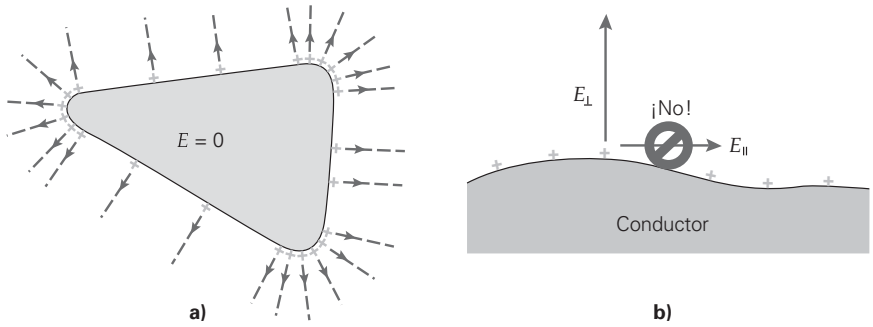
Por último, la carga en exceso sobre un conductor de forma irregular está más concentrada donde la superficie tiene mayor curvatura (esto es, en los puntos más prominentes). Como la carga es más densa ahí, el campo eléctrico será máximo justo en esos lugares. Es decir,

> La carga en exceso tiende a acumularse en zonas agudas, o en lugares de curvatura máxima, sobre conductores cargados. Como resultado, el campo eléctrico es máximo en tales lugares.

Esos dos últimos resultados se resumen en la ▸figura 15.18. *Recuerde que son verdaderos sólo para conductores en condiciones estáticas.* Los campos eléctricos *pueden* existir dentro de materiales no conductores y también dentro de conductores cuando las condiciones varían con el tiempo.

Para comprender *por qué* la mayoría de la carga se acumula en las regiones fuertemente curveadas, considere las fuerzas que actúan *entre* cargas sobre la superficie del conductor. (Véase la ▸figura 15.19a.) En los lugares donde la superficie es bastante plana, esas fuerzas estarán dirigidas casi de forma paralela a la superficie. Las cargas se esparcen hasta que se cancelan las fuerzas paralelas de cargas vecinas en sentidos opuestos. En un extremo agudo, las fuerzas entre cargas estarán dirigidas casi perpendicularmente a la superficie y, por consiguiente, habrá poca tendencia de las cargas a moverse de forma paralela a ésta. Así, es de esperarse que las regiones más curveadas de la superficie acumulen la mayor concentración de carga.

Una situación interesante ocurre cuando hay una gran concentración de carga sobre un conductor que termina en punta (figura 15.19b). La intensidad de campo eléctrico en la región situada arriba del punto será suficientemente alta para iniciar la ionización de las moléculas de aire (y jalar o empujar electrones de las moléculas). Los electrones liberados son acelerados aún más por el campo eléctrico y provocan ionizaciones secundarias al golpear otras moléculas. Esto da por resultado una "avalancha" de electrones, visible como una descarga de chispas. Más carga puede colocarse sobre

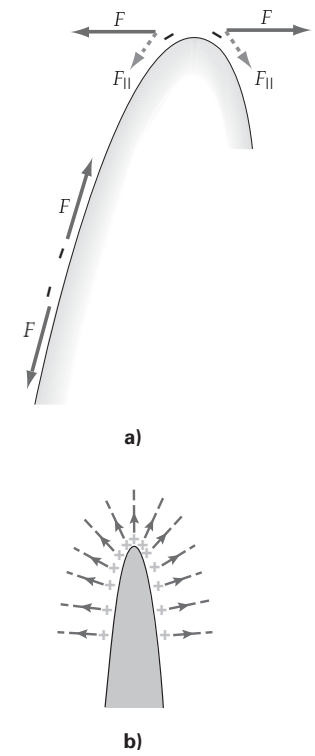


▲ **FIGURA 15.18 Campos eléctricos y conductores** ***a)*** En condiciones estáticas, el campo eléctrico es cero dentro de un conductor. Cualquier carga en exceso reside sobre la superficie del conductor. Para un conductor de forma irregular, la carga en exceso se acumula en las regiones de máxima curvatura (las puntas), como se muestra. El campo eléctrico cerca de la superficie es perpendicular a esa superficie y más intenso donde la carga es más densa. ***b)*** En condiciones estáticas, el campo eléctrico *no* debe tener un componente tangencial a la superficie del conductor.

un conductor suavemente curveado, como en una esfera, antes de que ocurra una descarga de chispas. La concentración de carga en la punta aguda de un conductor es una razón para la efectividad de los pararrayos. (Véase la sección A fondo 15.1 referente a relámpagos y pararrayos en la p. 523.)

Para conocer algunas aplicaciones de los campos eléctricos en los seres vivos y en las instituciones de seguridad pública, consulte la sección A fondo 15.2 sobre armas paralizantes y peces eléctricos en la p. 524.

Como una ilustración de un experimento temprano que se realizó sobre conductores con exceso de carga, considere el siguiente ejemplo.



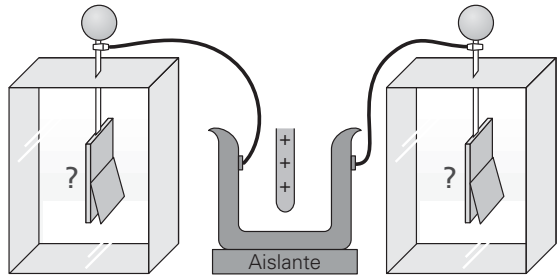
▲ **FIGURA 15.19 Concentración de la carga sobre una superficie curva** ***a)*** Sobre una superficie plana, las fuerzas repulsivas entre cargas en exceso son paralelas a la superficie y tienden a empujar las cargas separándolas. En contraste, sobre una superficie curva, esas fuerzas están dirigidas formando un ángulo con la superficie. Sus componentes paralelos a la superficie son más pequeños, permitiendo que la carga se concentre en esas áreas. ***b)*** Llevado el caso al extremo, una aguja metálica puntiaguda tiene una densa concentración de carga en la punta. Esto produce un gran campo eléctrico en la región arriba de la punta, que es el principio del pararrayos.

Ejemplo conceptual 15.10 ■ El experimento clásico de la cubeta de hielo

Una varilla positivamente cargada se coloca dentro de un recipiente metálico aislado que tiene electroscopios descargados unidos conductivamente a sus superficies interior y exterior (▼figura 15.20). ¿Qué sucederá a las hojas de los electroscopios? (Justifique su respuesta.) *a*) Ninguna hoja de los electroscopios mostrará una desviación. *b*) Sólo la hoja del electroscopio conectado al exterior mostrará una desviación. *c*) Sólo la hoja del electroscopio conectado al interior mostrará una desviación. *d*) Las hojas de ambos electroscopios mostrarán desviaciones.

Razonamiento y respuesta. La barra con carga positiva atraerá cargas negativas, provocando que el interior del contenedor metálico quede cargado negativamente. El electroscopio exterior adquirirá así una carga positiva. Por consiguiente, ambos electroscopios estarán cargados (aunque con signos contrarios) y mostrarán desviaciones, por lo que la respuesta correcta es la *d*. El físico inglés Michael Faraday realizó un experimento similar en el siglo XIX usando cubetas de hielo, por lo que a menudo se conoce como el *experimento de la cubeta de hielo de Faraday*.

Ejercicio de refuerzo. Suponga que la barra positivamente cargada *toca* el contenedor de metal. ¿Cuál sería el efecto sobre los electroscopios?



◀ **FIGURA 15.20 Experimento de la cubeta de hielo** Véase el ejemplo conceptual 15.10.

*15.6 Ley de Gauss para campos eléctricos: un enfoque cualitativo

OBJETIVOS: *a*) Establecer la base física de la ley de Gauss y *b*) usar la ley para hacer predicciones cualitativas.

El matemático alemán Karl Friedrich Gauss (1777-1855) descubrió una de las leyes fundamentales que rigen el comportamiento de los campos eléctricos. Utilizarla para hacer cálculos cuantitativos implica técnicas que están más allá de los objetivos de este libro. Sin embargo, una mirada conceptual a esta ley nos enseñará algunas propiedades físicas interesantes.

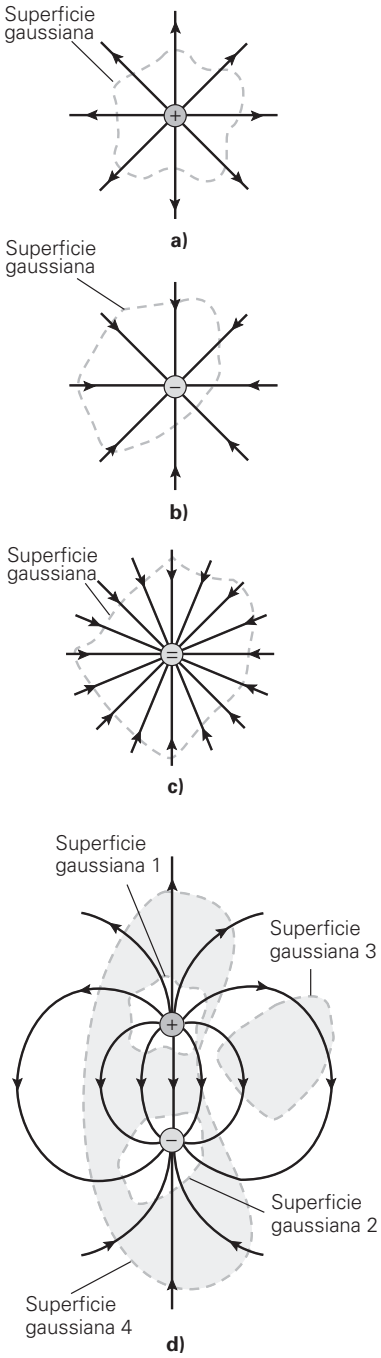
Considere la carga eléctrica positiva en la ◂figura 15.21a. Ahora visualice una *superficie cerrada imaginaria* que rodea a la carga. Tal superficie se llama **superficie gaussiana**. Ahora, designemos las líneas de campo eléctrico que pasan a través de la superficie y que apuntan hacia fuera como positivas y las que apuntan hacia dentro como negativas. Si contamos las líneas de ambos tipos (esto es, restamos el número de líneas negativas del número de positivas), encontramos que el total es positivo porque, en este caso, *sólo* hay líneas positivas. Este resultado refleja el hecho de que hay un número neto de líneas de campo eléctrico que apuntan hacia fuera a través de la superficie. De manera similar, para una carga negativa (figura 15.21b), la suma daría un total negativo, indicando un número neto de líneas que apuntan hacia dentro a través de la superficie. Note que esos resultados serían ciertos para *cualquier* superficie cerrada que rodeara la carga, sin importar su forma o tamaño. Si duplicamos la magnitud de la carga negativa (figura 15.21c), nuestra suma de líneas de campo negativas se duplicaría también. (¿Por qué?)

La figura 15.21d muestra un dipolo con cuatro diferentes superficies gaussianas imaginarias. La superficie 1 encierra una carga positiva neta y, por lo tanto, tiene una suma de líneas de campo positiva. De manera similar, la superficie 2 tiene una suma de líneas de campo negativa. Los casos más interesantes son las superficies 3 y 4. Observe que ambas incluyen una carga neta cero: la superficie 3 porque no incluye cargas y la superficie 4 porque incluye cargas iguales y opuestas. Advierta que las superficies 3 y 4 tienen una suma de líneas de campo neta de cero, que no se correlaciona con ninguna carga neta encerrada.

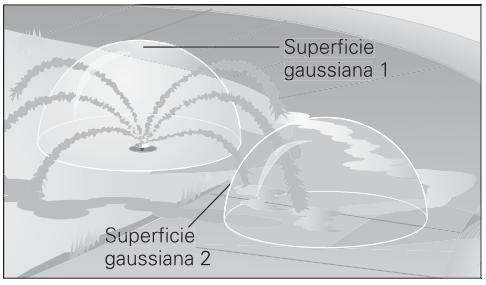
Esas situaciones se generalizan (conceptualmente) para obtener el principio físico subyacente de la **ley de Gauss**:*

> El número neto de líneas de campo eléctrico que pasan por una superficie cerrada imaginaria es proporcional a la cantidad de carga neta encerrada dentro de esa superficie.

Una analogía familiar ilustrada en la ▾figura 15.22 le ayudará a comprender este principio. Si rodea un rociador de césped con una superficie imaginaria (superficie 1), encontrará que hay un flujo neto de agua que sale a través de esa superficie, porque dentro hay una "fuente" de agua (sin considerar el agua que conduce la tubería hacia el rociador). De manera análoga, un campo eléctrico neto que apunta hacia fuera indica la presencia de una carga neta positiva dentro de la superficie, ya que cargas positivas son "fuentes" del campo eléctrico. Asimismo, se formaría un charco dentro de nuestra superficie imaginaria 2 porque habría un flujo neto de agua hacia dentro a través de la superficie. El siguiente ejemplo ilustra la fuerza de la ley de Gauss en su forma cualitativa.



▲ **FIGURA 15.21 Varias superficies gaussianas y líneas de fuerza** ***a*)** Rodeando una sola carga puntual positiva, ***b*)** rodeando una sola carga puntual negativa y ***c*)** rodeando una carga puntual negativa mayor. ***d*)** Cuatro superficies diferentes que rodean varias partes de un dipolo eléctrico.



◂ **FIGURA 15.22 Analogía hidráulica de la ley de Gauss** Un flujo neto de agua hacia fuera indica que hay una fuente de agua dentro de la superficie cerrada 1. Un flujo neto de agua hacia dentro indica que hay un canal de agua dentro de la superficie cerrada 2.

*En sentido estricto, ésta es la ley de Gauss para campos eléctricos. También existe una versión de la ley de Gauss para campos magnéticos, que no se estudiará aquí.

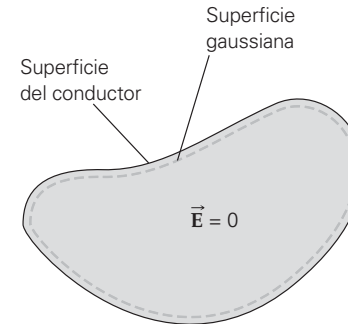
Ejemplo conceptual 15.11 ■ Una vez más, conductores cargados: ley de Gauss

Una carga neta Q se coloca en un conductor de forma arbitraria (▸figura 15.23). Utilice la versión cualitativa de la ley de Gauss para demostrar que toda la carga debe residir en la superficie del conductor en condiciones electrostáticas.

Razonamiento y respuesta. Como la situación es de equilibrio estático, no puede haber campo eléctrico dentro del volumen del conductor; de otra forma, los electrones casi libres se moverían alrededor. Consideremos la superficie gaussiana que sigue la forma del conductor, pero que *apenas* está dentro de la superficie real. Puesto que no hay líneas de campo eléctrico dentro del conductor, tampoco hay líneas de campo eléctrico que pasen a través de nuestra superficie imaginaria. Por lo tanto, no hay líneas del campo eléctrico que penetren en la superficie gaussiana. Pero por la ley de Gauss, el número neto de líneas de campo es proporcional a la cantidad de carga en el interior de la superficie. Por consiguiente, no debe haber carga neta dentro de la superficie.

Como nuestra superficie puede estar tan cerca como queramos de la superficie del conductor, se deduce que la carga en exceso, si no está dentro del volumen del conductor, debe estar en la superficie.

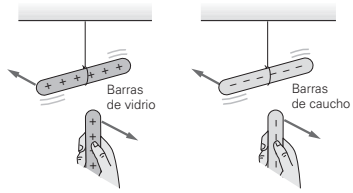
Ejercicio de refuerzo. En este ejemplo, si la carga neta en el conductor es negativa, ¿cuál es el signo del número neto de líneas a través de la superficie gaussiana que encierra completamente el conductor? Explique su razonamiento.



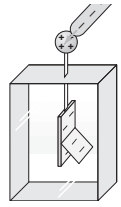
▲ **FIGURA 15.23** Ley de Gauss: carga en exceso en un conductor
Véase el Ejemplo conceptual 15.12.

Repaso del capítulo

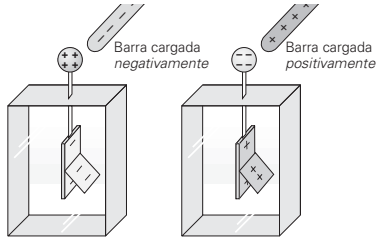
- La **ley de cargas** o **ley de carga-fuerza**, establece que las cargas iguales se repelen, y que las cargas contrarias se atraen.



- El principio de la **conservación de la carga** significa que la carga neta de un sistema aislado permanece constante.
- Los **conductores** son materiales que conducen carga eléctrica fácilmente porque sus átomos tienen uno o más electrones débilmente ligados.
- Los **aislantes** son materiales que no ganan, pierden o conducen fácilmente carga eléctrica.
- La **carga electrostática** implica procesos que permiten a un objeto ganar una carga neta. Entre esos procesos están la carga por fricción, por contacto (conducción) e inducción.



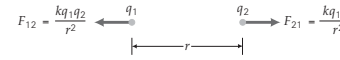
- La **polarización eléctrica** de un objeto implica crear cantidades separadas e iguales de carga positiva y negativa en puntos diferentes sobre ese objeto.



- La **ley de Coulomb** expresa la magnitud de la fuerza entre dos cargas puntuales:

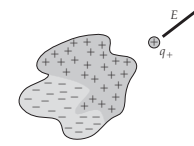
$$F_e = \frac{kq_1q_2}{r^2} \quad \textit{(dos cargas puntuales)} \tag{15.2}$$

donde $k \approx 9.00 \times 10^9\ \mathrm{N \cdot m^2/C^2}$.

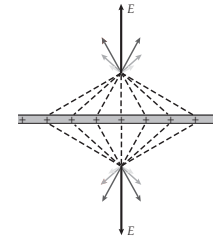


- El **campo eléctrico** es un campo vectorial que describe cómo las cargas modifican el espacio alrededor de ellas. Se define como la fuerza eléctrica por carga positiva unitaria, o

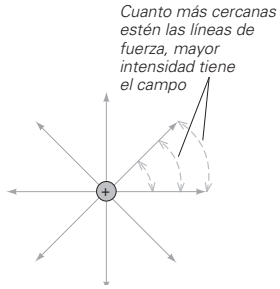
$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_{\text{en } q_+}}{q_+} \tag{15.3}$$



- De acuerdo con el **principio de superposición para campos eléctricos**, el campo eléctrico (neto) en cualquier punto que se debe a una configuración de cargas es la suma vectorial de los campos eléctricos individuales de las cargas individuales que forman esa configuración.



- Las **líneas de campo eléctrico** son una visualización gráfica del campo eléctrico. La separación entre líneas está inversamente relacionada con la intensidad del campo, y las tangentes a las líneas dan la dirección del campo eléctrico.



- En condiciones estáticas, los **campos eléctricos asociados con conductores** tienen las siguientes propiedades:

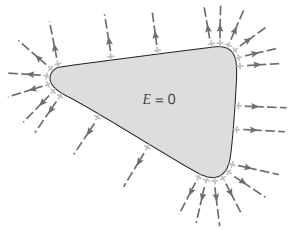
El campo eléctrico es cero dentro de un conductor cargado.

Cualquier carga en exceso en un conductor cargado reside enteramente sobre su superficie.

El campo eléctrico cerca de la superficie de un conductor cargado es perpendicular a ésta.

La carga en exceso en la superficie de un conductor es más densa en los lugares de máxima curvatura de la superficie.

El campo eléctrico cerca de la superficie de un conductor cargado es mayor en los lugares de máxima curvatura de la superficie.



Ejercicios*

Los ejercicios designados **OM** *son preguntas de opción múltiple; los* **PC** *son preguntas conceptuales; y los* **EI** *son ejercicios integrados. A lo largo del texto, muchas secciones de ejercicios incluirán ejercicios "apareados". Estos pares de ejercicios, que se identifican con* números subrayados*, pretenden ayudar al lector a resolver problemas y aprender. El primer ejercicio de cada pareja (el de número par) se resuelve en la Guía de estudio, que puede consultarse si se necesita ayuda para resolverlo. El segundo ejercicio (de número impar) es similar, y su respuesta se da al final del libro.*

15.1 Carga eléctrica

1. **OM** Una combinación de dos electrones y tres protones tendría una carga neta de *a*) + 1, *b*) −1, *c*) $+1.6 \times 10^{-19}$ C o *d*) -1.6×10^{-19} C.

2. **OM** Un electrón está justo encima de un protón fijo. La dirección de la fuerza en el protón eléctrico es *a*) hacia arriba, *b*) hacia abajo, *c*) cero.

3. **OM** En el ejercicio 2, ¿cuál siente la mayor fuerza? *a*) El electrón, *b*) el protón o *c*) ambos sienten la misma fuerza.

4. **PC** ¿Cómo sabemos que hay dos tipos de carga eléctrica? *b*) ¿Cuál sería el efecto de designar la carga del electrón como positiva y la carga del protón como negativa?

5. **PC** A un objeto eléctricamente neutro se le puede dar una carga neta de varias maneras. ¿Viola esto la conservación de la carga? Explique su respuesta.

6. **PC** Si un objeto sólido neutro resulta positivamente cargado, ¿su masa aumenta o disminuye? ¿Qué sucede si resulta negativamente cargado?

7. **PC** ¿Cómo se determina el tipo de carga sobre un objeto utilizando un electroscopio que tiene una carga neta de un signo conocido? Explique su respuesta.

8. **PC** Si dos objetos se repelen eléctricamente entre sí, ¿están ambos necesariamente cargados? ¿Y si se atraen?

9. ● ¿Cuál sería la carga eléctrica neta de un objeto con 1.0 millón de electrones en exceso?

10. ● Al caminar sobre una alfombra, usted adquiere una carga negativa neta de 50 μC. ¿Cuántos electrones en exceso tiene usted?

11. ●● Una partícula alfa es el núcleo de un átomo de helio sin electrones. ¿Cuál sería la carga en dos partículas alfa?

12. **EI** ●● Una barra de vidrio que se frota con seda adquiere una carga de $+8.0 \times 10^{-10}$ C. *a*) ¿La carga en la seda es 1) positiva, 2) cero o 3) negativa? ¿Por qué? *b*) ¿Cuál es la carga en la seda, y cuántos electrones se transfirieron a la seda? *c*) ¿Cuánta masa perdió la barra de vidrio?

13. **EI** ●● Una barra de caucho que se frota con piel adquiere una carga de -4.8×10^{-9} C. *a*) ¿La carga en la piel es 1) positiva, 2) cero o 3) negativa? ¿Por qué? *b*) ¿Cuál es la carga en la piel, y cuánta masa se transfiere a la barra? *c*) ¿Cuánta masa ganó la barra de caucho?

15.2 Carga electrostática

14. **OM** Una barra de caucho se frota con piel. Entonces, la piel se acerca rápidamente al bulbo de un electroscopio descargado. El signo de la carga sobre las hojas del electroscopio es *a*) positivo, *b*) negativo, *c*) cero.

*Tome k exactamente como 9.00×10^9 N·m²/C² y e como 1.60×10^{-19} C para fines de cifras significativas.

15. **OM** Una corriente de agua se desvía hacia un objeto cargado eléctricamente que se acerca a ella. El signo de la carga del objeto *a*) es positivo, *b*) es negativo, *c*) es cero, *d*) no se puede determinar a partir de los datos.

16. **OM** Un globo se carga por frotamiento y luego se adhiere a una pared. El signo de la carga en el globo *a*) es positivo, *b*) es negativo, *c*) es cero, *d*) no se puede determinar a partir de los datos.

17. **PC** Los camiones de combustible tienen a menudo cadenas metálicas que cuelgan de sus chasis al suelo. ¿Por qué ésta es una medida importante?

18. **PC** ¿Hay una ganancia o pérdida de electrones cuando un objeto se polariza eléctricamente? Explique su respuesta.

19. **PC** Explique con cuidado los pasos para fabricar un electroscopio que esté cargado positivamente mediante inducción. Una vez terminado, ¿cómo podría verificar que el electroscopio está cargado positivamente (y, por lo tanto, que no está cargado negativamente)?

20. **PC** Dos esferas metálicas montadas sobre soportes aislados están en contacto. Acercar un objeto con carga negativa a la esfera de la derecha le permitiría cargar temporalmente ambas esferas por inducción. Explique claramente cómo funcionaría esto y cuál sería el signo de la carga en cada esfera.

15.3 Fuerza eléctrica

21. **OM** ¿Cómo cambia la magnitud de la fuerza eléctrica entre dos cargas puntuales conforme aumenta la distancia entre ellas? La fuerza *a*) disminuye, *b*) aumenta, *c*) permanece constante.

22. **OM** Comparada con la fuerza eléctrica, la fuerza gravitacional entre dos protones es *a*) aproximadamente la misma, *b*) algo mayor, *c*) mucho mayor o *d*) mucho más pequeña.

23. **PC** La Tierra nos atrae con su fuerza gravitacional, pero la fuerza eléctrica es mucho mayor que aquella. ¿Por qué no experimentamos una fuerza eléctrica de la Tierra?

24. **PC** Dos electrones cercanos se alejarán si se liberan. ¿Cómo podría evitarse esto colocando una sola carga en su ambiente? Explique claramente cuál tendría que ser el signo de la carga y su ubicación.

25. **PC** La ley de Coulomb es un ejemplo de una ley de cuadrado inverso. Utilice esta idea del cuadrado inverso para determinar la razón de la fuerza eléctrica (la final dividida entre la inicial) entre dos cargas cuando la distancia entre ellas se reduce a un tercio de su valor inicial.

26. **EI** ● Sobre un electrón que está a cierta distancia de un protón actúa una fuerza eléctrica. *a*) Si el electrón se alejara al doble de esa distancia del protón, ¿la fuerza eléctrica sería 1) 2, 2) $\frac{1}{2}$,, 3) 4 o 4) $\frac{1}{4}$ veces la fuerza original? ¿Por qué? *b*) Si la fuerza eléctrica original es F, y el electrón se moviese a un tercio de la distancia original hacia el protón, ¿cuál sería la nueva fuerza eléctrica?

27. ● Dos cargas puntuales idénticas están una de otra a una distancia fija. ¿Por qué factor se vería afectada la magnitud de la fuerza eléctrica entre ellas si *a*) una de las cargas se duplica y la otra se reduce a la mitad, *b*) ambas cargas se reducen a la mitad y *c*) una carga se reduce a la mitad y la otra no cambia?

28. ● En una cierta molécula orgánica, los núcleos de dos átomos de carbono están separados una distancia de 0.25 nm. ¿Cuál es la magnitud de la repulsión eléctrica entre ellos?

29. ● Un electrón y un protón están separados 2.0 nm. *a*) ¿Cuál es la magnitud de la fuerza sobre el electrón? *b*) ¿Cuál es la fuerza neta sobre el sistema?

30. **EI** ● Dos cargas originalmente separadas una cierta distancia se separan aún más, hasta que la fuerza entre ellas disminuye por un factor de 10. *a*) ¿La nueva distancia es 1) menor que 10, 2) igual a 10 o 3) mayor que 10 veces la distancia original? ¿Por qué? *b*) Si la distancia original era de 30 cm, ¿qué distancia separa a las cargas?

31. ● Dos cargas se unen hasta que están a una distancia de 100 cm, de manera que la fuerza eléctrica entre ellas aumente exactamente por un factor de 5. ¿Cuál era su separación inicial?

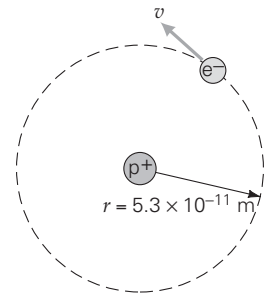
32. ● La distancia entre iones vecinos de sodio y cloro en cristales de sal de mesa (NaCl), cargados uno por uno, es de 2.82×10^{-10} m. ¿Cuál es la fuerza eléctrica de atracción entre los iones?

33. ●● Dos cargas puntuales de $-2.0\ \mu$C están fijas en los extremos opuestos de una vara graduada de un metro. ¿En qué lugar del metro de madera podría estar en equilibrio electrostático *a*) un electrón libre y *b*) un protón libre?

34. ●● Dos cargas puntuales de $-1.0\ \mu$C y $+1.0\ \mu$C están fijas en los extremos opuestos de una vara graduada de un metro. ¿Dónde podría estar en equilibrio electrostático *a*) un electrón libre y *b*) un protón libre?

35. ●● Dos cargas, q_1 y q_2, están localizadas en el origen y en el punto (0.50 m, 0), respectivamente. ¿En qué lugar del eje x debe colocarse una tercera carga, q_3, de signo arbitrario para estar en equilibrio electrostático si *a*) q_1 y q_2 son cargas de igual magnitud y signo, *b*) q_1 y q_2 son cargas contrarias pero de igual magnitud y *c*) $q_1 = +3.0\ \mu$C y $q_2 = -7.0\ \mu$C?

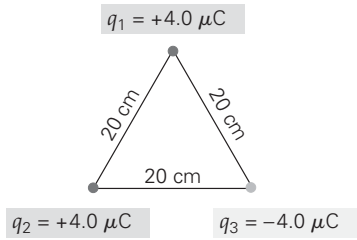
36. ●● Calcule la fuerza gravitacional y eléctrica entre el electrón y el protón en el átomo de hidrógeno (▼figura 15.24), suponiendo que están a una distancia de 5.3×10^{-11} m. Luego calcule la razón entre la magnitudes de la fuerza eléctrica y la de la fuerza gravitacional.



◀ **FIGURA 15.24 Átomo de hidrógeno** Véanse los ejercicios 36 y 37.

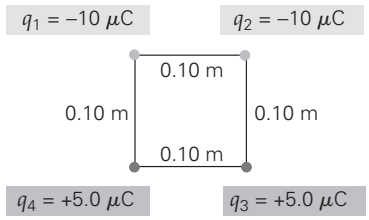
37. ●●● En promedio, el electrón y el protón en un átomo de hidrógeno están separados por una distancia de 5.3×10^{-11} m (figura 15.24). Suponiendo que la órbita del electrón es circular, *a*) ¿cuál es la fuerza eléctrica sobre el electrón? *b*) ¿Cuál es la rapidez orbital del electrón? *c*) ¿Cuál es la magnitud de la aceleración centrípeta del electrón en unidades de *g*?

38. ●●● Tres cargas están situadas en las esquinas de un triángulo equilátero, como se ilustra en la ▼figura 15.25. ¿Cuáles son la magnitud y el sentido de la fuerza sobre q_1?



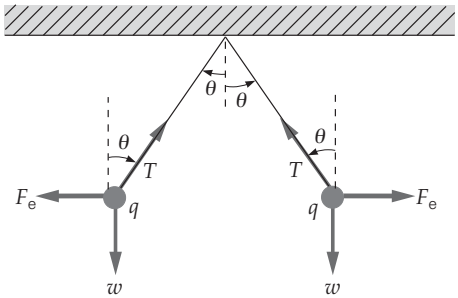
▲ **FIGURA 15.25 Triángulo de cargas** Véase los ejercicios 38, 59 y 60.

39. ●●● Cuatro cargas están situadas en las esquinas de un cuadrado, como se ilustra en la ▼figura 15.26. ¿Cuáles son la magnitud y el sentido de la fuerza *a*) sobre la carga q_2 y *b*) sobre la carga q_4?



▲ **FIGURA 15.26 Rectángulo de cargas** Véanse los ejercicios 39, 61 y 65.

40. ●●● Dos bolitas de 0.10 g de médula de saúco están suspendidas del mismo punto por cuerdas de 30 cm de largo. (La médula de saúco es un material ligero aislante usado en el pasado para hacer cascos para climas tropicales.) Cuando las bolitas tienen cargas iguales, llegan al reposo cuando están a 18 cm de distancia, como se muestra en la ▼figura 15.27. ¿Cuál es la magnitud de la carga en cada bolita? (Ignore la masa de las cuerdas.)



▲ **FIGURA 15.27 Bolitas repelentes** Véase el ejercicio 40.

15.4 Campo eléctrico

41. **OM** ¿Qué sucede con la magnitud del campo eléctrico provocado por una carga puntual cuando la distancia a esa carga se triplica? *a*) Permanece constante, *b*) se reduce a un tercio del valor original de la carga, *c*) se reduce a un noveno del valor original de la carga o *d*) se reduce a 1/27 del valor original de la carga.

42. **OM** Las unidades del campo eléctrico en el SI son *a*) C, *b*) N/C, *c*) N o *d*) J.

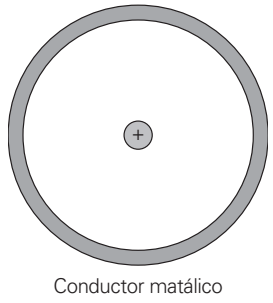
43. **OM** En un punto en el espacio, una fuerza eléctrica actúa verticalmente hacia abajo sobre un electrón. El sentido del campo eléctrico en ese punto *a*) es hacia abajo, *b*) es hacia arriba, *c*) es cero o *d*) no se puede determinar a partir de los datos.

44. **PC** ¿Cómo se determina la magnitud relativa del campo eléctrico en diferentes regiones a partir de un diagrama de campo vectorial?

45. **PC** ¿Cómo se determinan las magnitudes relativas del campo en diferentes regiones a partir de un diagrama de líneas de campo eléctrico?

46. **PC** Explique claramente por qué las líneas de campo eléctrico nunca se intersecan.

47. **PC** Una carga positiva está dentro de una esfera metálica aislada, como se muestra en la ▼figura 15.28. Describa el campo eléctrico en las tres regiones: entre la carga y la superficie interior de la esfera, dentro de la esfera y fuera de la superficie de la esfera. ¿Cuál es el signo de la carga en las dos superficies de la esfera? ¿Cómo cambiarían sus respuestas si la carga fuera negativa?



◀ **FIGURA 15.28 Un punto de carga dentro de una gruesa esfera metálica** Véase el ejercicio 47.

48. **PC** En cierto lugar, el campo eléctrico provocado por el exceso de carga sobre la superficie de la Tierra apunta hacia abajo. ¿Cuál es el signo de la carga en la superficie terrestre en ese lugar? ¿Por qué?

49. **PC** *a*) ¿El campo eléctrico generado por dos cargas negativas idénticas podría ser cero en algún lugar (o lugares) cercano(s)? Explique su respuesta. Si ésta es afirmativa, describa la situación y dibújela. *b*) ¿Cómo cambiaría su respuesta si las cargas fueran iguales pero con signos contrarios? Explique su respuesta.

50. **EI** ● *a*) Si la distancia desde una carga se duplica, ¿la magnitud del campo eléctrico 1) aumenta, 2) disminuye o 3) es igual en comparación con el valor inicial? *b*) Si el campo eléctrico original es de 1.0×10^{-4} N/C, ¿cuál es la magnitud del nuevo campo eléctrico al doble de la distancia de la carga?

51. ● Sobre un electrón aislado actúa una fuerza eléctrica de 3.2×10^{-14} N. ¿Cuál es la magnitud del campo eléctrico en la posición del electrón?

52. ● ¿Cuál es la magnitud y sentido del campo eléctrico en un punto situado a 0.75 cm de una carga puntual de +2.0 pC?

53. ● ¿A qué distancia de un protón, la magnitud del campo eléctrico es 1.0×10^5 N/C?

54. **EI** ●● Dos cargas fijas, de −4.0 y −5.0 μC, están separadas una cierta distancia. *a*) ¿El campo eléctrico neto a la mitad de la distancia entre las dos cargas 1) se dirige hacia la carga de −4.0 μC, 2) es cero o 3) se dirige hacia la carga de −5.0 μC? ¿Por qué? *b*) Si las cargas están separadas 20 cm, calcule la magnitud del campo eléctrico neto a media distancia entre las cargas.

55. ●● ¿Cuál sería la magnitud y el sentido de un campo eléctrico vertical que soportara justamente el peso de un protón sobre la superficie de la Tierra? ¿Y el peso de un electrón?

56. **EI** ●● Dos cargas, de −3.0 y −4.0 μC, están localizadas en los puntos (−0.50 m, 0) y (0.50 m, 0), respectivamente. Hay un punto sobre el eje x entre las dos cargas donde el campo eléctrico es cero. *a*) ¿Ese punto está 1) a la izquierda del origen, 2) en el origen o 3) a la derecha del origen? *b*) Encuentre la posición del punto donde el campo eléctrico es cero.

57. ●● Tres cargas, de +2.5 μC, −4.8 μC y −6.3 μC, están localizadas en (−0.20 m, 0.15 m), (0.50 m, −0.35 m) y (−0.42 m, −0.32 m), respectivamente. ¿Cuál es el campo eléctrico en el origen?

58. ●● Dos cargas, de +4.0 y +9.0 μC, están a 30 cm de distancia una de otra. ¿En qué lugar de la línea que une a las cargas el campo eléctrico es cero?

59. ●●● ¿Cuál es el campo eléctrico en el centro del triángulo en la figura 15.25?

60. ●●● Calcule el campo eléctrico en un punto a la mitad entre las cargas q_1 y q_2 en la figura 15.25.

61. ●●● ¿Cuál es el campo eléctrico en el centro del cuadrado en la figura 15.26?

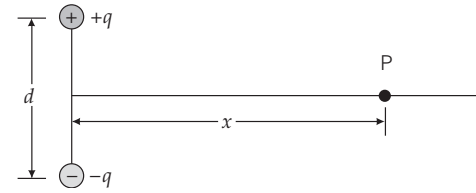
62. ●●● Una partícula con masa de 2.0×10^{-5} kg y una carga de +2.0 μC se libera en un campo eléctrico horizontal uniforme (de placas paralelas) de 12 N/C. *a*) ¿Qué tan lejos viaja horizontalmente la partícula en 0.50 s? *b*) ¿Cuál es el componente horizontal de su velocidad en ese punto? *c*) Si las placas miden 5.0 cm por lado, ¿cuánta carga tiene cada una?

63. ●●● Dos placas paralelas muy grandes tienen cargas uniformes y contrarias. Si el campo entre las placas es de 1.7×10^6 N/C, ¿qué tan densa es la carga sobre cada placa (en μC/m^2)?

64. ●●● Dos placas cuadradas conductoras con cargas contrarias miden 20 cm por lado. Están colocadas paralelamente y cerca una con respecto a la otra. Tienen cargas de +4.0 y −4.0 nC, respectivamente. *a*) ¿Cuál es el campo eléctrico entre las placas? *b*) ¿Qué fuerza se ejerce sobre un electrón entre las placas?

65. ●●● Calcule el campo eléctrico en un punto a 4.0 cm de q_2 a lo largo de una línea que se dirige hacia q_3 en la figura 15.26.

66. ●●● Dos cargas iguales y contrarias forman un dipolo, como se ilustra en la ▼figura 15.29. *a*) Sume los campos eléctricos generados por cada una en el punto P, para determinar gráficamente la dirección del campo eléctrico en ese lugar. *b*) Obtenga una expresión simbólica para la magnitud del campo eléctrico en el punto P, en términos de k, q, d y x? *c*) Si el punto P está muy alejado, utilice el resultado exacto para demostrar que $E \approx kqd/x^3$. *d*) ¿Por qué se trata de un *cubo* inverso en lugar de un *cuadrado* inverso? Explique su respuesta.



▲ **FIGURA 15.29 Campo eléctrico dipolar**
Véase el ejercicio 66.

15.5 Conductores y campos eléctricos

67. **OM** En equilibrio electrostático, ¿el campo eléctrico justo abajo de la superficie de un conductor cargado *a*) tiene el mismo valor que el campo justo arriba de la superficie, *b*) es cero, *c*) depende de la cantidad de carga en el conductor o *d*) está dado por kq/R^2?

68. **OM** Una plancha metálica delgada descargada se coloca en un campo eléctrico externo que apunta horizontalmente hacia la izquierda. ¿Cuál es el campo eléctrico dentro de la plancha? *a*) Cero, *b*) tiene el mismo valor que el del campo externo original, aunque con sentido contrario, *c*) es menor que el valor del campo externo original, pero es diferente de cero o *d*) depende de la magnitud del campo externo.

69. **OM** La dirección del campo eléctrico en la superficie de un conductor cargado en condiciones electrostáticas *a*) es paralelo a la superficie, *b*) es perpendicular a la superficie, *c*) está a 45° con respecto a la superficie o *d*) depende de la carga en el conductor.

70. **PC** ¿Es seguro permanecer en un automóvil durante una tormenta eléctrica (▼figura 15.30)? Explique su respuesta.

▲ **FIGURA 15.30 ¿Está seguro dentro del automóvil?**
Véase el ejercicio 70.

71. PC En condiciones electrostáticas, la carga en exceso en un conductor está distribuida de manera uniforme sobre su superficie. ¿Cuál es la forma de la superficie?

72. PC Los edificios altos tienen pararrayos para protegerlos del impacto de relámpagos. Explique por qué los pararrayos son puntiagudos y rebasan la altura de los edificios.

73. **EI** ● Una esfera sólida conductora está rodeada por una cubierta esférica gruesa conductora. Suponga que una carga total $+Q$ se coloca inicialmente en el centro de la esfera interior y luego se le libera. *a*) Después de que se alcanza el equilibrio, la superficie interior de la cubierta tendrá carga 1) negativa, 2) cero o 3) positiva. *b*) En términos de Q, ¿cuánta carga hay en el interior de la esfera? *c*) ¿En la superficie de la esfera? *d*) ¿En la superficie interior de la cubierta? *e*) ¿En la superficie exterior de la cubierta?

74. ● En el ejercicio 73, ¿cuál es la dirección del campo *a*) en el interior de la esfera sólida, *b*) entre la esfera y la cubierta, *c*) dentro de la cubierta y *d*) fuera de la cubierta?

75. ●● En el ejercicio 73, escriba expresiones para la magnitud del campo eléctrico *a*) en el interior de la esfera sólida, *b*) entre la esfera y la cubierta, *c*) dentro de la cubierta y *d*) fuera de la cubierta. Su respuesta debe estar en términos de Q, r (la distancia desde el centro de la esfera) y k.

76. ●● Una pieza de metal plana triangular con esquinas redondeadas tiene una carga positiva neta sobre ella. Dibuje la distribución de carga sobre la superficie y las líneas de campo eléctrico cerca de la superficie del metal (incluyendo sus direcciones).

77. ●●● Considere que una aguja metálica es aproximadamente un cilindro largo con un extremo muy puntiagudo pero ligeramente redondeado. Dibuje la distribución de carga y las líneas exteriores de campo eléctrico si la aguja tiene un exceso de electrones sobre ella.

*15.6 Ley de Gauss para campos eléctricos: un enfoque cualitativo

78. OM Una superficie gaussiana rodea un objeto que tiene una carga neta de $-5.0\ \mu$C. ¿Cuál de los siguientes enunciados es cierto? *a*) Más líneas de campo eléctrico apuntarán hacia fuera que hacia dentro. *b*) Más líneas de campo eléctrico apuntarán hacia dentro que hacia fuera. *c*) El número neto de líneas de campo a través de la superficie es cero. *d*) Sólo debe haber líneas de campo que apuntan hacia dentro a través de la superficie.

79. OM ¿Qué podría decir acerca del número neto de líneas de campo eléctrico que pasan a través de una superficie gaussiana localizada completamente dentro de la región comprendida entre un conjunto de placas paralelas con cargas contrarias? *a*) El número neto apunta hacia fuera. *b*) El número neto apunta hacia dentro. *c*) El número neto es cero. *d*) El número neto depende de la cantidad de carga en cada placa.

80. OM Dos superficies esféricas concéntricas encierran una partícula cargada. El radio de la esfera exterior es el doble del radio de la interior. ¿Cuál esfera tendrá más líneas de campo eléctrico que pasan a través de su superficie? *a*) La más grande. *b*) La más pequeña. *c*) Ambas esferas tendrían el mismo número de líneas de campo que pasan a través de ellas. *d*) La respuesta depende de la cantidad de carga de la partícula.

81. PC La misma superficie gaussiana se usa para rodear dos objetos cargados por separado. El número neto de líneas de campo que penetran la superficie es el mismo en ambos casos, pero las líneas tienen sentido contrario. ¿Qué podría decir acerca de las cargas netas sobre los dos objetos?

82. PC Si el número neto de líneas de campo eléctrico apunta hacia fuera desde una superficie gaussiana, ¿esto necesariamente significa que no hay cargas negativas en el interior? Explique con un ejemplo.

83. ● Suponga que una superficie gaussiana encierra tanto una carga puntual positiva (que tiene seis líneas de campo que salen de ella) como una carga puntual negativa (con el doble de magnitud de la carga positiva). ¿Cuál es el número neto de líneas de campo que pasan a través de la superficie gaussiana?

84. **EI** ●● Una superficie gaussiana tiene 16 líneas de campo que salen cuando rodea una carga puntual de $+10.0\ \mu$C y 75 líneas de campo que entran cuando rodea una carga puntual desconocida. *a*) La magnitud de la carga desconocida es 1) mayor que $10.0\ \mu$C, 2) igual a $10.0\ \mu$C o 3) menor que $10.0\ \mu$C. ¿Por qué? *b*) ¿Qué magnitud tiene la carga desconocida

85. ●● Si 10 líneas de campo salen de una superficie gaussiana cuando ésta rodea por completo el extremo positivo de un dipolo eléctrico, ¿cuál sería el número de líneas si la superficie rodeara sólo el otro extremo?

Ejercicios adicionales

86. Una bolita de médula de saúco cargada negativamente (con masa de 6.00×10^{-3} g y carga de -1.50 nC) está suspendida verticalmente de una cuerda ligera y no conductora cuya longitud es de 15.5 cm. Este aparato se coloca entonces en un campo eléctrico horizontal y uniforme. Después de ser liberada, la bolita llega a una posición estable a un ángulo de 12.3° a la izquierda de la vertical. *a*) ¿Cuál es la dirección del campo eléctrico externo? *b*) Determine la magnitud del campo eléctrico.

87. Una partícula con una carga positiva de 9.35 pC está suspendida en equilibrio en el campo eléctrico entre dos placas paralelas horizontales y con cargas contrarias. Cada una de las placas cuadradas tiene una carga de 5.50×10^{-5} C; entre ellas hay una separación de 6.25 mm y sus lados tienen una longitud de 11.0 cm. *a*) ¿Cuál placa debe estar cargada positivamente? *b*) Determine la masa de la partícula.

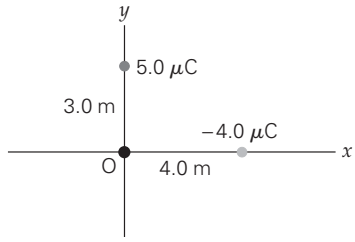
88. PC Utilice los argumentos del principio de superposición y/o de simetría para determinar la dirección del campo eléctrico *a*) en el centro de un cable semicircular con carga positiva uniforme, *b*) en el plano de una placa

lisa con carga negativa, justo fuera de una de las orillas, y *c*) en el eje perpendicular bisector de un largo y delgado aislador con más carga negativa en un extremo que carga positiva en el otro.

89. Un electrón parte de una placa que integra un arreglo de placas paralelas cargadas y con una pequeña separación (vertical). La velocidad del electrón es de 1.63×10^4 m/s hacia la derecha. Su rapidez al alcanzar la otra placa, localizada a 2.10 cm, es de 4.15×10^4 m/s. *a*) ¿Qué tipo de carga hay en cada placa? *b*) ¿Cuál es la dirección del campo eléctrico entre las placas? *c*) Si las placas son cuadradas y sus lados miden 25.4 cm de longitud, determine la carga en cada una.

90. Dos cargas fijas, de -3.0 y -5.0 μC, están separadas 0.40 m. *a*) ¿Dónde debería colocarse una tercera carga de -1.0 μC para que el sistema de tres cargas esté en equilibrio electrostático. *b*) ¿Y si la tercera carga fuera de $+1.0$ μC?

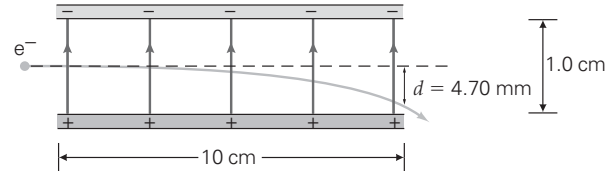
91. Encuentre el campo eléctrico en el punto O para la configuración de cargas que se ilustra en la ▼figura 15.31.



▲ **FIGURA 15.31 Campo eléctrico** Véase el ejercicio 91.

92. **PC** Un bloque uniforme de metal (menos grueso que la distancia de separación entre las placas) se inserta de forma paralela entre un par de placas paralelas con cargas contrarias. Haga un boceto del campo eléctrico resultante entre las placas incluyendo al bloque.

93. Un electrón en un monitor de computadora entra a medio camino entre dos placas paralelas con cargas opuestas, como se ilustra en la ▼figura 15.32. La rapidez inicial del electrón es de 6.15×10^7 m/s y su desviación vertical (*d*) es de 4.70 mm. *a*) ¿Cuál es la magnitud del campo eléctrico entre las placas? *b*) Determine la magnitud de la densidad de la carga superficial en las placas en C/m^2.



▲ **FIGURA 15.32 Un electrón en un monitor de computadora** Véase el ejercicio 93.

94. **PC** Para un dipolo eléctrico, el producto *qd* se llama *momento dipolar* y se denota con el símbolo *p*. El momento dipolar es en realidad un vector $\vec{\mathbf{p}}$ que apunta del extremo negativo al positivo. Suponiendo que un dipolo eléctrico está libre para moverse y girar, y que parte del reposo, *a*) haga un boceto para demostrar que si se coloca en un campo uniforme girará conforme trate de "alinearse" con la dirección del campo. *b*) ¿Qué cambia en el movimiento del dipolo si el campo no es uniforme?

PHYSLET®

Los siguientes problemas de física Physlet pueden utilizarse con este capítulo.
22.1, 22.2, 22.3, 22.4, 22.5, 22.7, 22.8, 22.9, 23.1, 23.2, 23.4, 23.6, 23.7, 23.8

CAPÍTULO 16

POTENCIAL ELÉCTRICO, ENERGÍA Y CAPACITANCIA

16.1 Energía potencial eléctrica y diferencia de potencial eléctrico 537

16.2 Superficies equipotenciales y el campo eléctrico 543

16.3 Capacitancia 549

16.4 Dieléctricos 552

16.5 Condensadores en serie y en paralelo 557

HECHOS DE FÍSICA

- La unidad de capacitancia eléctrica, el farad, recibió ese nombre en honor del científico británico Michael Faraday (1791-1867). A los 21 años y con escasa educación formal, Faraday se convirtió en asistente de laboratorio en la Real Institución de Londres. Finalmente, ocupó el cargo de director del laboratorio. Faraday descubrió la inducción electromagnética, que es el principio detrás de las modernas plantas generadoras de electricidad.
- En electroquímica, una importante cantidad de carga, llamada faraday, equivale a 96 485.3415 coulombs. El nombre se eligió en honor de Michael Faraday por sus experimentos electroquímicos, los cuales demostraron que se requiere 1 faraday de carga para depositar 1 mol de plata en el cátodo cargado negativamente de su aparato.
- El conde Alessandro Volta nació en Como, Italia, en 1745. Como no habló sino hasta los 4 años, su familia estaba convencida de que sufría retraso mental. Sin embargo, en 1778 fue el primero en aislar el metano (el principal componente del gas natural). Al igual que muchos químicos de su época, hizo un trabajo significativo sobre la electricidad en relación con las reacciones químicas. Construyó la primera batería eléctrica, y la unidad de fuerza electromotriz, el volt (V), recibió ese nombre en su honor.
- Las anguilas eléctricas pueden matar o paralizar a sus presas produciendo diferencias de potencial (o voltajes) mayores de 650 volts, una cifra que equivale a más de 50 veces el voltaje de un acumulador (batería) de automóvil. Otros peces eléctricos, como el nariz de elefante, generan apenas 1 volt, que resulta útil para localizar a sus presas, pero no para cazarlas.

La chica en la imagen experimenta algunos efectos eléctricos, conforme se carga a un potencial eléctrico de varios miles de volts. Los circuitos domésticos operan a sólo 120 volts y pueden darle a usted un choque molesto y potencialmente peligroso. Sin embargo, la señorita no parece tener ningún problema. ¿Qué es lo que pasa? El lector encontrará la explicación de esto y de muchos otros fenómenos eléctricos en éste y en los siguientes dos capítulos. Ahora estudiaremos el concepto básico de potencial eléctrico, y examinaremos sus propiedades y su utilidad.

Aun cuando este capítulo se concentra en el estudio de conceptos fundamentales de electricidad, como voltaje y capacitancia, se incluye información sobre sus aplicaciones. Por ejemplo, la máquina de rayos X de su dentista trabaja con alto voltaje para acelerar electrones. Los desfibriladores del corazón utilizan condensadores para almacenar temporalmente la energía eléctrica requerida para estimular el corazón a tomar su ritmo correcto. En las cámaras fotográficas se utilizan condensadores para almacenar la energía que acciona la unidad de flash. Nuestro sistema nervioso, al ser una red de comunicación, es capaz de enviar miles de voltajes eléctricos por segundo, que van y vienen por los "cables" que llamamos nervios. Estas señales son generadas por actividad química. El cuerpo las utiliza para permitirnos hacer muchas actividades que damos por sentadas, como el movimiento muscular, los procesos mentales, la visión y la audición. En capítulos posteriores, analizaremos más usos de la electricidad, como los aparatos eléctricos, las computadoras, los instrumentos médicos, el sistemas de distribución de energía eléctrica y el cableado doméstico.

16.1 Energía potencial eléctrica y diferencia de potencial eléctrico

OBJETIVOS: *a*) Entender el concepto de diferencia de potencial eléctrico (voltaje) y su relación con la energía potencial eléctrica y *b*) calcular diferencias de potencial eléctrico.

En el capítulo 15, los efectos eléctricos fueron analizados en términos de vectores de campo eléctrico y líneas de fuerza eléctrica. Recuerde que en los primeros capítulos, al estudiar la mecánica, iniciamos el uso de las leyes de Newton, los diagramas de cuerpo libre y las fuerzas (*vectores*). Entonces, la búsqueda de un enfoque más sencillo nos condujo al estudio de cantidades *escalares* como el trabajo, la energía cinética y la energía potencial. Con esos conceptos, pudieron emplearse métodos de energía para resolver muchos problemas que habrían sido mucho más difíciles de tratar usando el enfoque vectorial (fuerza). Resulta extremadamente útil, tanto conceptualmente como desde un enfoque de resolución de problemas, extender esos métodos de energía al estudio de los campos eléctricos.

Energía potencial eléctrica

Empecemos con uno de los patrones de campo eléctrico más sencillo: el campo entre dos grandes placas paralelas cargadas opuestamente. Como vimos en el capítulo 15, cerca del centro de las placas el campo es uniforme en magnitud y en dirección (▼figura 16.1a). Suponga que una carga pequeña positiva q_+ se mueve con rapidez constante contra el campo eléctrico, $\vec{\mathbf{E}}$, directamente de la placa negativa (A) a la placa positiva (B). Se requiere una fuerza externa ($\vec{\mathbf{F}}_{\text{ext}}$) con la misma magnitud que la fuerza eléctrica (¿por qué?), de manera que $F_{\text{ext}} = q_+E$. El trabajo efectuado por la fuerza externa es positivo, ya que la fuerza y el desplazamiento van en la misma dirección. Así, la cantidad de trabajo hecho por la fuerza externa es $W_{\text{ext}} = F_{\text{ext}}(\cos 0°)d = q_+Ed$.

Nota: de la ecuación, $\vec{\mathbf{E}} = \vec{\mathbf{F}}/q_+$ y $\vec{\mathbf{F}} = q_+\vec{\mathbf{E}}$.

Si la carga de prueba es liberada cuando llega a la placa positiva, ésta acelerará de regreso hacia la placa negativa, ganando energía cinética. Esta energía cinética resulta del trabajo efectuado sobre la carga, y la energía inicial (cuando no hay energía cinética en B) debe ser algún tipo de energía potencial. Al mover la carga de la placa A a la placa B, la fuerza externa incrementa la **energía potencial eléctrica**, $\boldsymbol{U_e}$, de la carga ($U_B > U_A$) en una cantidad igual al trabajo hecho sobre la carga. Por lo que el *cambio* en la energía potencial eléctrica de la carga es:

$$\Delta U_e = U_B - U_A = q_+Ed$$

La analogía gravitacional del campo eléctrico de placas paralelas es el campo gravitacional cerca de la superficie de la Tierra, donde ese campo es uniforme. Cuando un objeto se eleva una distancia vertical h a velocidad constante, el cambio en su energía potencial es positivo ($U_B > U_A$) e igual al trabajo efectuado por la fuerza externa (levantamiento). Suponiendo que no hay aceleración, esta fuerza es igual al peso del objeto: $F_{\text{ext}} = w = mg$ (figura 16.1b). Así, el incremento en energía potencial gravitacional es

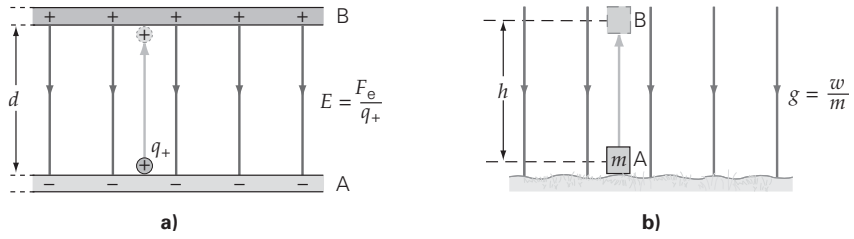
$$\Delta U_g = U_B - U_A = F_{\text{ext}}h = mgh$$

(*Nota*: para distinguir con claridad entre las dos situaciones, se usan diferentes símbolos h y d.)

PHYSLET®

Ilustración 25.1 Energía y voltaje

▼ **FIGURA 16.1 Cambios en energía potencial en campos eléctricos y gravitacionales uniformes** ***a)*** Para mover una carga positiva q_+ contra el campo eléctrico se requiere trabajo positivo e incrementa la energía potencial eléctrica. ***b)*** Para mover una masa m contra el campo gravitacional requiere trabajo positivo e incrementa la energía potencial gravitacional.



Diferencia de potencial eléctrico

Recuerde que al definir el campo eléctrico como la fuerza eléctrica *por unidad de carga de prueba positiva*, se eliminó la dependencia sobre la carga de prueba. Entonces, conociendo el campo eléctrico, se determina la fuerza en cualquier carga puntual colocada en esa localidad, con $F_e = q_+E$. Asimismo, la **diferencia de potencial eléctrico**, $\boldsymbol{\Delta V}$, entre dos puntos cualesquiera en el espacio se define como el cambio en energía potencial *por carga unitaria de prueba positiva*:

$$\Delta V = \frac{\Delta U_e}{q_+} \quad \textit{(diferencia de potencial eléctrico)} \tag{16.1}$$

Unidad SI de diferencia de potencial eléctrico:
joule/coulomb (J/C) o volt (V)

La unidad SI de la diferencia de potencial eléctrico es el joule por coulomb. Esta unidad se denomina **volt (V)** en honor de Alessandro Volta (1745-1827), el científico italiano que construyó la primera batería (capítulo 17), por lo que 1 V = 1 J/C. La diferencia de potencial comúnmente se llama **voltaje**, y el símbolo para la diferencia de potencial usualmente se cambia de ΔV a sólo V, como lo haremos más adelante en este capítulo.

Tenga en cuenta un punto fundamental: la diferencia de potencial eléctrico, aunque se basa en la diferencia de *energía* potencial eléctrica, *no* es lo mismo. La diferencia de potencial eléctrico se define como la diferencia de energía potencial eléctrica *por carga unitaria* y, por lo tanto, no depende de la cantidad de carga movida. Como el campo eléctrico, la diferencia de potencial es una propiedad útil, ya que a partir de ΔV se calcula ΔU_e para *cualquier* cantidad de carga movida. Para ilustrar este punto, calculemos la diferencia de potencial asociada con el campo uniforme entre dos placas paralelas:

$$\Delta V = \frac{\Delta U_e}{q_+} = \frac{q_+Ed}{q_+} = Ed \quad \textit{diferencia de potencial (sólo placas paralelas)} \tag{16.2}$$

Observe que la cantidad de carga movida, q_+, se cancela. Así, la diferencia de potencial ΔV depende sólo de las características de las placas cargadas, esto es, del campo que producen (E) y su separación (d). Decimos que:

> Para un par de placas paralelas con cargas opuestas, la placa con carga positiva está en un *potencial eléctrico mayor* que la de carga negativa, por una cantidad ΔV.

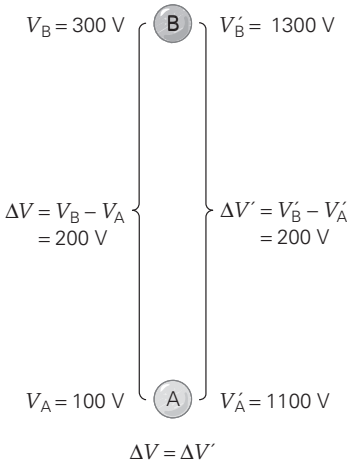
Note que se definió la *diferencia* de potencial eléctrico sin definir primero el potencial eléctrico (V). Aunque este enfoque no parece correcto, hay una buena razón para hacerlo así. Las *diferencias* de potencial eléctrico son las cantidades físicamente significativas que realmente se miden. (Las diferencias de potencial eléctrico, los voltajes, se miden usando voltímetros, los cuales se estudian en el capítulo 18.) En cambio, el valor del potencial eléctrico V no es definible en una manera absoluta, ya que depende por completo de la elección de un punto de referencia. Esto significa que una constante arbitraria puede sumarse a todos los potenciales, o restarse de éstos, y no alterar las *diferencias* de potencial.

Encontramos la misma idea durante nuestro estudio de las formas mecánicas de la energía potencial asociada con resortes y gravitación (apartados 5.2 y 5.4). Recuerde que sólo eran importantes los *cambios* en energía potencial. Determinamos los valores definidos de la energía potencial, pero sólo después de que se definió un punto de referencia cero. Así, en el caso de la gravedad, por conveniencia, una energía potencial gravitacional igual a cero a veces se elige en la superficie terrestre. Sin embargo, es igualmente correcto (y a veces más conveniente) definir el valor cero a una distancia infinita de la Tierra (apartado 7.5).

Esta propiedad también es válida para la energía potencial eléctrica y el potencial eléctrico. Este último puede elegirse como cero en la placa negativa de un par de placas paralelas cargadas. Sin embargo, a veces resulta conveniente localizar el valor cero en el infinito, como veremos en el caso de una carga puntual. De cualquier manera, no se afectará la *diferencia* entre dos puntos dados. Esta idea se aclara en la sección Aprender dibujando de esta página. Por lo que suponga que para una cierta selección de la localidad del potencial eléctrico cero, el punto A resulta tener un potencial de +100 V y el punto B un potencial de +300 V. Con un punto cero diferente, el potencial en A podría ser de +1100 V. En tal caso, el valor del potencial eléctrico en B sería de +1300 V. Independientemente del punto cero, B *siempre* estará 200 V más arriba en potencial que A.

APRENDER DIBUJANDO

ΔV es independiente del punto de referencia



Nota: comúnmente asignamos un valor de cero al potencial eléctrico de la placa negativa, pero esto es arbitrario. Sólo *diferencias* de potencial tienen sentido.

El siguiente ejemplo ilustra la relación entre energía potencial eléctrica y diferencia de potencial eléctrico.

Ejemplo 16.1 ■ Métodos de energía para mover un protón: energía de potencial contra potencial

Imagine que un protón se mueve desde la placa negativa hasta la placa positiva del arreglo de placas paralelas (▸figura 16.2a). Las placas están 1.50 cm separadas, y el campo eléctrico es uniforme con una magnitud de 1500 N/C. *a*) ¿Cuál es el cambio en la energía potencial eléctrica del protón? *b*) ¿Cuál es la diferencia de potencial eléctrico (voltaje) entre las placas? *c*) Si el protón se libera desde el reposo en la placa positiva (figura 16.2b), ¿qué rapidez tendrá justo antes de tocar la placa negativa?

Razonamiento. *a*) El cambio en energía potencial puede calcularse a partir del trabajo requerido para mover la carga. *b*) La diferencia de potencial eléctrico entre las dos placas se determina dividiendo el trabajo efectuado entre la carga movida. *c*) Cuando se libera el protón, su energía potencial eléctrica se convierte en energía cinética. Conociendo la masa del protón, se puede calcular su rapidez.

Solución. La magnitud del campo eléctrico, E, está dada. Como está implicado un protón, se conocen su masa y carga (tabla 15.1).

Dado: $E = 1500\ \text{N/C}$, $q_p = +1.60 \times 10^{-19}\ \text{C}$, $m_p = 1.67 \times 10^{-27}\ \text{kg}$, $d = 1.50\ \text{cm} = 1.50 \times 10^{-2}\ \text{m}$

Encuentre: *a*) ΔU_e (cambio de energía potencial) *b*) ΔV (diferencia de potencial entre placas) *c*) v (rapidez del protón liberado justo antes de alcanzar la placa negativa)

a) Se incrementa la energía potencial eléctrica, porque debe efectuarse trabajo positivo sobre el protón para moverlo contra el campo eléctrico, hacia la placa positiva:

$$\Delta U_e = q_p E d = (+1.60 \times 10^{-19}\ \text{C})(1500\ \text{N/C})(1.50 \times 10^{-2}\ \text{m})$$
$$= +3.60 \times 10^{-18}\ \text{J}$$

b) La diferencia de potencial, o voltaje, es el cambio de energía potencial por carga unitaria (definida en la ecuación 16.1):

$$\Delta V = \frac{\Delta U_e}{q_p} = \frac{+3.60 \times 10^{-18}\ \text{J}}{+1.60 \times 10^{-19}\ \text{C}} = +22.5\ \text{V}$$

Decimos entonces que la placa positiva es 22.5 V superior en potencial eléctrico que la placa negativa.

c) La energía total del protón es constante; por lo tanto, $\Delta K + \Delta U_e = 0$. El protón no tiene energía cinética inicial ($K_o = 0$). Por consiguiente, $\Delta K = K - K_o = K$. De esta relación, se calcula la rapidez del protón:

$$\Delta K = K = -\Delta U_e$$

o bien,

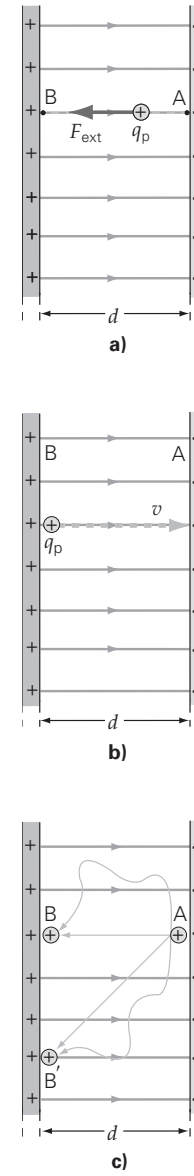
$$\tfrac{1}{2} m_p v^2 = -\Delta U_e$$

Pero al regresar a la placa negativa, el cambio en energía potencial del protón es negativo (¿por qué?), de manera que $\Delta U_e = -3.60 \times 10^{-18}$ J y la rapidez del protón será:

$$v = \sqrt{\frac{2(-\Delta U_e)}{m_p}} = \sqrt{\frac{2[-(-3.60 \times 10^{-18}\ \text{J})]}{1.67 \times 10^{-27}\ \text{kg}}} = 6.57 \times 10^4\ \text{m/s}$$

Si bien la energía cinética ganada es muy pequeña, el protón adquiere una alta rapidez porque su masa es extremadamente pequeña.

Ejercicio de refuerzo. ¿Cómo cambiarían sus respuestas en este ejemplo si se moviese una partícula alfa en vez de un protón? (Una partícula alfa es el núcleo de un átomo de helio y tiene una carga de $+2e$ con una masa de aproximadamente cuatro veces la del protón.) (*Las respuestas de todos los Ejercicios de refuerzo se dan al final del libro.*)



▲ **FIGURA 16.2** Aceleración de una carga ***a)*** Al mover un protón de la placa negativa a la positiva se incrementa la energía potencial del protón. (Véase el ejemplo 16.1.) ***b)*** Cuando se libera de la placa positiva, el protón acelera de regreso hacia la placa negativa, ganando energía cinética a costa de la energía potencial eléctrica. ***c)*** El trabajo efectuado para mover un protón entre dos puntos cualesquiera en un campo eléctrico, como A y B o A y B′, es independiente de la trayectoria.

Los principios del ejemplo 16.1 pueden usarse también para demostrar otra propiedad interesante de la energía potencial eléctrica (y del potencial eléctrico): ambos son *independientes de las trayectorias seguidas*. Recuerde que en el apartado 5.5 vimos que esto significa que *la fuerza electrostática es conservativa*. En la figura 16.2c, el trabajo efectuado para mover el protón de A a B es el mismo, independientemente de la ruta tomada. Así, las trayectorias ondulantes alternativas de A a B y de A a B′ requieren el mismo trabajo que sus respectivas trayectorias rectilíneas. Esto se debe a que el movimiento en ángulo recto al campo no requiere trabajo. (¿Por qué?)

Nota: las diferencias de potencial, como en campos eléctricos, se definen en términos de cargas positivas. Las cargas negativas se someten a la misma diferencia de potencial, pero la energía potencial opuesta cambia. Para determinar si el potencial aumenta o disminuye, decida si una fuerza externa efectúa trabajo positivo o negativo sobre una carga de prueba *positiva*.

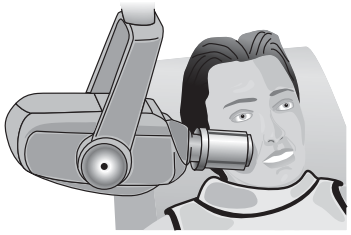
La analogía gravitacional en el ejemplo 16.1 es, por supuesto, elevar un objeto en un campo gravitacional uniforme. Cuando el objeto se eleva, se incrementa su energía potencial gravitacional, porque la fuerza de gravedad actúa hacia abajo. Sin embargo, con la electricidad, sabemos que hay dos tipos de cargas, y la fuerza entre ellas puede ser de repulsión o de atracción. En este punto cesa la simple analogía con la gravedad.

Para entender por qué la analogía falla, considere cómo el análisis del ejemplo 16.1 diferiría si se hubiera usado un electrón en vez de un protón. El electrón, negativamente cargado, sería atraído a la placa B, por lo que la fuerza externa tendría que ser en sentido *opuesto* al desplazamiento del electrón (para evitar que el electrón acelerara). Así, para un electrón, esta fuerza haría trabajo *negativo*, *disminuyendo* la energía potencial eléctrica. A diferencia del protón, el electrón es atraído hacia la placa positiva (la placa con mayor potencial eléctrico). Si se le permitiera moverse libremente, el electrón "caería" (aceleraría) hacia la región de menor potencial. Entonces tanto el protón como el electrón terminaron perdiendo energía potencial y ganando energía cinética. En resumen, acerca del comportamiento de partículas cargadas en campos eléctricos, diremos que:

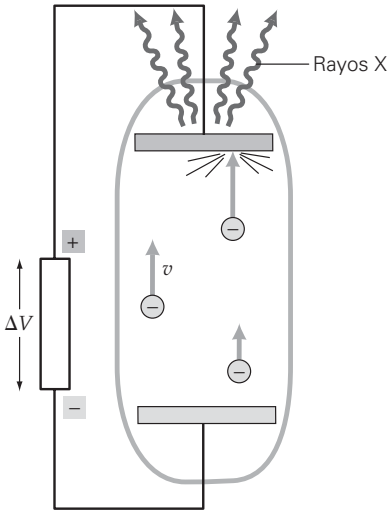
Las cargas positivas, al ser liberadas, tienden a moverse hacia regiones de menor potencial eléctrico.

Al liberarse las cargas negativas tienden a moverse hacia regiones de mayor potencial eléctrico.

Considere la siguiente aplicación médica que implica la generación de rayos X a partir de electrones rápidos acelerados por grandes diferencias de potencial eléctrico (voltajes).



a)



b)

▲ **FIGURA 16.3** Producción de rayos X *a)* Un aparato dental de rayos X. *b)* Un diagrama esquemático de la producción de rayos X.

Ejemplo 16.2 ■ Creación de rayos X: aceleración de electrones

Los consultorios dentales modernos cuentan con aparatos de rayos X para diagnosticar problemas dentales ocultos (◂figura 16.3a). En general los electrones se aceleran a través de una diferencia de potencial eléctrico (voltajes) de 25 000 V. Cuando los electrones golpean la placa positivamente cargada, su energía cinética se convierte en partículas de luz de alta energía llamadas *fotones de rayos X* (figura 16.3b). (Los fotones son partículas de luz.) Suponga que la energía cinética de un solo electrón está igualmente distribuida entre cinco fotones de rayos X. ¿Cuánta energía tendría un fotón?

Razonamiento. De la conservación de la energía, la energía cinética ganada por cualquier electrón es igual en magnitud a la energía potencial eléctrica que pierde. De esta energía cinética perdida por un electrón, puede calcularse la energía de un fotón de rayo X.

Solución. Se conoce la carga de un electrón (de la tabla 15.1), y se da el voltaje de aceleración.

Dado: $q = -1.60 \times 10^{-19}\ \text{C}$ ***Encuentre:*** energía (E) de un fotón de rayo X
$\Delta V = 2.50 \times 10^{4}\ \text{V}$

El electrón deja la placa negativamente cargada y se mueve hacia la región de máximo potencial eléctrico (esto es, "colina arriba"). Así, el cambio en su energía potencial eléctrica es

$$\Delta U_e = q\Delta V = (-1.60 \times 10^{-19}\ \text{C})(+2.50 \times 10^{4}\ \text{V}) = -4.00 \times 10^{-15}\ \text{J}$$

La ganancia en energía cinética proviene de esta pérdida en energía potencial eléctrica. Como los electrones no tienen energía cinética apreciable cuando ellos empiezan a moverse,

$$K = |\Delta U_e| = 4.00 \times 10^{-15}\ \text{J}$$

Por lo tanto, si se comparte igualmente un fotón tendrá una energía de

$$E = \frac{K}{5} = 8.00 \times 10^{-16}\ \text{J}$$

Ejercicio de refuerzo. En este ejemplo, use métodos de energía para determinar la rapidez de uno de los electrones cuando está a un décimo de la distancia a la placa positiva.

Diferencia de potencial eléctrico debido a una carga puntual

En campos eléctricos no uniformes, la diferencia de potencial entre dos puntos se determina aplicando la definición dada en la ecuación 16.1. Sin embargo, cuando varía la intensidad del campo (y por ende el trabajo efectuado), su cálculo se complica. El úni-

co campo no uniforme que consideraremos en detalle es el debido a una carga puntual (figura 16.4). Para la expresión para la diferencia de potencial (voltaje) entre dos puntos a distancias r_A y r_B desde una carga puntual q, simplemente enunciarnos:

$$\Delta V = \frac{kq}{r_B} - \frac{kq}{r_A} \quad \textit{diferencia de potencial eléctrico (sólo carga puntual)} \tag{16.3}$$

En la figura 16.4, la carga puntual es positiva. Como la localidad B está más cerca de la carga que A, la diferencia de potencial es positiva, es decir, $V_B - V_A > 0$ o $V_B > V_A$. De manera que B está a un mayor potencial que A. Esto fundamentalmente es porque los cambios en el potencial se determinan visualizando el movimiento de una carga de prueba positiva. Aquí se requiere un trabajo *positivo* para mover una carga de prueba de A a B.

De este análisis, vemos que el potencial eléctrico aumenta conforme consideramos localidades más cercanas a una carga positiva. Observe además (figura 16.4) que el trabajo efectuado en la trayectoria II es el mismo que en la trayectoria I. Como la fuerza eléctrica es una fuerza conservativa, la diferencia de potencial es la misma, independientemente de la trayectoria.

Ahora considere lo que pasaría si la carga puntual fuera negativa. En este caso, B estaría a un *menor* potencial que A, ya que el trabajo requerido para mover una carga de prueba positiva más cerca ahora sería *negativo* (¿por qué?)

Entonces, el potencial eléctrico cambia de acuerdo con las siguientes reglas:

> El potencial eléctrico aumenta cuando consideramos localidades más cercanas a cargas positivas o más alejadas de cargas negativas.

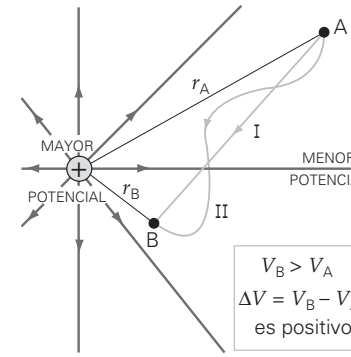
y

> El potencial eléctrico disminuye cuando consideramos localidades más alejadas de cargas positivas o más cercanas a cargas negativas.

Por lo general el potencial a una distancia muy grande de una carga puntual se elige igual a cero (como lo hicimos con la energía potencial gravitacional para una masa puntual en el capítulo 7). Para esta selección, el *potencial eléctrico V* a una distancia r de una carga puntual está dado por

$$V = \frac{kq}{r} \quad \textit{potencial eléctrico (sólo carga puntual, cero a infinito)} \tag{16.4}$$

Aunque esta expresión es para el potencial eléctrico, V, recuerde que sólo son importantes las *diferencias* de potencial eléctrico (ΔV), como lo ilustra el siguiente ejemplo.



▲ **FIGURA 16.4 Campo y potencial eléctricos debidos a una carga puntual** El potencial eléctrico aumenta conforme usted se acerca a una carga positiva. Así, B está a un potencial mayor que A.

Ejemplo integrado 16.3 ■ Descripción del átomo de hidrógeno: diferencias de potencial cerca de un protón

En el modelo de Bohr del átomo de hidrógeno, el electrón en órbita alrededor del protón puede existir sólo en ciertas órbitas circulares. La más pequeña tiene un radio de 0.0529 nm, y la siguiente mayor tiene un radio de 0.212 nm. *a*) ¿Qué puede usted decir acerca del potencial eléctrico asociado con cada órbita? 1) La menor tiene un mayor potencial, 2) la mayor tiene un mayor potencial o 3) ambas tienen el mismo potencial. Explique su razonamiento. *b*) Verifique su respuesta en el inciso a calculando los valores del potencial eléctrico en localidades de las dos órbitas.

a) Razonamiento conceptual. El electrón está en órbita en el campo de un protón, cuya carga es positiva. Como el potencial eléctrico crece con distancia decreciente desde una carga positiva, la respuesta debe ser 1.

b) Razonamiento cuantitativo y solución. Conocemos la carga del protón, por lo que la ecuación 16.4 puede usarse para encontrar los valores del potencial. A continuación damos una lista de los valores,

Dado: $q_P = +1.60 \times 10^{-19}$ C
$r_1 = 0.0529$ nm $= 5.29 \times 10^{-11}$ m
$r_2 = 0.212$ nm $= 2.12 \times 10^{-10}$ m (Nota: 1 nm $= 10^{-9}$ m)

Encuentre el valor del potencial eléctrico (V) de cada órbita

La ecuación 16.4 nos permite determinar el potencial eléctrico en ambas distancias. Así,

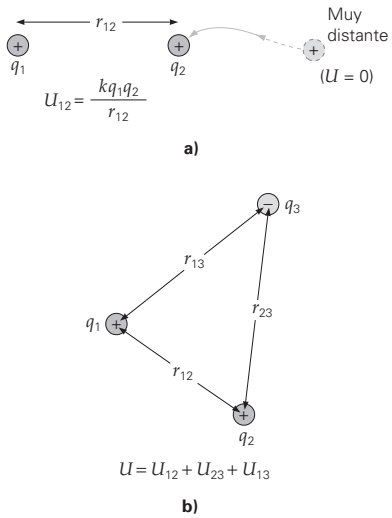
$$V_1 = \frac{kq_P}{r_1} = \frac{(9.00 \times 10^9\ \mathrm{N \cdot m^2/C^2})(+1.60 \times 10^{-19}\ \mathrm{C})}{5.29 \times 10^{-11}\ \mathrm{m}} = +27.2\ \mathrm{V}$$

(continúa en la siguiente página)

y para la órbita mayor, tenemos

$$V_2 = \frac{kq_P}{r_2} = \frac{(9.00 \times 10^9\ \mathrm{N \cdot m^2/C^2})(+1.60 \times 10^{-19}\ \mathrm{C})}{2.12 \times 10^{-10}\ \mathrm{m}} = +6.79\ \mathrm{V}$$

Ejercicio de refuerzo. En este ejemplo, suponga que el electrón se movió de la más pequeña a la siguiente órbita. *a*) ¿Se movió a una región de mayor o menor potencial eléctrico? *b*) ¿Cuál sería el cambio en la energía potencial eléctrica del electrón?



▲ **FIGURA 16.5 Energía potencial eléctrica mutua de cargas puntuales** ***a)*** Si se mueve una carga positiva desde una gran distancia a una distancia r_{12} desde otra carga positiva, se tiene un incremento en energía potencial, porque debe efectuarse trabajo positivo para acercar las cargas mutuamente repelentes. ***b)*** Para más de dos cargas, la energía potencial eléctrica del sistema es la suma de las energías potenciales mutuas de cada par.

Energía potencial eléctrica de varias configuraciones de carga

En el capítulo 7 la energía potencial gravitacional de *sistemas* de masas se analizó con algún detalle. Las expresiones para la fuerza eléctrica y la fuerza gravitacional son matemáticamente similares, así como aquellas para las correspondientes energías potenciales, excepto por el uso de carga en vez de masa (recuerde que la carga se asocia a dos signos). En el caso gravitacional de dos masas, la energía potencial gravitacional mutua es negativa, porque la fuerza siempre es *atractiva*. Para la energía potencial eléctrica, el resultado puede ser positivo o negativo, porque la fuerza eléctrica puede ser de *repulsión* o de *atracción*.

Si una carga puntual positiva q_1 está fija en el espacio y una segunda carga positiva q_2 se lleva hacia ella desde una distancia muy grande (es decir, hacen su localidad inicial $r \to \infty$) a una distancia r_{12} (◂figura 16.5a). En este caso, el trabajo requerido es positivo (¿por qué?). Por lo tanto, este sistema específico gana energía potencial eléctrica. El potencial a una gran distancia (V_∞) se escoge igual a cero, como se acostumbra para cargas puntuales y masas. (Recuerde que el punto de referencia cero es arbitrario.) Así, de la ecuación 16.3, vemos que el cambio en energía potencial es

$$\Delta U_e = q_2 \Delta V = q_2(V_1 - V_\infty) = q_2\left(\frac{kq_1}{r_{12}} - 0\right) = \frac{kq_1q_2}{r_{12}}$$

Como el valor a gran distancia de la energía potencial eléctrica se elige igual a cero, se infiere que $\Delta U_e = U_{12} - U_\infty = U_{12}$. Con esta selección del valor de referencia, la energía potencial de *cualquier* sistema de dos cargas es

$$U_{12} = \frac{kq_1q_2}{r_{12}} \quad \textit{energía potencial eléctrica mutua (dos cargas)} \tag{16.5}$$

Para cargas de *signos diferentes*, la energía potencial eléctrica es negativa. Para cargas del *mismo signo*, la energía potencial eléctrica es positiva. Así, si las dos cargas son del mismo signo, al liberarlas, se separarán ganando energía cinética y perdiendo energía potencial. A la inversa, se requiere trabajo positivo para incrementar la separación de dos cargas opuestas, como el protón y el electrón, similar a estirar un resorte. (Véase el Ejercicio de refuerzo del Ejemplo integrado 16.3.)

Como la energía es una cantidad escalar, para una configuración de cualquier número de cargas puntuales, la energía potencial *total* (U) es la suma algebraica de las energías potenciales mutuas de todos los pares de cargas:

$$U = U_{12} + U_{23} + U_{13} + U_{14} \cdots \tag{16.6}$$

Sólo los tres primeros términos de la ecuación 16.6 serían necesarios para la configuración mostrada en la figura 16.5b. Observe que los signos de las cargas mantienen las cosas matemáticamente correctas, como lo muestra la situación molecular del ejemplo 16.4.

Ejemplo 16.4 ■ La molécula de la vida: la energía potencial eléctrica de una molécula de agua

La molécula de agua es la base de la vida como la conocemos. Muchas de sus propiedades importantes (por ejemplo, que sea un líquido sobre la superficie de la Tierra) están relacionadas con el hecho de que es una molécula polar permanente (un dipolo eléctrico; véase la sección 15.4). Una simple figura de la molécula de agua, incluidas las cargas, está dada en la ▸figura 16.6. La distancia de cada átomo de hidrógeno al átomo de oxígeno es de 9.60×10^{-11} m, y el ángulo (θ) entre las dos direcciones de enlace hidrógeno-oxígeno es de 104°. ¿Cuál será la energía electrostática de la molécula de agua?

Razonamiento. El modelo de la molécula de agua implica tres cargas. Se dan las cargas, pero la distancia entre los átomos de hidrógeno deben calcularse mediante trigonometría. La energía potencial electrostática total es la suma algebraica de las energías potenciales de los tres pares de cargas (es decir, la ecuación 16.6 tendrá tres términos).

Solución. Los siguientes datos se tomaron de la figura 16.6.

Dado: $q_1 = q_2 = +5.20 \times 10^{-20}$ C
$q_3 = -10.4 \times 10^{-20}$ C
$r_{13} = r_{23} = 9.60 \times 10^{-11}$ m
$\theta = 104°$

Encuentre: U (potencial electrostático total de la molécula de agua)

Observe que $(r_{12}/2)/r_{13} = \text{sen}(\theta/2)$. Por consiguiente, despejamos r_{12}:

$$r_{12} = 2r_{13}\left(\text{sen}\,\frac{\theta}{2}\right) = 2(9.60 \times 10^{-11}\ \text{m})(\text{sen } 52°) = 1.51 \times 10^{-10}\ \text{m}$$

Antes de determinar la energía potencial total de este sistema, calculemos cada contribución de los pares al total por separado. Observe que $U_{13} = U_{23}$. (¿Por qué?) Aplicando la ecuación 16.5,

$$U_{12} = \frac{kq_1q_2}{r_{12}} = \frac{(9.00 \times 10^9\ \text{N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2)(+5.20 \times 10^{-20}\ \text{C})(+5.20 \times 10^{-20}\ \text{C})}{1.51 \times 10^{-10}\ \text{m}}$$
$$= +1.61 \times 10^{-19}\ \text{J}$$

y

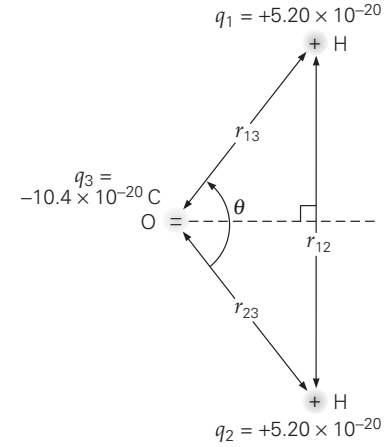
$$U_{13} = U_{23} = \frac{kq_2q_3}{r_{23}} = \frac{(9.00 \times 10^9\ \text{N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2)(+5.20 \times 10^{-20}\ \text{C})(-10.4 \times 10^{-20}\ \text{C})}{9.60 \times 10^{-11}\ \text{m}}$$
$$= -5.07 \times 10^{-19}\ \text{J}$$

La energía potencial electrostática total es

$$U = U_{12} + U_{13} + U_{23} = (+1.61 \times 10^{-19}\ \text{J}) + (-5.07 \times 10^{-19}\ \text{J}) + (-5.07 \times 10^{-19}\ \text{J})$$
$$= -8.53 \times 10^{-19}\ \text{J}$$

El resultado negativo indica que la molécula requiere trabajo positivo para romperse. (Esto es, debe separarse.)

Ejercicio de refuerzo. Otra molécula polar común es el monóxido de carbono (CO), un gas tóxico comúnmente producido en automóviles cuando la quema del combustible es incompleta. El átomo de carbono está positivamente cargado y el átomo de oxígeno negativamente cargado. La distancia entre el átomo de carbono y el átomo de oxígeno es de 1.20×10^{-10} m, y la carga (promedio) sobre cada uno es de 6.60×10^{-20} C. Determine la energía electrostática de esta molécula. ¿Es más o menos eléctricamente estable que una molécula de agua en este ejemplo?



▲ **FIGURA 16.6 Energía potencial electrostática de una molécula de agua** Una configuración de carga tiene energía potencial eléctrica, ya que se requiere trabajo para acercar las cargas desde grandes distancias. Las cargas mostradas sobre la molécula de agua son cargas netas promedio, porque los átomos dentro de la molécula comparten electrones. Así, las cargas sobre los extremos de la molécula de agua pueden ser menores que la carga sobre el electrón o el protón. (Véase los detalles en el ejemplo 16.4.)

16.2 Superficies equipotenciales y el campo eléctrico

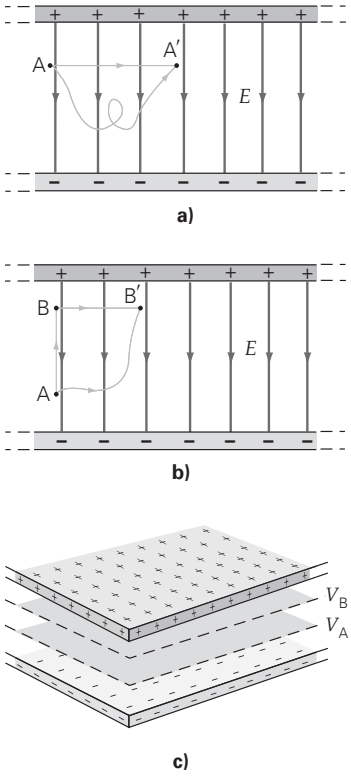
OBJETIVOS: *a*) Explicar lo que significa superficie equipotencial, *b*) esbozar superficies equipotenciales para configuraciones de carga simple y *c*) explicar la relación entre superficies equipotenciales y campos eléctricos.

Superficies equipotenciales

Suponga que una carga positiva se mueve perpendicularmente a un campo eléctrico (como la trayectoria I de la ▼figura 16.7a). Cuando la carga se mueve de A a A′, el campo eléctrico no efectúa *ningún trabajo* (¿por qué?). Si no se efectúa trabajo, entonces la energía potencial de la carga no cambia, por lo que $\Delta U_{AA'} = 0$. De este resultado, concluimos que esos dos puntos (A y A′) y *todos* los otros puntos sobre la trayectoria I, están al mismo potencial V; esto es,

$$\Delta V_{AA'} = V_{A'} - V_A = \frac{\Delta U_{AA'}}{q} = 0 \qquad \text{o sea} \qquad V_A = V_{A'}$$

Esta propiedad también es válida para todos los puntos sobre el *plano* paralelo a las placas y que contienen la trayectoria I. Un plano sobre el cual el potencial eléctrico es constante, es una **superficie equipotencial** (llamado a veces una *equipotencial*). La



▲ **FIGURA 16.7 Construcción de superficies equipotenciales entre placas paralelas** ***a)*** El trabajo efectuado al mover una carga es cero, siempre que usted comience y termine sobre la misma superficie equipotencial. (Compare las trayectorias I y II.) ***b)*** Una vez que la carga se mueve a un potencial mayor (por ejemplo, del punto A al punto B), puede permanecer en esa nueva superficie equipotencial moviéndose perpendicularmente al campo eléctrico (B a B′). El cambio en potencial es independiente de la trayectoria, ya que el mismo cambio ocurre si se usa la trayectoria I o la trayectoria II. (¿Por qué?) ***c)*** Las superficies reales equipotenciales dentro de las placas paralelas son planos paralelos a esas placas. Dos de tales placas se muestran, con $V_B > V_A$.

palabra *equipotencial* significa "mismo potencial". Note que, a diferencia de este caso especial, una equipotencial no necesita ser una superficie plana.

Como ningún trabajo se requiere para mover una carga a lo largo de una superficie equipotencial, por lo general debe ser cierto que

> Las superficies equipotenciales forman siempre ángulos rectos con el campo eléctrico.

Además, como el campo eléctrico es un campo conservativo, el trabajo será el mismo si tomamos la trayectoria I, la trayectoria II o *cualquier otra* trayectoria de A a A′ (figura 16.7a). Siempre que la carga regrese a la misma superficie equipotencial de la cual partió, el trabajo efectuado es cero y su energía potencial eléctrica permanece igual.

Si la carga positiva se mueve en sentido opuesto al de $\vec{\mathbf{E}}$ (trayectoria I en la figura 16.7b), en ángulos rectos a las equipotenciales, la energía potencia eléctrica y, por lo tanto, el potencial eléctrico, aumentarán. (¿Por qué?) Cuando se alcanza B, la carga está sobre una superficie equipotencial diferente, una con un potencial mayor que la de A. Si la carga se moviera de A a B′, el trabajo requerido sería el mismo que al moverla de A a B. Por consiguiente, B y B′ están también sobre una superficie equipotencial. Así, para placas paralelas cargadas, las superficies equipotenciales son planos paralelos a las placas, como se muestra en la figura 16.7c.

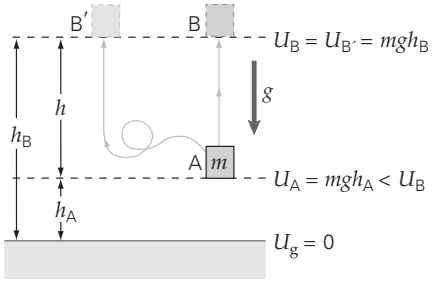
Para ayudar a entender el concepto de una superficie equipotencial eléctrica, consideremos una analogía gravitacional. Si la energía potencial gravitacional se establece como cero al nivel del suelo y se levanta un objeto a una altura $h = h_B - h_A$ (de A a B en la ▼figura 16.8), entonces el trabajo realizado por una fuerza externa es mgh y es positivo. Para el movimiento horizontal, no cambia la energía potencial. Esto significa que el plano rayado a la altura h_B es una superficie equipotencial gravitacional, así como lo es el plano en h_A, pero a un menor potencial. Así, las superficies de energía potencial gravitacional constante son planos paralelos a la superficie terrestre. Los mapas topográficos que presentan contornos terrestres al trazar líneas de elevación constante (usualmente relativos al nivel del mar) en realidad son mapas de potencial gravitacional constante (▸figura 16.9a, b). Observe cómo las equipotenciales cerca de una carga puntual (figura 16.9c, d) son cualitativamente similares a los contornos de una colina.

Es útil aprender a diagramar las superficies equipotenciales, porque están íntimamente relacionadas con el campo eléctrico y aspectos prácticos como el voltaje. La sección Aprender dibujando sobre relación gráfica entre líneas de campo eléctrico y equipotenciales (p. 547) resume un método cualitativo que es útil para diagramar superficies equipotenciales, dado un patrón de líneas de campo eléctrico. Como se verá ahí, el método es también útil para el problema inverso: diagramar las líneas de campo eléctrico si se dan las superficies equipotenciales. ¿Puede ver cómo esas ideas se usaron para construir las equipotenciales de un dipolo eléctrico en la ▸figura 16.10?

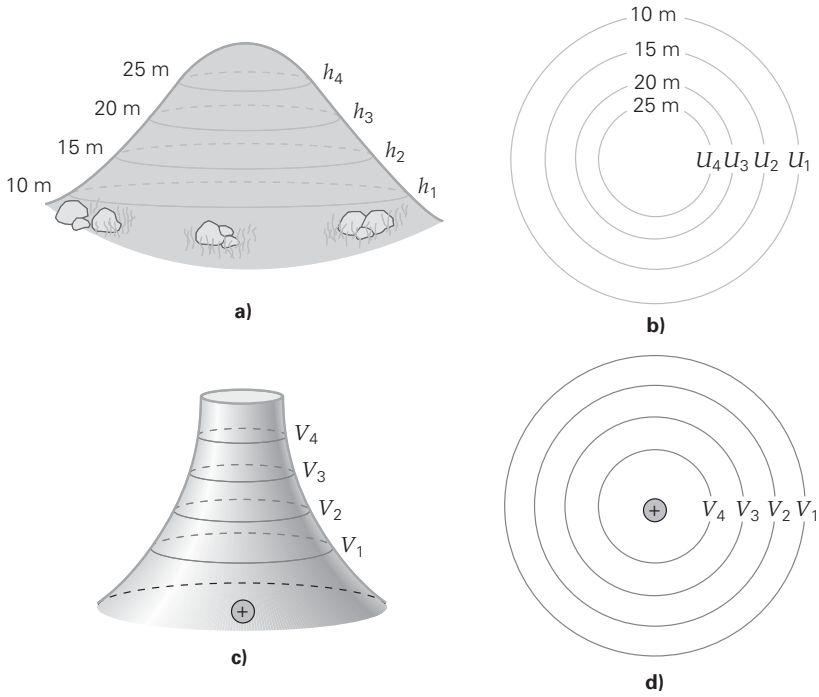
Para determinar la relación entre el campo eléctrico (E) y el potencial eléctrico (V), considere el caso especial del campo eléctrico uniforme (▸figura 16.11). La diferencia de potencial (ΔV) entre dos planos equipotenciales cualquiera (por ejemplo, los rotulados V_1 y V_2 en la figura) puede calcularse con el mismo procedimiento usado para obtener la ecuación 16.2. El resultado es

$$\Delta V = V_3 - V_1 = E\,\Delta x \tag{16.7}$$

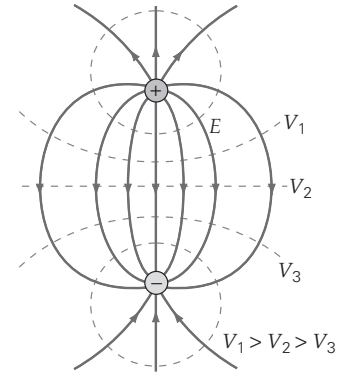
Así, si usted comienza sobre la superficie equipotencial 1 y se mueve *perpendicularmente alejándose* de ella y *contra* el campo eléctrico a la superficie equipotencial 3, habrá un *incremento* de potencial (ΔV) que depende de la intensidad del campo eléctrico (E) y de la distancia recorrida (Δx).



◀ **FIGURA 16.8 Analogía con la energía potencial gravitacional** Elevar un objeto en un campo gravitacional uniforme conduce a un incremento en energía potencial gravitacional, y $U_B > U_A$. A determinada altura, la energía potencial del objeto es constante siempre que permanezca sobre esa superficie equipotencial (gravitacional). Aquí, $\vec{\mathbf{g}}$ señala hacia abajo, como $\vec{\mathbf{E}}$ en la figura 16.7.



▲ **FIGURA 16.9 Mapas topográficos; una analogía gravitacional con superficies equipotenciales** ***a)*** Una colina simétrica con cortes a diferentes alturas. Cada corte es un plano de potencial gravitacional constante. ***b)*** Un mapa topográfico de los cortes en *a*. Los contornos, donde los planos intersecan a la superficie, representan valores cada vez mayores del potencial gravitacional, al subir por la colina. ***c)*** El potencial eléctrico V cerca de una carga puntual q forma una colina simétrica similar. V es constante a distancias fijas de q. ***d)*** Los equipotenciales eléctricos alrededor de una carga puntual son esféricos (en dos dimensiones son círculos) con centro en la carga. Cuanto más cerca esté la equipotencial a la carga positiva, mayor será el potencial eléctrico.



▲ **FIGURA 16.10 Equipotenciales de un dipolo eléctrico** Las equipotenciales son perpendiculares a las líneas de campo eléctrico. $V_1 > V_2$, ya que la superficie equipotencial 1 está más cerca a la carga positiva que la superficie 2. Para entender cómo se construyen las equipotenciales, véase la sección Aprender dibujando de la p. 547.

Para una distancia de recorrido dada Δx, este movimiento perpendicular da la ganancia máxima posible de potencial. Considere que toma un paso de longitud Δx en *cualquier* dirección, partiendo de la superficie 1. La forma de maximizar el incremento sería pisar sobre la superficie 3. Un paso en cualquier dirección no perpendicular a la superficie 1 (por ejemplo, terminar sobre la superficie 2) da un menor incremento de potencial.

Al encontrar la dirección del incremento de potencial máximo, encontramos la dirección opuesta a la de $\vec{\mathbf{E}}$. Por regla general esto significa que:

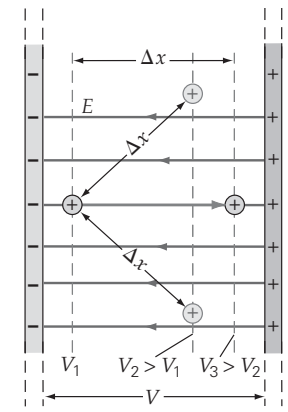
> La dirección del campo eléctrico $\vec{\mathbf{E}}$ es la dirección en que el potencial eléctrico disminuye más rápidamente.

Así, en cualquier localidad, la magnitud del campo eléctrico es la razón máxima de cambio del potencial con la distancia, o bien,

$$E = \left|\frac{\Delta V}{\Delta x}\right|_{\text{máx}} \tag{16.8}$$

Las unidades de campo eléctrico son volt por metro (V/m). En el capítulo 15, E se expresó en newtons por coulomb (N/C; véase la sección 15.4). Usted ya debe saber, del análisis dimensional, que 1 V/m = 1 N/C. Una interpretación gráfica de la relación entre $\vec{\mathbf{E}}$ y V se muestra en la sección Aprender dibujando de la p. 547.

En la mayoría de situaciones prácticas, se especifica la diferencia de potencial (*voltaje*) en vez del campo eléctrico. Por ejemplo, una batería de lámpara D tiene un voltaje terminal de 1.5 V, lo cual significa que puede mantener una diferencia de potencial de 1.5 V entre sus terminales. La mayoría de las baterías de automóvil (acumuladores) tienen un voltaje terminal de aproximadamente 12 V. Algunas de las diferencias de potencial comunes, o voltajes, se presentan en la tabla 16.1.



▲ **FIGURA 16.11 Relación entre el cambio de potencial (ΔV) y el campo eléctrico ($\vec{\mathbf{E}}$)** La dirección del campo eléctrico es la del decremento máximo de potencial, o la opuesta a la dirección de máximo incremento en potencial (aquí, este máximo está en la dirección de la flecha sólida, no de la angulada; ¿por qué?). La magnitud del campo eléctrico está dada por la razón a la que cambia el potencial con la distancia (usualmente en volts por metro).

PHYSLET®
Ilustración 25.2 Trabajo y equipotenciales

PHYSLET®
Ilustración 25.3 Potenciales eléctricos de esferas cargadas

TABLA 16.1 Diferencias de potencial eléctrico comunes (voltajes)

Fuente	*Voltaje aproximado (ΔV)*
A través de membranas nerviosas	100 mV
Baterías de pequeños dispositivos	1.5 a 9.0 V
Baterías de automóvil	12 V
Salida en el hogar (en Estados Unidos)	110 a 120 V
Salidas (en Europa)	220 a 240 V
Encendido de automóvil (bujías)	10 000 V
Generadores en laboratorios	25 000 V
Líneas de suministro de energía eléctrica de alto voltaje	300 kV o más
Nube a superficie de la Tierra durante una tormenta	100 MV o más

Ya sea que usted lo sepa o no, vive en un campo eléctrico cerca de la superficie de la Tierra. Este campo varía según las condiciones climáticas y, en consecuencia, puede ser un indicador de que se avecinan tormentas. El ejemplo 16.5 aplica el concepto de superficie equipotencial para ayudar a entender el campo eléctrico de la Tierra.

Ejemplo 16.5 ■ El campo eléctrico de la Tierra y superficies equipotenciales: ¿barómetros eléctricos?

Bajo condiciones atmosféricas normales, la superficie terrestre está eléctricamente cargada. Esto genera un campo eléctrico constante de aproximadamente 150 V/m que señala hacia *abajo* cerca de la superficie. *a*) En tales condiciones, ¿cuál será la forma de las superficies equipotenciales, y en qué dirección disminuye más rápidamente el potencial eléctrico? *b*) ¿Qué separadas están dos superficies equipotenciales que tienen entre sí una diferencia de 1000 V? ¿Cuál tiene un potencial mayor, la más alejada de la Tierra o la más cercana?

Razonamiento. *a*) Cerca de la superficie de la Tierra, el campo eléctrico es aproximadamente uniforme, por lo que las equipotenciales son similares a las de las placas paralelas cargadas. El análisis de las ecuaciones 16.7 y 16.8 nos permite determinar cómo aumenta el potencial. *b*) La ecuación 16.8 puede entonces usarse para determinar qué tan alejadas están las superficies equipotenciales.

Solución. Tenemos,

Dado: $E = 150$ V/m, hacia abajo
$\Delta V = 1000$ V

Encuentre: *a*) Forma de las superficies equipotenciales y dirección del decremento de potencial
b) Δx (distancia entre equipotenciales)

a) Los campos eléctricos uniformes están asociados con equipotenciales planas. En este caso, los planos son paralelos a la superficie terrestre. El campo eléctrico señala hacia abajo. Ésta es la dirección en que el potencial disminuye más rápidamente.

b) Para determinar la distancia entre los dos equipotenciales, piense en moverse verticalmente de manera que $\Delta V/\Delta x$ tenga su valor máximo. (¿Por qué?) Despejando Δx de la ecuación 16.8 obtenemos

$$\Delta x = \frac{\Delta V}{E} = \frac{1000 \text{ V}}{150 \text{ V/m}} = 6.67 \text{ m}$$

Como el potencial disminuye al movernos hacia abajo (en la dirección de $\vec{\mathbf{E}}$), el mayor potencial está asociado con la superficie que está 6.67 m *más allá* del suelo.

Ejercicio de refuerzo. Reexaminemos el ejemplo anterior, pero bajo condiciones de tormenta. Durante una tormenta con rayos, el campo eléctrico puede adquirir muchas veces el valor normal. *a*) Bajo esas condiciones, si el campo es de 900 V/m y señala hacia arriba, ¿qué tan separadas estarán las dos superficies equipotenciales que difieren en 2000 V? *b*) ¿Qué superficie está a un potencial mayor, la más cercana a la Tierra o la otra más alejada? *c*) ¿Puede decir dónde están localizadas las dos superficies respecto al suelo? Explique por qué.

PHYSLET®
Exploración 25.1 Líneas equipotenciales

PHYSLET®
Exploración 25.2 Líneas de campo eléctrico y equipotenciales

APRENDER DIBUJANDO

RELACIÓN GRÁFICA ENTRE LÍNEAS DE CAMPO ELÉCTRICO Y EQUIPOTENCIALES

Como no se requiere trabajo para mover una carga a lo largo de una superficie equipotencial, tales superficies deben siempre ser perpendiculares a las líneas de campo eléctrico. Además, el campo eléctrico tiene una magnitud igual a la carga en potencial por distancia unitaria (V/m) y señala en la dirección en que el potencial disminuye más rápidamente. Podemos usar esto para construir equipotenciales si conocemos el patrón de líneas de campo eléctrico. La proposición inversa es también cierta: Dadas las equipotenciales, podemos construir las líneas de campo eléctrico. Además, si conocemos el potencial (en volts) asociado con cada equipotencial, pueden estimarse la intensidad y la dirección del campo a partir de la razón con que el potencial cambia con la distancia (ecuación 16.8).

Un par de ejemplos deberían proporcionar un punto de vista gráfico sobre la conexión entre superficies equipotenciales y sus campos eléctricos asociados. Considere la figura 1, en la cual se dan las líneas de campo eléctrico y se quiere determinar la forma de las equipotenciales. Elija cualquier punto, como el A, y empiece a moverse según ángulos rectos a las líneas de campo eléctrico. Continúe moviéndose pero siempre manteniendo esta misma orientación perpendicular a las líneas de campo. Entre líneas usted tendrá que aproximar, pero vea adelante a la siguiente línea de campo de modo que pueda cruzarla según un ángulo recto. Para encontrar otra equipotencial, empiece en otro punto, como el B, y proceda de la misma manera. Diagrame tantas equipotenciales como necesite usted para mapear el área de interés. La figura muestra el resultado de esbozar cuatro de tales equipotenciales, de A (en el potencial más alto; ¿puede usted decir por qué?) a D (en el potencial más bajo).

Ahora suponga que le dan las equipotenciales en vez de las líneas de campo (figura 2). Las líneas de campo eléctrico señalan en la dirección de V decreciente y son perpendiculares a las superficies equipotenciales. Así, para mapear el campo, comience en cualquier punto, y muévase de tal manera que su trayectoria interseque cada superficie equipotencial según un ángulo recto. La línea de campo resultante se muestra en la figura 2, comenzando en el punto A. Iniciando en los puntos B, C y D se obtienen líneas de campo adicionales que sugieren el patrón completo de campo eléctrico; usted necesita sólo sumar las flechas en la dirección del potencial decreciente.

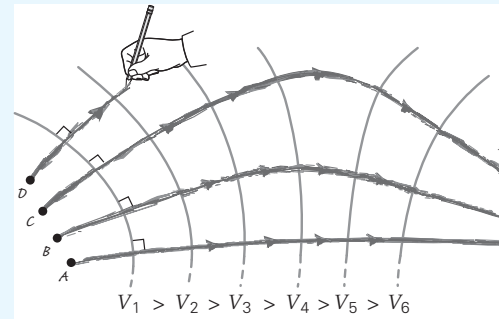


FIGURA 2 Mapeo del campo eléctrico a partir de equipotenciales Comience en un punto conveniente, y trace una línea que cruce cada equipotencial según un ángulo recto. Repita el proceso tan a menudo como sea necesario para revelar el patrón de campo, agregando flechas para indicar el sentido de las líneas de campo de mayor a menor potencial. Al ir de un potencial al próximo, planeé por adelantado de manera que cada equipotencial sucesiva también se cruce según ángulos rectos.

Finalmente, suponga que quiere estimar la magnitud de $\vec{\mathbf{E}}$ en algún punto P (figura 3), conociendo los valores de las equipotenciales a 1.0 cm a cada lado de ella. Con esta información, usted puede decir que el campo señala aproximadamente de A a B. (¿Por qué?) Su magnitud aproximada sería entonces

$$E = \left|\frac{\Delta V}{\Delta x}\right|_{\text{máx}} = \frac{(1000\ \text{V} - 950\ \text{V})}{2.0 \times 10^{-2}\ \text{m}}$$
$$= 2.5 \times 10^{3}\ \text{V/m}$$

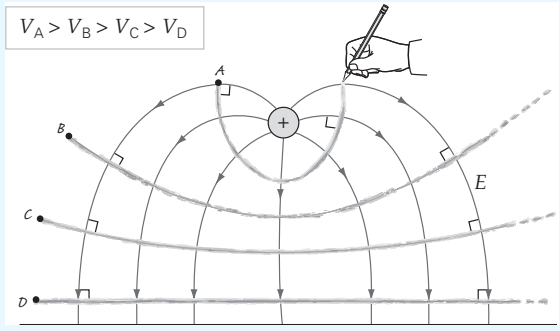


FIGURA 1 Esbozo de equipotenciales de las líneas de un campo eléctrico Si conoce el patrón del campo eléctrico, elija un punto en la región de interés y muévase de forma que su trayectoria siempre sea perpendicular a la siguiente línea de campo. Trace su trayectoria tan suave como le sea posible, planeando adelante de modo que cada línea de campo sucesiva también se cruce según ángulos rectos. Para mapear una superficie con un mayor (o menor) potencial, muévase en la dirección opuesta (o la misma) que el campo eléctrico y repita el proceso. Aquí, $V_A > V_B$, y así sucesivamente.

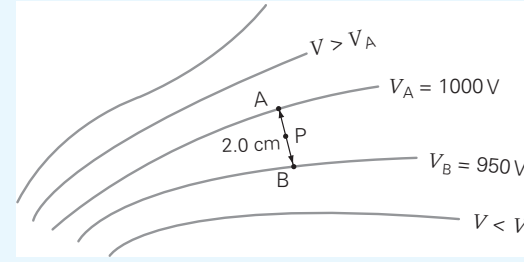
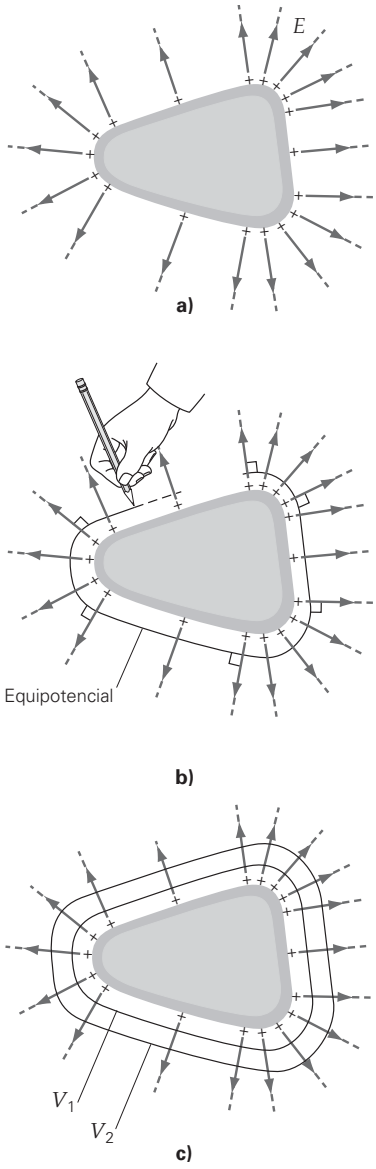


FIGURA 3 Estimación de la magnitud del campo eléctrico La magnitud del cambio de potencial por metro en cualquier punto da la intensidad del campo eléctrico en ese punto.



▲ **FIGURA 16.12 Superficies equipotenciales cerca de un conductor cargado** Véase el Ejemplo conceptual 16.6.

Exploración 25.3 Potencial eléctrico alrededor de conductores

Nota: el electrón volt es una unidad de energía. El volt no lo es. ¡No confunda ambos!

Las superficies equipotenciales pueden también ser útiles para describir el campo cerca de un conductor cargado, como lo muestra el siguiente Ejemplo conceptual.

Ejemplo conceptual 16.6 ■ Las superficies equipotenciales fuera de un conductor cargado

Un conductor sólido con exceso de carga positiva sobre él se muestra en la ◂figura 16.12a. ¿Qué describe mejor la forma de las superficies equipotenciales justo fuera de la superficie del conductor *a*) planos, *b*) esferas o *c*) aproximadamente en forma de la superficie del conductor. Explique su razonamiento.

Razonamiento y respuesta. La opción *a* puede eliminarse inmediatamente, porque las superficies equipotenciales planas se asocian con placas planas. Si bien podría ser tentador elegir la respuesta *b* una mirada rápida al patrón de campo eléctrico cerca de la superficie (capítulo 15), en conjunción con la sección Aprender dibujando de la p. 547, muestra que la respuesta correcta es *c*. Para verificar que *c* es la respuesta correcta, recuerde que justo arriba de la superficie, el campo eléctrico debe ser perpendicular a esa superficie. Como las superficies equipotenciales son perpendiculares a las líneas del campo eléctrico, deben seguir el contorno de la superficie del conductor (figura 16.12b).

Ejercicio de refuerzo. En este ejemplo, *a*) ¿cuál de las dos equipotenciales (1 o 2) que se muestran en la figura 16.12c está a un potencial mayor? *b*) ¿Cuál es la forma de las superficies equipotenciales muy lejos del conductor? Explique su razonamiento. (*Sugerencia:* ¿cómo se ve el conductor cargado cuando usted está muy lejos de él?)

El electrón volt

El concepto de potencial eléctrico proporciona una unidad de energía que es especialmente útil en la física molecular, atómica, nuclear y de partículas elementales. El **electrón volt (eV)** se define como la energía cinética adquirida por un electrón (o un protón) acelerado a través de una diferencia de potencial, o voltaje, de exactamente 1 V. La ganancia de energía cinética del electrón es igual (pero de carga opuesta) a su pérdida en energía potencial eléctrica. Usando esta relación, podemos expresar la ganancia de energía cinética en joules:

$$\Delta K = -\Delta U_e = -(e\,\Delta V) = -(-1.60 \times 10^{-19}\,\mathrm{C})(1.00\,\mathrm{V}) = +1.60 \times 10^{-19}\,\mathrm{J}$$

Como esto es lo que significa 1 electrón volt, el factor de conversión entre el electrón volt y el joule (con tres cifras significativas) es

$$1\,\mathrm{eV} = 1.60 \times 10^{-19}\,\mathrm{J}$$

El electrón volt es típico de energías de la escala atómica. Así, es conveniente expresar energías atómicas en términos de electrón volts en vez de joules. La energía de *cualquier* partícula cargada acelerada a través de *cualquier* diferencia de potencial puede expresarse en electrón volts. Por ejemplo, si un electrón se acelera a través de una diferencia de potencial de 1000 V, su ganancia en energía cinética (ΔK) será 1000 veces mayor que 1 eV electrón, o

$$\Delta K = e\,\Delta V = (1\,\mathrm{e})(1000\,\mathrm{V}) = 1000\,\mathrm{eV} = 1\,\mathrm{keV}$$

El *keV* es la abreviatura para el *kiloelectrón volt*.

El electrón volt se define en términos de una partícula con la carga mínima (el electrón o protón). Sin embargo, la energía de una partícula con *cualquier* cantidad de carga también puede expresarse en electrón volts. Así, si una partícula con una carga de $+2e$, tal como una partícula alfa, fuera acelerada a través de una diferencia de potencial de 1000 volts, ganaría una energía cinética de $\Delta K = e\Delta V = (2\,\mathrm{e})(1000\,\mathrm{V}) = 2000\,\mathrm{eV} = 2\,\mathrm{keV}$. Observe lo sencillo que es calcular la energía cinética, si usted trabaja en electrón volts.

A veces son necesarias las unidades más grandes de energía que el electrón volt. Por ejemplo, en la física nuclear y de partículas elementales, es común encontrar partículas con energías de *megaelectrón volts* (MeV) y *gigaelectrón volts* (GeV). (1 MeV = 10^6 eV y 1 GeV = 109 eV.)*

*Antes, mil millones de electrón volts se refería como BeV, pero esta norma se descartó por la confusión que generó. En algunos países, como Inglaterra y Alemania, un billón significa 10^{12}. En Estados Unidos se le llama trillón.

Al resolver problemas de física, es importante estar consciente de que el electrón volt (eV) no es una unidad SI. Por consiguiente, al usar energías para calcular rapideces, usted debe primero convertir los electrón volts a joules. Por ejemplo, para calcular la rapidez de un electrón acelerado desde el reposo a través de 10.0 V, primero convierta la energía cinética (10.0 eV) a joules:

$$K = (10.0\ \text{eV})(1.60 \times 10^{-19}\ \text{J/eV}) = 1.60 \times 10^{-18}\ \text{J}$$

Para continuar en el sistema SI, la masa del electrón debe expresarse en kilogramos. Entonces, la rapidez se calcula como sigue:

$$v = \sqrt{2K/m} = \sqrt{2(1.60 \times 10^{-18}\ \text{J})/(9.11 \times 10^{-31}\ \text{kg})} = 1.87 \times 10^{6}\ \text{m/s}$$

16.3 Capacitancia

OBJETIVOS: *a*) Definir capacitancia y explicar lo que significa físicamente y *b*) calcular la carga, el voltaje, el campo eléctrico y el almacenamiento de energía en condensadores de placas paralelas.

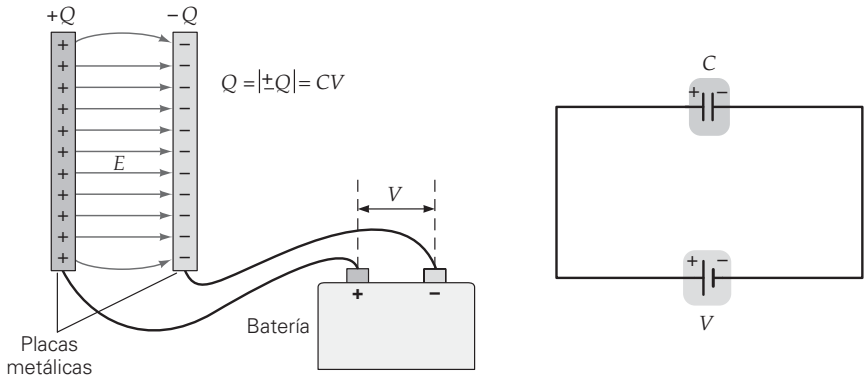
Un par de placas paralelas, si están cargadas, almacenan energía eléctrica (▾figura 16.13). Un arreglo así de conductores es ejemplo de un **condensador**. (En realidad, cualquier par de conductores califica como condensador.) El almacenamiento de energía tiene lugar porque se requiere trabajo para transferir la carga de una placa a la otra. Imagine que un electrón se desplaza entre un par de placas inicialmente descargadas. Una vez hecho esto, transferir un *segundo* electrón sería más difícil, porque no sólo es repelido por el primer electrón sobre la placa negativa, sino también es atraído por una carga positiva doble sobre la placa positiva. Así, para separar las cargas se requiere cada vez más trabajo, conforme se acumula más y más carga sobre las placas. (Esto es como estirar un resorte. Cuanto más se alargue, más difícil será alargarlo más.)

Nota: los condensadores almacenan energía en sus campos eléctricos.

El trabajo necesario para cargar placas paralelas puede hacerse rápidamente (usualmente en unos pocos microsegundos) por una batería. Aunque no estudiaremos el funcionamiento de una batería en detalle sino hasta el próximo capítulo, todo lo que usted necesita saber ahora es que una batería remueve electrones de la placa positiva y los transfiere, o "bombea", a través de un alambre a la placa negativa. En el proceso de efectuar trabajo, la batería pierde algo de su energía potencial química interna. Aquí es de gran interés el resultado: una separación de las cargas y la creación de un campo eléctrico en el condensador. La batería continuará cargando el condensador hasta que la diferencia de potencial entre las placas sea igual al voltaje terminal de la batería, por ejemplo, 12 V si usted usa una batería estándar de automóvil. Cuando el condensador se desconecta de la batería, se vuelve "recipiente" almacenador de energía eléctrica.

Nota: recuerde que por conveniencia nuestra notación para diferencia de potencial, o voltaje (ΔV), se reemplazará con V.

Para un condensador, la diferencia de potencial a través de las placas es proporcional a la carga Q sobre ellas, o $Q \propto V$.* (Aquí, Q denota la magnitud de la carga sobre



a) Condensador de placas paralelas **b) Diagrama**

◀ **FIGURA 16.13 Condensador y diagrama del circuito** ***a)*** Dos placas metálicas paralelas se cargan con una batería que mueve electrones de la placa positiva a la negativa a través del alambre. Se efectúa trabajo mientras se carga el condensador y la energía se almacena en el campo eléctrico. ***b)*** Este diagrama representa la situación de carga mostrada en el inciso *a*. También muestra los símbolos comúnmente usados para una batería (V) y un condensador (C). La línea más larga del símbolo de batería es la terminal positiva, y la línea más corta representa la terminal negativa. El símbolo para un condensador es similar, pero las líneas son de igual longitud.

*A partir de aquí, usaremos V para denotar diferencias de potencial, en vez de ΔV. Se trata de una práctica común. Siempre recuerde que la cantidad importante es la diferencia de potencial, ΔV.

Nota: las cargas sobre las placas son $+Q$ y $-Q$, pero en general es usual referirse a la magnitud de estas cargas, como Q (que significa $|\pm Q|$), sobre un condensador.

cualquier placa, *no* la carga neta sobre todo el condensador, que es cero.) Esta proporcionalidad puede hacerse una ecuación usando una constante, C, llamada *capacitancia*:

$$Q = CV \qquad \text{o} \qquad C = \frac{Q}{V} \tag{16.9}$$

Unidad SI de capacitancia: coulomb por volt (C/V), o farad (F)

Nota: el farad se llamó así en honor del científico inglés Michael Faraday (1791-1867), un investigador pionero de los fenómenos eléctricos quien fue el primero en introducir el concepto de campo eléctrico.

El coulomb por volt equivale al **farad**, 1 C/V = 1 F. El farad es una unidad grande (véase al ejemplo 16.7), de manera que por lo común se utilizan el *microfarad* (1 μF = 10^{-6} F), el *nanofarad* (1 nF = 10^{-9} F) y el *picofarad* (1 pF = 10^{-12}).

Capacitancia significa carga almacenada *por volt*. Cuando un condensador tiene una capacitancia grande, guarda una gran cantidad de carga *por volt*, en comparación con uno de capacitancia pequeña. Si usted conecta la misma batería a dos condensadores diferentes, el que tiene mayor capacitancia almacenará más carga y más energía.

La capacitancia depende *sólo* de la geometría (tamaño, forma y separación) de las placas (y del material entre las placas, sección 16.5), y *no* de la carga en las placas. Considere el condensador de placas paralelas que tiene un campo eléctrico dado por la ecuación 15.5:

$$E = \frac{4\pi kQ}{A}$$

Nota: generalmente, usaremos la letra minúscula q para representar cargas sobre partículas solas, y la letra mayúscula Q para las cantidades mayores de cargas sobre placas de un condensador.

El voltaje a través de las placas se calcula con la ecuación 16.2:

$$V = Ed = \frac{4\pi kQd}{A}$$

La capacitancia de un arreglo de placas paralelas es entonces

$$C = \frac{Q}{V} = \left(\frac{1}{4\pi k}\right)\frac{A}{d} \qquad \textit{(sólo placas paralelas)} \tag{16.10}$$

Es común reemplazar la expresión en el paréntesis de la ecuación 16.10 por una sola cantidad, llamada **permisividad del espacio libre (ε_o)**. El valor de esta constante (con tres cifras significativas) es

$$\varepsilon_o = \frac{1}{4\pi k} = 8.85 \times 10^{-12}\ \mathrm{C^2/(N \cdot m^2)} \qquad \textit{permisividad del espacio libre} \tag{16.11}$$

PHYSLET®

Ilustración 26.2 Un condensador conectado a una batería

ε_o describe las propiedades eléctricas del espacio libre (vacío), aunque su valor en aire es sólo 0.05% mayor. En nuestros cálculos, tomaremos ambos valores como iguales.

Es común reescribir la ecuación 16.10 en términos de ε_o.

$$C = \frac{\varepsilon_o A}{d} \qquad \textit{(sólo placas paralelas)} \tag{16.12}$$

Usemos la ecuación 16.12 en el siguiente ejemplo para demostrar qué tan irrealísticamente grande sería un condensador lleno de aire con una capacitancia de 1.0 F.

Ejemplo 16.7 ■ Condensadores de placa paralela: ¿qué tan grande es un farad?

¿Cuál sería el área de placa de un condensador de placas paralelas lleno de aire a 1.0 F, si la separación de las placas fuese de 1.0 mm? ¿Sería realista planear la construcción de un condensador como ese?

Razonamiento. El área se puede calcular directamente con la ecuación 16.12. Recuerde usar todas las cantidades en unidades SI, de manera que la respuesta esté en metros cuadrados. Podemos usar el valor en vacío de ε_o para el aire sin generar un error significativo.

Solución.

Dado: $C = 1.0$ F
$d = 1.0$ mm $= 1.0 \times 10^{-3}$ m

Encuentre: A (área de una de las placas)

Despejando el área en la ecuación 16.12 obtenemos

$$A = \frac{Cd}{\varepsilon_o} = \frac{(1.0\ \mathrm{F})(1.0 \times 10^{-3}\ \mathrm{m})}{8.85 \times 10^{-12}\ \mathrm{C^2/(N \cdot m^2)}} = 1.1 \times 10^8\ \mathrm{m^2}$$

PHYSLET®

Exploración 26.1 Energía

Esto es más de 100 km^2 (40 mi^2), es decir, un cuadrado de más de 10 km (6 mi) de lado. No es realista construir un condensador de ese tamaño; 1.0 F es entonces un valor muy grande de capacitancia. Sin embargo, hay maneras de hacer condensadores de alta capacitancia (sección 16.4).

Ejercicio de refuerzo. En este ejemplo, ¿cuál debería ser la separación de las placas, si usted quisiera que el condensador tuviera una área de placa de 1 cm^2? Compare su respuesta con un diámetro atómico típico de 10^{-9} a 10^{-10} m. ¿Es factible construir este condensador?

La expresión para la energía almacenada en un condensador puede obtenerse por análisis gráfico, ya que Q y V varían durante la carga, por ejemplo cuando la carga se separa por medio de una batería. Una gráfica de voltaje contra carga para cargar un condensador es una línea recta con una pendiente de $1/C$, ya que $V = (1/C)Q$ (▸figura 16.14). La gráfica representa la carga de un condensador inicialmente descargado ($V_o = 0$) hasta un voltaje final (V). El trabajo efectuado es equivalente a transferir la carga total, usando un voltaje promedio V. Como el voltaje varía linealmente con la carga, el voltaje promedio es la mitad del voltaje final V:

$$\overline{V} = \frac{V_{\text{final}} + V_{\text{inicial}}}{2} = \frac{V + 0}{2} = \frac{V}{2}$$

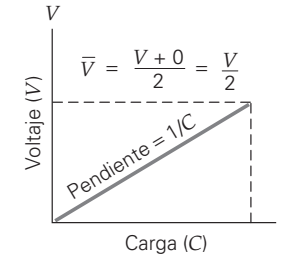
Así, la energía almacenada en el condensador (igual al trabajo efectuado por la batería) es

$$U_C = W = Q\overline{V} = \tfrac{1}{2}QV$$

Como $Q = CV$, esta ecuación se puede escribir en varias formas equivalentes:

$$U_C = \tfrac{1}{2}QV = \frac{Q^2}{2C} = \tfrac{1}{2}CV^2 \qquad \textit{energía almacenada en un condensador} \qquad (16.13)$$

Por lo común, la forma $U_C = \frac{1}{2}CV^2$ es la más práctica, ya que usualmente la capacitancia y el voltaje son las cantidades conocidas. Una aplicación médica muy importante del condensador es en el *desfibrilador cardiaco*, analizado en el siguiente ejemplo.



▲ **FIGURA 16.14 Voltaje contra carga en un condensador** Un diagrama de voltaje (V) contra carga (Q) para un condensador es una línea recta con pendiente $1/C$ (ya que $V = (1/C)Q$). El voltaje promedio es $\overline{V} = \frac{1}{2}V$, y el trabajo total efectuado es equivalente a transferir la carga a través de $\overline{V}$. Así, $U_C = W = Q\overline{V} = \frac{1}{2}QV$, el área bajo la curva (un triángulo).

Nota: No confunda U_C, la energía almacenada en un condensador, con ΔU_e, el cambio en energía potencial eléctrica de una partícula cargada. (Véase la sección 16.1.)

Nota: Practique usando las varias formas de la energía de un condensador. En un aprieto, usted necesita recordar sólo una, junto con la definición de capacitancia, $C = Q/V$.

Ejemplo 16.8 ■ Condensadores al rescate: almacenamiento de energía en un desfibrilador cardiaco

Durante de un ataque cardiaco, el corazón late de manera errática llamada *fibrilación*. Una forma de lograr que el corazón vuelva a su ritmo normal es impartirle energía eléctrica suministrada por un instrumento llamado *desfibrilador cardiaco* (▸figura 16.15). Para producir el efecto deseado se requieren aproximadamente 300 J de energía. Típicamente, un desfibrilador almacena esta energía en un condensador cargado por una fuente de potencia de 5000 V. *a*) ¿Qué capacitancia se requiere? *b*) ¿Cuál es la carga en las placas del condensador?

Razonamiento. *a*) Para encontrar la capacitancia, determine C en la ecuación 16.13. *b*) La carga se obtiene entonces a partir de la definición de la capacitancia (ecuación 16.9).

Solución. Los datos son:

Dado: $U_C = 300$ J, $V = 5000$ V

Encuentre: *a*) C (la capacitancia); *b*) Q (carga en el condensador)

a) La forma más conveniente de la ecuación 16.13 es $U_C = \frac{1}{2}CV^2$. Despejando C, obtenemos

$$C = \frac{2U_C}{V^2} = \frac{2(300\text{ J})}{(5000\text{ V})^2} = 2.40 \times 10^{-5}\text{ F} = 24.0\ \mu\text{F}$$

b) La carga (magnitud sobre cualquier placa) es entonces

$$Q = CV = (2.40 \times 10^{-5}\text{ F})(5000\text{ V}) = 0.120\text{ C}$$

Ejercicio de refuerzo. En este ejemplo, si la energía permisible máxima para cualquier intento de desfibrilación es de 750 J, ¿cuál será el voltaje máximo que debería usarse?

▲ **FIGURA 16.15 Desfibrilador** Una ráfaga de corriente eléctrica (flujo de carga) de un desfibrilador puede restaurar un latido normal en personas que han sufrido un paro cardiaco. Los condensadores almacenan la energía eléctrica de que depende el dispositivo.

Algunas veces los condensadores pueden modelar con éxito fenómenos de la vida real. Por ejemplo, una tormenta puede considerarse como la descarga de una nube cargada negativamente hacia el suelo cargado positivamente, en efecto, un condensador "nube-suelo". Otra aplicación interesante del potencial eléctrico trata las membranas nerviosas como condensadores cilíndricos para ayudar a explicar la transmisión de señales nerviosas. (Véase A fondo 16.1 sobre el potencial eléctrico y la transmisión de señales nerviosas en la p. 552.)

A FONDO 16.1 POTENCIAL ELÉCTRICO Y TRANSMISIÓN DE SEÑALES NERVIOSAS

El sistema nervioso del cuerpo humano es responsable de nuestra recepción de los estímulos externos por medio de los sentidos (por ejemplo, el tacto). Los nervios también proporcionan comunicación entre el cerebro y los órganos y músculos. Si usted toca algo muy caliente, los nervios de la mano detectan el problema y envían una señal al cerebro. Éste a la vez envía la señal de "quítela" a través del sistema nervioso a la mano. Pero, ¿qué son estas señales y cómo funcionan?

Un nervio típico consiste en un haz de celdas nerviosas llamadas *neuronas*, dispuestas de manera parecida a como los alambres telefónicos se agrupan en un solo cable. La estructura de una neurona típica se muestra en la figura 1a. El cuerpo de la celda o *soma*, tiene ramificaciones llamadas *dendritas*, las cuales reciben la señal de entrada. El soma es responsable del procesamiento de la señal y de transmitirla al *axón*. En el otro extremo del axón hay proyecciones con salientes llamadas *terminales sinápticas*. En esas salientes, la señal eléctrica se transmite a otra neurona a través de una brecha llamada *sinapsis*. El cuerpo humano contiene alrededor de 10 mil millones de neuronas y ¡cada neurona puede tener varios cientos de sinapsis! Hacer funcionar el sistema nervioso cuesta al cuerpo humano aproximadamente 25% de su toma de energía cada día.

Para entender la naturaleza eléctrica de la transmisión de señales nerviosas, consideremos el axón. Una componente vital del axón es su membrana celular, la cual normalmente tiene alrededor de 10 nm de espesor y consiste en *fosfolípidos* (moléculas de hidrocarbono polarizadas) y en moléculas de proteínas (figura 1b). La membrana tiene proteínas llamadas *canales iónicos*, que forman poros y donde grandes moléculas de proteínas regulan el flujo de los iones (principalmente de sodio) a través de la membrana. La clave de la transmisión de señales nerviosas es que esos canales iónicos son selectivos: permiten sólo a ciertos tipos de iones cruzar la membrana; a otros no.

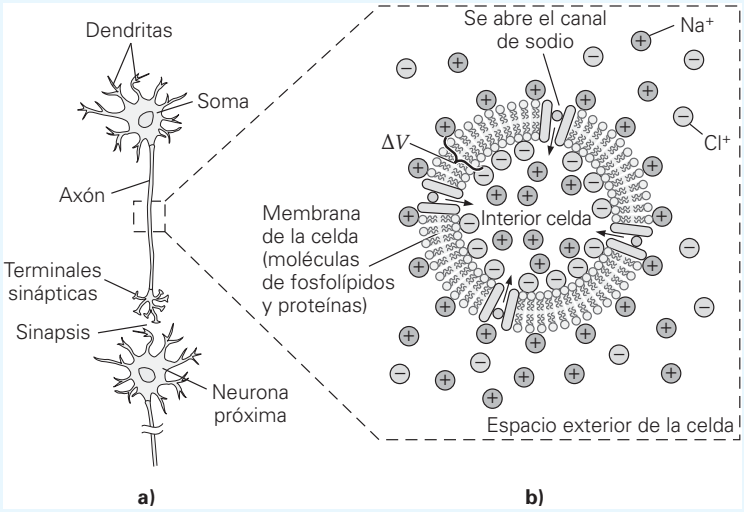


FIGURA 1 ***a)*** La estructura de una neurona típica. ***b)*** Una ampliación de la membrana del axón que muestra la membrana (aproximadamente 10 nm de espesor) y la concentración de iones dentro y fuera de la celda. La polarización de la carga a través de la membrana conduce a un voltaje, o potencial de membrana. Cuando un estímulo externo los dispara, los canales de iones de sodio se abren, permitiendo la entrada de iones de sodio en la celda. Esta afluencia cambia el potencial de la membrana.

16.4 Dieléctricos

OBJETIVOS: Entender *a*) qué es un dieléctrico y *b*) cómo afecta las propiedades físicas de un condensador.

PHYSLET®

Ilustración 26.1 Vista microscópica de un condensador

En la mayoría de los condensadores, una hoja de material aislante, como el papel o el plástico, se coloca entre las placas. Un material aislante, llamado **dieléctrico**, sirve para varios propósitos. Uno de ellos es impedir que las placas entren en contacto y este contacto permitiría a los electrones fluir de regreso hacia la placa positiva, neutralizando así la carga sobre el condensador y la energía almacenada. Un dieléctrico también permite que placas flexibles de hoja metálica se enrollen en un cilindro, dando al condensador un tamaño más compacto (y por ello más práctico). Finalmente, un dieléctrico aumenta la capacidad de almacenamiento de carga del condensador y, por lo tanto, bajo las condiciones correctas, la energía almacenada en el condensador. Tal capacidad depende del tipo de material y está caracterizada por la **constante dieléctrica (κ)**. Los valores de la constante dieléctrica para algunos materiales comunes se presentan en la tabla 16.2.

El fluido fuera del axón, aunque eléctricamente neutro, contiene iones de sodio (Na^+) y iones de cloro (Cl^-) en solución. En cambio, el fluido interno del axón es rico en iones de potasio (K^+) y moléculas de proteínas cargadas negativamente. Si no fuera por la naturaleza selectiva de la membrana de la celda, la concentración de Na^+ sería igual en ambos lados de la membrana. Bajo condiciones normales (o *de reposo*), resulta difícil para los iones Na^+ penetrar el interior de la celda nerviosa. Este proceso da lugar a una polarización de la carga a través de la membrana. El exterior es positivo (con el Na^+ tratando de entrar a la región de menor concentración), que atrae las proteínas negativas a la superficie interior de la membrana (figura 1b). Así, existe un sistema de almacenamiento de carga tipo condensador cilíndrico, a través de una membrana de axón cuando está en reposo. El *potencial de membrana en reposo* (el voltaje a través de la membrana) se define como $\Delta V = V_{\text{dentro}} - V_{\text{fuera}}$. Como el exterior está cargado positivamente, el potencial en reposo es una cantidad negativa y varía de aproximadamente -40 a -90 mV (milivolts), con un valor típico de -70 mV en seres humanos.

La conducción de la señal tiene lugar cuando la membrana de la celda recibe un estímulo de las dendritas. Sólo entonces cambia el potencial de la membrana, y este cambio se propaga por el axón. El estímulo ocasiona que los canales Na^+ en la membrana (cerrados cuando está en reposo, como una compuerta) se abran y permitan temporalmente que los iones de sodio entren a la celda (figura 1b). Esos iones positivos son atraídos a la capa de carga negativa en el interior y son conducidos por la diferencia en la concentración. En aproximadamente 0.001 s, suficientes iones de sodio han pasado por el canal de compuerta para causar una inversión de la polaridad, y entonces se eleva el potencial de la membrana, típicamente a $+30$ mV en seres humanos. Esta secuencia de tiempo para el cambio en el potencial de la membrana se muestra en la figura 2. Cuando la diferencia en la concentración de Na^+ hace que el voltaje de la membrana se vuelva positivo, y se cierren las compuertas de sodio. Un proceso químico conocido como *bombeo molecular Na/K−ATPase* reestablece después el potencial de reposo a -70 mV por transporte selectivo del exceso de Na^+ al exterior de la celda.

Esta variación en el potencial de la membrana (un total de 100 mV, de -70 mV a $+30$ mV) se llama *potencial de acción* de la celda. Este potencial de acción es la señal de que se transmite realmente por el axón. La "onda" de voltaje viaja con rapideces de 1 a 100 m/s en su camino a disparar otra pulsación en la neurona adyacente. Esta rapidez, junto con otros factores como las demoras de tiempo en la región sináptica, es responsable de los tiempos normales de reacción humana que suman unas cuantas décimas de segundo.

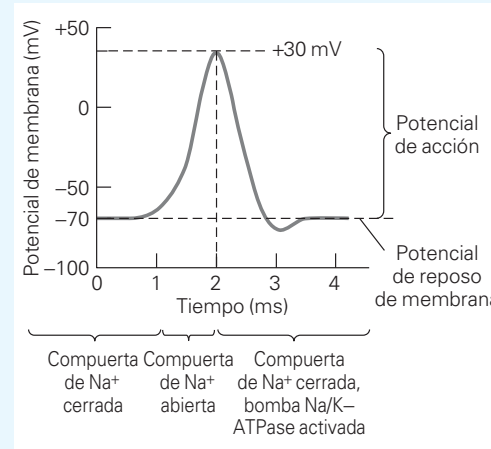
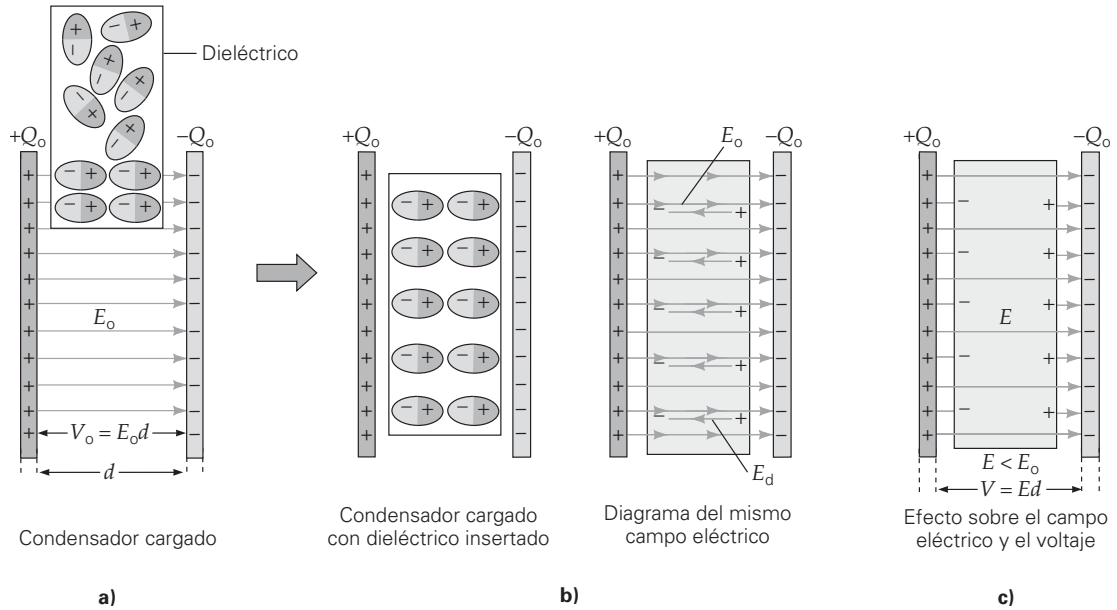


FIGURA 2 Cuando los canales de sodio se abren como compuertas y los iones de sodio se precipitan al interior de la celda, el potencial de membrana cambia rápidamente de su valor de reposo de -70 mV a cerca de $+30$ mV. El potencial de reposo se restaura (aproximadamente 4 ms después) mediante un proceso de "bombeo" de proteínas, que remueve químicamente el exceso de Na^+ después de que se cierran las compuertas de sodio (en 2 ms).

TABLA 16.2 Constantes dieléctricas para algunos materiales

Material	*Constante dieléctrica (κ)*	*Material*	*Constante dieléctrica (κ)*
Vacío	1.0000	Vidrio (rango)	3–7
Aire	1.00059	Vidrio Pirex	5.6
Papel	3.7	Baquelita	4.9
Polietileno	2.3	Aceite de silicio	2.6
Poliestireno	2.6	Agua	80
Teflón	2.1	Titanato de estroncio	233

La forma en que un dieléctrico afecta las propiedades eléctricas de un condensador se muestra en la figura 16.16. El condensador se carga plenamente (generando un campo $\vec{\mathbf{E}}_o$) y se desconecta de la batería, después de lo cual se inserta un dieléctrico (figura 16.16a). En el material dieléctrico, el trabajo es efectuado sobre dipolos molecu-



▲ **FIGURA 16.16 Los efectos de un dieléctrico sobre un condensador aislado** ***a)*** Un material dieléctrico con dipolos moleculares permanentes orientados al azar (o dipolos inducidos por el campo eléctrico) se inserta entre las placas de un condensador cargado aislado. Conforme se inserta el dieléctrico, el condensador tiende a jalarlo hacia adentro, efectuando así trabajo sobre él. (Observe las fuerzas de atracción entre las cargas de las placas y aquellas inducidas sobre las superficies dieléctricas.) ***b)*** Cuando el material está en el campo eléctrico del condensador, los dipolos se orientan a sí mismos con el campo, dando lugar a un campo eléctrico opuesto $\vec{\mathbf{E}}_d$. ***c)*** El campo dipolar cancela parcialmente el campo debido a las cargas de las placas. El efecto neto es una disminución tanto en el campo eléctrico como en el voltaje. Puesto que la carga almacenada permanece igual, aumenta la capacitancia.

PHYSLET®

Ilustración 26.3 Condensador con un dieléctrico

lares por el campo eléctrico existente, alineándolos con ese campo (figura 16.16b). (La polarización molecular puede ser permanente o temporalmente inducida por el campo eléctrico. En cualquier caso, el efecto es el mismo.) El trabajo también se efectúa sobre la placa dieléctrica en su conjunto, ya que las placas cargadas la jalan al espacio entre ellas.

El resultado es que el dieléctrico genera un campo eléctrico "inverso" ($\vec{\mathbf{E}}_d$ en la figura 16.16c) que cancela parcialmente el campo entre las placas. Esto significa que se reduce el campo *neto* $(\vec{\mathbf{E}})$ entre las placas y, por lo tanto, también el voltaje a través de las placas (ya que $V = Ed$). La constante dieléctrica κ del material se define como la razón del voltaje con el material en posición (V) al voltaje en vacío (V_o). Como V es proporcional a E, esta razón es la misma que la razón de campo eléctrico:

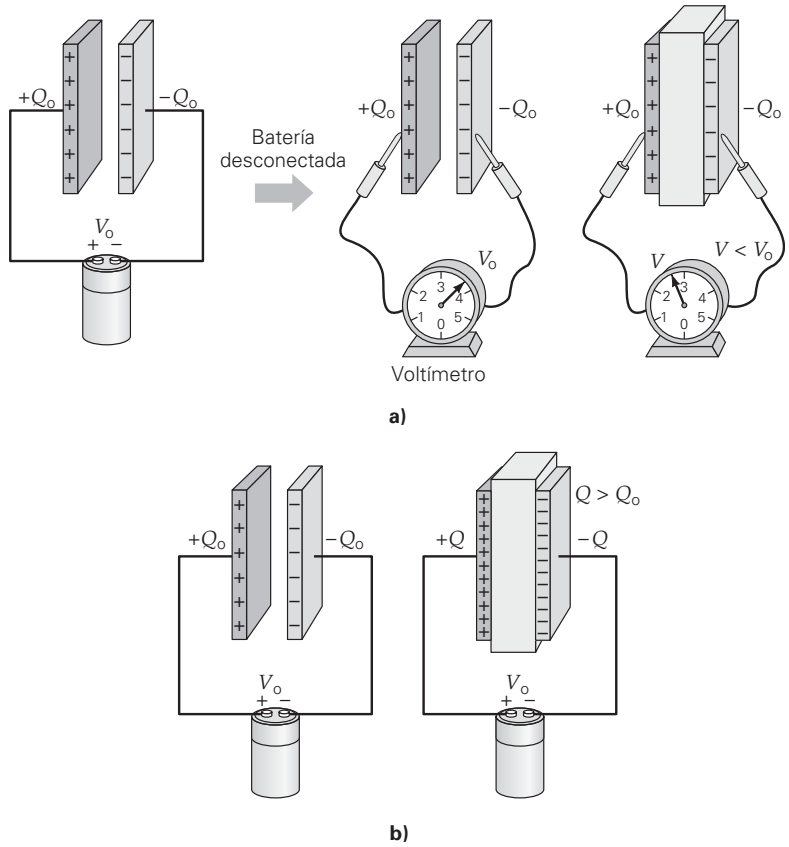
Nota: la ecuación 16.14 sólo es válida si la batería está desconectada.

$$\kappa = \frac{V_o}{V} = \frac{E_o}{E} \quad \textit{(sólo cuando es constante la carga del condensador)} \tag{16.14}$$

Observe que κ no tiene dimensiones y es mayor que 1, ya que $V < V_o$. De la ecuación 16.14, sabemos que una manera de determinar la constante dieléctrica es midiendo los dos voltajes. (Los voltímetros se estudian con detalle en el capítulo 18.) Como la batería estaba desconectada, y el condensador aislado, no se afecta la carga sobre las placas, Q_o. Puesto que $V = V_o/\kappa$, el valor de la capacitancia con el dieléctrico insertado es mayor que el valor en vacío por un factor de κ. En efecto, ahora se almacena la misma cantidad de carga a un menor voltaje, y el resultado es un incremento en capacitancia. Para entender este efecto, aplique la definición de capacitancia:

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{Q_o}{(V_o/\kappa)} = \kappa\left(\frac{Q_o}{V_o}\right) \quad \text{o} \quad C = \kappa C_o \tag{16.15}$$

De manera que al insertar un dieléctrico en un condensador aislado se obtiene una mayor capacitancia. Pero, ¿qué sucede con el almacenamiento de energía? Como no hay entrada de energía (se desconectó la batería) y el condensador efectúa trabajo so-



◀ **FIGURA 16.17 Dieléctricos y capacitancia** ***a)*** Un condensador de placas paralelas en aire (sin dieléctrico) se carga con una batería a una carga Q_o y un voltaje V_o (izquierda). Si se desconecta la batería y el potencial a través del condensador se mide con un voltímetro, se obtiene una lectura de V_o (centro). Pero si ahora se inserta un dieléctrico entre las placas del condensador, el voltaje cae a $V = V_o/\kappa$ (derecha), por lo disminuye que la energía almacenada. (¿Puede estimar la constante dieléctrica de las lecturas del voltaje?) ***b)*** Se carga un condensador como en el inciso *a*, pero se deja conectada la batería. Cuando se inserta un dieléctrico en el condensador, el voltaje se mantiene en V_o. (¿Por qué?) Sin embargo, la carga sobre las placas aumenta a $Q = \kappa Q_o$. Por lo tanto, ahora se almacena más energía en el condensador. En ambos casos, la capacitancia aumenta por un factor de κ.

bre el dieléctrico jalándolo a la región entre las placas, la energía almacenada *cae* por un factor de κ (▲figura 16.17a), como lo muestra la siguiente ecuación:

$$U_C = \frac{Q^2}{2C} = \frac{Q_o^2}{2\kappa C_o} = \frac{Q_o^2/2C_o}{\kappa} = \frac{U_o}{\kappa} < U_o \quad \textit{(batería desconectada)}$$

Sin embargo, ocurre una situación diferente si se inserta el dieléctrico *y la batería permanece conectada*. En este caso, se mantiene el voltaje original y la batería es capaz de suministrar (bombear) más carga y, por ende, efectuar trabajo (figura 16.17b). Como la batería efectúa trabajo adicional, esperamos que aumente la energía almacenada en el condensador. Con la batería aún conectada, la carga sobre las placas *aumenta* por un factor κ, o bien, $Q = \kappa Q_o$. De nuevo, aumenta la capacitancia, pero ahora debido a que se almacena más carga bajo el mismo voltaje. De la definición de capacitancia, el resultado es el mismo que el dado por la ecuación 16.15, ya que $C = Q/V = \kappa Q_o/V_o = \kappa(Q_o/V_o) = \kappa C_o$. Así,

> el efecto de un dieléctrico es incrementar la capacitancia por un factor κ independientemente de las condiciones bajo las cuales se inserte el dieléctrico.

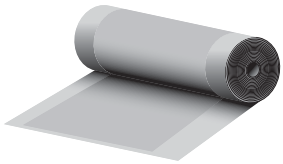
En el caso de un condensador mantenido a voltaje constante, aumenta el almacenamiento de energía del condensador a expensas de la batería. Para ver esto, calculemos la energía con el dieléctrico en posición bajo tales condiciones:

$$U_C = \tfrac{1}{2}CV^2 = \tfrac{1}{2}\kappa C_o V_o^2 = \kappa\left(\tfrac{1}{2}C_o V_o^2\right) = \kappa U_o > U_o \quad \textit{(batería conectada)}$$

Para un condensador de placas paralelas con un dieléctrico, la capacitancia se incrementa sobre su valor (en aire) en la ecuación 16.12, por un factor de κ:

$$C = \kappa C_o = \frac{\kappa \varepsilon_o A}{d} \quad \textit{(sólo placas paralelas)} \qquad (16.16)$$

Esta relación a veces se escribe como $C = \varepsilon A/d$, donde $\varepsilon = \kappa\varepsilon_o$ se llama **permisividad dieléctrica** del material, que siempre mayor es que ε_o. (¿Cómo se sabe esto?)



a)

b)

▲ **FIGURA 16.18** Condensadores en uso ***a)*** El material dieléctrico entre las placas del condensador permite que las placas se construyan de manera que queden muy cerca entre sí, aumentando la capacitancia. Además, las placas pueden enrollarse en un condensador compacto más práctico. ***b)*** Condensadores entre otros elementos de circuitos de una microcomputadora.

Una imagen del interior de un condensador cilíndrico típico y una variedad de condensadores reales se muestran en la ◂figura 16.18. Los cambios en capacitancia sirven para monitorear el movimiento en nuestro mundo tecnológico, como veremos en el siguiente ejemplo.

Ejemplo 16.9 ■ El condensador como un detector de movimiento: teclados de computadora

Considere un condensador (con dieléctrico) bajo la tecla de una computadora (▾figura 16.19). El condensador está conectado a una batería de 12.0 volts y tiene una separación normal de placas (sin oprimir) de 3.00 mm y una área de placa de 0.750 cm^2. *a)* ¿Cuál será la constante del dieléctrico que se requiere si la capacitancia es 1.10 pF? *b)* ¿Cuánta carga se almacena en las placas bajo condiciones normales? *c)* ¿Cuánta carga fluye sobre las placas (es decir, cuál es el cambio en sus cargas), si se comprimen hasta una separación de 2.00 mm?

Razonamiento. *a)* La capacitancia de placas llenas de aire puede encontrarse con la ecuación 16.12, y luego puede determinarse la constante dieléctrica con la ecuación 16.15. *b)* La carga resulta de la ecuación 16.9. *c)* Debe usarse la distancia de separación de placas comprimidas para volver a calcular la capacitancia. Entonces, la nueva carga se encuentra como en el inciso *b*.

Solución. Los datos son los siguientes:

Dado:
$V = 12.0\ \text{V}$
$d = 3.00\ \text{mm} = 3.00 \times 10^{-3}\ \text{m}$
$A = 0.750\ \text{cm}^2 = 7.50 \times 10^{-5}\ \text{m}^2$
$C = 1.10\ \text{pF} = 1.10 \times 10^{-12}\ \text{F}$
$d' = 2.00\ \text{mm} = 2.00 \times 10^{-3}\ \text{m}$

Encuentre:
a) κ (constante dieléctrica)
b) Q (carga inicial del condensador)
c) ΔQ (cambio en la carga del condensador)

a) De la ecuación 16.12, la capacitancia, si las placas estuvieran separadas por aire, sería

$$C_o = \frac{\varepsilon_o A}{d} = \frac{(8.85 \times 10^{-12}\ \text{C}^2/\text{N}\cdot\text{m}^2)(7.50 \times 10^{-5}\ \text{m}^2)}{3.00 \times 10^{-3}\ \text{m}} = 2.21 \times 10^{-13}\ \text{F}$$

Como el dieléctrico aumenta la capacitancia, su valor es

$$\kappa = \frac{C}{C_o} = \frac{1.10 \times 10^{-12}\ \text{F}}{2.21 \times 10^{-13}\ \text{F}} = 4.98$$

b) La carga inicial es entonces

$$Q = CV = (1.10 \times 10^{-12}\ \text{F})(12.0\ \text{V}) = 1.32 \times 10^{-11}\ \text{C}$$

c) Bajo condiciones de compresión, la capacitancia es

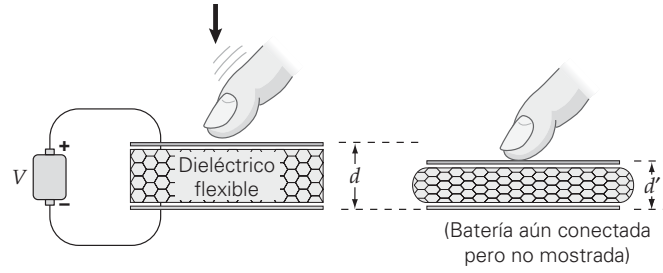
$$C' = \frac{\kappa\varepsilon_o A}{d'} = \frac{(4.98)(8.85 \times 10^{-12}\ \text{C}^2/\text{N}\cdot\text{m}^2)(7.50 \times 10^{-5}\ \text{m}^2)}{2.00 \times 10^{-3}\ \text{m}} = 1.65 \times 10^{-12}\ \text{F}$$

El voltaje permanece igual, $Q' = C'V = (1.65 \times 10^{-12}\ \text{F})(12.0\ \text{V}) = 1.98 \times 10^{-11}\ \text{C}$. Como aumentó la capacitancia, la carga se incrementó en

$$\Delta Q = Q' - Q = (1.98 \times 10^{-11}\ \text{C}) - (1.32 \times 10^{-11}\ \text{C}) = +6.60 \times 10^{-12}\ \text{C}$$

Al oprimir la tecla, una carga, cuya magnitud está relacionada con el desplazamiento, fluye al condensador dando una forma de medir eléctricamente el movimiento.

Ejercicio de refuerzo. En este ejemplo, suponga que la separación entre las placas se incrementó 1.00 mm del valor normal de 3.00 mm. ¿La carga fluirá hacia el condensador o desde éste? ¿Cuánta carga será la que fluya?



▶ **FIGURA 16.19** Condensadores en uso Los condensadores se utilizan para convertir movimiento en señales eléctricas que pueden medirse y analizarse usando una computadora. Conforme la distancia entre las placas cambia, también lo hace la capacitancia, lo cual causa un cambio en la carga sobre el condensador. Algunos teclados de computadora operan de esta manera, así como otros instrumentos, por ejemplo, los sismógrafos. (capítulo 13.) Véase el ejemplo 16.9.

16.5 Condensadores en serie y en paralelo

OBJETIVOS: *a*) Encontrar la capacitancia equivalente de condensadores conectados en serie y en paralelo, *b*) calcular las cargas, los voltajes y el almacenamiento de energía de condensadores individuales en configuraciones en serie y en paralelo y *c*) analizar redes de condensadores que incluyan arreglos tanto en serie como en paralelo.

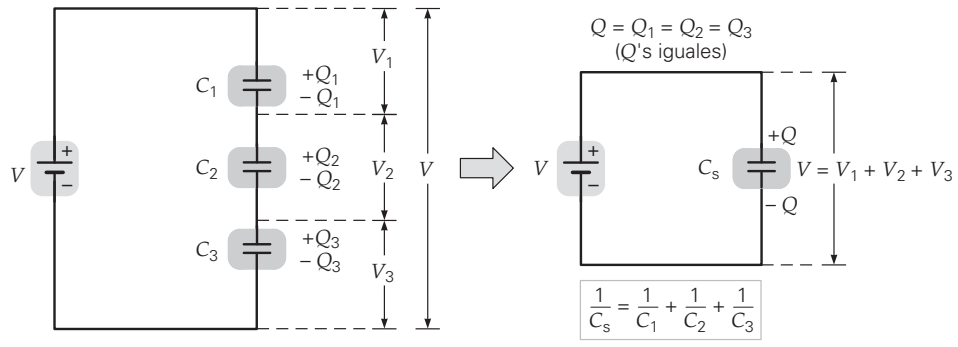
Los condensadores se conectan de dos formas básicas: *en serie* o *en paralelo*. En serie, los condensadores están conectados cabeza a cola (▼figura 16.20a). Cuando están conectados en paralelo, todos los conductores a un lado de los condensadores tienen una conexión común. (Piense que todas las "colas" están conectadas juntas y que todas las "cabezas" están también conectadas juntas; figura 16.20b.)

Nota: Para los llamados condensadores de placas paralelas con dieléctrico intercalado, no hay distinción de cabeza o cola entre los conductores. Algunos tipos de condensadores tienen lados particulares positivos y negativos, y por ende debe hacerse la distinción.

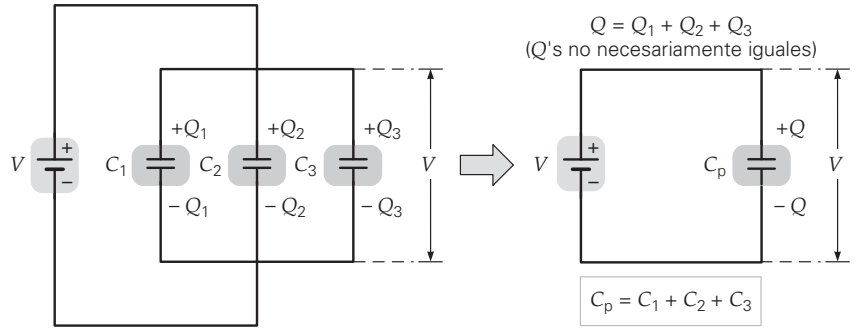
▼ **FIGURA 16.20 Condensadores en serie y en paralelo** ***a)*** Todos los condensadores conectados en serie tienen la misma carga, y la suma de las caídas de voltaje es igual al voltaje de la batería. La capacitancia total en serie es equivalente al valor de C_s. ***b)*** Cuando los condensadores están conectados en paralelo, las caídas de voltaje a través de los condensadores son las mismas, y la carga total es igual a la suma de las cargas sobre los condensadores individuales. La capacitancia total en paralelo es equivalente al valor de C_p. ***c)*** En una conexión en paralelo, pensar en las placas facilita ver por qué la carga total es la suma de las cargas individuales. En efecto, este arreglo representa un condensador con dos placas grandes.

PHYSLET®

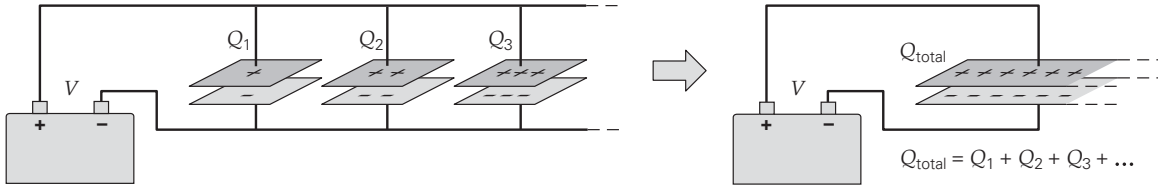
Ilustración 26.4 Vista microscópica de condensadores en serie y en paralelo



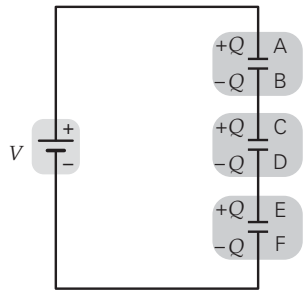
a) Condensadores en serie



b) Condensadores en paralelo



c) Condensadores en paralelo



▲ **FIGURA 16.21** Cargas sobre condensadores en serie
Las placas B y C juntas tenían carga neta cero al principio. Cuando la batería colocó $+Q$ en la placa A, se indujo la carga $-Q$ en B; entonces, C debió adquirir $+Q$ para que la combinación BC permaneciera neutral. Continuando de esta manera por el arreglo, vemos que todas las cargas deben de igual magnitud.

Condensadores en serie

Cuando los condensadores están conectados en serie, la carga Q debe ser la misma en todas las placas:

$$Q = Q_1 = Q_2 = Q_3 = \cdots$$

Para saber por qué esto es así, examine la ◂figura 16.21. Observe que sólo las placas A y F están realmente conectadas a la batería. Como las placas B y C están aisladas, la carga total sobre ellas siempre debe ser cero. Así, cuando la batería pone una carga de $+Q$ sobre la placa A, entonces $-Q$ se induce sobre B a expensas de la placa C, que adquiere una carga $+Q$. Esta carga a la vez induce $-Q$ sobre D, y así sucesivamente, hacia abajo por la línea.

Como hemos visto, la "caída de voltaje" es sólo otro nombre para el "cambio en energía potencial eléctrica por carga unitaria". Así, cuando sumamos todas las caídas de voltaje en condensadores en serie (véase la figura 16.20a), debemos obtener el mismo valor que el voltaje a través de las terminales de la batería. Así, la suma de las caídas de voltaje individuales a través de todos los condensadores es igual al voltaje de la fuente:

$$V = V_1 + V_2 + V_3 + \cdots$$

La **capacitancia equivalente en serie, C_s**, se define como el valor de un solo condensador que podría reemplazar la combinación en serie y almacenar la misma carga al mismo voltaje. Como la combinación de condensadores almacena una carga de Q a un voltaje de V, se infiere que $C_s = Q/V$ o $V = Q/C_s$. Sin embargo, los voltajes individuales están relacionados con las cargas individuales por $V_1 = Q/C_1$, $V_2 = Q/C_2$, $V_3 = Q/C_3$, y así sucesivamente.

Sustituyendo estas expresiones en la ecuación del voltaje, tenemos

$$\frac{Q}{C_s} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \frac{Q}{C_3} + \cdots$$

Cancelando las Q comunes,

$$\frac{1}{C_s} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \cdots \quad \textit{capacitancia equivalente en serie} \qquad (16.17)$$

Esta relación implica que el valor de C_s siempre es menor que la capacitancia más pequeña en la combinación en serie. Por ejemplo, pruebe la ecuación 16.17 con $C_1 = 1.0\ \mu F$ y $C_2 = 2.0\ \mu F$. Usted debería demostrar que $C_s = 0.67\ \mu F$, lo cual es menor que $1.0\ \mu F$ (la prueba general se le deja como ejercicio). Físicamente, el razonamiento es el siguiente: como todos los condensadores en serie tienen la misma carga, la carga almacenada por este arreglo es $Q = C_iV_i$ (donde el subíndice i se refiere a *cualquiera* de los condensadores individuales en la cadena). Como $V_i < V$, el arreglo en serie almacena menos carga que cualquier condensador individual conectado por sí mismo a la misma batería.

Tiene sentido que en serie la capacitancia más pequeña reciba el voltaje más grande. Un valor pequeño de C significa menos carga almacenada por volt. Para que la carga sobre todos los condensadores sea la misma, cuanto menor sea el valor de la capacitancia, mayor será la fracción del voltaje total requerido ($Q = CV$).

Condensadores en paralelo

Con un arreglo en paralelo (figura 16.20b), los voltajes a través de los condensadores son los mismos (¿por qué?), y cada voltaje individual es igual al de la batería:

$$V = V_1 = V_2 = V_3 = \cdots$$

La carga total es la suma de las cargas sobre cada condensador (figura 16.20c):

$$Q_{total} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \cdots$$

Esperamos que la capacitancia equivalente en paralelo sea mayor que la capacitancia más grande, porque se puede almacenar más carga por volt de esta manera que si cualquier condensador se conectara a la batería por sí solo. Las cargas individuales están dadas por $Q_1 = C_1V$, $Q_2 = C_2V$, y así sucesivamente. Un condensador con la **capacitancia equivalente en paralelo**, C_p, tendría esta misma carga total

que conectado a la batería, por lo que $C_p = Q_{total}/V$ o $Q_{total} = C_pV$. Sustituyendo esas expresiones en la ecuación anterior, tenemos

$$C_pV = C_1V + C_2V + C_3V + \cdots$$

y, cancelando la V común, obtenemos

$$C_p = C_1 + C_2 + C_3 + \cdots \quad \textit{capacitancia equivalente en paralelo} \qquad (16.18)$$

Así, en el caso en paralelo, la capacitancia equivalente C_p es la suma de las capacitancias individuales. En este caso, la capacitancia equivalente es mayor que la capacitancia individual más grande. Como los condensadores en paralelo tienen el mismo voltaje, la capacitancia más grande almacenará la mayor cantidad de carga. Como una comparación de condensadores en serie y en paralelo, considere el siguiente ejemplo.

Ejemplo 16.10 ■ Carga sin tarjeta de crédito: condensadores en serie y en paralelo

Dados dos condensadores, uno con una capacitancia de 2.50 μF y el otro de 5.00 μF, ¿cuáles serán las cargas en cada uno y la carga total almacenada si están conectados a través de una batería de 12.0 volts *a*) en serie y *b*) en paralelo?

Exploración 26.4 Capacitancia equivalente

Razonamiento. *a*) Los condensadores en serie tienen la misma carga. La ecuación 16.17 nos permite encontrar la capacitancia equivalente y, de ahí, la carga sobre cada condensador. *b*) Los condensadores en paralelo tienen el mismo voltaje; entonces, la carga de cada uno se puede determinar fácilmente, pues se conocen sus capacitancias individuales.

Solución. Tenemos lo siguiente:

Dado: $C_1 = 2.50\ \mu\text{F} = 2.50 \times 10^{-6}$ F
$C_2 = 5.00\ \mu\text{F} = 5.00 \times 10^{-6}$ F
$V = 12.0$ V

Encuentre: *a*) Q en cada condensador en serie y Q_{total} (carga total)
b) Q en cada condensador en paralelo y Q_{total} (carga total)

a) En serie, la capacitancia (equivalente) total es:

$$\frac{1}{C_s} = \frac{1}{2.50 \times 10^{-6}\ \text{F}} + \frac{1}{5.00 \times 10^{-6}\ \text{F}} = \frac{3}{5.00 \times 10^{-6}\ \text{F}}$$

por lo que

$$C_s = 1.67 \times 10^{-6}\ \text{F}$$

(Note que C_s es menor que la capacitancia más pequeña en la cadena en serie, como se esperaba.)

Como la carga sobre cada condensador es la misma en serie (y la misma que el total),

$$Q_{total} = Q_1 = Q_2 = C_sV = (1.67 \times 10^{-6}\ \text{F})(12.0\ \text{V}) = 2.00 \times 10^{-5}\ \text{C}$$

b) Aquí, usamos la relación de capacitancia paralela equivalente:

$$C_p = C_1 + C_2 = 2.50 \times 10^{-6}\ \text{F} + 5.00 \times 10^{-6}\ \text{F} = 7.50 \times 10^{-6}\ \text{F}$$

(Este resultado es razonable porque es mayor que el valor individual más grande en el arreglo paralelo.)

Por lo tanto,

$$Q_{total} = C_pV = (7.50 \times 10^{-6}\ \text{F})(12.0\ \text{V}) = 9.00 \times 10^{-5}\ \text{C}$$

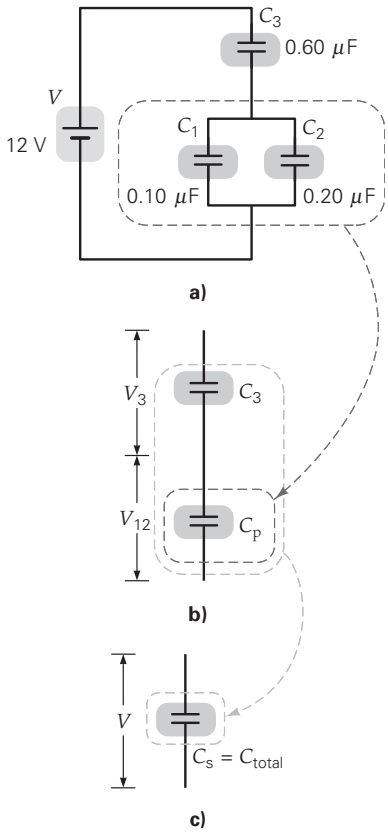
En paralelo, cada condensador tiene los 12.0 V completos a través de él; por lo tanto,

$$Q_1 = C_1V = (2.50 \times 10^{-6}\ \text{F})(12.0\ \text{V}) = 3.00 \times 10^{-5}\ \text{C}$$
$$Q_2 = C_2V = (5.00 \times 10^{-6}\ \text{F})(12.0\ \text{V}) = 6.00 \times 10^{-5}\ \text{C}$$

Como una doble revisión final, observe que la carga almacenada total es igual a la suma de las cargas sobre ambos condensadores.

Ejercicio de refuerzo. En este ejemplo, determine qué combinación, en serie o en paralelo, almacena más energía.

Los arreglos de condensadores típicamente implican conexiones tanto en serie como en paralelo (véase el siguiente ejemplo). En esta situación, usted simplifica el circuito, usando las expresiones para la capacitancia equivalente en paralelo y en serie, hasta que termina con una sola capacitancia equivalente total. Para encontrar los resultados para cada condensador individual, usted procede hacia atrás hasta que obtiene el arreglo original.



▲ **FIGURA 16.22 Reducción de circuito** Al combinar las capacitancias, la combinación de condensadores se reduce a una sola capacitancia equivalente. Véase el ejemplo 16.11.

Ejemplo 16.11 ■ Un paso a la vez: combinación de condensadores en serie y en paralelo

Tres condensadores están conectados en un circuito como se muestra en la ◂figura 16.22a. ¿Cuál es el voltaje a través de cada condensador?

Razonamiento. El voltaje a través de cada condensador podría encontrarse de $V = Q/C$, *si* se conoce la carga sobre cada condensador. La carga total sobre los condensadores se encuentra reduciendo la combinación serie-paralelo a una sola capacitancia equivalente. Dos de los condensadores están en paralelo. Su sola capacitancia equivalente (C_p) está en serie con el último condensador, un hecho que permite encontrar la capacitancia total. Procediendo hacia atrás podremos encontrar el voltaje a través de cada condensador.

Solución.

Dado: Valores de la capacitancia y el voltaje de la figura

Encuentre: V_1, V_2 y V_3 (voltajes a través de los condensadores)

Comenzando con la combinación en paralelo, tenemos

$$C_p = C_1 + C_2 = 0.10\ \mu\text{F} + 0.20\ \mu\text{F} = 0.30\ \mu\text{F}$$

Ahora el arreglo está parcialmente reducido, como se muestra en la figura 16.22b. A continuación, considerando C_p en serie con C_3, podemos encontrar la capacitancia equivalente total del arreglo original:

$$\frac{1}{C_s} = \frac{1}{C_3} + \frac{1}{C_p} = \frac{1}{0.60\ \mu\text{F}} + \frac{1}{0.30\ \mu\text{F}} = \frac{1}{0.60\ \mu\text{F}} + \frac{2}{0.60\ \mu\text{F}} = \frac{1}{0.20\ \mu\text{F}}$$

Por lo tanto,

$$C_s = 0.20\ \mu\text{F} = 2.0 \times 10^{-7}\ \text{F}$$

Ésta es la capacitancia equivalente total del arreglo (figura 16.22c). Tratando el problema como si fuera para un solo condensador, estimamos la carga sobre esa capacitancia equivalente:

$$Q = C_s V = (2.0 \times 10^{-7}\ \text{F})(12\ \text{V}) = 2.4 \times 10^{-6}\ \text{C}$$

Ésta es la carga sobre C_3 y C_p, ya que están en serie. Podemos usar esto para calcular el voltaje a través de C_3:

$$V_3 = \frac{Q}{C_3} = \frac{2.4 \times 10^{-6}\ \text{C}}{6.0 \times 10^{-7}\ \text{F}} = 4.0\ \text{V}$$

La suma de los voltajes a través de los condensadores es igual al voltaje a través de las terminales de la batería. Los voltajes a través de C_1 y C_2 son los mismos porque están en paralelo. Como el voltaje a través de C_1 (o C_2) más el voltaje a través de C_3 es igual al voltaje total (el voltaje de la batería), escribimos $V = V_{12} + V_3 = 12$ V. (Véase la figura 16.22a.) Aquí, V_{12} representa el voltaje a través de C_1 o de C_2. Despejando V_{12},

$$V_{12} = V - V_3 = 12\ \text{V} - 4.0\ \text{V} = 8.0\ \text{V}$$

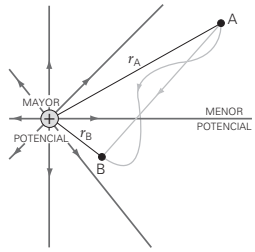
Note que C_p es menor que C_3. Como C_p y C_3 están en serie, se infiere que C_p (y por lo tanto C_1 y C_2) tienen la mayoría del voltaje.

Ejercicio de refuerzo. En este ejemplo, encuentre *a*) la carga almacenada en cada condensador y *b*) la energía almacenada en cada uno.

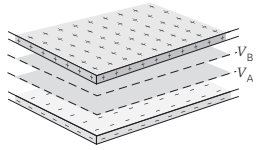
Repaso del capítulo

- Las **diferencia de potencial eléctrico** (o **voltaje**) entre dos puntos es el trabajo hecho por una carga unitaria positiva entre esos dos puntos, o la carga en energía potencial eléctrica por carga unitaria positiva. Expresada en forma de ecuación, esta relación es

$$\Delta V = \frac{\Delta U_e}{q_+} = \frac{W}{q_+} \tag{16.1}$$



- Las **superficies equipotenciales** (superficies de potencial eléctrico constante, también llamadas **equipotenciales**) son superficies sobre las cuales una carga tiene una energía potencial eléctrica constante. En todas partes esas superficies son perpendiculares al campo eléctrico.

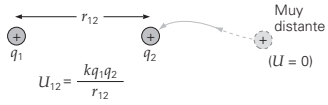


- La expresión para el **potencial eléctrico debido a una carga puntual** (eligiendo $V = 0$ en $r = \infty$) es

$$V = \frac{kq}{r} \tag{16.4}$$

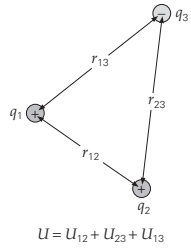
- La **energía potencial eléctrica para un par de cargas puntuales** está dada por (eligiendo $U = 0$ en $r = \infty$)

$$U_{12} = \frac{kq_1q_2}{r_{12}} \tag{16.5}$$



- La **energía potencial eléctrica de una configuración de más de dos cargas puntuales** está dada por una suma de términos de pares de cargas puntuales de la ecuación 16.5:

$$U_{\text{total}} = U_{12} + U_{23} + U_{13} + \cdots \tag{16.6}$$

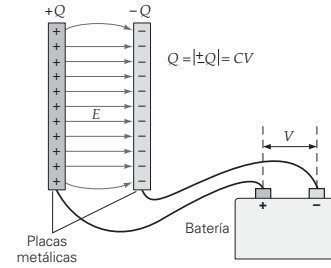


- El campo eléctrico está relacionado con qué rápidamente cambia el potencial eléctrico con la distancia. El campo eléctrico ($\vec{\mathbf{E}}$) señala en la dirección de la disminución más rápido en potencial eléctrico (V). La magnitud del campo eléctrico (E) es la razón de cambio del potencial con la distancia, o bien,

$$E = \left|\frac{\Delta V}{\Delta x}\right|_{\text{máx}} \tag{16.8}$$

- El **electrón volt (eV)** es la energía cinética ganada por un electrón o un protón acelerado a través de una diferencia de potencial de 1 volt.
- Un **condensador** es cualquier arreglo de dos placas metálicas. Los condensadores almacenan carga sobre sus placas y, por ello, energía eléctrica.
- La **capacitancia** es una medida cuantitativa de qué tan efectivo es un condensador en almacenar carga. Se define como la magnitud de la carga almacenada en cualquier placa por volt, o bien,

$$Q = CV \quad \text{o} \quad C = \frac{Q}{V} \tag{16.9}$$



- La **capacitancia de un condensador de placas paralelas** (en aire) es

$$C = \frac{\varepsilon_o A}{d} \tag{16.12}$$

donde $\varepsilon_o = 8.85 \times 10^{-12}\ \text{C}^2/(\text{N} \cdot \text{m}^2)$ se llama **permisividad del espacio libre**.

- La **energía almacenada en un condensador** depende de la capacitancia del condensador y de la cantidad de carga que el condensador almacena (o, de manera equivalente, el voltaje a través de sus placas). Hay tres expresiones equivalentes para esta energía:

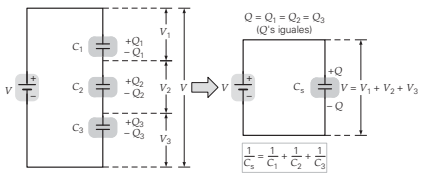
$$U_C = \tfrac{1}{2}QV = \frac{Q^2}{2C} = \tfrac{1}{2}CV^2 \tag{16.13}$$

- Un **dieléctrico** es un material no conductor que incrementa el valor de la capacitancia.
- La **constante dieléctrica κ** describe el efecto de un dieléctrico sobre la capacitancia. Un dieléctrico aumenta la capacitancia del condensador sobre su valor con aire entre las placas, por un factor de κ

$$C = \kappa C_o \tag{16.15}$$

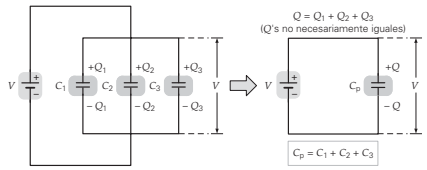
- Los condensadores conectados en serie son equivalentes a un condensador, con una capacitancia llamada **capacitancia equivalente en serie C_s**. En serie, todos los condensadores tienen la misma carga. La capacitancia equivalente en serie es

$$\frac{1}{C_s} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \cdots \tag{16.17}$$



- Cuando los condensadores están conectados en paralelo, pueden considerarse equivalentes a un condensador, con una capacitancia llamada **capacitancia equivalente en paralelo** C_p. En paralelo, todos los condensadores tienen el mismo voltaje. La capacitancia equivalente en paralelo está dada por

$$C_p = C_1 + C_2 + C_3 + \cdots \tag{16.18}$$



Ejercicios

Los ejercicios designados **OM** *son preguntas de opción múltiple; los* **PC** *son preguntas conceptuales; y los* **EI** *son ejercicios integrados. A lo largo del texto, muchas secciones de ejercicios incluirán ejercicios "apareados". Estos pares de ejercicios, que se identifican con números subrayados, pretenden ayudar al lector a resolver problemas y aprender. El primer ejercicio de cada pareja (el de número par) se resuelve en la Guía de estudio, que puede consultarse si se necesita ayuda para resolverlo. El segundo ejercicio (de número impar) es similar, y su respuesta se da al final del libro.*

16.1 Energía potencial eléctrica y diferencia de potencial eléctrico

1. **OM** La unidad SI de la diferencia de potencial eléctrico es *a*) el joule, *b*) el newton por coulomb, *c*) el newton-metro o *d*) el joule por coulomb.

2. **OM** ¿Cómo cambia la energía potencial electrostática de dos cargas puntuales positivas cuando se triplica la distancia entre ellas? *a*) Se reduce a un tercio de su valor original, *b*) se reduce a un noveno de su valor original, *c*) no cambia o *d*) se triplica su valor original.

3. **OM** Un electrón se mueve de la placa positiva a la negativa de un arreglo de placas paralelas cargadas. ¿Cómo se compara el signo del cambio en *d* de su energía potencial electrostática, con el signo del cambio en el potencial electrostático que experimenta: *a*) ambos son positivos, *b*) el cambio de energía es positivo, el cambio de potencial es negativo, *c*) el cambio de energía es negativo, el cambio de potencial es positivo o *d*) ambos son negativos?

4. **PC** ¿Cuál es la diferencia *a*) entre energía potencial electrostática y potencial eléctrico y *b*) entre diferencia de potencial eléctrico y voltaje?

5. **PC** Cuando un protón se acerca a otro protón fijo, ¿qué sucede *a*) a la energía cinética del protón que se aproxima, *b*) a la energía potencial eléctrica del sistema y *c*) a la energía total del sistema?

6. **PC** Utilizando el lenguaje de potencial y energía eléctricos (no fuerzas), explique por qué las cargas positivas aceleran conforme se aproximan a las cargas negativas.

7. **PC** Se libera un electrón en una región donde el potencial eléctrico disminuye a la izquierda. ¿De qué forma se moverá el electrón? Explique.

8. **PC** Se libera un electrón en una región donde el potencial eléctrico es constante. ¿De qué forma acelerará el electrón?

9. **PC** Si dos localidades están al mismo potencial, ¿cuánto trabajo se requiere para mover una carga de la primera localidad a la segunda? Explique.

10. ● Un par de placas paralelas están cargadas por una batería de 12 V. ¿Cuánto trabajo se requiere para mover una partícula con una carga de $-4.0\ \mu$C de la placa positiva a la negativa?

11. ● Si se requieren $+1.6 \times 10^{-5}$ J para mover una partícula con carga positiva entre dos placas paralelas cargadas, *a*) ¿cuál será la magnitud de la carga si las placas están conectadas a una batería de 6.0 V? *b*) Se movió ésta de la placa negativa a la positiva, o de la placa positiva a la negativa?

12. ● ¿Cuáles son la magnitud y dirección del campo eléctrico entre las dos placas paralelas cargadas en el ejercicio 11, si las placas están 4.0 mm separadas?

13. ● En una máquina dental de rayos X, un haz de electrones se acelera mediante una diferencia de potencial de 10 kV. Al final de la aceleración, ¿cuánta energía cinética tiene cada electrón si todos partieron del reposo?

14. ● Un electrón es acelerado por un campo eléctrico uniforme (1000 V/m) que señala verticalmente hacia arriba. Use las leyes de Newton para determinar la velocidad del electrón después que éste se mueve 0.10 cm desde el reposo.

15. ● *a*) Repita el ejercicio 14, pero encuentre la rapidez usando métodos de energía. Obtenga la dirección en que se está moviendo el electrón, considerando cambios de energía potencial eléctrica. *b*) ¿El electrón gana o pierde energía potencial?

16. **EI** ● Considere dos puntos a diferentes distancias de una carga puntual positiva. *a*) El punto más cercano a la carga tiene un potencial 1) mayor, 2) igual o 3) menor que el punto más alejado de la carga. ¿Por qué? *b*) ¿Cuál es la diferencia de potencial entre dos puntos a 20 y 40 cm de una carga de 5.5 μC?

17. **EI** ●● *a*) A un tercio de la distancia original desde una carga puntual positiva, ¿por qué factor cambia el potencial eléctrico? 1) 1/3, 2) 3, 3) 1/9 o 4) 9. ¿Por qué? *b*) ¿Qué tan lejos de una carga de +1.0 μC está un punto con un potencial eléctrico de 10 kV? *c*) ¿Qué cambio en potencial ocurriría si el punto se moviera a tres veces esa distancia?

18. **EI** ●● En el modelo de Bohr del átomo de hidrógeno, el electrón puede existir sólo en órbitas circulares de ciertos radios alrededor de un protón. *a*) ¿Una órbita mayor tendrá un potencial eléctrico 1) mayor, 2) igual o 3) menor que una órbita más pequeña? ¿Por qué? *b*) Determine la diferencia de potencial entre dos órbitas de radios 0.21 y 0.48 nm.

19. ●● En el ejercicio 18, ¿cuánto cambia la energía potencial del átomo si el electrón va *a*) de la órbita inferior a la superior, *b*) de la órbita superior a la inferior y *c*) de la órbita mayor a una distancia muy grande?

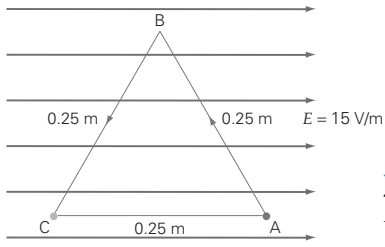
20. ●● ¿Cuánto trabajo se requiere para separar completamente dos cargas (cada una de −1.4 μC) y dejarlas en reposo, si inicialmente estaban a 8.00 mm de distancia?

21. ●● En el ejercicio 20, si las dos cargas son liberadas en su distancia de separación inicial, ¿cuánta energía cinética tendría cada una cuando ellas estén muy distantes una de otra?

22. ●● Toma +6.0 J de trabajo mover dos cargas desde una distancia grande a 1.0 cm una de otra. Si las cargas tienen la misma magnitud, *a*) ¿qué grande es cada carga y *b*) qué se puede decir acerca de sus signos?

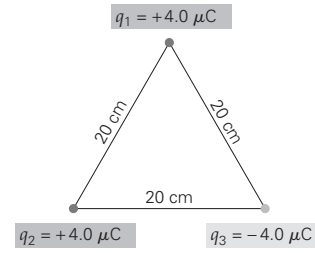
23. ●● Una carga de +2.0 μC está inicialmente a 0.20 m de una carga fija de −5.0 μC y luego se mueve a una posición a 0.50 m de la carga fija. *a*) ¿Qué trabajo se requirió para mover la carga? *b*) ¿Depende el trabajo de la trayectoria sobre la cual se movió la carga?

24. ●● Se traslada un electrón del punto A al punto B y luego al punto C a lo largo de dos lados de un triángulo equilátero, cuyos lados tienen longitud de 0.25 m (▼figura 16.23). Si el campo eléctrico horizontal es de 15 V/m, *a*) ¿cuál es la magnitud del trabajo requerido? *b*) ¿Cuál es la diferencia de potencial entre los puntos A y C? *c*) ¿Qué punto está a un potencial mayor?



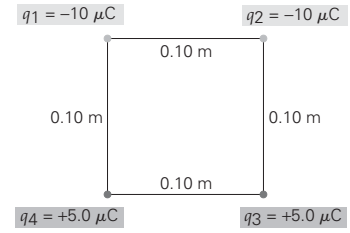
◀ **FIGURA 16.23 Trabajo y energía** Véase el ejercicio 24.

25. ●● Calcule la energía necesaria para juntar las cargas (desde una distancia muy grande) en la configuración mostrada en la ▼figura 16.24.



◀ **FIGURA 16.24 Un triángulo de carga** Véanse los ejercicios 25 y 27.

26. ●● Calcule la energía necesaria para juntar las cargas (desde una distancia muy grande) en la configuración mostrada en la ▼figura 16.25.

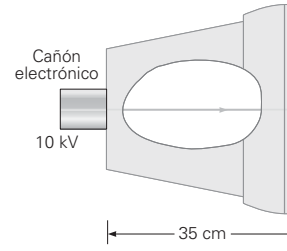


◀ **FIGURA 16.25 Un rectángulo de carga** Véanse los ejercicios 26 y 28.

27. ●●● ¿Cuál es el valor del potencial eléctrico *a*) en el centro del triángulo y *b*) a medio punto entre q_2 y q_3 en la figura 16.24?

28. ●●● ¿Cuál es valor del potencial eléctrico en *a*) el centro del cuadrado y *b*) en un punto a la mitad entre q_2 y q_4 en la figura 16.25?

29. **EI** ●●● En el monitor de una computadora, los electrones se aceleran desde el reposo a través de una diferencia de potencial en un arreglo de "cañón electrónico" (▼figura 16.26). *a*) ¿El lado izquierdo del cañón debería estar a un potencial 1) mayor, 2) igual o 3) menor que el lado derecho? ¿Por qué? *b*) Si la diferencia de potencial en el cañón es de 5.0 kV, ¿cuál será la "velocidad inicial" de los electrones que salen del cañón? *c*) Si el cañón está dirigido a una pantalla a 35 cm, ¿qué tiempo tomará a los electrones llegar a la pantalla?



◀ **FIGURA 16.26 Rapidez del electrón** Véase el ejercicio 29.

16.2 Superficies equipotenciales y el campo eléctrico

30. **OM** En una superficie equipotencial *a*) el potencial eléctrico es constante, *b*) el campo eléctrico es cero, *c*) el potencial eléctrico es cero, *d*) debe haber iguales cantidades de carga negativa y positiva.

31. **OM** Las superficies equipotenciales son *a*) paralelas al campo eléctrico, *b*) perpendiculares al campo eléctrico o *c*) forman cualquier ángulo con respecto al campo eléctrico.

32. **OM** Un electrón se mueve de una superficie equipotencial de +5.0 V a una de +10.0 V. En general, se mueve en una dirección *a*) paralela al campo eléctrico, *b*) opuesta al campo eléctrico, *c*) en la misma dirección que el campo eléctrico.

33. **PC** Esboce el mapa topográfico que esperaría usted al alejarse del mar caminando por una playa uniforme con suave pendiente ascendente. Rotule las equipotenciales gravitacionales respecto a sus alturas relativas y potenciales. Muestre cómo predecir, a partir del mapa, en qué dirección acelerará una pelota si se encuentra inicialmente a cierta distancia del agua.

34. **PC** Explique por qué dos superficies equipotenciales no pueden intersecarse.

35. **PC** Suponga que usted comienza con una carga en reposo sobre una superficie equipotencial, la mueve fuera de la superficie, luego la regresa a la superficie y, finalmente, la lleva al reposo. ¿Cuánto trabajo requirió hacer esto? Explíquelo.

36. **PC** ¿Qué forma geométrica tienen las superficies equipotenciales entre dos placas paralelas cargadas?

37. **PC** *a*) ¿Cuál es la forma aproximada de las superficies equipotenciales dentro de la membrana de la celda de un axón? (Véase la figura 1, p. 552.) *b*) Bajo condiciones de potencial en reposo, ¿dónde está la región de máximo potencial eléctrico dentro de la membrana? *c*) ¿Qué puede decir respecto a las condiciones durante polaridad inversa?

38. **PC** Cerca de una carga puntual positiva fija, si usted va de una superficie equipotencial a otra con un menor radio, *a*) ¿qué le pasa al valor del potencial? *b*) ¿Cuál fue su dirección general con respecto al campo eléctrico?

39. **PC** *a*) Si un protón se acelera a partir del reposo mediante una diferencia de potencial de 1 millón de volts, ¿cuánta energía cinética gana? *b*) ¿Cómo cambiaría su respuesta al inciso *a* si la partícula acelerada tuviera el doble de carga del protón (pero igual signo) y cuatro veces su masa?

40. **PC** *a*) ¿El campo eléctrico en un punto puede ser cero mientras hay un potencial eléctrico diferente de cero en ese punto? *b*) ¿El potencial eléctrico en un punto puede ser cero mientras hay un campo eléctrico diferente de cero en ese punto? Explique su respuesta. Si la respuesta a cualquiera de los incisos es sí, dé un ejemplo.

41. ● Para una carga puntual de +3.50 μC, ¿cuál será el radio de la superficie equipotencial cuyo potencial es de 2.50 kV?

42. ● Un campo eléctrico uniforme de 10 kV/m señala verticalmente hacia arriba. ¿Qué tan separados están los planos equipotenciales que difieren en 100 V?

43. ● En el ejercicio 42, si el suelo tiene potencial cero, ¿qué tan arriba del suelo estará la superficie equipotencial correspondiente a 7.0 kV?

44. ● Determine el potencial a 2.5 mm de la placa negativa de un par de placas paralelas separadas 10 mm y conectadas a una batería de 24 V.

45. ● Con relación a la placa positiva del ejercicio 44, ¿dónde está el punto con un potencial de 20 V?

46. ● Si el radio de la superficie equipotencial de la carga puntual está a 14.3 m a un potencial de 2.20 kV, ¿cuál será la magnitud de la carga puntual que genera el potencial?

47. **EI** ● *a*) La forma de una superficie equipotencial a cierta distancia de una carga puntual consiste en 1) esferas concéntricas, 2) cilindros concéntricos o 3) planos. ¿Por qué? *b*) Calcule la cantidad de trabajo (en eV) que tomaría mover un electrón de 12.6 a 14.3 m desde una carga puntual de +3.50 μC.

48. ● La diferencia de potencial implicada en la descarga de un relámpago puede ser hasta de 100 MV (1 millón de volts). ¿Cuál sería la ganancia de energía cinética de un electrón después de moverse a través de esta diferencia de potencial? Dé su respuesta en tanto en eV como en joules. (Suponga que no hay colisiones.)

49. ● En un acelerador lineal Van de Graaff típico, los protones se aceleran a través de una diferencia de potencial de 20 MV. ¿Cuál será su energía cinética si parten desde el reposo? Dé su respuesta en *a*) eV, *b*) keV, *c*) MeV, *d*) GeV y *e*) joules.

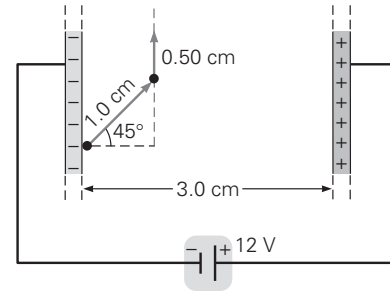
50. ● En el ejercicio 49, ¿cómo cambian sus respuestas si es una partícula alfa doblemente cargada (+2e) la que se acelera? (Recuerde que una partícula alfa consiste en dos neutrones y dos protones.)

51. ●● En los ejercicios 49 y 50, calcule la rapidez del protón y la partícula alfa al ser acelerados.

52. ●● Calcule el voltaje requerido para acelerar un haz de protones inicialmente en reposo, y calcule su rapidez si tienen una energía cinética de *a*) 3.5 eV, *b*) 4.1 keV y *c*) 8.0×10^{-16} J.

53. ●● Repita el cálculo en el ejercicio 52 para electrones en vez de protones.

54. ●●● Dos grandes placas paralelas están separadas 3.0 cm y conectadas a una batería de 12 V. Comenzando en la placa negativa y moviéndose 1.0 cm hacia la placa positiva según un ángulo de 45° (▼figura 16.27), *a*) ¿qué valor



▲ **FIGURA 16.27 Alcanzar nuestro potencial** Véanse los ejercicios 54 y 55.

de potencial se alcanza, suponiendo que la placa negativa se define con un potencial cero? *b*) ¿Cuál sería el valor del potencial si luego se moviera 0.50 cm paralelo a las placas?

55. ●●● Considere un punto a medio camino entre las dos grandes placas cargadas en la figura 16.27. Calcule el cambio en potencial eléctrico, si desde ahí usted se moviera *a*) 1.0 mm hacia la placa positiva, *b*) 1.0 mm hacia la placa negativa y *c*) 1.0 mm en forma paralela a ambas placas.

56. ●●● Utilizando los resultados del ejercicio 55, determine el campo eléctrico (dirección y magnitud) en un punto a la mitad del camino entre las placas.

16.3 Capacitancia

57. OM Un condensador se conecta primero a una batería de 6.0 V y luego se desconecta para conectarse a otra de 12.0 V. ¿Su capacitancia: *a*) aumenta, *b*) disminuye o *c*) permanece constante?

58. OM Un condensador se conecta primero a una batería de 6.0 V y luego se desconecta para conectarse a otra de 12.0 V. ¿Cómo cambia la carga en una de sus placas: *a*) aumenta, *b*) disminuye o *c*) permanece constante?

59. OM Un condensador se conecta primero a una batería de 6.0 V y luego se desconecta para conectarse a otra de 12.0 V. ¿Por cuánto cambia la intensidad del campo eléctrico entre sus placas: *a*) dos veces, *b*) cuatro veces o *c*) permanece constante?

60. OM La distancia entre las placas de un condensador se reduce a la mitad. ¿Por qué factor cambia su capacitancia: *a*) disminuye a la mitad, *b*) se reduce a una cuarta parte de su valor original, *c*) se duplica o *d*) se cuadruplica?

61. OM Si el área de las placas de un condensador se reduce, ¿cómo ajustaría la distancia entre esas placas para mantener constante la capacitancia: *a*) aumentándola, *b*) reduciéndola o *c*) cambiar la distancia no compensa el cambio en el área de las placas?

62. PC Si las placas de un condensador de placas paralelas aislado se acercan entre sí, ¿la energía almacenada aumenta, disminuye o permanece igual? Explíquelo.

63. PC Si la diferencia de potencial a través de un condensador se duplica, ¿qué sucede a *a*) la carga sobre el condensador y *b*) a la energía almacenada en el condensador?

64. PC Un condensador está conectado a una batería de 12 V. Si la separación de las placas se triplica y el condensador permanece conectado a la batería, ¿en factor cambia la carga sobre el condensador?

65. ● ¿Cuánta carga fluye por una batería de 12 V cuando se conecta un condensador de 2.0 μF entre sus terminales?

66. ● Un condensador de placas paralelas tiene una área de placa de 0.50 m^2 y una separación de placas de 2.0 mm. ¿Cuál será su capacitancia?

67. ● ¿Qué separación entre placas se requiere para un condensador de placas paralelas que tenga una capacitancia de 5.0×10^{-9} F, si el área de la placa es de 0.40 m^2?

68. **EI** ● *a*) Para un condensador de placas paralelas, una área mayor de placa resulta en una capacitancia 1) mayor, 2) igual o 3) menor. ¿Por qué? *b*) Un condensador de placas paralelas de 2.5×10^{-9} F tiene una área de placa de 0.425 m^2. Si se duplica la capacitancia, ¿cuál será el área requerida de placa?

69. ●● Una batería de 12.0 V se conecta a un condensador de placas paralelas con área de placa de 0.20 m^2 y una separación de placas de 5.0 mm. *a*) ¿Cuál es la carga resultante sobre el condensador? *b*) ¿Cuánta energía se almacena en el condensador?

70. ●● Si la separación de las placas del condensador en el ejercicio 69 cambió a 10 mm después que el condensador se desconectó de la batería, ¿cómo cambian sus respuestas a ese ejercicio?

71. ●●● Los condensadores modernos son capaces de almacenar muchas veces la energía de los antiguos. Un condensador así, con una capacitancia de 1.0 F, es capaz de encender una pequeña bombilla de luz de 0.50 W a plena potencia durante 5.0 s antes de que se apague. ¿Cuál es el voltaje terminal de la batería que cargó el condensador?

72. ●●● Un condensador de 1.50 F se conecta a una batería de 12.0 V durante un tiempo prolongado, y luego se desconecta. El condensador pone en funcionamiento un motor de juguete de 1.00 W durante 2.00 s. Después de este tiempo, *a*) ¿por cuánto disminuyó la energía almacenada en el condensador. *b*) ¿Cuál es el voltaje a través de las placas? *c*) ¿Cuánta carga se almacena en el condensador? *d*) ¿Por cuánto tiempo más podría el condensador hacer funcionar el motor, suponiendo que éste opera a toda potencia hasta el final?

73. ●●● Dos placas paralelas tienen un valor de capacitancia de 0.17 μF cuando están separadas 1.5 mm. Están conectadas de forma permanente a un suministro de potencia de 100 V. Si las placas se separan una distancia de 4.5 mm, *a*) ¿cuál sería el campo eléctrico entre ellas? *b*) ¿Por cuánto cambiaría la carga del condensador? *c*) ¿Por cuánto cambiaría su energía almacenada? *d*) Repita estos cálculos suponiendo que el suministro de potencia se desconecta antes de separar las placas.

16.4 Dieléctricos

74. OM Si se pone un dieléctrico en un condensador cargado de placas paralelas que no está conectado a una batería, *a*) disminuye la capacitancia, *b*) disminuye el voltaje, *c*) aumenta la carga o *d*) causa una descarga porque el dieléctrico es un conductor.

75. OM Un condensador de placas paralelas se conecta a una batería. Si un dieléctrico se inserta entre las placas, *a*) la capacitancia disminuye, *b*) el voltaje aumenta, *c*) el voltaje decrece o *d*) la carga aumenta.

76. OM Un condensador de placas paralelas se conecta a una batería y luego se desconecta. Si entonces se inserta un dieléctrico entre las placas, ¿qué sucede a la carga de éstas? *a*) La carga disminuye, *b*) la carga aumenta o *c*) la carga permanece constante.

77. PC Dé varias razones por las que un conductor no sería una buena opción como dieléctrico para un condensador.

78. PC Un condensador de placas paralelas está conectado a una batería. Si un dieléctrico se inserta entre las placas, ¿qué sucede *a*) a la capacitancia y *b*) al voltaje?

79. **PC** Explique claramente por qué el campo eléctrico entre dos placas paralelas de un condensador disminuye cuando un dieléctrico se inserta, si el condensador no está conectado a un suministro de potencia, pero permanece constante cuando está conectado a un suministro de potencia.

80. ● Un condensador tiene una capacitancia de 50 pF, que aumenta a 150 pF cuando un material dieléctrico se inserta entre sus placas. ¿Cuál será la constante dieléctrica del material?

81. ● Un condensador de 50 pF se sumerge en aceite silicónico ($\kappa = 2.6$). Cuando el condensador está conectado a una batería de 24 V, ¿cuál será la carga sobre el condensador y la cantidad de energía almacenada?

82. ●● El dieléctrico de un condensador de placas paralelas se construye de vidrio que llena completamente el volumen entre las placas. El área de cada placa es de 0.50 m^2. *a*) ¿Qué espesor debe tener el vidrio para que la capacitancia sea de 0.10 μF? *b*) ¿Cuál es la carga sobre el condensador si éste se conecta a una batería de 12 V?

83. ●●● Un condensador de placas paralelas tiene una capacitancia de 1.5 μF con aire entre las placas. El condensador está conectado a una batería de 12 V y se carga. Luego se retira la batería. Cuando un dieléctrico se coloca entre las placas, se mide una diferencia de potencial de 5.0 V a través de las placas. *a*) ¿Cuál será la constante dieléctrica del material? *b*) La energía almacenada en el condensador aumentó, disminuyó o permaneció igual? *c*) ¿Cuánto cambió la energía almacenada en este condensador cuando se insertó el dieléctrico?

84. **EI** ●●● Un condensador de placas paralelas lleno de aire tiene placas rectangulares que miden 6.0 × 8.0 cm. Está conectado a una batería de 12 V. Mientras la batería permanece conectada, se inserta una hoja de Teflón de 1.5 mm de grosor ($\kappa = 2.1$), de forma que llene por completo el espacio entre las placas. *a*) Mientras se insertaba el dieléctrico, 1) la carga fluía hacia el condensador, 2) la carga fluía fuera del condensador, 3) no fluía carga. *b*) Determine el cambio en la carga que almacena este condensador como resultado de la inserción del dieléctrico.

16.5 Condensadores en serie y en paralelo

85. **OM** Los condensadores en serie tienen el mismo *a*) voltaje, *b*) carga o *c*) almacenamiento de energía.

86. **OM** Los condensadores en paralelo tienen el mismo *a*) voltaje, *b*) carga o *c*) almacenamiento de energía.

87. **OM** Los condensadores 1, 2 y 3 tienen el mismo valor de capacitancia C. Los condensadores 1 y 2 están en serie y su combinación está en paralelo con el 3. ¿Cuál será su capacitancia efectiva total? *a*) C, *b*) $1.5C$, *c*) $3C$ o *d*) $C/3$.

88. **PC** ¿Bajo qué condiciones dos condensadores en serie tendrían el mismo voltaje?

89. **PC** ¿Bajo qué condiciones dos condensadores en paralelo tendrían la misma carga?

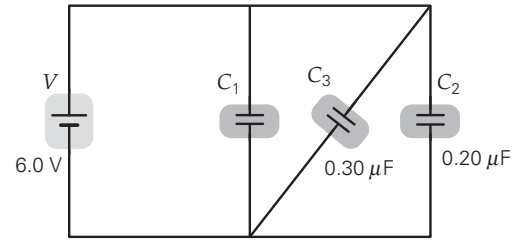
90. **PC** Si usted tiene dos condensadores, ¿cómo debería conectarlos para obtener *a*) una capacitancia equivalente máxima y *b*) una capacitancia equivalente mínima?

91. **PC** Usted tiene N (un número par ≥ 2) condensadores idénticos, cada uno con una capacitancia de C. En términos de N y C, ¿cuál es su capacitancia efectiva total si *a*) están conectados en serie, *b*) están conectados en paralelo, *c*) dos mitades ($N/2$) están conectadas en serie y estos dos conjuntos están conectados en paralelo?

92. ● ¿Cuál es la capacitancia equivalente de dos condensadores con capacitancias de 0.40 y 0.60 μF cuando están conectados *a*) en serie y *b*) en paralelo?

93. **EI** ● *a*) Dos condensadores pueden conectarse a una batería en combinación en serie o en paralelo. La combinación en paralelo extraerá 1) más, 2) igual o 3) menos energía de una batería que la combinación en serie. ¿Por qué? *b*) Cuando una combinación en serie de dos condensadores descargados se conecta a una batería de 12 V, se extraen 173 μJ de energía de la batería. Si uno de los condensadores tiene una capacitancia de 4.0 μF, ¿cuál será la capacitancia del otro?

94. ●● Para el arreglo de tres condensadores en la ▼figura 16.28, ¿qué valor de C_1 dará una capacitancia equivalente total de 1.7 μF?



▲ **FIGURA 16.28 Una tríada de condensador**
Véanse ejercicios 94 y 98.

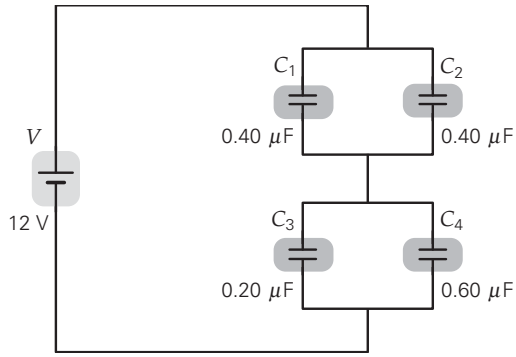
95. **EI** ●● *a*) Tres condensadores de igual capacitancia se conectan en paralelo a una batería, y juntos extraen una cierta cantidad de carga Q de la batería. ¿La carga en cada condensador será 1) Q, 2) $3Q$ o 3) $Q/3$? *b*) Tres condensadores de 0.25 μF cada uno están conectados en paralelo a una batería de 12 V. ¿Cuál será la carga en cada condensador? *c*) ¿Cuánta carga se extrae de la batería?

96. **EI** ●● *a*) Si le dan tres condensadores idénticos, usted puede obtener 1) tres, 2) cinco o 3) siete valores diferentes de capacitancia. *b*) Si los tres condensadores tienen cada uno una capacitancia de 1.0 μF, ¿cuáles son los valores diferentes de capacitancia equivalente?

97. ●● ¿Cuáles son las capacitancias máxima y mínima equivalentes que se pueden obtener combinando tres condensadores de 1.5, 2.0 y 3.0 μF?

98. ●●● Si la capacitancia $C_1 = 0.10\mu$F, ¿cuál será la carga en cada uno de los condensadores en el circuito de la figura 16.28?

99. ●●● Cuatro condensadores están conectados en un circuito como se ilustra en la ▸figura 16.29. Encuentre la carga sobre cada uno de los condensadores, y la diferencia de voltaje a través de éstos.



▲ **FIGURA 16.29 Doble paralelo en serie** Véase el ejercicio 99.

Ejercicios adicionales

100. **EI** Una diminuta partícula de polvo en forma de aguja larga y delgada tiene cargas de ±7.14 pC en su extremo. La longitud de la partícula es de 3.75 μm. *a*) ¿Qué localidad tiene el potencial más alto? 1) 7.65 μm por arriba del extremo positivo, 2) 5.15 μm por encima del extremo positivo o 3) ambos lugares tienen el mismo potencial. *b*) Calcule el potencial en los dos puntos del inciso *a*. *c*) Utilice su respuesta al inciso *b* para determinar el trabajo necesario para mover un electrón del punto cercano al punto lejano.

101. Un tubo de vacío tiene una altura vertical de 50.0 cm. Un electrón sale de la parte superior con una rapidez de 3.2×10^6 m/s hacia abajo y se somete a un campo terrestre "típico" de 150 V/m hacia abajo. *a*) Utilice métodos de energía para determinar si alcanza la superficie inferior del tubo. *b*) Si es así, ¿con qué rapidez la golpea; si no, ¿qué tan cerca llega de la superficie inferior?

102. **PC** Haga un bosquejo de las superficies equipotenciales y del patrón de líneas del campo eléctrico afuera de un largo cable cargado. Etiquete las superficies con valor potencial relativo e indique la dirección del campo eléctrico.

103. Un átomo de helio con un electrón ya removido (un ion de helio positivo) consiste en un solo electrón en órbita y un núcleo de dos protones. Si el electrón está en su radio orbital mínimo de 0.027 nm, *a*) ¿cuál será la energía potencial del sistema? *b*) ¿Cuál será la aceleración centrípeta del electrón? *c*) ¿Cuál será la energía total del sistema? *d*) ¿Cuál será la energía mínima requerida para ionizar estos átomos de manera que el electrón salga por completo?

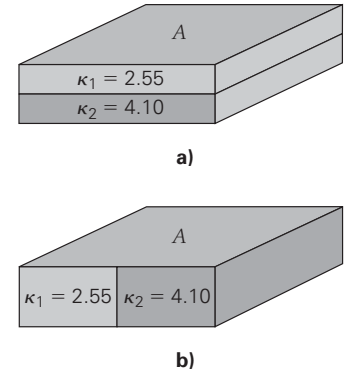
104. Suponga que los tres condensadores en la figura 16.22 tienen los siguientes valores: $C_1 = 0.15\ \mu$F, $C_2 = 0.25\ \mu$F y $C_3 = 0.30\ \mu$F. *a*) ¿Cuál será la capacitancia equivalente de este arreglo? *b*) ¿Cuánta carga se extraerá de la batería? *c*) ¿Cuál es el voltaje a través de cada condensador?

105. **EI** Dos placas paralelas horizontales muy grandes están separadas 1.50 cm. Un electrón se suspende en el aire entre ellas. *a*) La placa superior estará a un potencial 1) mayor, 2) igual o 3) menor respecto a la placa inferior. ¿Por qué? *b*) ¿Qué voltaje se requiere a través de las placas? *c*) ¿El electrón se colocó a la mitad entre las placas, o es adecuada cualquier ubicación entre las placas?

106. (Vea la sección A fondo sobre potencial eléctrico y transmisión de señales nerviosas de la p. 552 y el recuadro Aprender dibujando sobre las relaciones gráficas entre $\vec{\mathbf{E}}$ y V de la p. 547.) Suponga que la membrana celular de un axón está experimentando el final de un estímulo y que el voltaje instantáneo a través de la membrana celular es de 30 mV. Suponga que la membrana mide 10 nm de grosor. En este punto, la bomba molecular de Na/K-ATPasa comienza a mover el exceso de iones Na^+ de regreso al exterior. *a*) ¿Cuánto trabajo se requiere para que la bomba mueva el primer ion de sodio? *b*) Estime el campo eléctrico (incluida la dirección) de la membrana en estas condiciones. *c*) ¿Cuál será el campo eléctrico (incluida la dirección) en condiciones normales cuando el voltaje a través de la membrana es de −70 mV?

107. En el ejercicio 106, suponga que las superficies interior y exterior de la membrana del axón actúan como un condensador de placas paralelas con una área de 1.1×10^{-9} m^2. *a*) Estime la capacitancia de una membrana de axón, suponiendo que está llena de lípidos con una constante dieléctrica de 3.0. *b*) ¿Cuánta carga habría en cada superficie en condiciones potenciales de reposo?

108. Dos placas paralelas, de 9.25 cm por lado, están separadas 5.12 mm. *a*) Determine su capacitancia si el volumen de una placa hacia la mitad del plano está lleno con un material cuya constante dieléctrica es de 2.55 y el resto está lleno con un material diferente (constante dieléctrica de 4.10). Véase la ▼figura 16.30a. [*Sugerencia:* ¿ve dos condensadores en serie?] *b*) Repita el inciso *a*, excepto que ahora el volumen que va de un borde a la mitad está lleno con los mismos dos materiales. Véase la figura 16.30b. (¿Ve dos condensadores en paralelo?)



▲ **FIGURA 16.30 Condensador de doble material** Véase el ejercicio 108.

Los siguientes problemas de física Physlet pueden usarse con este capítulo.
25.1, 25.2, 25.3, 25.4, 25.5, 25.6, 25.7, 26.1, 26.2, 26.3, 26.5, 26.9, 26.11

CAPÍTULO 17

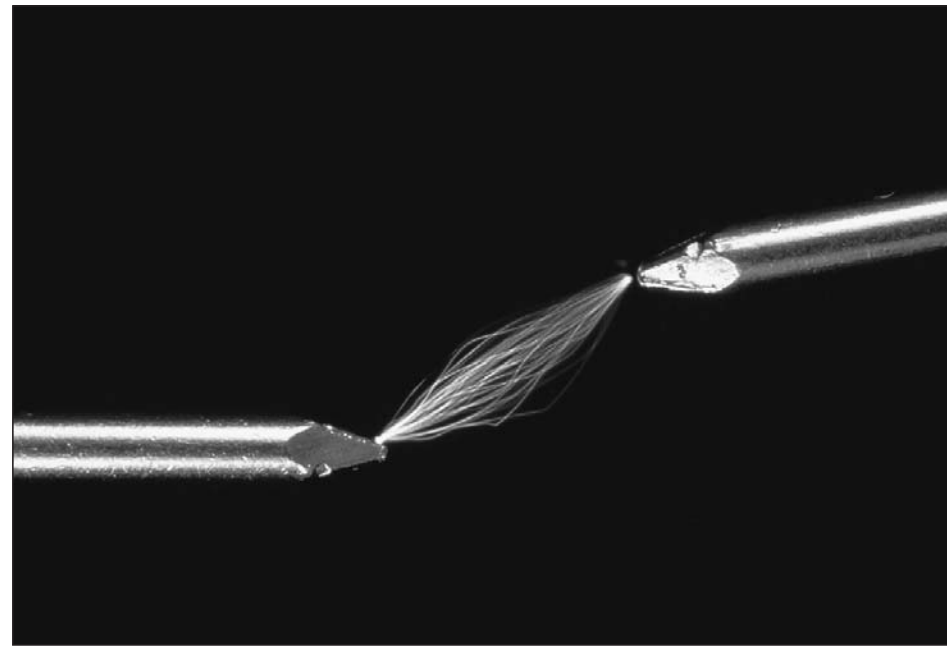
CORRIENTE ELÉCTRICA Y RESISTENCIA

17.1 Baterías y corriente directa 569

17.2 Corriente y velocidad de deriva 571

17.3 Resistencia y ley de Ohm 573

17.4 Potencia eléctrica 580



HECHOS DE FÍSICA

- André Marie Ampère (1775-1836) fue un físico matemático conocido por su trabajo con las corrientes eléctricas. Su nombre se utiliza para designar la unidad de corriente del SI, el ampere (que con frecuencia se abrevia como *amp*). También realizó investigación en química, pues participó en la clasificación de los elementos y en el descubrimiento del flúor. En física, Ampère es famoso por ser uno de los primeros en intentar una teoría que combinara la electricidad y el magnetismo. La ley de Ampère, que describe el campo *magnético* creado por un flujo de carga *eléctrica*, es una de las cuatro ecuaciones fundamentales del electromagnetismo clásico.
- En un alambre de metal, la *energía* eléctrica viaja a la rapidez de la luz (en el alambre), que es mucho mayor que la rapidez de los portadores de carga por sí solos. La rapidez de estos últimos es apenas de unos cuantos milímetros por segundo.
- La unidad de resistencia eléctrica del SI, el ohm (Ω), recibió ese nombre en honor de Georg Simon Ohm (1789-1854), un matemático y físico alemán. Una cantidad llamada conductividad eléctrica, proporcional al *inverso* de la resistencia, se nombró, apropiadamente, el mho (el apellido Ohm al revés).
- Utilizando un voltaje superior a los 600 volts, las anguilas eléctricas y las rayas, por breves momentos, pueden descargar tanto como 1 ampere de corriente a través de la carne. La energía se transmite a una tasa de 600 J/s, o aproximadamente tres cuartos de un caballo de potencia.

Si le pidieran a usted que pensara acerca de la electricidad y sus usos, vendrían a su mente muchas imágenes favorables, incluidas diversas aplicaciones como lámparas, controles remotos de televisión y sopladores eléctricos de hojas del jardín. Quizá también vengan a su mente imágenes desfavorables como los peligrosos relámpagos, o las chispas que brotan de un tomacorriente sobrecargado.

Común a todas esas imágenes es el concepto de energía eléctrica. Para un dispositivo eléctrico, la energía es suministrada por la corriente eléctrica que viaja por cables; en el caso de los relámpagos o de las chispas, viaja por el aire. En cualquier caso, la luz, el calor o la energía mecánica liberada es simplemente energía eléctrica convertida a una forma diferente. Por ejemplo, en la fotografía de esta página, la luz que emana la chispa es emitida por las moléculas del aire.

En este capítulo nos ocuparemos de los principios fundamentales que rigen los circuitos eléctricos. Esos principios nos permitirán responder preguntas como las siguientes: ¿qué es la corriente eléctrica y cómo viaja? ¿Qué causa que una corriente eléctrica se mueva por un aparato cuando accionamos un interruptor? ¿Por qué la corriente eléctrica hace brillar intensamente el filamento de una bombilla de luz, pero no afecta a los alambres conductores de la misma manera? Podemos aplicar los principios eléctricos para comprender un amplio rango de fenómenos, desde la operación de aparatos domésticos hasta los espectaculares juegos de luces que generan los relámpagos.

17.1 Baterías y corriente directa

OBJETIVOS: *a*) Describir las propiedades de una batería, *b*) explicar cómo una batería produce una corriente directa en un circuito y c) aprender varios símbolos de circuitos para dibujar diagramas de circuito.

Después de estudiar la fuerza y la energía eléctrica en los capítulos 15 y 16, usted probablemente supone lo que se requiere para producir una *corriente eléctrica*, o un flujo de carga. Presentaremos algunas analogías para ayudarle. El agua fluye de manera natural colina abajo, desde áreas de mayor a menor energía potencial gravitacional (a causa de una *diferencia* en la energía potencial gravitacional). El calor fluye de manera natural a causa de las *diferencias* de temperatura. Para la electricidad, un flujo de carga eléctrica es el resultado de una *diferencia* de potencial *eléctrico*, al que llamamos "voltaje".

En los conductores sólidos, particularmente en los metales, los electrones externos de los átomos tienen una libertad relativa para moverse. (En los conductores líquidos y gases cargados llamados *plasmas*, los iones positivos y negativos, al igual que los electrones, se mueven.) Para mover una carga eléctrica se requiere energía. La energía eléctrica se genera por la conversión de otras formas de energía, lo que produce una diferencia de potencial, o voltaje. Cualquier dispositivo capaz de producir y mantener diferencias de potencial se llama, de manera general, *suministro de potencia*.

Funcionamiento de una batería

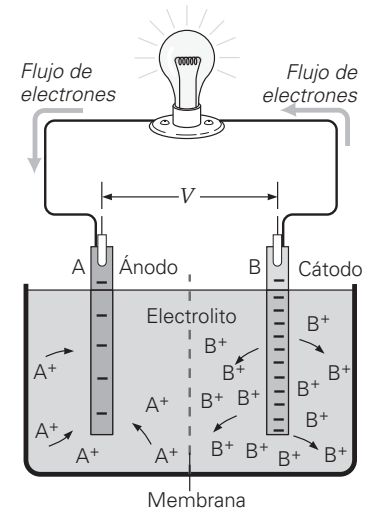
Un tipo común de suministro de potencia es la batería. Una **batería** convierte la energía potencial *química* almacenada en energía eléctrica. El científico italiano Allesandro Volta construyó una de las primeras baterías prácticas. Una batería simple consiste en dos *electrodos* metálicos diferentes en un *electrolito*, una solución que conduce electricidad. Con los electrodos y electrolito apropiados, se desarrolla una diferencia de potencial entre los electrodos como resultado de una acción química (▸figura 17.1).

Cuando se forma un circuito completo, por ejemplo, conectando una bombilla de luz y unos alambres (figura 17.1), los electrones del electrodo más negativo (B) se moverán por el alambre y la bombilla hacia el electrodo menos negativo (A).* El resultado es un flujo de electrones en el alambre. Conforme los electrones se mueven por el filamento de la bombilla, entrando en colisión y transfiriendo energía a sus átomos (por lo general, de tungsteno), el filamento alcanza una temperatura suficiente para emitir luz visible (brillo). Como los electrones tienden a moverse a regiones de mayor potencial, el electrodo A debe estar a un potencial eléctrico mayor que el electrodo B. Así, la acción de la batería crea una *diferencia* de potencial (V) entre las terminales de la batería. El electrodo A se llama **ánodo** y se denota con un signo (+). El electrodo B se llama **cátodo** y se reconoce por un signo (−). Es fácil recordar esta convención de signos porque los electrones están negativamente cargados y se mueven por el alambre de B (−) a A (+).

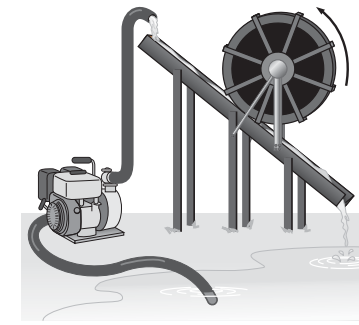
Con el fin de estudiar los circuitos eléctricos, podemos representar una batería como una "caja negra" que mantiene una diferencia de potencial constante entre sus terminales. Insertada en un circuito, una batería es capaz de realizar trabajo sobre los electrones en el alambre y transferirles energía (a costa de su propia energía química interna), y el alambre, por su parte, entrega esa energía a elementos del circuito externos a la batería. En esos elementos, la energía se convierte en otras formas, por ejemplo, movimiento mecánico (ventiladores eléctricos), calor (calentadores de inmersión) y luz (bombillas). Otras fuentes de voltaje, como generadores y fotoceldas, se analizarán más adelante.

Para comprender mejor el papel de una batería en un circuito, considere la analogía gravitacional en la ▸figura 17.2. Una bomba de gasolina (de forma análoga a una batería) realiza trabajo sobre el agua y la sube. El aumento en energía potencial gravitacional del agua se realiza en detrimento de la energía potencial química de las moléculas de gasolina. El agua entonces regresa a la bomba, fluyendo hacia abajo por la canaleta (analogía con el alambre) hacia el estanque. Camino abajo, el agua efectúa trabajo sobre la rueda, lo que da por resultado energía cinética de rotación, de forma análoga a como los electrones transfieren energía a las bombillas.

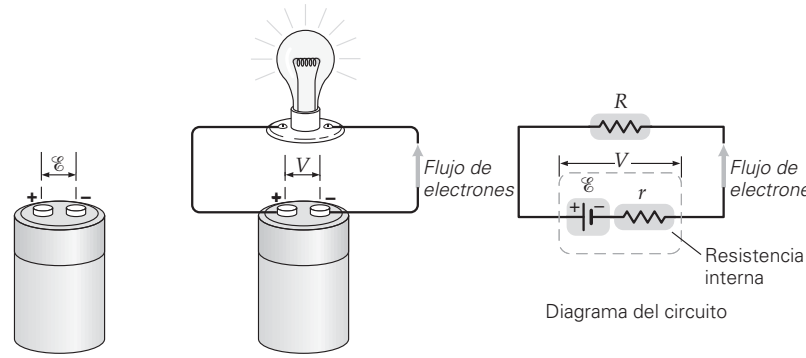
*Como veremos dentro de poco, un *circuito completo* es cualquier ciclo completo que consiste en cables y dispositivos eléctricos (como baterías y bombillas de luz).



▲ **FIGURA 17.1 Acción de una batería en una batería o celda química** Los procesos químicos en los que participan un electrolito y dos electrodos metálicos diferentes ocasionan que los iones de ambos metales se disuelvan en la solución a tasas diferentes. Así, un electrodo (el cátodo) queda con más carga negativa que el otro (el ánodo). El ánodo está a un mayor potencial que el cátodo. Por convención, el ánodo se designa como la terminal positiva y el cátodo como la negativa. Esta diferencia de potencial (V) puede generar una corriente, o un flujo de carga (electrones), en el alambre. Los iones positivos migran, como se observa en la figura. (Es necesaria una membrana para impedir la mezcla de los dos tipos de iones; ¿por qué?)



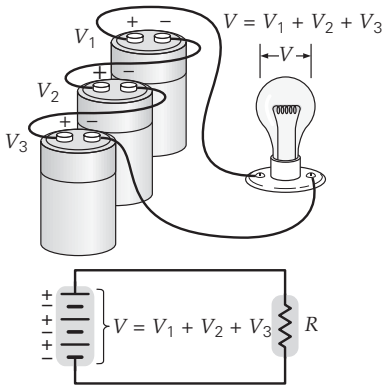
▲ **FIGURA 17.2 Analogía gravitacional entre una batería y una bombilla de luz** Una bomba de gasolina sube agua de un estanque, incrementando la energía potencial del agua. Cuando el agua fluye hacia abajo, transfiere energía a una rueda hidráulica (es decir, efectúa trabajo sobre ella), haciendo que la rueda gire. Esta acción es análoga a la entrega de energía por parte de una corriente eléctrica a una bombilla de luz (por ejemplo, como en la figura 17.1).



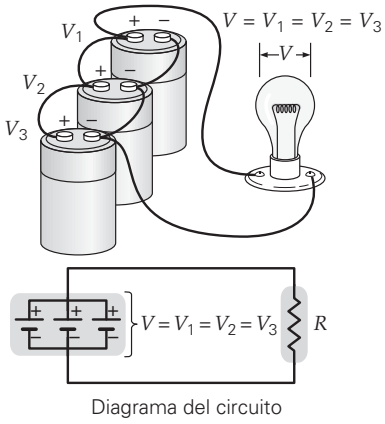
a) Fuerza electromotriz (fem)

b) Voltaje terminal

▶ **FIGURA 17.3 Fuerza electromotriz (fem) y voltaje terminal** ***a)*** La fem ($\mathscr{E}$) de una batería es la máxima diferencia de potencial entre sus terminales. Este máximo ocurre cuando la batería no está conectada a un circuito externo, ***b)*** A causa de la resistencia interna (r) el voltaje terminal V cuando la batería está en operación es menor que la fem ($\mathscr{E}$). Aquí, R es la resistencia de la bombilla.



a) Baterías en serie



b) Baterías en paralelo (voltajes iguales)

▲ **FIGURA 17.4 Baterías en serie y en paralelo** ***a)*** Cuando las baterías están conectadas en serie, sus voltajes se suman y el voltaje a través de la resistencia R es la suma de los voltajes. ***b)*** Cuando baterías del mismo voltaje están conectadas en paralelo, el voltaje a través de la resistencia es la misma, como si sólo una sola batería estuviera presente. En este caso, cada batería suministra parte de la corriente total.

fem y voltaje terminal de una batería

La diferencia de potencial entre las terminales de una batería *cuando no está conectada* a un circuito se llama **fuerza electromotriz (fem)** de la batería y se designa con el símbolo $\mathscr{E}$. El nombre es algo confuso, porque la fuerza electromotriz *no* es una fuerza, sino una diferencia de potencial, o voltaje. Para evitar confusiones con el concepto de fuerza, llamaremos a la fuerza electromotriz meramente "fem". La fem de una batería es el trabajo que ésta efectúa *por coulomb* de carga que pasa por ella. Si una batería realiza 1 joule de trabajo sobre 1 coulomb de carga, entonces su fem es de 1 joule por coulomb (1 J/C) o de 1 volt (1 V).

La fem, en realidad, representa la máxima diferencia de potencial entre las terminales de la batería (▲figura 17.3a). En la práctica, cuando una batería está conectada a un circuito y fluye carga, el voltaje a través de las terminales es siempre ligeramente *menor* que la fem. Este "voltaje de operación" (V) de una batería (el símbolo para una batería es el par de líneas paralelas de longitud desigual en la figura 17.3b) se llama su **voltaje terminal**. Las baterías en operación real son de sumo interés para nosotros y su voltaje terminal es lo que más nos interesa.

En muchas condiciones, la fem y el voltaje terminal, en esencia, son lo mismo. Cualquier diferencia se debe al hecho de que la batería misma ofrece a *resistencia interna* (r), que se muestra de forma explícita en el diagrama del circuito en la figura 17.3b. (La resistencia, que se definirá en la sección 17.3, es una medida cuantitativa de la oposición a un flujo de carga.) Las resistencias internas, en general, son pequeñas, por lo que el voltaje terminal de una batería es esencialmente igual que la fem $V \approx \mathscr{E}$. Sin embargo, cuando una batería suministra una gran corriente o cuando su resistencia interna es alta (baterías viejas), el voltaje terminal puede caer apreciablemente por debajo de la fem. La razón es que se requiere algún voltaje justo para producir una corriente en la resistencia interna. Matemáticamente, el voltaje terminal está relacionado con la fem, la corriente y la resistencia interna mediante $V = \mathscr{E} - Ir$, donde I es la *corriente eléctrica* (sección 17.2) en la batería.

Por ejemplo, la mayoría de los automóviles modernos tienen un "lector de voltaje" de la batería. Al encender el automóvil, el voltaje de una batería de 12 V, por lo común, arroja una lectura de sólo 10 V (este valor es normal). A causa de la enorme corriente que se requiere en el arranque, el término Ir (2 V) reduce la fem unos 2 V al voltaje terminal medido de 10 V. Cuando el motor está encendido y suministra la mayor parte de la energía eléctrica que se necesita para las funciones del automóvil, la corriente requerida de la batería es esencialmente cero y el lector de ésta sube de regreso a los niveles normales de voltaje. Así, el voltaje terminal, y no la fem, es un indicador fidedigno del estado de la batería. A menos que se especifique otra cosa, supondremos que la resistencia interna es insignificante, de forma que $V \approx \mathscr{E}$.

Existe una amplia variedad de baterías. Una de las más comunes es la batería de 12 V para automóvil, que consiste en seis celdas de 2 V conectadas en *serie*.* Esto es, la terminal positiva de cada celda está conectada a la terminal negativa de la siguiente celda (observe las tres celdas en la ◂figura 17.4a). Cuando las baterías o celdas están conectadas de esta manera, sus voltajes se suman. Si las celdas están conectadas en *paralelo*, todas sus terminales positivas están conectadas entre sí, al igual que sus terminales negativas (figura

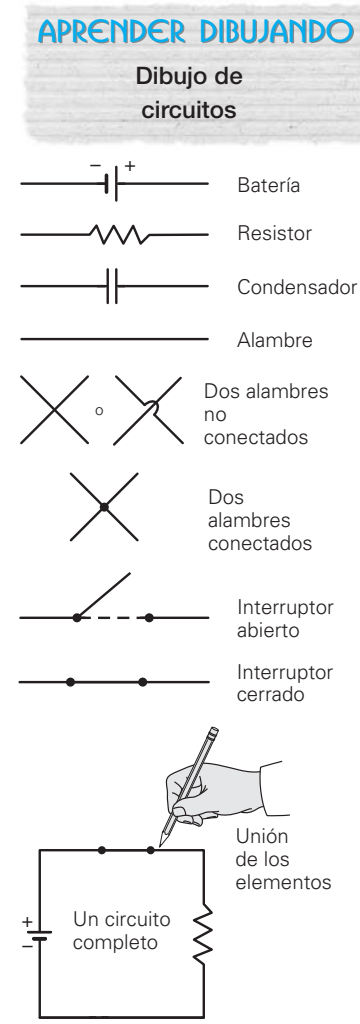
*La energía química se convierte a energía eléctrica en una *celda* química. El término *batería* generalmente se refiere a un conjunto, o "batería", de celdas.

17.4b). Cuando baterías idénticas están conectadas de esta manera, la diferencia de potencial o el voltaje terminal es igual para todas ellas. Sin embargo, cada una suministra una fracción de la corriente al circuito. Por ejemplo, si tenemos tres baterías con voltajes iguales, cada una suministra un tercio de la corriente. Una conexión en paralelo de dos baterías es el método más utilizado para encender el automóvil pasando corriente de otro vehículo. Para un arranque así, la batería débil (alta r) se conecta en paralelo a una batería normal (baja r), que entrega la mayor parte de la corriente para encender el automóvil.

Nota: Recuerde que el término *voltaje* significa "diferencia en potencial eléctrico".

Diagramas de circuitos y símbolos

Para analizar y visualizar circuitos, es común dibujar diagramas de circuitos que son representaciones esquemáticas de los alambres, baterías y aparatos, tal como están conectados. Cada elemento del circuito se representa por su propio símbolo en el diagrama del circuito. Como hemos visto en las figuras 17.3b y 17.4, el símbolo para una batería son dos líneas paralelas, la más larga de las cuales representa la terminal positiva (+) y la más corta la terminal negativa (−). Cualquier elemento de circuito (como una bombilla de luz o un aparato) que se *opone* al flujo de carga se representa mediante el símbolo —∿∿∿—, que significa resistencia R. (La resistencia eléctrica se definirá en la sección 17.3; por el momento sólo presentamos su símbolo.) Los alambres de conexión se dibujan como líneas no interrumpidas y se supone que, a menos que se especifique otra cosa, que tienen resistencia insignificante. Cuando las líneas se cruzan, se supone que *no* están en contacto una con otra, a menos que tengan un punto resaltado en su intersección. Finalmente, los interruptores se representan como "puentes levadizos", capaces de subir (para abrir el circuito y detener la corriente) y bajar (para cerrar el circuito y permitir el paso de la corriente). Estos símbolos, junto con el del condensador o capacitor (capítulo 16), están resumidos en la sección Aprender dibujando en esta página. En el siguiente ejemplo se presenta cómo se utilizan estos símbolos y los diagramas de circuito para comprender mejor el tema.



Ejemplo conceptual 17.1 ■ ¿Dormido en el interruptor?

La ▸figura 17.5 ilustra un circuito que representa dos baterías idénticas (cada una con voltaje terminal V) conectadas en paralelo a una bombilla (representada por un resistor). Como se supone que los alambres no representan resistencia, sabemos que antes de abrir el interruptor S_1, el voltaje a través de la bombilla es igual a V (esto es, $V_{AB} = V$). ¿Qué sucede al voltaje a través de la bombilla cuando se abre S_1? *a*) El voltaje permanece igual (V) que antes de abrir el interruptor. *b*) El voltaje cae a $V/2$, ya que sólo una batería está ahora conectada a la bombilla. *c*) El voltaje cae a cero.

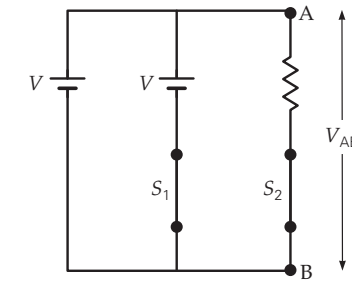
Razonamiento y respuesta. Podríamos sentirnos tentados a elegir la respuesta *b*, porque ahora sólo hay una batería. Pero observe de nuevo. La batería restante aún está conectada a la bombilla. Esto significa que debe haber *algún* voltaje a través de la bombilla, por lo que la respuesta no puede ser la *c*. Pero también significa que la respuesta correcta no es la *b*, porque la batería restante mantendrá por sí sola un voltaje de V a través de la bombilla. Por consiguiente, la respuesta correcta es la *a*.

Ejercicio de refuerzo. En este ejemplo, ¿cuál sería la respuesta correcta si, además de abrir S_1, también se abre el interruptor S_2? Explique su respuesta y razonamiento. *(Las respuestas de todos los Ejercicios de refuerzo se presentan al final del libro.)*

17.2 Corriente y velocidad de deriva

OBJETIVOS: *a*) Definir corriente eléctrica, *b*) distinguir entre flujo de electrones y corriente convencional y *c*) explicar el concepto de velocidad de deriva y transmisión de energía eléctrica

Como acabamos de ver, mantener una corriente eléctrica requiere de una fuente de voltaje y un **circuito completo**, es decir, una trayectoria continua de conducción. La gran mayoría de los circuitos tienen un interruptor que se usa para "abrir" o "cerrar" el circuito. Un circuito abierto elimina la continuidad de la trayectoria, lo que detiene el flujo de carga en los alambres.



▲ **FIGURA 17.5 ¿Qué le sucede al voltaje?** Véase el ejemplo 17.1.

Corriente eléctrica

Como son electrones los que se mueven en los alambres del circuito, el flujo de carga se aleja de la terminal negativa de la batería. Sin embargo, históricamente, el análisis de

los circuitos se ha realizado en términos de **corriente convencional**, que es en el sentido en que fluirán las cargas positivas, es decir, en sentido *contrario* al flujo de electrones (◂figura 17.6). (Existen algunas situaciones en las que un flujo de carga positiva *es* responsable de la corriente, por ejemplo, en los semiconductores.)

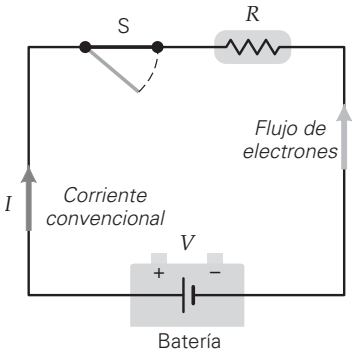
Se dice que la batería *entrega* corriente a un circuito o a un componente de éste (un elemento de circuito). De manera alternativa, decimos que el circuito (o sus componentes) *extrae* corriente de la batería. Entonces la corriente regresa a la batería. Una batería sólo puede impulsar una corriente en una dirección. Este tipo de flujo de carga unidireccional se llama **corriente directa (cd)**. (Observe que si la corriente cambia de dirección y/o de magnitud, se convierte en *corriente alterna*. Estudiaremos este tipo de situación en detalle en el capítulo 21.)

Cuantitativamente, la **corriente eléctrica** (I) se define como la tasa de flujo de la carga neta en función del tiempo. En este capítulo, nos ocuparemos principalmente del flujo de carga constante. En ese caso, si una carga neta q pasa a través de una área transversal en un intervalo de tiempo t (◂figura 17.7), la corriente eléctrica se define como

$$I = \frac{q}{t} \quad \textit{corriente eléctrica} \tag{17.1}$$

Unidad SI de corriente: coulomb por segundo (C/s) o ampere (A)

El coulomb por segundo se designa como **ampere (A)** en honor del físico francés André Ampère (1775-1836), investigador pionero de los fenómenos eléctricos y magnéticos. Comúnmente, el ampere se abrevia como *amp*. Una corriente de 10 A se lee como "diez amperes" o "diez amps". Las corrientes pequeñas se expresan en *miliamperes* (*m*A o 10^{-3} A), *microamperes* (μA o 10^{-6} A) o *nanoamperes* (nA o 10^{-9} A). Estas unidades a menudo se abrevian como *miliamps*, *microamps* y *nanoamps*, respectivamente. En un típico circuito doméstico, es común que los alambres conduzcan varios amperes de corriente. Para comprender la relación entre carga y corriente, considere el siguiente ejemplo.



▲ **FIGURA 17.6 Corriente convencional** Por razones históricas, el análisis de un circuito generalmente se realiza con corriente convencional. Esta última es en el sentido en que fluyen las cargas positivas, es decir, en sentido contrario al flujo de los electrones.

Ejemplo 17.2 ■ Conteo de electrones: corriente y carga

Se tiene una corriente constante de 0.50 A en la bombilla de una linterna durante 2.0 minutos. ¿Cuánta carga pasa por la bombilla en este tiempo? ¿Cuántos electrones representa esto?

Razonamiento. La corriente y el tiempo transcurrido se conocen. La definición de corriente (ecuación 17.1) nos permite encontrar la carga q. Como cada electrón tiene una carga con una magnitud de 1.6×10^{-19} C, entonces es posible convertir q a un número específico de electrones.

Solución. Se lista los datos y se convierte el intervalo de tiempo a segundos:

Dado: $I = 0.50$ A; $t = 2.0$ min $= 1.2 \times 10^2$ s

Encuentre: q (cantidad de carga); n (número de electrones)

De la ecuación (17.1), $I = q/t$, por lo que la magnitud de la carga está dada por

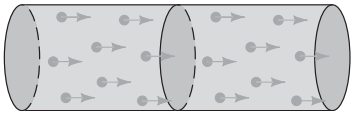
$$q = It = (0.50\ \text{A})(1.2 \times 10^2\ \text{s}) = (0.50\ \text{C/s})(1.2 \times 10^2\ \text{s}) = 60\ \text{C}$$

Se resuelve para determinar el número de electrones (n), y se tiene

$$n = \frac{q}{e} = \frac{60\ \text{C}}{1.6 \times 10^{-19}\ \text{C/electrón}} = 3.8 \times 10^{20}\ \text{electrones}$$

(Lo que implica muchísimos electrones.)

Ejercicio de refuerzo. Muchos instrumentos muy sensibles de laboratorio pueden medir fácilmente corrientes en el rango de nanoamperes, o aun menores. ¿Cuánto tiempo, en años, le tomaría a una carga de 1.0 C fluir por un punto dado en un alambre que conduce una corriente de 1.0 nA?



▲ **FIGURA 17.7 Corriente eléctrica** La corriente eléctrica (I) en un alambre se define como la tasa a la que la carga neta (q) pasa por el área de la sección transversal del alambre: $I = q/t$. La unidad de I es el ampere (A), o *amp*, para abreviar.

Velocidad de deriva, flujo de electrones y transmisión de energía eléctrica

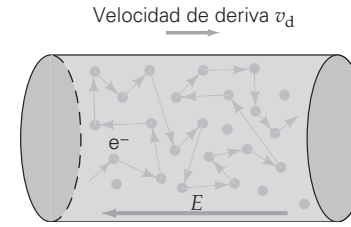
Aunque a menudo mencionamos el flujo de carga en analogía al flujo de agua, la carga eléctrica que circula por un conductor no fluye de la misma forma en que el agua fluye por un tubo. En ausencia de una diferencia de potencial en un alambre metálico, los electrones libres se mueven al azar a grandes velocidades entrando en colisión muchas veces por segundo con los átomos del metal. En consecuencia, no hay un flujo neto promedio de carga, ya que cantidades iguales de carga pasan por un punto dado en sentidos opuestos durante un intervalo específico de tiempo.

Sin embargo, cuando una diferencia de potencial (voltaje) *se aplica* entre los extremos del alambre (por ejemplo, mediante una batería), en éste aparece un campo eléctrico en una dirección. Entonces se presenta un flujo de electrones que *se opone* a esa dirección (¿por qué?). Esto *no* significa que los electrones se están moviendo directamente de un extremo del alambre al otro, pues se siguen moviendo en todas direcciones al entrar en colisión con los átomos del conductor, pero ahora hay un componente que se *suma* (en una dirección) a sus velocidades (▸figura 17.8). El resultado es que sus movimientos ahora son, en promedio, más hacia la terminal positiva de la batería que en sentido contrario.

Este flujo neto de electrones se caracteriza por una velocidad promedio llamada **velocidad de deriva**, que es mucho menor que las velocidades aleatorias (térmicas) de los electrones mismos. En general, la magnitud de la velocidad de deriva es del orden de 1 mm/s. De acuerdo con esto, un electrón tardaría aproximadamente 17 min en viajar 1 m a lo largo de un alambre. Sin embargo, una lámpara se enciende casi instantáneamente cuando accionamos el interruptor (para cerrar el circuito), y las señales electrónicas que transmiten conversaciones telefónicas viajan casi instantáneamente por millas de cable. ¿Cómo es posible esto?

Es evidente que *algo* debe estar moviéndose más rápidamente que los electrones de deriva. Por supuesto, se trata del campo eléctrico. Cuando se aplica una diferencia de potencial, el campo eléctrico asociado en el conductor viaja con una rapidez cercana a la de la luz (aproximadamente 10^8 m/s). Por tanto, el campo eléctrico influye en el movimiento de los electrones *a lo largo del conductor* casi instantáneamente. Esto significa que la corriente se inicia en todas partes del circuito casi de forma simultánea. No tenemos que esperar que los electrones "lleguen ahí" desde un lugar distante (por ejemplo, cerca del interruptor). Por ejemplo, en una bombilla, los electrones que *ya* están en el filamento comienzan a moverse casi inmediatamente para entregar energía y generar luz sin demora.

Este efecto es análogo a derribar una hilera de fichas de dominó. Cuando se derriba una ficha en un extremo, esa *señal* o energía se transmite rápidamente a lo largo de la hilera. Muy rápidamente, en el otro extremo, la última ficha cae (y entrega la energía). Es evidente que la ficha de dominó que entrega la señal o la energía *no* es la que usted empujó. Así, fue la energía —no las fichas de dominó— la que viajó a lo largo de la hilera.



▲ **FIGURA 17.8 Velocidad de deriva** A causa de las colisiones con los átomos del conductor, el movimiento de los electrones es al azar. Sin embargo, cuando el conductor está conectado, por ejemplo, a una batería, para formar un circuito completo, se tiene un pequeño movimiento neto en sentido opuesto al campo eléctrico [hacia la terminal de mayor potencial (positiva) o ánodo]. La rapidez y el sentido de este movimiento neto constituye la velocidad de deriva de los electrones.

17.3 Resistencia y ley de Ohm

OBJETIVOS: *a*) Definir resistencia eléctrica y explicar qué significa resistor óhmico, *b*) resumir los factores que determinan la resistencia y *c*) calcular el efecto de esos factores en situaciones simples.

Nota: *resistor* es un término genérico para cualquier objeto que posee una resistencia eléctrica significativa.

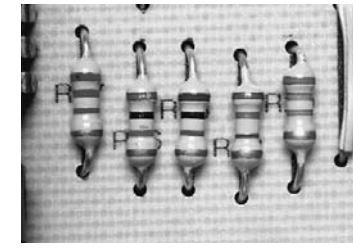
Si usted aplica un voltaje (diferencia de potencial) entre los extremos de un material conductor, ¿qué factores determinan la corriente? Como podría esperarse, en general, cuanto mayor es el voltaje, mayor es la corriente. Sin embargo, hay otro factor que influye en la corriente. Así como la fricción interna (viscosidad; véase el capítulo 9) afecta el flujo de los fluidos en los tubos, la resistencia del material del que está hecho el alambre afectará el flujo de carga. Cualquier objeto que ofrece resistencia considerable a la corriente eléctrica se llama *resistor* y se representa en los diagramas mediante el símbolo en zigzag (sección 17.1). Este símbolo se usa para representar todos los tipos existentes de "resistores", desde los cilíndricos codificados en color sobre tableros de circuitos impresos a los dispositivos y aparatos eléctricos como secadoras de cabello y bombillas de luz (▸figura 17.9).

Nota: Recuerde, V significa ΔV.

Pero, ¿cómo se cuantifica la resistencia? Sabemos, por ejemplo, que si un gran voltaje se aplica a través de un objeto y produce sólo una pequeña corriente, entonces ese objeto presenta una elevada resistencia. Así, la **resistencia (*R*)** de cualquier objeto se define como la razón entre el voltaje a través del objeto y la corriente resultante a través de ese objeto. Por lo tanto, la resistencia se define como

$$R = \frac{V}{I} \quad \textit{resistencia eléctrica} \tag{17.2a}$$

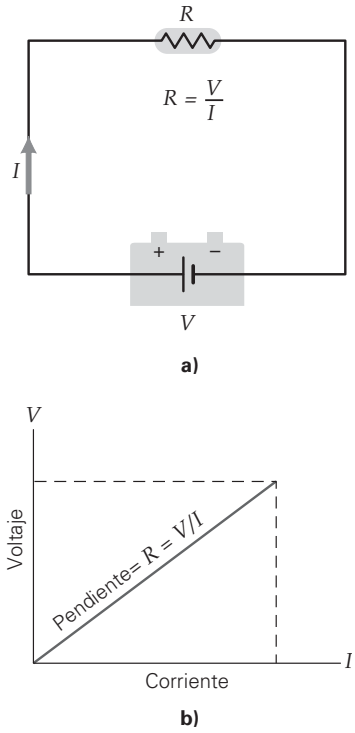
Unidad SI de resistencia: volt por ampere (V/A), u ohm (Ω)



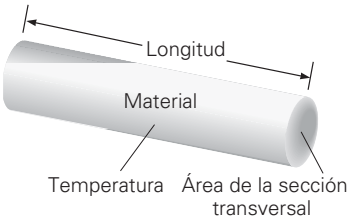
▲ **FIGURA 17.9 Resistores en uso** Un tablero de circuito impreso, típicamente usado en computadoras, incluye resistores de diferentes valores. Los grandes cilindros rayados son resistores; sus códigos de bandas de cuatro colores indican sus resistencias en ohms.

Las unidades de resistencia son volts por ampere (V/A), llamado **ohm** (Ω) en honor del físico alemán Georg Ohm (1789-1854), quien investigó la relación entre corriente y voltaje. Los grandes valores de la resistencia se expresan comúnmente en kilohms (kΩ) y megaohms (MΩ). Un diagrama de un circuito que muestra cómo, en princi-

Nota: *ohmico* significa "con resistencia constante".



▲ **FIGURA 17.10 Resistencia y ley de Ohm** ***a)*** En principio, cualquier resistencia eléctrica de un objeto se determina dividiendo el voltaje a través de él entre la corriente que fluye. ***b)*** Si el elemento obedece la ley de Ohm (aplicable sólo a una resistencia constante), entonces una gráfica del voltaje *versus* la corriente es una línea recta con pendiente igual a R, o resistencia del elemento. (Su resistencia no cambia con el voltaje.)



▲ **FIGURA 17.11 Factores de resistencia** Los factores que afectan directamente la resistencia eléctrica de un conductor cilíndrico son el tipo de material del que está hecho, su longitud (L), el área de su sección transversal (A) y su temperatura (T).

pio, se determina la resistencia, aparece en la ◂figura 17.10a. (En el capítulo 18 estudiaremos los instrumentos que se emplean para medir la corriente y el voltaje eléctricos, llamados *amperímetros* y *voltímetros*, respectivamente.)

Para algunos materiales, la resistencia es constante en un rango de voltajes. Se dice que un resistor que exhibe resistencia constante obedece la **ley de Ohm**, o que es *óhmico*. La ley se llamó así en honor de Ohm, quien encontró materiales que poseen esta propiedad. Una gráfica de voltaje *versus* corriente para un material con una resistencia óhmica es una línea recta con una pendiente igual a su resistencia R (figura 17.10b). Una forma común y práctica de la ley de Ohm es

$$V = IR \quad \textit{(ley de Ohm)} \tag{17.2b}$$

(o $I \propto V$, sólo cuando R es constante)

La ley de Ohm no es una ley fundamental en el mismo sentido en que, por ejemplo, la ley de la conservación de la energía. No hay "ley" que establezca que los materiales *deben* tener resistencia constante. De hecho, muchos de nuestros avances en electrónica se basan en materiales como los semiconductores, que tienen relaciones *no lineales* entre voltaje y corriente.

A menos que se especifique otra cosa, supondremos que los resistores son óhmicos. Sin embargo, siempre recuerde que muchos materiales no son óhmicos. Por ejemplo, la resistencia de los filamentos de tungsteno de las bombillas de luz aumenta con la temperatura, y es mayor a la temperatura de operación que a temperatura ambiente. El siguiente ejemplo muestra cómo la resistencia del cuerpo humano puede hacer la diferencia entre la vida y la muerte.

Ejemplo 17.3 ■ Peligro en la casa: resistencia humana

Cualquier habitación en una casa expuesta al voltaje eléctrico y al agua representa peligro. (Véase el análisis de la seguridad eléctrica en la sección 18.5.) Por ejemplo, suponga que una persona sale de la ducha y, sin querer, toca con el dedo un alambre expuesto de 120 V (quizá un cordón deshilachado de una secadora). El cuerpo humano, cuando está mojado, tiene una resistencia eléctrica tan baja como 300 Ω. Con base en este valor, estime la corriente en el cuerpo de esa persona.

Razonamiento. El alambre tiene un potencial eléctrico de 120 V por encima del piso, que es "tierra" y que está a 0 V. Por lo tanto, el voltaje (o diferencia de potencial) a través del cuerpo es de 120 V. Para determinar la corriente, utilizaremos la ecuación 17.2, que define la resistencia.

Solución. Se listan los datos,

Dado: $V = 120$ V, $R = 300\ \Omega$ ***Encuentre:*** I (corriente en el cuerpo)

Usando la ecuación 17.2, tenemos

$$I = \frac{V}{R} = \frac{120\text{ V}}{300\ \Omega} = 0.400\text{ A} = 400\text{ mA}$$

Si bien ésta es una pequeña corriente según los estándares diarios, es una corriente fuerte para el cuerpo humano. Una corriente de más de 10 mA provoca severas contracciones musculares, y corrientes del orden de 100 mA pueden detener el corazón. Así que esta corriente es potencialmente mortal. (Véase la sección A fondo sobre electricidad y seguridad personal, y la tabla 1 en el capítulo 18, p. 614.)

Ejercicio de refuerzo. Cuando el cuerpo humano está seco, su resistencia (a todo lo largo) llega a ser tan alta como 100 kΩ. ¿Qué voltaje se requiere para producir una corriente de 1.0 mA (un valor que la gente apenas percibe)?

Factores que influyen en la resistencia

En el nivel atómico, la resistencia aparece cuando los electrones entran en colisión con los átomos que constituyen el material. Así, la resistencia depende parcialmente del tipo de material del que se compone el objeto. Sin embargo, los factores geométricos también influyen en la resistencia de un objeto. En resumen, la resistencia de un objeto de sección transversal uniforme, como un tramo de alambre, depende de cuatro propiedades: 1) el tipo de material, 2) su longitud, 3) su área transversal y 4) su temperatura (◂figura 17.11).

Como podría esperarse, la resistencia de un objeto (por ejemplo, un trozo de alambre) es *inversamente* proporcional al área de su sección transversal (A) y *directamente* proporcional a la longitud (L); esto es, $R \propto L/A$. Por ejemplo, un alambre metálico uniforme de 4 m de longitud ofrece el doble de resistencia que un alambre similar de 2 m de longitud, pero un alambre con un área transversal de 0.50 mm^2 tiene sólo la mitad de la resistencia de uno con área de 0.25 mm^2. Esas condiciones geométricas de resistencia son análogas a las del flujo de un líquido en un tubo. Cuanto más largo es el tubo, mayor es su resistencia (arrastre), pero cuanto mayor es el área transversal del tubo, mayor es la cantidad de líquido que puede llevar. Para conocer más acerca de la resistencia en relación con la longitud y el área en los organismos vivos, véase en esta página la sección A fondo 17.1 sobre la "biogeneración" de alto voltaje.

PHYSLET®

Ilustración 30.5 "Ley" de Ohm

A FONDO 17.1 LA "BIOGENERACIÓN" DE ALTO VOLTAJE

Usted sabe que dos metales diferentes inmersos en ácido generan una separación constante de carga (o voltaje) y, por lo tanto, producen corriente eléctrica. Sin embargo, los organismo vivos también crean voltajes mediante un proceso que, en ocasiones, se llama "biogeneración". En particular, las anguilas eléctricas (véase la sección A fondo 15.2 de la p. 527) son capaces de generar 600 V, un voltaje más que suficiente para matar a un ser humano. Como veremos, el proceso tiene similitudes tanto con las "pilas secas" como con la transmisión de señales nerviosas.

Las anguilas tienen tres órganos relacionados con sus actividades eléctricas. El órgano de Sachs genera pulsaciones de bajo voltaje para la navegación. Los otros dos (el órgano de Hunter y el órgano de Main) son fuentes de alto voltaje (figura 1). En estos órganos, las células llamadas *electrocitos* o *electroplacas*, están apiladas. Cada célula tiene forma de disco plano. La columna de electroplacas es una conexión en serie similar a la de una batería de automóvil, en donde hay seis celdas de 2 V cada una, que producen un total de 12 V. Cada electroplaca es capaz de producir un voltaje de apenas 0.15 V, pero cuatro o cinco mil de ellas conectadas en serie generan un voltaje de 600 V. Las electroplacas son similares a las células musculares en que reciben impulsos nerviosos a través de conexiones sinápticas. Sin embargo, estos impulsos nerviosos no generan movimiento. En lugar de ello, desencadenan la generación de voltaje mediante el siguiente mecanismo.

Cada electroplaca tiene la misma estructura. Las membranas superior e inferior se comportan de manera similar a las membranas nerviosas. En condiciones de reposo, los iones de Na^+ no pueden penetrar en la membrana. Para equilibrar sus concentraciones en ambos lados, los iones permanecen cerca de la superficie exterior. Esto, a la vez, atrae (del interior) las proteínas negativamente cargadas hacia la superficie interna. Como resultado, el interior tiene un potencial 0.08 V más bajo que el exterior. Así, en condiciones de reposo, la superficie externa superior (la que da hacia la cabeza o la parte anterior de la anguila) y la superficie externa inferior (que da a la parte posterior) de *todas* las electroplacas son positivas (una de ellas se ilustra en la figura 2a) y no presenta voltaje ($\Delta V_1 = 0$). Por lo tanto, en condiciones de reposo, una columna de electroplacas en serie no tiene voltaje ($\Delta V_{total} = \Sigma \Delta V_i = 0$) de la parte superior a la inferior (figura 2b).

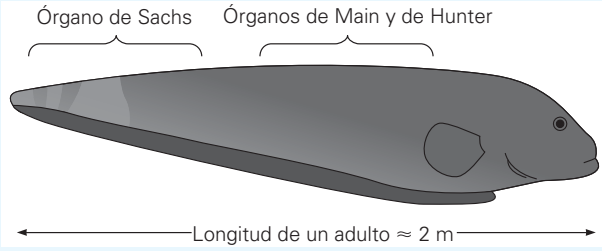


FIGURA 1 Anatomía de una anguila eléctrica El 80% del cuerpo de una anguila eléctrica está dedicado a la generación de voltaje. La mayor parte de esa porción contiene los dos órganos (de Main y de Hunter) responsables del alto voltaje que le permite matar a sus presas. El órgano de Sachs produce un voltaje de baja pulsación, que se utiliza para la navegación.

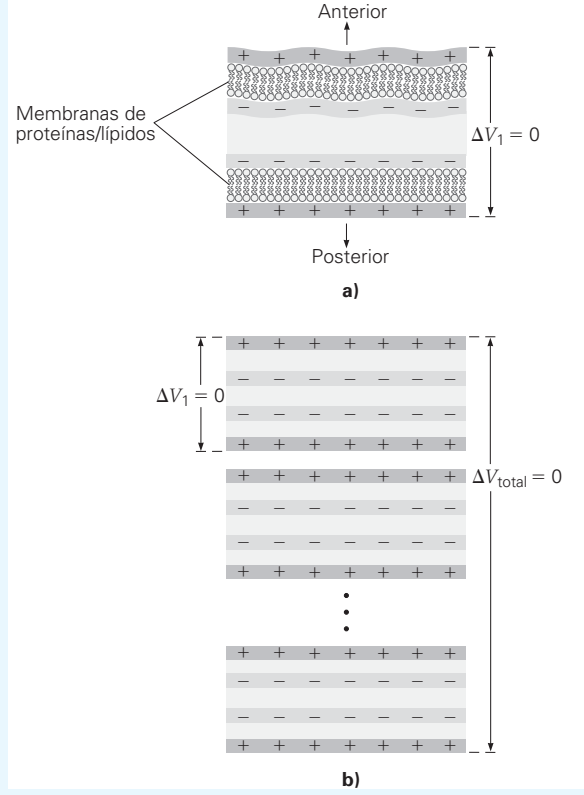


FIGURA 2 ***a*) Una sola electroplaca en reposo** Una de las miles de electroplacas en los órganos de la anguila tiene, en condiciones de reposo, iguales cantidades de carga positiva en la parte superior y en la inferior, lo que da por resultado un voltaje de 0. ***b*) Electroplacas en reposo conectadas en serie** Varios miles de electroplacas en serie, en condiciones de reposo, tienen un voltaje total de 0.

(continúa en la siguiente página)

Sin embargo, cuando una anguila localiza a su presa, su cerebro envía una señal a través de una neurona *sólo a la membrana inferior* de cada electroplaca (en la figura 3a se ilustra una célula). Una sustancia química (*acetilcolina*) se difunde a través de la sinapsis sobre la membrana, abriendo brevemente canales de iones y permitiendo que entre el Na^+. *Por unos cuantos milisegundos, se invierte la polaridad de la membrana inferior*, creando un voltaje a través de la célula de $\Delta V_1 \approx 0.15$ V. La columna entera de electroplacas realiza esto de manera simultánea, generando un gran voltaje entre los extremos de la columna ($\Delta V_{total} \approx 4000\ \Delta V_1 = 600$ V; véase la figura 3b). Cuando la anguila toca a su presa con los extremos de la columna de células, el pulso de corriente resultante que transmite a la presa (aproximadamente de 0.5 A) entrega suficiente energía para matarla o, al menos, para inmovilizarla.

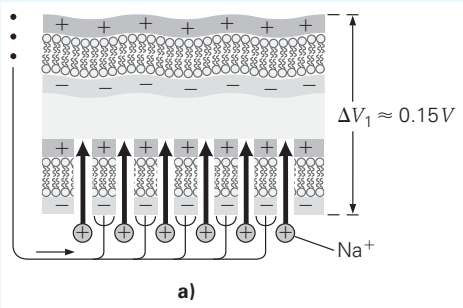
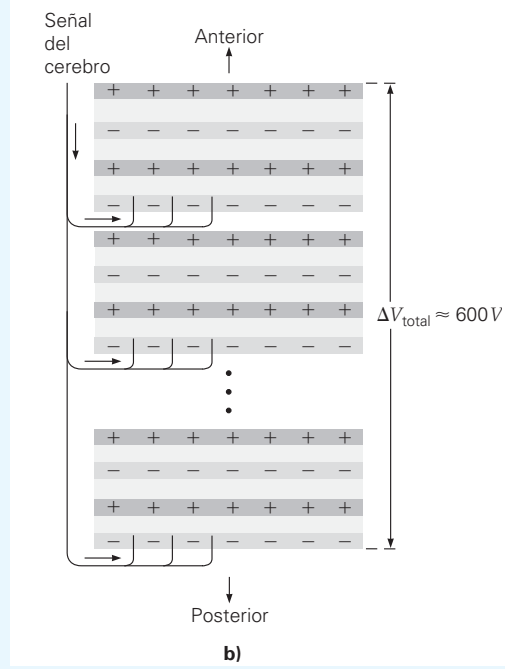


FIGURA 3 ***a*) Una electroplaca en acción** En la localización de la presa, una señal se envía desde el cerebro de la anguila a cada electroplaca a lo largo de una neurona conectada sólo a la parte inferior de la placa. Esto desencadena la breve apertura del canal de iones, permitiendo que los iones de Na^+, entren e invierte temporalmente la polaridad en la membrana inferior. De esta forma, se registra una diferencia de potencial eléctrico (voltaje) temporal entre las membranas superior e inferior. El voltaje de cada electroplaca, generalmente, es de varias décimas de volt. ***b*) Una columna de electroplacas en serie en acción** Cuando cada electroplaca en la columna es activada por la señal de la neurona inferior, esto da por resultado un gran voltaje entre la parte superior e inferior de la columna, por lo general, de unos 600 V. Este gran voltaje permite que la anguila aplique un pulso de corriente equivalente a varias décimas de un ampere al cuerpo de la presa. La energía depositada en la presa es suficiente para inmovilizarla o matarla.

Una configuración biológica interesante de "cableado" permite que todas las electroplacas se activen de manera simultánea, un requisito fundamental para la generación del máximo voltaje. Como cada electroplaca está a diferente distancia del cerebro, el potencial de acción que viaja por las neuronas debe estar perfectamente cronometrado. Para lograrlo, las neuronas conectadas a la parte superior de la columna de electroplacas (más cercana al cerebro) son más largas y más delgadas que aquellas conectadas con la parte inferior. A partir de lo que usted sabe sobre resistencia (véase, por ejemplo, la explicación de la ecuación 17.3 y de $R \propto L/A$, resulta claro que tanto una reducción en el área como un aumento en la longitud de las neuronas sirven para incrementar la resistencia de las neuronas en comparación con la de aquellas conectadas a electroplacas más distantes. El aumento de resistencia significa que el potencial de acción viaja más lentamente a través de las neuronas más cercanas y, por lo tanto, permite que las electroplacas que están más cerca reciban su señal al mismo tiempo que las más distantes, una aplicación muy interesante de la física (por supuesto, desde la perspectiva de la anguila, no de la presa.)



Resistividad

Nota: no confunda resistividad con densidad de masa, que tienen el mismo símbolo (ρ).

La resistencia de un objeto está determinada parcialmente por las propiedades atómicas del material que lo constituye, descritas cuantitativamente por la **resistividad (ρ)** del material. La resistencia de un objeto de sección transversal uniforme está dada por

$$R = \rho\left(\frac{L}{A}\right) \tag{17.3}$$

Unidad SI de resistividad: ohm-metro $(\Omega \cdot \mathrm{m})$

Las unidades de resistividad (ρ) son ohm-metros $(\Omega \cdot \mathrm{m})$. (Usted debería demostrar esto.) Así, si se conoce la resistividad (del tipo del material) y utilizando la ecuación 17.3, podemos calcular la resistencia de cualquier objeto con área constante, siempre que se conozcan su longitud y área transversal.

TABLA 17.1 Resistividades (a 20°C) y coeficientes de temperatura de la resistividad para varios materiales*

	ρ ($\Omega \cdot m$)	α (1/C°)		ρ ($\Omega \cdot m$)	α (1/C°)
Conductores			*Semiconductores*		
Aluminio	2.82×10^{-8}	4.29×10^{-3}	Carbono	3.6×10^{-5}	-5.0×10^{-4}
Cobre	1.70×10^{-8}	6.80×10^{-3}	Germanio	4.6×10^{-1}	-5.0×10^{-2}
Hierro	10×10^{-8}	6.51×10^{-3}	Silicio	2.5×10^{2}	-7.0×10^{-2}
Mercurio	98.4×10^{-8}	0.89×10^{-3}			
Nicromo (aleación de níquel y cromo)	100×10^{-8}	0.40×10^{-3}	*Aislantes*		
Níquel	7.8×10^{-8}	6.0×10^{-3}	Vidrio	10^{12}	
Platino	10×10^{-8}	3.93×10^{-3}	Caucho	10^{15}	
Plata	1.59×10^{-8}	4.1×10^{-3}	Madera	10^{10}	
Tungsteno	5.6×10^{-8}	4.5×10^{-3}			

*Los valores para los semiconductores son generales, y las resistividades para los aislantes son órdenes de magnitud típicas.

Los valores de resistividad de algunos conductores, semiconductores y aislantes se presentan en la tabla 17.1. Los valores son aplicables a 20°C, porque la resistividad puede depender de la temperatura. Los cables más comunes están hechos de cobre o aluminio con áreas de sección transversal de 10^{-6} m^2 o 1 mm^2. Para una longitud de 1.5 m, usted seguramente podrá demostrar que la resistencia de un cable de cobre con esta área es aproximadamente de 0.025 Ω ($= 25\ \text{m}\Omega$). Esto explica por qué las resistencias de los cables se ignoran en los circuitos (sus valores son mucho menores que la mayoría de los aparatos domésticos).

Una aplicación médica interesante y potencialmente importante implica la medición de la resistencia del ser humano y su relación con la grasa corporal. (Véase la sección A fondo sobre el análisis de la impedancia bioeléctrica en la p. 578.) Para tener una idea de las magnitudes de estas cantidades en los tejidos vivos, considere el siguiente ejemplo.

Ejemplo 17.4 ■ Anguilas eléctricas: ¿cocinando con bioelectricidad?

Suponga que una anguila eléctrica toca la cabeza y cola de un pez con forma cilíndrica y que le aplica un voltaje de 600 V. (Véase la sección A fondo 17.1 en la p. 575.) Si la corriente resultante es de 0.80 A (que probablemente matará a la presa), estime la resistividad promedio de la carne del pez, suponiendo que éste mide 20 cm de longitud y 4.0 cm de diámetro.

Razonamiento. Si el pez tiene una forma cilíndrica y conocemos su longitud, podemos determinar su área transversal a partir de las dimensiones que nos dan. Por lo que se refiere a su resistencia, podemos determinarla a partir del voltaje y de la corriente. Por último, su resistividad se estimará utilizando la ecuación 17.3.

Solución. Se listan los datos:

Dado: $L = 20\ \text{cm} = 0.20\ \text{m}$
$d = 4.0\ \text{cm} = 4.0 \times 10^{-2}\ \text{m}$
$V = 600\ \text{V}$
$I = 0.80\ \text{A}$

Encuentre: f(resistividad)

El área transversal del pez es

$$A = \pi r^2 = \pi\left(\frac{d}{2}\right)^2 = \frac{\pi(2.0 \times 10^{-2}\ \text{m})^2}{4} = 3.1 \times 10^{-4}\ \text{m}^2$$

También se sabe que la resistencia general del pez es $R = \dfrac{V}{I} = \dfrac{600\ \text{V}}{0.80\ \text{A}} = 7.5 \times 10^2\ \Omega$. A partir de la ecuación 17.3, se tiene

$$\rho = \frac{RA}{L} = \frac{(7.5 \times 10^2\ \Omega)(3.1 \times 10^{-4}\ \text{m}^2)}{0.20\ \text{m}} = 1.2\ \Omega \cdot \text{m o bien } 120\ \Omega \cdot \text{cm}$$

(continúa en la siguiente página)

Al comparar este resultado con los valores en la tabla 17.1, se podrá ver —como se esperaba— que la carne del pez es mucho más resistiva que los metales, pero, por supuesto, no es un gran aislante. El valor está en el rango de las resistividades que se han medido en diferentes tejidos humanos; por ejemplo, el músculo cardiaco tiene una resistividad de 175 $\Omega \cdot$cm, y el hígado de 200 $\Omega \cdot$cm. Resulta claro que nuestra respuesta es un promedio de todo el cuerpo del pez y no nos dice nada acerca de las diferentes partes de su organismo.

Ejercicio de refuerzo. Suponga que para su siguiente comida, la anguila de este ejemplo elige una especie diferente de pez, que tiene el doble de la resistividad promedio, la mitad de la longitud y la mitad del diámetro del primer pez. ¿Qué corriente se esperaría en este pez si la anguila le aplica 400 V en el cuerpo?

Para muchos materiales, especialmente los metales, la dependencia de la resistividad con respecto a la temperatura es casi lineal si el cambio de temperatura no es demasiado grande. Esto es, la resistividad a una temperatura T después de un cambio de temperatura $\Delta T = T - T_o$ está dada por

$$\rho = \rho_o(1 + \alpha\Delta T) \qquad \textit{variación de la resistividad por la temperatura} \tag{17.4}$$

donde α es una constante (generalmente sólo en un cierto rango de temperatura) llamada **coeficiente de temperatura de la resistividad** y ρ_o es una resistividad de referencia a T_o (por lo general a 20°C). La ecuación 17.4 se rescribe como

$$\Delta\rho = \rho_o\alpha\Delta T \tag{17.5}$$

Nota: compare la forma de la ecuación 17.5 con la ecuación 10.10 para la expansión lineal de un sólido.

donde $\Delta\rho = \rho - \rho_o$ es el cambio en resistividad que ocurre cuando la temperatura cambia en ΔT. La razón $\Delta\rho/\rho_o$ es adimensional, por lo que α tiene unidades de grados Celsius a la inversa, que se escriben como $1/C^o$. Físicamente, α representa el cambio fraccional en resistividad ($\Delta\rho/\rho_o$) por grado Celsius. Los coeficientes de temperatura de la resistividad para algunos materiales se presentan en la tabla 17.1. Se supone que esos coeficientes son constantes en rangos normales de temperatura. Observe que para los semiconductores y los aislantes, los coeficientes, en general, son órdenes de magnitud y no son constantes.

A FONDO 17.2 ANÁLISIS DE IMPEDANCIA BIOELÉCTRICA (AIB)

Los métodos tradicionales (y poco precisos) para determinar los porcentajes de grasa en el cuerpo humano implican el uso de tanques de flotación (para mediciones de densidad) o de calibres para medir el grosor de la masa corporal. En años recientes, se han diseñado experimentos de resistencia eléctrica para medir la grasa del cuerpo humano.* En teoría, esas mediciones (llamadas *análisis de impedancia bioeléctrica* o AIB) tienen el potencial para determinar, con más precisión que los métodos tradicionales, el contenido total de agua en el cuerpo, la masa de grasa libre y la grasa corporal (*tejido adiposo*).

El principio del AIB se basa en el contenido de agua del cuerpo humano. El agua en el cuerpo humano es relativamente un buen conductor de la corriente eléctrica, gracias a la presencia de iones como el potasio (K^+) y el sodio (Na^+). Como el tejido muscular guarda más agua por kilogramo que la grasa, es un mejor conductor que esta última. Así, para un voltaje dado, la diferencia en corrientes debería ser un buen indicador del porcentaje de grasa y músculo presentes en el cuerpo.

En la práctica, al realizar un AIB, un electrodo con un bajo voltaje se conecta a la muñeca y el otro al tobillo opuesto. Por fines de seguridad, la corriente se mantiene por debajo de 1 mA, siendo comunes las de 800 μA. El paciente no percibe esta pequeña corriente. Los valores típicos de la resistencia son de aproximadamente 250 Ω. A partir de la ley de Ohm, podemos estimar el voltaje requerido: $V = IR = (8 \times 10^{-4}\ \text{A})(250\ \Omega) = 0.200$ V, o aproximadamente 200 mV. En realidad, el voltaje alterna en polaridad a una frecuencia de 50 kHz, porque se sabe que este rango de frecuencia no activa eléctricamente tejidos excitables, como los nervios y el músculo cardiaco.

Seguramente usted comprende algunos de los factores implicados en interpretar los resultados de las mediciones de la resistencia humana. La resistencia que se mide es en realidad la resistencia total. Sin embargo, la corriente viaja no a través de un conductor uniforme, sino más bien por el brazo, tronco y pierna. Cada una de esas partes del cuerpo no sólo tiene una proporción diferente de grasa y músculo, lo que afecta la resistividad (ρ), sino que todas ellas tienen diferente longitud (L) y área transversal (A). Así, el brazo y la pierna, constituidos en su mayor parte por músculo, y con una pequeña área transversal, ofrecen la mayor resistencia. Por el contrario, el tronco, que por lo general contiene un porcentaje relativamente alto de grasa y que tiene una área transversal grande, presenta una resistencia baja.

Al someter el AIB al análisis estadístico, los investigadores esperan entender cómo el amplio rango de parámetros físicos y genéticos presentes en los seres humanos afectan las mediciones de la resistencia. Entre esos parámetros están la altura, el peso, la complexión y el origen étnico. Una vez comprendidas las correlaciones, el AIB se convierte en una valiosa herramienta médica en el diagnóstico de diversas enfermedades.

*Técnicamente, este procedimiento mide la *impedancia* del cuerpo, lo que incluye efectos de capacitancia y efectos magnéticos, así como la resistencia. (Véase el capítulo 21.) Sin embargo, estas contribuciones representan un 10% del total. Así que la palabra que usaremos aquí es la de *resistencia*.

La resistencia es directamente proporcional a la resistividad (ecuación 17.3). Esto significa que la resistencia de un objeto presenta la misma dependencia con respecto a la temperatura que la resistividad (ecuaciones 17.3 y 17.4). La resistencia de un objeto de sección transversal uniforme varía en función de la temperatura:

$$R = R_o(1 + \alpha\Delta T) \quad \text{o} \quad \Delta R = R_o\alpha\Delta T \qquad \textit{variación de la resistencia con la temperatura} \qquad (17.6)$$

Aquí, $\Delta R = R - R_o$ es el cambio en la resistencia relativa con respecto a su valor de referencia R_o, que generalmente se toma a 20°C. La variación de la resistencia con la temperatura ofrece una forma de medir temperaturas por medio de un *termómetro de resistencia eléctrica*, como se ilustra en el siguiente ejemplo:

Ejemplo 17.5 ■ Un termómetro eléctrico: variación de la resistencia con la temperatura

Un alambre de platino tiene una resistencia de 0.50 Ω a 0°C, y es puesto en un baño de agua, donde su resistencia se eleva a un valor final de 0.60 Ω. ¿Cuál es la temperatura del baño?

Razonamiento. A partir del coeficiente de temperatura de la resistividad para el platino que se indica en la tabla 17.1, podemos despejar ΔT de la ecuación 17.6 y sumarla a 0°C, la temperatura inicial, para encontrar la temperatura del baño.

Solución.

Dado: $T_o = 0°C$
$R_o = 0.50\ \Omega$
$R = 0.60\ \Omega$
$\alpha = 3.93 \times 10^{-3}/C°$ (tabla 17.1)

Encuentre: T (temperatura del baño)

La razón $\Delta R/R_o$ es el cambio fraccional en la resistencia inicial R_o (a 0°C). Despejamos ΔT de la ecuación 17.6, usando los valores dados:

$$\Delta T = \frac{\Delta R}{\alpha R_o} = \frac{R - R_o}{\alpha R_o} = \frac{0.60\ \Omega - 0.50\ \Omega}{(3.93 \times 10^{-3}/C°)(0.50\ \Omega)} = 51\ C°$$

Así, el baño está a $T = T_o + \Delta T = 0°C + 51\ C° = 51°C$.

Ejercicio de refuerzo. En este ejemplo, si el material hubiera sido cobre, para el cual R_o = 0.50 Ω, en vez de platino, ¿cuál sería su resistencia a 51°C? A partir de ello, usted podría explicar qué material constituye el termómetro más "sensible": uno con un alto coeficiente de temperatura de resistividad o uno con un bajo valor.

Superconductividad

El carbono y otros semiconductores tienen coeficientes de temperatura de resistividad negativos. Sin embargo, muchos materiales tienen coeficientes de temperatura de resistividad positivos, por lo que sus resistencias aumentan conforme se incrementa la temperatura. Usted quizá se pregunte cuánto se reduce la resistencia eléctrica al bajar la temperatura. En ciertos casos, la resistencia puede llegar a cero, es decir, no sólo cerca de cero, sino *exactamente* cero. Este fenómeno se llama **superconductividad**, y fue Heike Kamerlingh Onnes, un físico holandés, quien lo descubrió en 1911. Actualmente, las temperaturas requeridas para estos materiales son de 100 K o menores, y su uso está restringido a aparatos de laboratorio de alta tecnología y equipo de investigación.

Sin embargo, la superconductividad tiene potencial para diversas aplicaciones novedosas e importantes, especialmente si se encuentran materiales cuya temperatura de superconducción esté cercana a la temperatura ambiente. Entre las aplicaciones están los imanes superconductores (que se utilizan ya en laboratorios y en unidades de propulsión naval a pequeña escala). Si no hay resistencia, son posibles corrientes elevadas y campos magnéticos de gran intensidad (capítulo 19). Utilizados en motores y máquinas, los electromagnetos superconductores serían más eficientes y entregarían más potencia para la misma entrada de energía. Los superconductores también podrían usarse como cables de transmisión de electricidad sin pérdidas por resistividad. Algunos imaginan memorias de computadoras sumamente rápidas a base superconductores. La ausencia de resistencia eléctrica abre un sinfín de posibilidades. Es probable que usted escuche más acerca de las aplicaciones de los superconductores en el futuro conforme se desarrollen nuevos materiales.

17.4 Potencia eléctrica

OBJETIVOS: *a*) Definir potencia eléctrica, *b*) calcular la entrega de potencia de circuitos eléctricos simples y *c*) explicar el calentamiento de joule y su significado.

Cuando en un circuito existe una corriente sostenida, los electrones reciben energía de la fuente de voltaje, por ejemplo, de una batería. Conforme esos portadores de carga pasan por componentes del circuito, entran en colisión con los átomos del material (es decir, encuentran resistencia) y pierden energía. La energía transferida en las colisiones da por resultado un incremento en la temperatura de los componentes. De esta manera, la energía eléctrica se transforma, por lo menos parcialmente, en energía térmica.

Sin embargo, la energía eléctrica también puede convertirse en otras formas de energía, como luz (en las bombillas eléctricas) y movimiento mecánico (en las perforadoras). De acuerdo con la ley de la conservación de la energía, cualquier forma que ésta tome, la energía *total* que entrega la batería a los portadores de carga debe transferirse *por completo* a los elementos del circuito (ignorando las pérdidas de energía en los cables). Esto es, al regresar a la fuente de voltaje o batería, un portador de carga pierde toda la energía potencial eléctrica que ganó de esa fuente y está listo para repetir el proceso.

La energía ganada por una cantidad de carga q a partir de una fuente de voltaje (voltaje V) es qV [en unidades, C(J/C) = J]. En un intervalo de tiempo t, la *tasa* a la que la energía se entrega quizá no sea constante. La tasa promedio de entrega de energía se llama **potencia eléctrica** promedio, $\overline{P}$, y está dada por

$$\overline{P} = \frac{W}{t} = \frac{qV}{t}$$

En el caso especial en que la corriente y el voltaje son constantes en el tiempo (como sucede con una batería), entonces la potencia promedio es la misma que la potencia en todo momento. Para corrientes constantes (cd), $I = q/t$ (ecuación 17.1). Así, podemos rescribir la ecuación de potencia anterior como:

$$P = IV \quad \textit{potencia eléctrica} \tag{17.7a}$$

Como recordará del capítulo 5, la unidad SI de potencia es el watt (W). El ampere (la unidad de corriente I) multiplicado por el volt (la unidad de voltaje V) da el joule por segundo (J/s), o watt. (Debería verificar esto.)

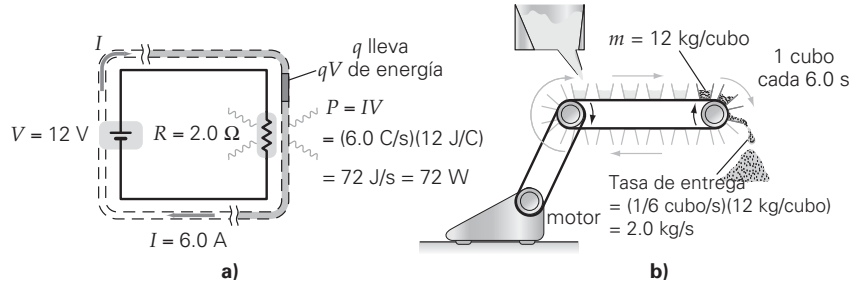
Una analogía mecánica visual que ayuda a explicar la ecuación 17.7a se presenta en la ▼figura 17.12, que ilustra un simple circuito eléctrico como un sistema para transferir energía, en analogía a un sistema de entrega por medio de una banda transportadora.

Como $R = V/I$, la potencia puede expresarse en tres formas equivalentes:

$$P = IV = \frac{V^2}{R} = I^2R \quad \textit{potencia eléctrica} \tag{17.7b}$$

Calor de joule

A la energía térmica consumida en un resistor portador de corriente se le llama **calor de joule**, o **pérdidas I^2R** (que se lee como "I cuadrada R"). En muchos casos (por ejemplo en líneas de transmisión eléctrica), el calor de joule tiene efectos colaterales indeseables. Sin embargo, en otras situaciones, el objetivo principal es la conversión de energía eléctrica a energía térmica. Las aplicaciones térmicas incluyen los elementos



▶ **FIGURA 17.12 Analogía de la potencia eléctrica** Los circuitos eléctricos pueden considerarse como sistemas de entrega de energía muy similares a una banda transportadora. ***a)*** Imagine la corriente hecha de segmentos consecutivos de carga $q = 1.0$ C, cada uno de los cuales porta $qV = 12$ J de energía que suministra la batería. La corriente es $I = V/R = 6.0$ A, o 6.0 C/s. Así, la potencia (o tasa de entrega de energía) al resistor es (6.0 C/s)(12 J/C) = 72 J/s = 72 W. ***b)*** La banda transportadora comprende una serie de cubos, cada uno de los cuales lleva 12 kg de arena (de forma análoga a la energía que porta cada carga q); un cubo llega a su destino cada 6.0 s (de manera análoga a la corriente I). La tasa de entrega en kg/s es análoga a la potencia en J/s en el inciso *a*.

calentadores (quemadores) de las estufas eléctricas, secadores de cabello, calentadores por inmersión y tostadores.

Las bombillas de luz se clasifican de acuerdo con su potencia en watts, por ejemplo, 60 W (▸figura 17.13a). Las lámparas incandescentes son relativamente ineficientes como fuentes de luz. Por lo general, menos del 5% de la energía eléctrica se convierte a luz visible; la mayor parte de la energía producida es radiación infrarroja invisible y calor.

Los aparatos eléctricos llevan indicadas sus clasificaciones de potencia. Se dan los requisitos de voltaje y potencia o los de voltaje y corriente (figura 17.13b). En cualquier caso, es posible calcular la corriente, la potencia y la resistencia efectiva. Los requisitos de potencia de algunos aparatos domésticos se presentan en la tabla 17.2. Aunque los aparatos más comunes especifican un voltaje de operación nominal de 120 V, hay que hacer notar que el voltaje doméstico varía entre 110 y 120 V y aun así se considera en el rango "normal".

a)

b)

▲ **FIGURA 17.13** Clasificación de potencia ***a)*** Las bombillas de luz se clasifican según sus watts. Al operar a 120 V, esta bombilla de 60 W consume 60 J de energía cada segundo. ***b)*** Las clasificaciones de los aparatos indican el voltaje y la potencia, o bien, el voltaje y la corriente. A partir de esos datos es posible calcular la corriente, la potencia y la resistencia efectiva. Aquí, un aparato es de 120 V y 18 W, mientras que el otro es de 120 V y 300 mA. ¿Podría calcular la corriente y resistencia del primero y la potencia requerida y la resistencia del segundo?

Ejemplo integrado 17.6 ■ Un dilema moderno: usar la computadora o comer

a) Considere dos aparatos que operan al mismo voltaje. El aparato A tiene una potencia nominal mayor que el aparato B. *a*) ¿Cómo es la resistencia de A con respecto a la de B? 1) Mayor, 2) menor, o 3) es igual. *b*) Un sistema de computadora incluye un monitor a color, con un requerimiento de potencia de 200 W, mientras que un horno tostador y asador tiene un requerimiento de 1500 W. ¿Cuál es la resistencia de cada uno si ambos están diseñados para funcionar a 120 V?

a) Razonamiento conceptual. La potencia depende de la corriente y del voltaje. Como los dos aparatos operan al mismo voltaje, no pueden llevar la misma corriente y, por lo tanto, tienen diferentes requerimientos de potencia. Por consiguiente, la respuesta 3 no es correcta. Como ambos aparatos operan con el mismo voltaje, el que tiene mayor potencia (A) debe llevar la mayor corriente. Para que A lleve más corriente al mismo voltaje que B, debe tener menos resistencia que B. Por lo tanto, la respuesta correcta es la 2; esto es, A tiene menos resistencia que B.

b) Razonamiento cuantitativo y solución. La definición de resistencia es $R = V/I$ (ecuación 17.2). Para usar esta definición, necesitamos la corriente, que se determina con la ecuación 17.7 ($P = IV$). Esta operación se hará dos veces, una para el monitor y luego para el asador/tostador. Se listan los datos, donde usamos el subíndice m para el monitor y b para el asador/tostador:

Dado: $P_m = 200$ W ***Encuentre:*** R (resistencia de cada aparato)
$P_b = 1500$ W
$V = 120$ V

La corriente del monitor es (utilizando la ecuación 17.7)

$$I_m = \frac{P_m}{V} = \frac{200\ \text{W}}{120\ \text{V}} = 1.67\ \text{A}$$

y la del asador/tostador es

$$I_b = \frac{P_b}{V} = \frac{1500\ \text{W}}{120\ \text{V}} = 12.5\ \text{A}$$

Las resistencias son

$$R_m = \frac{V}{I_m} = \frac{120\ \text{V}}{1.67\ \text{A}} = 71.9\ \Omega$$

y

$$R_b = \frac{V}{I_b} = \frac{120\ \text{V}}{12.5\ \text{A}} = 9.60\ \Omega$$

Como los dos operan al mismo voltaje, la salida de potencia de un aparato está controlada por su resistencia. La resistencia del aparato está *inversamente* relacionada con su requerimiento de potencia.

Ejercicio de refuerzo. Un calentador de inmersión es un "aparato" común en la mayoría de los dormitorios universitarios, y resulta útil para calentar agua para té, café o sopa. Suponiendo que el 100% del calor va al agua, ¿cuál debe ser la resistencia del calentador (que opera a 120 V) para calentar una taza de agua (cuya masa es de 250 g) de la temperatura ambiente (20°C) al punto de ebullición en 3.00 minutos?

TABLA 17.2 Requerimientos típicos de potencia y corriente para varios dispositivos domésticos (120 V)

Aparato	*Potencia*	*Corriente*	*Aparato*	*Potencia*	*Corriente*
Acondicionador de aire de habitación	1500 W	12.5 A	Calentador portátil	1500 W	12.5 A
Acondicionador de aire central	5000 W	41.7 A*	Horno de microondas	900 W	5.2 A
Mezcladora	800 W	6.7 A	Radio, reproductor de casetes	14 W	0.12 A
Secador de ropa	6000 W	50 A*	Refrigerador, no formador de escarcha	500 W	4.2 A
Lavadora de ropa	840 W	7.0 A	Estufa, quemadores superiores	6000 W	50.0 A*
Cafetera	1625 W	13.5 A	Estufa, horno	4500 W	37.5 A*
Lavavajillas	1200 W	10.0 A	Televisión a color	100 W	0.83 A
Cobertor eléctrico	180 W	1.5 A	Tostador	950 W	7.9 A
Secadora de cabello	1200 W	10.0 A	Calentador de agua	4500 W	37.5 A*

*Un aparato de alta potencia como éste se conecta a un suministro casero de 240 V para reducir la corriente a la mitad de esos valores (sección 18.5).

Ejemplo 17.7 ■ Una reparación potencialmente peligrosa: ¡nunca lo intente!

Una secadora de cabello está clasificada a 1200 W para un voltaje de operación de 115 V. El filamento del cable uniforme se rompe cerca de un extremo, y el propietario lo repara cortando una sección cerca de la ruptura y simplemente lo reconecta. Entonces, el filamento es 10.0% más corto que su longitud original. ¿Cuál será la salida de potencia del aparato después de esta "reparación"?

Razonamiento. El cable siempre opera a 115 V. Así que al acortar el cable, lo que disminuye su resistencia, dará por resultado una mayor corriente. Con este aumento de corriente, uno esperaría que se incremente la salida de potencia.

Solución. Usaremos el subíndice 1 para indicar la situación "antes de la ruptura" y el subíndice 2 para "después de la reparación". Se listan los datos,

Dado: $P_1 = 1200$ W, $V_1 = V_2 = 115$ V, $L_2 = 0.900L_1$ ***Encuentre:*** P_2 (salida de potencia después de la reparación)

Después de la reparación, el cable tiene el 90.0% de su resistencia original, porque (véase la ecuación 17.3) la resistencia de un cable es directamente proporcional a su longitud. Para mostrar la reducción del 90% de forma explícita, vamos a expresar la resistencia después de la reparación ($R_2 = \rho L_2/A$) en términos de la resistencia original ($R_1 = \rho L_1/A$):

$$R_2 = \rho\frac{L_2}{A} = \rho\frac{0.900L_1}{A} = 0.900\left(\rho\frac{L_1}{A}\right) = 0.900R_1$$

como se esperaba.

La corriente aumentará porque el voltaje es el mismo ($V_2 = V_1$). Este requerimiento se expresa como $V_2 = I_2R_2 = V_1 = I_1R_1$. De manera que la nueva corriente en términos de la corriente original es

$$I_2 = \left(\frac{R_1}{R_2}\right)I_1 = \left(\frac{R_1}{0.900R_1}\right)I_1 = (1.11)I_1$$

lo que significa que la corriente después de la reparación es 11% mayor que antes.

La potencia original es $P_1 = I_1V = 1200$ W. La potencia después de la reparación es $P_2 = I_2V$ (observe que los voltajes no tienen subíndices porque permanecieron igual y se anularán). Expresando una razón da

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{I_2V}{I_1V} = \frac{I_2}{I_1} = 1.11$$

de donde se despeja P_2:

$$P_2 = 1.11P_1 = 1.11(1200\text{ W}) = 1.33 \times 10^3\text{ W}$$

La salida de potencia de la secadora aumentó 120 W. *¡Nunca intente hacer ese trabajo de reparación!*

Ejercicio de refuerzo. En este ejemplo, determine *a*) las resistencias inicial y final y *b*) las corrientes inicial y final.

A menudo nos quejamos acerca de lo que tenemos que pagar por consumo de electricidad, pero ¿por qué pagamos en realidad? Lo que pagamos es *energía* eléctrica medida en unidades de **kilowatt-hora (kWh)**. La potencia es la tasa a la que se realiza trabajo ($P = W/t$ o $W = Pt$), por lo que el trabajo tiene unidades de watt-segundo (potencia × tiempo). Al convertir esta unidad a la mayor unidad de kilowatt-horas (kWh), vemos que el kilowatt-hora es una unidad de trabajo (o energía), equivalente a 3.6 millones de joules, porque:

$$1\ \text{kWh} = (1000\ \text{W})(3600\ \text{s}) = (1000\ \text{J/s})(3600\ \text{s}) = 3.6 \times 10^6\ \text{J}$$

Así, pagamos a la compañía de "luz" la energía eléctrica que usamos para efectuar trabajo con nuestros aparatos domésticos.

El costo de la energía eléctrica varía según el lugar. En Estados Unidos, el costo va de unos cuantos centavos de dólar (por kilowatt-hora) a varias veces ese valor. En los últimos años, las tarifas de energía eléctrica se han liberado. Aunada a una creciente demanda (sin un aumento correspondiente en el suministro), la eliminación del control de precios ha provocado un aumento estratosférico en las tarifas en algunas zonas del país. ¿Sabe cuál es el precio de la electricidad en su localidad? Consulte una tabla de tarifas para averiguarlo, especialmente si usted vive en alguna de las áreas afectadas por el alza de tarifas. Veamos cuál es el costo de la electricidad para operar un aparato doméstico en el siguiente ejemplo.

Ejemplo 17.8 ■ Costo de la energía eléctrica: el precio del enfriamiento

Si el motor de un refrigerador que no forma escarcha funciona el 15% del tiempo, ¿cuánto cuesta operarlo por mes (al centavo más cercano) si la compañía de luz cobra 11 centavos por kilowatt-hora? (Suponga que el mes es de 30 días.)

Razonamiento. De la potencia y la cantidad de tiempo que el motor está encendido por día, podemos calcular la energía eléctrica que consume el refrigerador *diariamente* y luego calcularla para un mes de 30 días.

Solución. Al hablar de cantidades de energía eléctrica, se usan kilowatts-horas porque el joule es una unidad relativamente pequeña. Se listan los datos:

Dado: $P = 500\ \text{W}$ (tabla 17.2) ***Encuentre:*** costo de operación por mes
Costo = \$0.11/kWh

Como el motor del refrigerador opera el 15% del tiempo, en un día funciona $t = (0.15)(24\ \text{h}) = 3.60\ \text{h}$. Como $P = W/t$, la energía eléctrica que se consume *por día*, es

$$W = Pt = (500\ \text{W})(3.60\ \text{h/día}) = 1.80 \times 10^3\ \text{Wh} = 1.80\ \text{kWh/día}$$

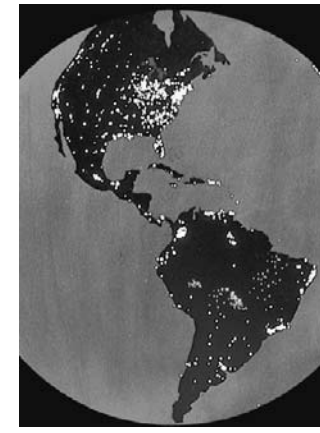
Entonces, el costo por día es

$$\left(\frac{1.80\ \text{kWh}}{\text{día}}\right)\left(\frac{\$0.11}{\text{kWh}}\right) = \frac{\$0.20}{\text{día}}$$

o 20 centavos por día. Así, para un mes de 30 días el costo es

$$\left(\frac{\$0.20}{\text{día}}\right)\left(\frac{30\ \text{día}}{\text{mes}}\right) \approx \$6\ \text{por mes}$$

Ejercicio de refuerzo. ¿Cuánto tiempo tendría usted que dejar encendida una bombilla de luz de 60 W para usar la misma cantidad de energía eléctrica que el motor del refrigerador en este ejemplo consume cada hora que está encendido?

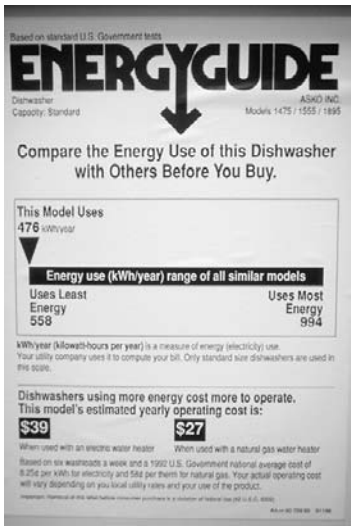


▲ **FIGURA 17.14** Todo iluminado Una imagen nocturna del Continente Americano tomada desde un satélite. ¿Podría identificar los principales centros de población en Estados Unidos y en otros países? Las manchas en el centro de Sudamérica indican incendios forestales. La pequeña mancha al sur de México representa las llamas del gas ardiendo en los sitios de producción de petróleo. En el extremo superior derecho de la imagen alcanzan a verse las luces de algunas ciudades europeas. La imagen fue registrada por un sistema de infrarrojo visible.

Eficiencia eléctrica y recursos naturales

Aproximadamente el 25% de la electricidad generada en Estados Unidos se usa para el alumbrado (▸figura 17.14). Este porcentaje es casi equivalente a la producción de 100 plantas generadoras de electricidad. Los refrigeradores consumen aproximadamente el 7% de la electricidad generada en Estados Unidos (lo que equivale a la producción de 28 plantas generadoras).

Este enorme (y creciente) consumo de energía eléctrica en Estados Unidos, ha inducido al gobierno federal y a muchos gobiernos estatales a establecer límites mínimos de eficiencia para refrigeradores, congeladores, sistemas acondicionadores de aire y calenta-



▲ **FIGURA 17.15** Guía de energía
Los consumidores pueden conocer las eficiencias de los aparatos domésticos en términos del costo anual promedio de operación. En algunos casos, el costo anual está dado para diferentes tarifas de kilowatt-hora (kWh), que varían en diferentes zonas de Estados Unidos.

dores de agua (◂figura 17.15). Además, se han desarrollado lámparas fluorescentes más eficientes y se ha generalizado su uso. Estas lámparas ahora consumen aproximadamente entre 25 y 30% menos de energía que la lámpara fluorescente promedio y cerca del 75% menos de energía que las lámparas incandescentes con salida de luz equivalente.

El resultado de todas esas medidas ha sido un ahorro considerable de energía conforme los nuevos aparatos más eficientes reemplazan gradualmente a los antiguos modelos menos eficientes. La energía ahorrada se traduce directamente en ahorro de combustible y de otros recursos naturales, así como en una reducción de los daños ambientales, tales como la contaminación química y el calentamiento global. Para ver qué tipo de resultados se logran aplicando un estándar de eficiencia de energía, considere el siguiente ejemplo.

Ejemplo 17.9 ■ Lo que podemos ahorrar: incremento de la eficiencia eléctrica

La mayoría de las plantas modernas generadoras de potencia producen electricidad a razón de 1.0 GW (salida de gigawatt de potencia eléctrica). Estime cuántas menos de esas plantas necesitaría el estado de California, si todas las casas habitación cambiaran sus refrigeradores de 500 W del ejemplo 17.8 a refrigeradores más eficientes de 400 W. (Suponga que hay aproximadamente 10 millones de hogares en California con un promedio de 1.2 refrigeradores operando por hogar.)

Razonamiento. Los resultados del ejemplo 17.8 se utilizarán para calcular el efecto total.

Solución.

Dado: Tasa de la planta = 1.0 GW = 1.0×10^6 kW
Requisito de energía, modelo de 500 watts = 1.80 kWh/día (ejemplo 17.8)
Número de hogares = 10×10^6
Número de refrigeradores por hogar = 1.2

Encuentre: ¿cuántas plantas generadoras menos se requerirán al cambiar a refrigeradores más eficientes?

Para todo el estado, el uso de energía por día con refrigeradores menos eficientes es

$$\left(\frac{1.80\ \text{kWh/día}}{\text{refrigerador}}\right)(10 \times 10^6\ \text{hogares})\left(\frac{1.2\ \text{refrigeradores}}{\text{hogar}}\right) = 2.2 \times 10^7\ \frac{\text{kWh}}{\text{día}}$$

Los refrigeradores más eficientes en su uso de energía, usan sólo el 80% (400 W/500 W = 0.80) de esta cantidad, o aproximadamente 1.7×10^7 kWh/día. La diferencia, 5.0×10^6 kWh/día, es la razón a la que se ahorra energía eléctrica. Una planta generadora de 1.0 GW produce

$$\left(1.0 \times 10^6\ \frac{\text{kW}}{\text{planta}}\right)\left(24\ \frac{\text{h}}{\text{día}}\right) = 2.4 \times 10^7\ \frac{(\text{kWh/planta})}{\text{día}}$$

De manera que los refrigeradores de reemplazo ahorrarían aproximadamente

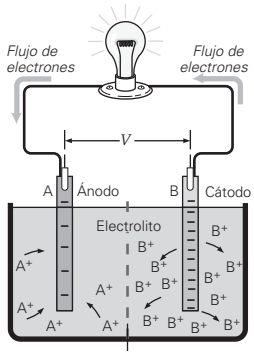
$$\frac{5.0 \times 10^6\ \text{kWh/día}}{2.4 \times 10^7\ \text{kWh/(planta-día)}} = 0.21\ \text{planta}$$

o cerca del 20% de la producción de una planta típica. Advierta que este ahorro sería resultado del cambio de un *solo* aparato doméstico. Imagine lo que podría hacerse si todos los aparatos domésticos, incluidos los que se encargan de la iluminación, fueran más eficientes. El desarrollo y uso de aparatos eléctricos más eficientes es la manera de evitar tener que construir nuevas plantas generadoras de energía eléctrica.

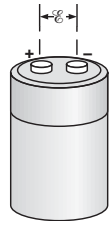
Ejercicio de refuerzo. Se dice a menudo que los calentadores de agua, eléctricos y de gas son igualmente eficientes, con aproximadamente 95% de eficiencia. En realidad, mientras que los calentadores de gas alcanzan una eficiencia del 95%, sería más preciso decir que los calentadores eléctricos de agua tienen un 33% de eficiencia, aun cuando aproximadamente el 95% de la *energía eléctrica* que consumen se transfiere al agua en forma de calor. Explique esta situación. [*Sugerencia:* ¿cuál es la fuente de energía de un calentador eléctrico de agua? Compare esto con la energía que entrega el gas natural. Recuerde el análisis de generación eléctrica en la sección 12.4 y la eficiencia de Carnot en la sección 12.5.]

Repaso del capítulo

- Una **batería** genera una **fuerza electromotriz (fem)**, o un voltaje, entre sus terminales. La terminal de alto voltaje es el **ánodo**, y la terminal de bajo voltaje es el **cátodo**.

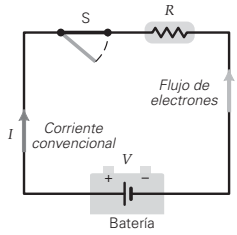


- La **fuerza electromotriz (fem $\mathscr{E}$)** se mide en volts y representa el número de joules de energía que una batería (o cualquier suministro de potencia) entrega a 1 coulomb de carga que pasa a través de ella (1 J/C = 1 V).



- La **corriente eléctrica (*I*)** es la razón a la que fluye la carga. Su dirección es la de la **corriente convencional**, que es en la dirección en que la carga positiva realmente fluye o parece fluir. En los metales, el flujo de carga se debe a los electrones y, por consiguiente, la dirección de la corriente convencional es contraria a la dirección de flujo de los electrones. La corriente se mide en amperes (1 A = 1 C/s) como

$$I = \frac{q}{t} \tag{17.1}$$

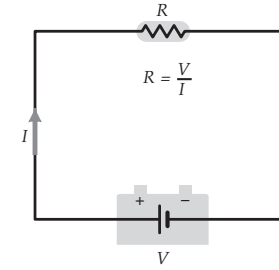


- Para que una corriente eléctrica exista en un circuito, éste debe ser un **circuito completo**, es decir, un circuito (o conjunto de elementos de circuito y cables) que conecte ambas terminales de una batería o suministro de potencia sin interrupción.

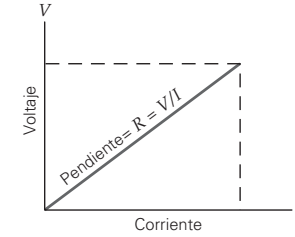
- La **resistencia eléctrica (*R*)** de un objeto es el voltaje a través del objeto dividido entre la corriente en ella, o

$$R = \frac{V}{I} \quad \text{o} \quad V = IR \tag{17.2}$$

Las unidades de resistencia son el **ohm** o el volt por ampere.

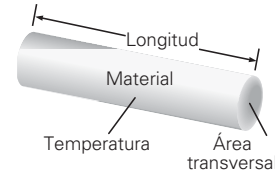


- Un elemento de circuito obedece la **ley de Ohm** si ese elemento presenta una resistencia eléctrica constante. La ley de Ohm se escribe comúnmente como $V = IR$, donde R es constante.



- La resistencia de un objeto depende de la **resistividad (ρ)** del material del que está hecho (propiedades atómicas), del área transversal A, y de la longitud L. Para objetos con sección transversal uniforme,

$$R = \rho\left(\frac{L}{A}\right) \tag{17.3}$$



- La **potencia eléctrica** (P) es la tasa a la que una batería (suministro de potencia) efectúa trabajo, o la tasa a la que se transfiere energía a un elemento de un circuito. La entrega de potencia a un elemento de un circuito depende de la resistencia del elemento, de la corriente en él y del voltaje que se le aplica. La potencia eléctrica se expresa de tres maneras equivalentes:

$$P = IV = \frac{V^2}{R} = I^2R \tag{17.7b}$$

Ejercicios

Los ejercicios designados **OM** *son preguntas de opción múltiple; los* **PC** *son preguntas conceptuales; y los* **EI** *son ejercicios integrados. A lo largo del texto, muchas secciones de ejercicios incluirán ejercicios "apareados". Estos pares de ejercicios, que se identifican con números subrayados, pretenden ayudar al lector a resolver problemas y aprender. El primer ejercicio de cada pareja (el de número par) se resuelve en la Guía de estudio, que puede consultarse si se necesita ayuda para resolverlo. El segundo ejercicio (de número impar) es similar, y su respuesta se da al final del libro.*

En este capítulo suponga que todas las baterías tienen una resistencia interna insignificante a menos que se indique lo contrario.

17.1 Baterías y corriente directa

1. **OM** Cuando una batería es parte de un circuito completo, el voltaje a través de sus terminales es su *a*) fem, *b*) voltaje terminal, *c*) salida de potencia, *d*) todas las opciones anteriores son válidas.

2. **OM** Conforme una batería envejece, su *a*) fem aumenta, *b*) fem disminuye, *c*) voltaje terminal aumenta, *d*) voltaje terminal disminuye.

3. **OM** Cuando cuatro baterías de 1.5 V se conectan, el voltaje de salida de la combinación es 1.5. Estas baterías están conectadas *a*) en serie, *b*) en paralelo, *c*) un par están conectadas en paralelo y el otro par en serie, *d*) ninguna de las opciones anteriores es verdadera.

4. **OM** Cuando se ayuda a alguien cuyo automóvil tiene una batería "muerta", ¿cómo debería conectarse la batería del automóvil de usted en relación con la batería "muerta"? *a*) En serie, *b*) en paralelo o *c*) tanto en serie como en paralelo funcionaría bien.

5. **OM** Cuando varias baterías de 1.5 V están conectadas en serie, la salida de voltaje total de la combinación se mide en 12 V. ¿Cuántas baterías se necesitan para obtener este voltaje? *a*) Dos, *b*) diez, *c*) ocho o *d*) seis.

6. **PC** ¿Por qué el diseño de la batería que se ilustra en la figura 17.1 requiere una membrana química?

7. **PC** Se mide el voltaje de una batería mientras se encuentra sobre el banco de trabajo y un técnico lee la especificación del fabricante, que es de 12 V. ¿Esto significa que funcionará como se espera cuando se coloque en el circuito completo? Explique su respuesta.

8. **PC** Dibuje los siguientes circuitos *completos*, utilizando los símbolos mostrados en la sección Aprender dibujando de la p. 571. *a*) Dos baterías ideales de 6.0 V en serie conectadas a un condensador seguido de un resistor. *b*) Dos baterías ideales de 12.0 V en paralelo, conectadas como una unidad a dos resistores idénticos en serie uno con otro. *c*) Una batería no ideal (una con resistencia interna) conectada a dos condensadores idénticos que están en paralelo uno con otro, seguidos de dos resistores en serie uno con otro.

9. ● *a*) Tres pilas secas de 1.5 V están conectadas en serie. ¿Cuál es el voltaje total de la combinación? *b*) ¿Cuál sería el voltaje total si las pilas estuvieran conectadas en paralelo?

10. ● ¿Cuál es el voltaje a través de seis baterías de 1.5 V cuando están conectadas *a*) en serie y *b*) en paralelo?

11. ●● Dos baterías de 6.0 V y una de 12 V están conectadas en serie. *a*) ¿Cuál es el voltaje a través de todo el arreglo? *b*) ¿Qué arreglo de esas tres baterías daría un voltaje total de 12 V?

12. ●● Dadas tres baterías con voltajes de 1.0, 3.0 y 12 V, respectivamente, ¿cuántos voltajes diferentes podrían obtenerse conectando una o más de las baterías en serie o en paralelo, y cuáles serían esos voltajes?

13. **EI** ●● Se tienen cuatro pilas AA de 1.5 V cada una. Las pilas están agrupadas en pares. En el arreglo A, las dos pilas en cada par están en serie, y luego los pares están conectados en paralelo. En el arreglo B, las dos pilas en cada par están en paralelo y luego los pares están conectados en serie. *a*) Comparado con el arreglo B, ¿ el arreglo A tendrá un voltaje total 1) mayor, 2) igual o 3) menor? *b*) ¿Cuáles son los voltajes totales de cada arreglo?

17.2 Corriente y velocidad de deriva

14. **OM** ¿En cuál de estas situaciones fluye más carga por un punto dado en un cable: cuando este último tiene *a*) una corriente de 2.0 A durante 1.0 min, *b*) 4.0 A durante 0.5 min, *c*) 1.0 A durante 2.0 min o *d*) todas tienen la misma carga.

15. **OM** ¿Cuál de estas situaciones implica la menor corriente? Un cable que tiene *a*) 1.5 C que pasa por un punto dado en 1.5 min, *b*) 3.0 C que pasan por un punto dado en 1.0 min o *c*) 0.5 C que pasan por un punto dado en 0.10 min.

16. **OM** En una máquina dental de rayos X, el movimiento de electrones acelerados es hacia el este. ¿En qué dirección es la corriente asociada con estos electrones? *a*) Este, *b*) oeste o *c*) cero.

17. **PC** En el circuito que se ilustra en la figura 17.4a, ¿cuál es la dirección de *a*) el flujo de electrones en el resistor, *b*) la corriente en el resistor y *c*) la corriente en la batería.

18. **PC** La velocidad de deriva, o velocidad promedio con que los electrones viajan en un circuito completo, es de varios mm por segundo. Sin embargo, una lámpara que está a 3 m de distancia se enciende instantáneamente cuando usted acciona el interruptor. Explique esta aparente paradoja.

19. ● Una carga neta de 30 C pasa por el área transversal de un cable en 2.0 min. ¿Cuál es la corriente en el cable?

20. ● ¿Cuánto tiempo le tomaría a una carga neta de 2.5 C pasar por un punto de un cable para producir una corriente constante de 5.0 mA?

21. ● Un carrito de juguete extrae una corriente de 0.50 mA de una batería nicad (de níquel-cadmio). En 10 min de operación, *a*) ¿cuánta carga fluye por el carrito de juguete y *b*) cuánta energía pierde la batería?

22. ●● El arrancador del motor de un automóvil extrae 50 A de la batería al echarlo a andar. Si el tiempo de arranque es de 1.5 s, ¿cuántos electrones pasan por un punto dado en el circuito durante ese tiempo?

23. ●● Una carga neta de 20 C pasa por un punto en un cable en 1.25 min. ¿Cuánto tardará una carga neta de 30 C en pasar por ese punto si la corriente en el cable se duplica?

24. ●●● Las baterías de automóvil a menudo están clasificadas en "ampere-horas" o A · h. *a*) Demuestre que A · h tiene unidades de carga y que el valor de 1 A · h es 3600 C. *b*) Una batería completamente cargada, de uso rudo, es de 100 A · h y entrega una corriente de 5.0 A de manera constante hasta que se agota. ¿Cuál es el tiempo máximo que esta batería podrá entregar corriente, suponiendo que no se recarga? *c*) ¿Cuánta carga entregará la batería en este tiempo?

25. **EI** ●●● Imagine que algunos protones se mueven hacia la izquierda al mismo tiempo que algunos electrones se mueven hacia la derecha por el mismo lugar. *a*) La corriente neta será 1) hacia la derecha, 2) hacia la izquierda, 3) cero o 4) ninguna de las opciones anteriores es correcta. *b*) En 4.5 s, 6.7 C de electrones fluyen hacia la derecha al mismo tiempo que 8.3 C de protones fluyen hacia la izquierda. ¿Cuál es la magnitud de la corriente total?

26. ●●● En un acelerador lineal de protones, una corriente de protones de 9.5 mA golpea un blanco. *a*) ¿Cuántos protones golpean el blanco cada segundo? *b*) ¿Cuál es la energía entregada al blanco cada segundo si los protones tienen, cada uno, una energía cinética de 20 MeV y pierden su energía en el blanco?

17.3 Resistencia y ley de Ohm*

27. **OM** El ohm es sólo otro nombre para el *a*) volt por ampere, *b*) ampere por volt, *c*) watt o *d*) volt.

28. **OM** Dos resistores óhmicos se colocan a través de una batería de 12 V, uno a la vez. La corriente resultante en el resistor A, según las mediciones, es el doble de la del resistor B. ¿Qué podría decir acerca de sus valores de resistencia? *a*) $R_A = 2R_B$, *b*) $R_A = R_B$, *c*) $R_A = R_B/2$ o *d*) ninguna de las opciones anteriores es válida.

29. **OM** Un resistor óhmico se coloca a través de dos baterías diferentes. Cuando se conecta a la batería A, la corriente resultante, según las mediciones, es tres veces la corriente que cuando el resistor está conectado a la batería B. ¿Qué podría decir acerca de los voltajes de las baterías? *a*) $V_A = 3V_B$, *b*) $V_A = V_B$, *c*) $V_B = 3V_A$ o *d*) ninguna de las opciones anteriores es válida.

30. **OM** Si se duplica el voltaje a través de un resistor óhmico y al mismo tiempo se reduce su resistencia a un tercio de su valor original, ¿qué sucede a la corriente en el resistor? *a*) Se duplica, *b*) se triplica, *c*) se multiplica seis veces o *d*) no es posible determinarlo a partir de los datos.

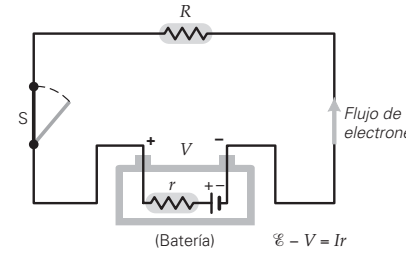
31. **PC** Si se traza una gráfica de voltaje (V) *versus* corriente (I) para dos conductores óhmicos con diferentes resistencias, ¿cómo podría usted decir cuál es menos resistivo?

32. **PC** Los filamentos de las bombillas de luz generalmente fallan justo después de que se encienden y no luego de que han estado encendidos un cierto tiempo. ¿Por qué?

*Suponga que los coeficientes de temperatura de la resistividad que aparecen en la tabla 17.1 se aplican a grandes rangos de temperatura.

33. **PC** Un alambre está conectado a través de una fuente permanente de voltaje. *a*) Si ese alambre se reemplaza por otro del mismo material pero con el doble de longitud y el doble de área transversal, ¿cómo se verá afectada la corriente que pasa por él? *b*) ¿Cómo resultará afectada la corriente si, en lugar de lo anterior, el nuevo alambre tiene la misma longitud, pero la mitad del diámetro del primero?

34. **PC** Una batería real siempre tiene alguna resistencia interna r (▼figura 17.16) que aumenta con la edad de la batería. Explique por qué el voltaje terminal cae cuando la resistencia interna aumenta.



▲ **FIGURA 17.16 Fem y voltaje terminal** Véanse los ejercicios 34 y 35.

35. ● Una batería de 12.0 V suministra 1.90 A a un resistor de 6.00 Ω (figura 17.16). *a*) ¿Cuál es el voltaje terminal de la batería? *b*) ¿Cuál es su resistencia interna?

36. ● ¿Cuál es la fem de una batería con una resistencia interna de 0.15 Ω si la batería entrega 1.5 A a un resistor de 5.0 Ω conectado externamente?

37. **EI** ● Algunos estados permiten el uso de alambre de aluminio en las casas en lugar de los de cobre. *a*) Si usted quiere que la resistencia de sus alambres de aluminio sea igual que con alambres de cobre, el alambre de aluminio debe tener 1) un mayor diámetro, 2) un menor diámetro o 3) el mismo diámetro que el alambre de cobre. *b*) Calcule la razón entre los espesores del alambre de aluminio y el de cobre.

38. ● ¿Cuánta corriente se extrae de una batería de 12 V cuando un resistor de 15 Ω se conecta a través de sus terminales?

39. ● ¿Qué voltaje debe tener una batería para producir una corriente de 0.50 A a través de un resistor de 2.0 Ω?

40. ● Durante un experimento sobre la conducción de corriente en el cuerpo humano, un técnico conecta un electrodo a la muñeca y otro al hombro de una persona. Si se aplican 100 mV a través de los dos electrodos y la corriente resultante es de 12.5 mA, ¿cuál es la resistencia total del brazo de la persona?

41. ●● Un alambre de cobre de 0.60 m de longitud tiene un diámetro de 0.10 cm. ¿Cuál es su resistencia?

42. ●● Un material se utiliza para formar una varilla larga con sección transversal cuadrada de 0.50 cm de lado. Cuando un voltaje de 100 V se aplica a lo largo de 20 m de longitud de la varilla, se presenta una corriente de 5.0 A. *a*) ¿Cuál es la resistividad del material? *b*) ¿El material es un conductor, un aislante o un semiconductor?

43. ●● Dos alambres de cobre tienen áreas transversales iguales y longitudes de 2.0 y 0.50 m, respectivamente. *a*) ¿Cuál es la razón de la corriente en el alambre más corto con respecto a la de la corriente en el más largo si están conectados a la misma fuente de potencia? *b*) Si se desea que los dos alambres conduzcan la misma corriente, ¿cuál tendría que ser la razón de sus áreas transversales? (Dé su respuesta como una razón del alambre más largo al más corto.)

44. **EI** ●● Dos alambres de cobre tienen igual longitud, pero el diámetro de uno es tres veces el del otro. *a*) La resistencia del alambre más delgado es 1) 3, 2) $\frac{1}{3}$, 3) 9 o 4) $\frac{1}{9}$ veces la resistencia del alambre más grueso. ¿Por qué? *b*) Si el alambre más grueso tiene una resistencia de 1.0 Ω, ¿cuál es la resistencia del más delgado?

45. ●● El alambre de un elemento calefactor de un quemador de estufa eléctrica tiene una longitud efectiva de 0.75 m y una área transversal de 2.0×10^{-6} m^2. *a*) Si el alambre se hace de hierro y opera a una temperatura de 380°C, ¿cuál es su resistencia operativa? *b*) ¿Cuál es su resistencia cuando la estufa está apagada?

46. ●● *a*) ¿Cuál es la variación porcentual de la resistividad del cobre sobre el rango de temperaturas que va de la temperatura ambiente (20°C) a 100°C? *b*) Suponga que la resistencia del alambre de cobre cambia sólo a causa de los cambios de resistividad sobre este rango de temperatura. Después suponga que el alambre se conecta al mismo suministro de potencia. ¿Por qué porcentaje cambiaría su corriente? ¿Aumentaría o disminuiría?

47. ●● Un alambre de cobre tiene una resistencia de 25 mΩ a 20°C. Cuando el alambre lleva una corriente, el calor que genera la corriente hace que la temperatura del alambre aumente en 27 C°. *a*) ¿Cuál es el cambio en la resistencia del alambre? *b*) Si su corriente original era de 10.0 mA, ¿cuál es su corriente final?

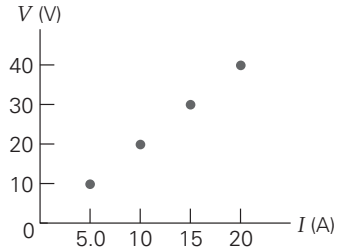
48. ●● Cuando un resistor está conectado a una fuente de 12 V, extrae una corriente de 185 mA. El mismo resistor conectado a una fuente de 90 V extrae una corriente de 1.25 A. ¿El resistor es óhmico? Justifique su respuesta matemáticamente.

49. ●● Una aplicación particular requiere que un alambre de aluminio de 20 m de longitud tenga una resistencia de 0.25 mΩ a 20°C. ¿Cuál debe ser el diámetro del alambre?

50. ●● Si la resistencia del alambre en el ejercicio 49 no puede variar en más de ±5.0%, ¿cuál es el rango de temperaturas de operación del alambre?

51. **EI** ●●● Cuando un alambre se estira y su longitud aumenta, su área transversal disminuye, en tanto que su volumen total permanece constante. *a*) La resistencia del alambre después de estirarse será 1) mayor, 2) igual o 3) menor que antes de estirarse. *b*) Un alambre de cobre de 1.0 m de longitud y 2.0 mm de diámetro se estira; su longitud aumenta 25% mientras que su área transversal disminuye, pero permanece uniforme. Calcule la razón de su resistencia (la final con respecto a la inicial).

52. ●●● La ▼figura 17.17 muestra los datos de la dependencia de la corriente a través de un resistor sobre el voltaje a través de ese resistor. *a*) ¿El resistor es óhmico? Explique su respuesta. *b*) ¿Cuál es su resistencia? *c*) Utilice los datos para predecir qué voltaje se necesitará para producir una corriente de 4.0 A en el resistor.



◀ **FIGURA 17.17 ¿Un resistor óhmico?** Véase el ejercicio 52.

53. ●●● A 20°C, una barra de silicio está conectada a una batería con un voltaje terminal de 6.0 V y se produce una corriente de 0.50 A. La temperatura de la barra aumenta entonces a 25°C. Suponga que el coeficiente de temperatura de la resistencia es constante. *a*) ¿Cuál es su nueva resistencia? *b*) ¿Cuánta corriente lleva entonces la barra? *c*) Si se desea reducir la corriente de su valor a temperatura ambiente de 0.50 a 0.40 A, ¿a qué temperatura debería estar la muestra?

54. **EI** ●●● Un alambre de platino está conectado a una batería. *a*) Si la temperatura aumenta, ¿la corriente en el alambre 1) aumentará, 2) permanecerá igual o 3) disminuirá? ¿Por qué? *b*) Un termómetro de resistencia eléctrica está hecho de alambre de platino que tiene una resistencia de 5.0 Ω a 20°C. El alambre está conectado a una batería de 1.5 V. Cuando el termómetro se calienta a 2020°C, ¿por cuánto cambia la corriente?

17.4 Potencia eléctrica

55. **OM** La unidad de potencia eléctrica, el watt, ¿es equivalente a qué combinación de unidades SI? *a*) $A^2 \cdot \Omega$, *b*) J/s, *c*) V^2/Ω o *d*) todas las opciones son válidas.

56. **OM** Si el voltaje a través de un resistor óhmico se duplica, la potencia gastada en el resistor *a*) aumenta por un factor de 2, *b*) aumenta por un factor de 4, *c*) disminuye a la mitad, *d*) ninguna de las opciones anteriores es verdadera.

57. **OM** Si la corriente a través de un resistor óhmico se reduce a la mitad, la potencia gastada en el resistor *a*) aumenta por un factor de 2, *b*) aumenta por un factor de 4, *c*) disminuye a la mitad, *d*) disminuye por un factor de 4.

58. **PC** Suponiendo que la resistencia de su secadora de cabello obedece la ley de Ohm, ¿qué pasaría a su salida de potencia si la enchufara directamente a un tomacorriente de 240 V en Europa, en tanto que está diseñada para conectarse a tomacorrientes de 120 V en Estados Unidos?

59. **PC** La mayor parte de los filamentos de las bombillas de luz están hechos de tungsteno y son aproximadamente de la misma longitud. ¿Qué sería diferente en el filamento de una bombilla de 60 W comparado con el de una bombilla de 40 W?

60. **PC** ¿Quién consume más potencia de una batería de 12 V, un resistor de 5.0 Ω o uno de 10 Ω? ¿Por qué?

61. ● Un reproductor digital de video (DVD) está clasificado como de 100 W a 120 V. ¿Cuál es su resistencia?

62. ● Un congelador con 10 Ω de resistencia está conectado a una fuente de 110 V. ¿Cuál es la potencia entregada cuando este congelador está encendido?

63. ● La corriente a través de un refrigerador con una resistencia de 12 Ω es de 13 A (cuando el refrigerador está encendido). ¿Cuál es la potencia entregada al refrigerador?

64. ● Demuestre que la cantidad de volts al cuadrado por ohm (V^2/Ω) tiene unidades SI de potencia.

65. ● Un calentador eléctrico de agua está diseñado para producir 50 kW de calor cuando está conectado a una fuente de 240 V. ¿Cuál debe ser la resistencia del calentador?

66. ●● Suponiendo que el calentador en el ejercicio 65 tiene 90% de eficiencia, ¿cuánto tiempo le tomará calentar 50 gal de agua de 20 a 80°C?

67. **EI** ●● Un resistor óhmico en un circuito está diseñado para operar a 120 V. *a*) ¿Si usted conecta el resistor a una fuente de potencia de 60 V, el resistor disipará calor a 1) 2, 2) 4, 3) $\frac{1}{2}$ o 4) $\frac{1}{4}$ veces la potencia designada? ¿Por qué? *b*) Si la potencia designada es de 90 W a 120 V, pero el resistor está conectado a 40 V, ¿cuál es la potencia entregada al resistor al menor voltaje?

68. ●● Un juguete eléctrico con una resistencia de 2.50 Ω opera con una batería de 1.50 V. *a*) ¿Qué corriente extrae el juguete? *b*) Suponiendo que la batería entrega una corriente constante durante la vida de 6.00 h del juguete, ¿cuánta carga pasa por éste? *c*) ¿Cuánta energía fue entregada al juguete?

69. ●● Una máquina soldadora extrae 18 A de corriente a 240 V. *a*) ¿Cuál es su tasa de consumo de energía? *b*) ¿Cuál es su resistencia?

70. ●● En promedio, un calentador eléctrico de agua opera 2.0 h cada día. *a*) Si el costo de la electricidad es de \$0.15/kWh, ¿cuál es el costo de operar el calentador durante un mes de 30 días? *b*) ¿Cuál es la resistencia de un calentador de agua típico? [*Sugerencia:* véase la tabla 17.2.]

71. ●● *a*) ¿Cuál es la resistencia de un serpentín de calefacción si genera 15 kJ de calor por minuto cuando está conectado a una fuente de 120 V? *b*) ¿Cómo cambiaría usted la resistencia si quisiera obtener 10 kJ de calor por minuto?

72. ●● Se suministra potencia a una computadora de 200 W durante 10 h por día. Si el costo de la electricidad es de \$0.15 kWh, ¿cuál es el costo (aproximando al dólar más cercano) de usar la computadora durante un año (365 días)?

73. ●● Un sistema acondicionador de aire de 120 V extrae 15 A de corriente. Si opera 20 min, *a*) ¿cuánta energía consume en kilowatts-hora? *b*) Si el costo de la electricidad es de \$0.15/kWh, ¿cuál es el costo (aproximando al centavo más cercano) de operar la unidad durante 20 min?

74. ●● Dos resistores de 100 y 25 Ω están especificados para una salida máxima de potencia de 1.5 y 0.25 W, respectivamente. ¿Cuál es el voltaje máximo que puede aplicarse con seguridad a cada resistor?

75. ●● Un alambre de 5.0 m de longitud y 3.0 mm de diámetro tiene una resistencia de 100 Ω. Se aplica una diferencia de potencial de 15 V a través del alambre. Encuentre *a*) la corriente en el alambre, *b*) la resistividad de su material y *c*) la razón a la que se produce calor en el alambre.

76. **EI** ●● Cuando se conecta a una fuente de voltaje, una bobina de tungsteno disipa inicialmente 500 W de potencia. En un corto tiempo, la temperatura de la bobina aumenta en 150 C° a causa del calentamiento de joule. *a*) ¿La potencia disipada 1) aumenta, 2) permanece igual o 3) disminuye? ¿Por qué? *b*) ¿Cuál es el cambio correspondiente en la potencia?

77. ●● Un resistor de 20 Ω está conectado a cuatro baterías de 1.5 V. ¿Cuál es la pérdida de calor en joules por minuto en el resistor si las baterías están conectadas *a*) en serie y *b*) en paralelo?

78. ●● Un calentador de agua de 5.5 kW opera a 240 V. *a*) ¿El circuito del calentador debería tener un disyuntor de 20 A o uno de 30 A? (Un disyuntor es un dispositivo de seguridad que abre el circuito a su corriente estipulada.) *b*) Suponiendo una eficiencia del 85%, ¿cuánto tardará el calentador en calentar el agua en un tanque de 55 gal de 20 a 80°C?

79. ●● Un estudiante usa un calentador de inmersión para calentar 0.30 kg de agua de 20 a 80°C para preparar té. Si el calentador tiene un 75% de eficiencia y tarda 2.5 min hacerlo, ¿cuál es su resistencia? (Suponga un voltaje doméstico de 120 V.)

80. ●● Un aparato óhmico está clasificado a 100 W cuando está conectado a una fuente de 120 V. Si la compañía de suministro eléctrico corta el voltaje en 5.0% para conservar energía, ¿cuál es *a*) la corriente en el aparato y *b*) la energía que consume después de la caída del voltaje?

81. ●● La salida de una bombilla de luz es de 60 W cuando opera a 120 V. Si el voltaje se reduce a la mitad y la potencia cae a 20 W durante un apagón parcial, ¿cuál es la razón entre la resistencia de la bombilla a toda potencia y su resistencia durante el apagón parcial?

82. ●● Para limpiar un sótano inundado, una bomba de agua debe trabajar (subir el agua) a razón de 2.00 kW. Si la bomba está conectada a una fuente de 240 V y su eficiencia es del 84%, *a*) ¿cuánta corriente extrae y *b*) cuál es su resistencia?

83. ●●● Calcule el costo mensual (30 días) total (aproximando al dólar más cercano) del uso de los siguientes aparatos eléctricos si la tarifa es de \$0.12/kWh: un sistema acondicionador de aire que funciona el 30% del tiempo; una mezcladora que se utiliza 0.50 h/mes; una máquina lavavajillas que se utiliza 8.0 h/mes; un horno de microondas que se ocupa 15 min/día; el motor de un refrigerador libre de escarcha que funciona 15% del tiempo; una estufa (quemadores más horno) que funciona un total de 10 h/mes; y un televisor a color que opera 120 h/mes. (Utilice la información de la tabla 17.2.)

Ejercicios adicionales

84. **EI** Una pieza de carbono y una pieza de cobre tienen la misma resistencia a temperatura ambiente. *a*) Si la temperatura de cada pieza se incrementa 10.0 C°, la pieza de cobre tendrá 1) una mayor resistencia, 2) la misma resistencia o 3) menor resistencia que la pieza de carbono. ¿Por qué? *b*) Calcule la razón entre la resistencia del cobre y la del carbono.

85. Dos piezas de alambre, una de aluminio y la otra de cobre, son idénticas en longitud y diámetro. A cierta temperatura, uno de los alambres tendrá la misma resistencia que tiene el otro a 20°C. ¿Cuál es esa temperatura? (¿Hay más de una temperatura?)

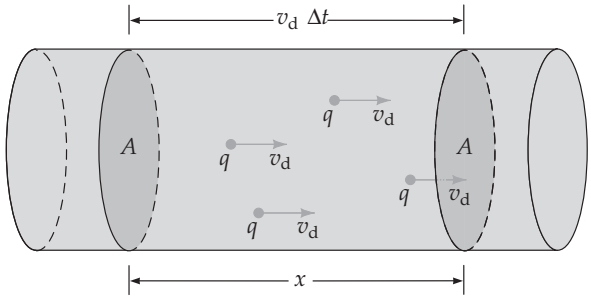
86. Una batería entrega 2.54 A a un resistor óhmico de 4.52 Ω. Cuando se conecta a un resistor de 2.21 Ω, entrega 4.98 A. Determine *a*) la resistencia interna (que se supone constante), *b*) la fem y *c*) el voltaje terminal (en ambos casos) de la batería.

87. Un resistor externo está conectado a una batería con una fem variable, pero resistencia interna constante. A una fem de 3.00 V, el resistor extrae una corriente de 0.500 A, y a 6.00 V, extrae una corriente de 1.00 A. ¿El resistor externo es óhmico? Pruebe su respuesta.

88. Una anguila eléctrica aplica una corriente de 0.75 A a una pequeña presa con forma de lápiz, que mide 15 cm de largo. Si la "biobatería" de la anguila se cargó a 500 V y fue constante durante 20 ms antes de caer a cero, estime *a*) la resistencia del pez, *b*) la energía que recibió el pez y *c*) el campo eléctrico promedio (la magnitud) en la carne del pez.

89. La mayoría de los televisores modernos tienen una función de "calentamiento instantáneo". Aunque el aparato parece estar apagado, sólo está "apagado" en el sentido de que no hay imagen ni audio. Para volver a ofrecer una imagen "instantánea", el televisor tiene una función que le permite tener siempre listo su sistema electrónico. Esto implica consumir unos 10 W de energía eléctrica de forma constante. Suponga que hay un televisor de este tipo por cada dos hogares y estime cuántas plantas de energía eléctrica se necesitan en Estados Unidos para tener activa esta función.

90. ▼La figura 17.18 ilustra unos portadores de carga, cada uno con carga q y una velocidad v_d (velocidad de deriva) en un conductor de área transversal A. Sea n el número de portadores de carga libre por volumen unitario. *a*) Demuestre que la carga total (ΔQ) libre para moverse en el elemento de volumen mostrado está dada por $\Delta Q = (nAx)q$. *b*) Demuestre que la corriente en el conductor está dada por $I = nqv_dA$.



▲ **FIGURA 17.18 Carga y corriente totales** Véanse los ejercicios 90 y 91.

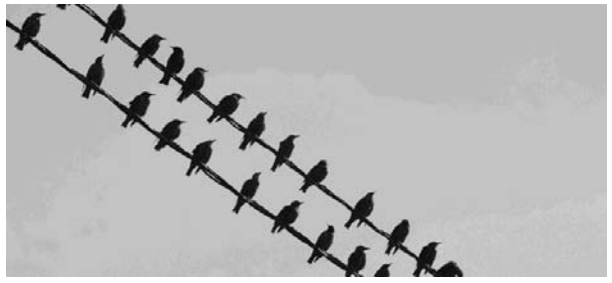
91. Un alambre de cobre con área transversal de 13.3 mm^2 (AWG Núm. 6) conduce una corriente de 1.2 A. Si el alambre contiene 8.5×10^{22} electrones libres por centímetro cúbico, ¿cuál es la velocidad de deriva de los electrones? [*Sugerencia:* véase el ejercicio 90 y la figura 17.18.]

92. Una unidad de CD-ROM de una computadora que opera con 120 V tiene clasificación de 40 W cuando está funcionando. *a*) ¿Cuánta corriente extrae la unidad? *b*) ¿Cuál es su resistencia?

93. El filamento de tungsteno de una lámpara incandescente tiene una resistencia de 200 Ω a temperatura ambiente. ¿Cuál será su resistencia a una temperatura operativa de 1600°C?

94. Un panorama común en nuestro mundo moderno incluye líneas de transmisión de alto voltaje tendidas a lo largo de enormes distancias desde la planta generadora de energía hasta áreas habitadas. El voltaje que corre por estas líneas es, por lo común, de 500 kV, pero para cuando la energía llega a nuestros hogares el voltaje es de 120 V (véase el capítulo 20 para saber cómo se logra esto). *a*) Explique claramente por qué la energía eléctrica tiene que recorrer grandes distancias a altos voltajes cuando sabemos que éstos son peligrosos. *b*) Calcule la razón de la pérdida por calor en una longitud dada de cable (que se supone óhmico) cuando conduce corriente a 500 kV y cuando opera a 120 V.

95. En el campo es común observar halcones que se posan sobre las líneas eléctricas de alto voltaje mientras tratan de ubicar a sus presas (▼figura 17.19). Para comprender por qué esta ave no se electrocuta, hagamos una estimación del voltaje entre sus patas. Suponga que las condiciones son de cd en el cable, que éste mide 1.0 km de longitud, tiene una resistencia de 30 Ω, y que está a un potencial eléctrico de 250 kV por encima del otro cable (en el que no está el halcón), que está puesto a tierra o a cero volts. *a*) Si los cables conducen energía a una tasa de 100 MV, ¿cuál es la corriente en ellos? *b*) Suponiendo que las patas del halcón están separadas 15 cm, ¿cuál es la resistencia de ese segmento de cable de alta tensión? *c*) ¿Cuál es la *diferencia* de voltaje entre las patas del ave? Comente su respuesta y diga si esto le parece peligroso. *d*) ¿Cuál es la diferencia de voltaje entre las patas del halcón si coloca una sobre el cable a tierra mientras sigue en contacto con el cable de alta tensión? Comente su respuesta y diga si esto le parece peligroso.



◀ **FIGURA 17.19 Aves sobre una línea eléctrica** Véase el ejercicio 95.

PHYSLET® 30.5 Los siguientes problemas de física Physlet pueden utilizarse con este capítulo.

CAPÍTULO 18

CIRCUITOS ELÉCTRICOS BÁSICOS

18.1 Combinaciones de resistencias en serie, en paralelo y en serie-paralelo 592

18.2 Circuitos de múltiples mallas y reglas de Kirchhoff 599

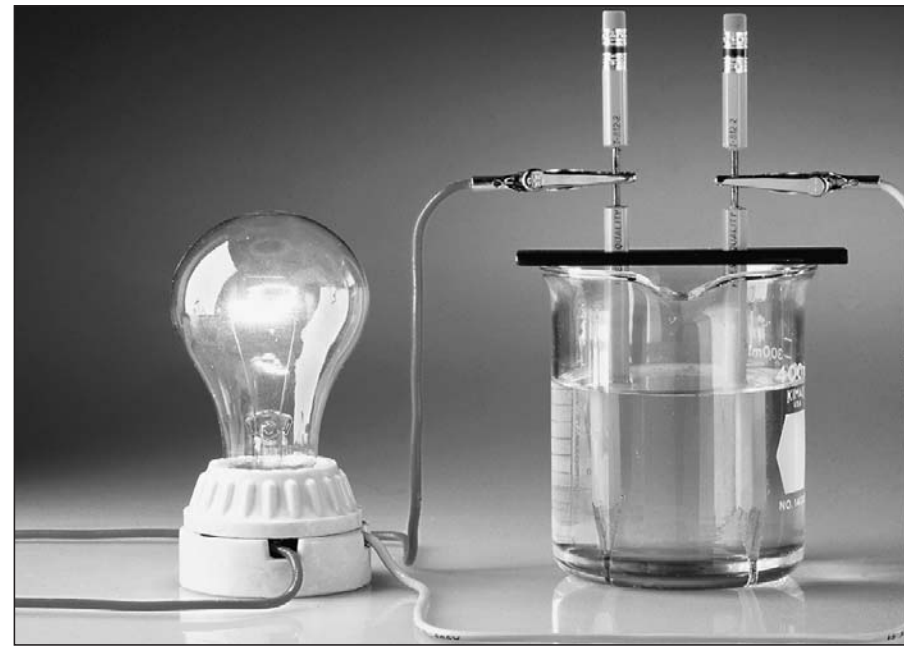
18.3 Circuitos RC 604

18.4 Amperímetros y voltímetros 607

18.5 Circuitos domésticos y seguridad eléctrica 611

HECHOS DE FÍSICA

- Física para los padres de adolescentes: no es recomendable conectar más de una secadora para el cabello en el mismo circuito doméstico sin activar el disyuntor. Se necesitan dos circuitos separados en el baño, o alguien tendrá que irse a otra habitación y utilizar un circuito distinto.
- Un amperímetro conectado *incorrectamente* en paralelo con un elemento de circuito no sólo mide mal la corriente, sino que corre el riesgo de quemarse. Por eso, todos los amperímetros tienen fusibles de protección. Por otra parte, si un voltímetro está conectado *incorrectamente* en serie con un elemento de circuito, la corriente del circuito se desploma a cero, y aunque la medición del voltaje será incorrecta, no hay riesgo de daño.
- Menos de 0.01 de un ampere de corriente a través del cuerpo humano causa parálisis muscular. Si la persona no puede alejarse del cable expuesto, podría morir si la corriente pasa por un órgano vital, como el corazón.
- Las *células marcapaso* (o células P), localizadas en una pequeña región del corazón, provocan el latido cardiaco. Sus señales eléctricas viajan a través del corazón en unos 50 ms. Si estas células fallan, otras partes del sistema eléctrico del corazón asumen su función como respaldo. Las células marcapaso reciben influencia del sistema nervioso del cuerpo, de manera que la tasa a la que le indican al corazón que lata varía drásticamente (por ejemplo, de 60 latidos por minuto cuando se está dormido a más de 100 por minuto cuando se realiza ejercicio físico).



Por lo general, pensamos que los alambres metálicos son los "conectores" entre los resistores en un circuito. Sin embargo, los alambres no son los únicos conductores de electricidad, como se observa en la fotografía. Como la bombilla de luz está encendida, el circuito debe estar completo. Por tanto, podemos concluir que el "plomo" en un lápiz (en realidad, una forma de carbono llamado *grafito*) es un buen conductor de electricidad. Lo mismo debe ser cierto para el líquido en el vaso de precipitados, en este caso, una solución de agua y sal de mesa.

Los circuitos eléctricos son de muchos tipos y se diseñan para diversos fines, como hervir agua e iluminar un árbol de Navidad. Los circuitos que contienen conductores "líquidos" (como el de esta fotografía) tienen aplicaciones prácticas en el laboratorio y en la industria; por ejemplo, pueden servir para sintetizar o purificar sustancias químicas y para *galvanizar* metales. (La galvanización significa aplicar químicamente metales a superficies utilizando técnicas eléctricas, como al hacer chapado en plata.) Con los principios aprendidos en los capítulos 15, 16 y 17, usted está ahora listo para analizar algunos circuitos eléctricos. Con este análisis tendrá una mejor apreciación de cómo trabaja en realidad la electricidad.

El análisis de circuitos trata muy a menudo con voltajes, corrientes y requisitos de potencia. Es posible analizar teóricamente un circuito antes de ensamblarlo. El análisis podría mostrar que el circuito no funcionará apropiadamente tal como se ha diseñado o que podría representar un problema de seguridad (por ejemplo, a causa de sobrecalentamiento por calor de joule). Como ayuda en el análisis, nos apoyaremos considerablemente en los diagramas de circuitos para visualizar y comprender sus funciones. Algunos de esos diagramas se incluyeron en el capítulo 17.

Comenzaremos nuestro análisis de circuitos fijándonos en los arreglos de los elementos resistivos, como bombillas de luz, tostadores y calentadores de inmersión.

18.1 Combinaciones de resistencias en serie, en paralelo y en serie-paralelo

OBJETIVOS: *a*) Determinar la resistencia equivalente de resistores combinados en serie, paralelo y serie-paralelo y *b*) usar resistencias equivalentes para analizar circuitos simples.

El símbolo de resistencia puede representar *cualquier* tipo de elemento de circuito, por ejemplo, una bombilla de luz o un tostador. Aquí suponemos que todos los elementos son óhmicos (con resistencia constante), a menos que se indique otra cosa. (Hay que hacer notar que las bombillas de luz, en particular, no son óhmicas porque su resistencia aumenta de forma significativa conforme se calientan.) Además, como es costumbre, la resistencia de los alambres se considerará insignificante.

Resistores en serie

Al analizar un circuito, como el voltaje representa energía por carga unitaria, para conservar la energía, la *suma de los voltajes alrededor de una malla en un circuito es cero*. Recuerde que *voltaje* significa siempre "cambio en el potencial eléctrico", así que las ganancias y pérdidas de voltaje se representan mediante los signos + y −, respectivamente. Por ejemplo, para el circuito en la figura 18.1a, por la conservación de la energía (por coulomb) los voltajes individuales (V_i, donde $i = 1, 2$ o 3) a través de los resistores se suman para igualar el voltaje (V) a través de las terminales de la batería. Cada resistor en serie lleva la misma corriente (I) porque la carga no puede "acumularse" o "fugarse" en ningún punto del circuito. Al sumar las ganancias y pérdidas de voltaje, tenemos $V - \Sigma V_i = 0$. Finalmente, sabemos cómo se relaciona el voltaje con la resistencia para cada resistor, $V_i = IR_i$. Al sustituir esta expresión en la ecuación anterior, obtenemos,

Nota: para resistores, $V = IR$.

$$V - \Sigma(IR_i) = 0 \quad \text{o} \quad V = \Sigma(IR_i) \tag{18.1}$$

Se dice que los elementos del circuito en la figura 18.1a están conectados en **serie**, o conectados, extremo a extremo. *Cuando los resistores están en serie, la corriente debe ser la misma a través de todos los resistores,* como se requiere por la conservación de carga. Si esto no fuera cierto, entonces la carga aumentaría o desaparecería, lo cual no es posible. La figura 18.2 muestra el análogo flujo de agua a lo largo de una corriente interrumpida por una serie de rápidos (que representan la "resistencia").

Si designamos la corriente común en los resistores como I, entonces la ecuación 18.1 puede escribirse explícitamente para tres resistores (como en la figura 18.1a):

$$\begin{aligned} V &= V_1 + V_2 + V_3 \\ &= IR_1 + IR_2 + IR_3 = I(R_1 + R_2 + R_3) \end{aligned}$$

Nota: para comprender mejor las conexiones de resistores, repase el análisis de los condensadores conectados en serie y en paralelo en el capítulo 16.

Para la **resistencia equivalente en serie (R_s)** es el valor de un solo resistor que podría reemplazar los tres resistores por un resistor R_s y mantener la misma corriente, necesitamos $V = IR_s$ o $R_s = V/I$. Por consiguiente, de la ecuación previa, los tres resistores en serie tienen una resistencia equivalente

$$R_s = \frac{V}{I} = R_1 + R_2 + R_3$$

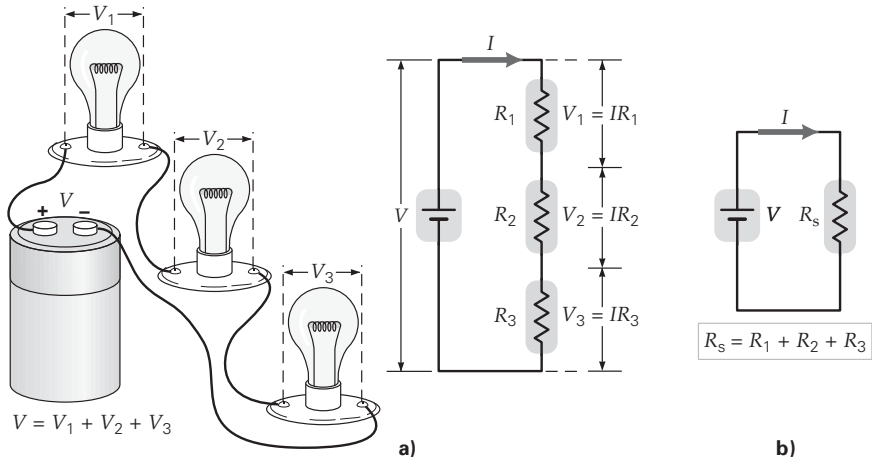
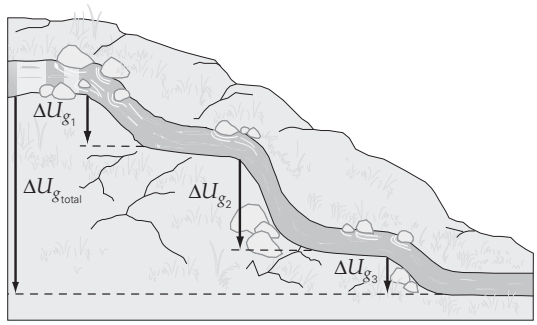


FIGURA 18.1 Resistores en serie ***a)*** Cuando los resistores (que aquí representan las resistencias de las bombillas de luz) están en serie, la corriente a través de cada uno es la misma. ΣV_i, la suma de las caídas de voltaje a través de los resistores, es igual a V, el voltaje de la batería. ***b)*** La resistencia equivalente R_s de los resistores en serie es la suma de las resistencias.



◀ **FIGURA 18.2 Analogía del flujo de agua con resistores en serie** Aunque, en general, una diferente cantidad de energía potencial gravitacional (por kilogramo) se pierde conforme el agua fluye por cada rápido, la *corriente* de agua es la misma en todas partes. La pérdida *total* de energía potencial gravitacional (por kilogramo) es la suma de las pérdidas. (Para hacer que este circuito de agua esté "completo", algún agente externo —como una bomba— necesitaría trabajar de manera continua haciendo que el agua regrese a la cumbre de la colina, restaurando así su energía potencial gravitacional.)

Esto es, la resistencia equivalente de resistores en serie es la suma de las resistencias individuales. Esto significa que los tres resistores (bombillas de luz) en la figura 18.1a podrían reemplazarse por un solo resistor de resistencia R_s (figura 18.1b) sin afectar la corriente. Por ejemplo, si cada resistor en la figura 18.1a tuviera un valor de 10 Ω, entonces R_s sería de 30 Ω. *Observe que la resistencia equivalente en serie es mayor que la resistencia del mayor resistor en la serie.*

Este resultado puede extenderse a cualquier número de **resistores en serie**:

$$R_s = R_1 + R_2 + R_3 + \cdots = \Sigma R_i \quad \textit{resistencia equivalente en serie} \tag{18.2}$$

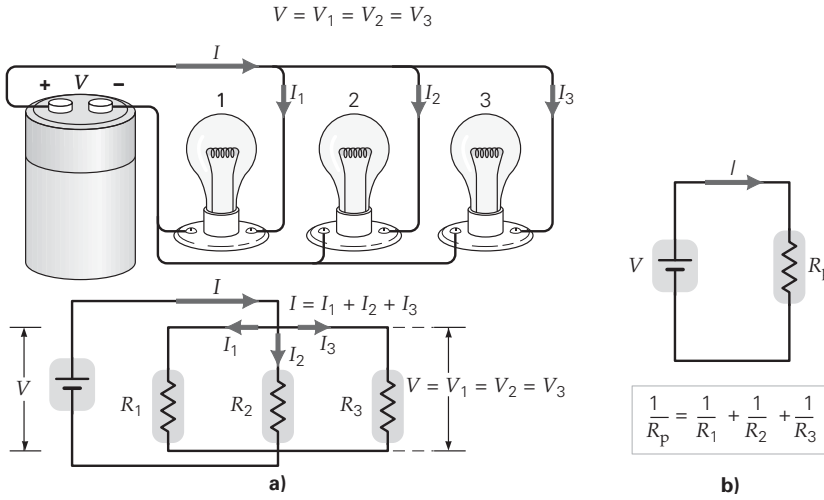
Nota: R_s es mayor que la mayor resistencia en un arreglo en serie.

Las conexiones en serie no son comunes en algunos circuitos, tales como los cableados domésticos, porque presentan dos desventajas principales en comparación con las conexiones en paralelo. La primera es clara si se considera qué sucede cuando uno de las bombillas en la figura 18.1a se funde (o cuando se quiere apagar sólo esa bombilla). En ese caso, *todas* las bombillas se apagarían, porque el circuito ya no sería completo o continuo. En tal situación, se dice que el circuito está *abierto*. Un *circuito abierto* tiene una resistencia equivalente infinita, porque la corriente es cero, a diferencia del voltaje de la batería.

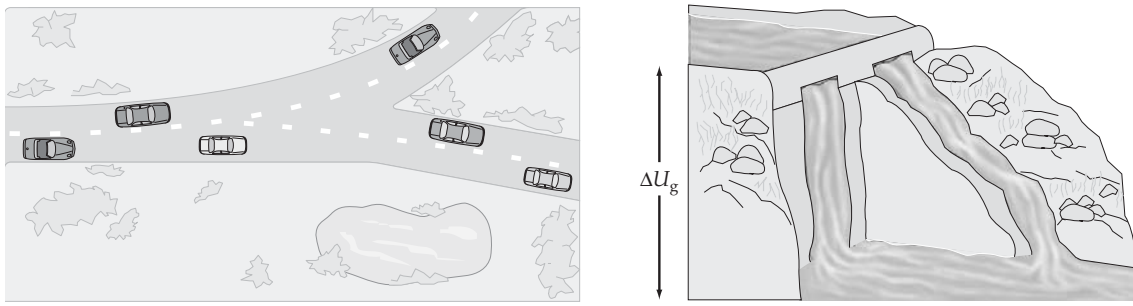
Una segunda desventaja de las conexiones en serie es que cada resistor opera a un voltaje menor que el de la batería (V). Considere qué sucedería si se agregara un cuarto resistor. El resultado sería que el voltaje a través de cada una de las tres primeras bombillas (y sus corrientes) disminuiría, entregando una menor potencia a todas las bombillas. Esto es, las bombillas no darían el mismo brillo o luz. Es claro que esta condición no es aceptable en un arreglo doméstico.

Resistores en paralelo

También podemos conectar resistores a una batería en **paralelo** (▼figura 18.3a). En este caso, todos los resistores tienen conexiones comunes, esto es, todos los conductores a un lado de los resistores están unidos juntos a una terminal de la batería. Todos los conductores al otro lado están unidos a la otra terminal. *Cuando los resistores están conectados en paralelo a una fuente de fem, la caída de voltaje a través de cada resistor es la mis-*



◀ **FIGURA 18.3 Resistores en paralelo** ***a)*** Cuando los resistores están conectados en paralelo, la caída de voltaje a través de cada uno de los resistores es la misma. La corriente de la batería se divide (por lo general, de forma desigual) entre los resistores. ***b)*** Resistencia equivalente R_p de los resistores en paralelo está dada por una relación recíproca.



a) b)

▲ **FIGURA 18.4 Analogías de los resistores en paralelo** ***a)*** Cuando un camino se bifurca, el número total de automóviles que entran a las dos ramas cada minuto es igual al número de autos que llegan a la bifurcación cada minuto. El movimiento de carga en una unión puede considerarse de la misma forma. ***b)*** Cuando el agua fluye desde una presa, la cantidad de energía potencial gravitacional que pierde (por kilogramo de agua) al caer corriente abajo es la misma independientemente de la trayectoria de descenso. Esta situación es análoga a los voltajes a través de resistores en paralelo.

Nota: en realidad, los cables del circuito no están arreglados en los impecables patrones rectangulares de un diagrama de circuito. La forma rectangular es simplemente una convención que permite una presentación más clara y una fácil visualización del circuito real.

ma. Tal vez no le sorprenda saber que los circuitos domésticos están conectados en paralelo. (Véase la sección 18.5.) Esto se debe a que cuando la conexión está en paralelo, cada aparato doméstico opera a pleno voltaje, y encender o apagar uno de ellos no afecta a los demás.

A diferencia del caso de los resistores en serie, la corriente en un circuito en paralelo se divide en trayectorias diferentes (figura 18.3a). Esto ocurre siempre que se tiene una *unión* (un lugar donde varios cables se juntan), en forma parecida a como lo hace el tránsito en una carretera al llegar a una bifurcación (▲figura 18.4a). La corriente total que sale de la batería es igual a la suma de esas corrientes. Específicamente, para tres resistores en paralelo, $I = I_1 + I_2 + I_3$. Hay que hacer notar que si las resistencias son iguales, la corriente se dividirá de manera que cada resistor tenga la misma corriente. Sin embargo, en general, las resistencias no serán iguales y la corriente se dividirá entre los resistores en proporción inversa a sus resistencias. Esto significa que la mayor corriente tomará la trayectoria de mínima resistencia. Sin embargo, recuerde que un solo resistor no llevará toda la corriente.

La **resistencia equivalente en paralelo (R_p)** es el valor de un solo resistor que podría reemplazar a todos los resistores y mantener la misma corriente. Así, $R_p = V/I$ o $I = V/R_p$. Además, la caída de voltaje (V) es la misma a través de cada resistor. Para visualizar esta situación, imagine una analogía hidráulica. Considere dos trayectorias separadas para el agua; cada una va de la parte superior de una presa al fondo. El agua pierde la misma cantidad de energía potencial gravitacional (de forma análoga a V) independientemente de la trayectoria (figura 18.4b). Para la electricidad, una cantidad dada de carga pierde la misma cantidad de energía potencial eléctrica, independientemente del resistor en paralelo por el que pasa.

La corriente a través de cada resistor es $I_i = V/R_i$. (Aquí, el subíndice i representa cualquiera de los resistores: 1, 2, 3, …) Al sustituir para cada corriente, obtenemos

$$I = I_1 + I_2 + I_3 = \frac{V}{R_1} + \frac{V}{R_2} + \frac{V}{R_3}$$

Por lo tanto,

$$\frac{V}{R_p} = V\left(\frac{1}{R_p}\right) = V\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}\right)$$

Igualando las dos expresiones de resistencias entre paréntesis, vemos que la resistencia equivalente R_p está relacionada con las resistencias individuales mediante la ecuación recíproca

$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

Este resultado puede generalizarse para incluir cualquier número de **resistores en paralelo**:

$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \cdots = \Sigma\left(\frac{1}{R_i}\right) \quad \textit{resistencia equivalente en paralelo} \tag{18.3}$$

Para el caso especial en que sólo hay dos resistores, la resistencia equivalente puede expresarse en forma no recíproca (utilizando un común denominador) como,

$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2}$$

o

$$R_p = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad \textit{(solo para dos resistores en paralelo)} \tag{18.3a}$$

Nota: R_p es menor que la resistencia más pequeña en un arreglo en paralelo.

Sugerencia para resolver problemas

Observe que la ecuación 18.3 da $1/R_p$, *no* R_p. Al final de cada cálculo, se debe tomar el recíproco para encontrar R_p. El análisis de las unidades mostrará que las unidades no son ohms hasta que se invierten. Como es costumbre, si lleva unidades como control en sus cálculos, será menos probable que cometa errores de este tipo.

La resistencia equivalente de resistores en paralelo siempre es menor que la menor resistencia en el arreglo. Por ejemplo, dos resistores en paralelo —digamos de 6.0 y 12.0 Ω— son equivalentes a uno solo con resistencia de 4.0 Ω (debería demostrar esto). Pero, ¿por qué esperar esta respuesta aparentemente extraña?

Físicamente, la razón se encuentra considerando una batería de 12V en un circuito completo con *un solo* resistor de 6.0 Ω. La corriente en el circuito es de 2.0 A ($I = V/R$). Ahora imagine que un resistor de 12.0 Ω se conecta en paralelo al resistor de 6.0 Ω. La corriente a través del resistor de 6.0 Ω no se verá afectada: permanecerá igual a 2.0 A. (¿Por qué?) Sin embargo, el nuevo resistor tendrá una corriente de 1.0 A (utilizando $I = V/R$ una vez más). Así que la corriente *total* en el circuito es 1.0 A + 2.0 A = 3.0 A. Veamos ahora el resultado final. Cuando el segundo resistor se conecta al primero *en paralelo*, la corriente total que entrega la batería aumenta. Como el voltaje no aumentó, la resistencia equivalente del circuito *debe haber disminuido* (por debajo de su valor inicial de 6.0 Ω) cuando se conectó el resistor de 12Ω. En otras palabras, cada vez que se agrega una trayectoria extra en paralelo, el resultado es más corriente total. De manera que el circuito se comporta como si su resistencia equivalente *disminuyera*.

Observe que este razonamiento no depende del valor del resistor agregado. Lo que importa es que se ha añadido otra trayectoria con resistencia. (Intente esto utilizando un resistor de 2 Ω o uno de 2 MΩ en lugar del resistor de 12 Ω. De nuevo ocurre una reducción en la resistencia equivalente. Sin embargo, note que el *valor* de la resistencia equivalente será distinto.)

Entonces, en general, las conexiones en serie ofrecen una manera de incrementar la resistencia total, mientras que las conexiones en paralelo brindan una forma de disminuir la resistencia total. Para ver cómo funcionan estas ideas, considere el ejemplo 18.1.

PHYSLET®

Ilustración 30.3 Divisores de corriente y voltaje

PHYSLET®

Ilustración 30.4 Baterías e interruptores

Ejemplo 18.1 ■ Conteo de conexiones: resistores en serie y en paralelo

¿Cuál es la resistencia equivalente de tres resistores (1.0, 2.0 y 3.0 Ω) cuando se conectan *a*) en serie (figura 18.1a) y *b*) en paralelo (figura 18.3a)? *c*) ¿Cuánta corriente entregará una batería de 12V en cada uno de esos arreglos?

Razonamiento. Para encontrar las resistencias equivalentes para *a* y *b*, aplique las ecuaciones 18.2 y 18.3, respectivamente. Para encontrar la corriente en serie del inciso *c*, calcule la corriente a través de la batería tratando ésta como si estuviera conectada a un solo resistor, la resistencia equivalente en serie. Para el arreglo en paralelo, la corriente total se determina usando la resistencia equivalente en paralelo. Como sabemos que cada resistor en paralelo tiene el mismo voltaje, es posible calcular las corrientes individuales.

Solución. Se listan los datos

Dado: $R_1 = 1.0\ \Omega$, $R_2 = 2.0\ \Omega$, $R_3 = 3.0\ \Omega$, $V = 12$ V

Encuentre: *a*) R_s (resistencia en serie); *b*) R_p (resistencia en paralelo); *c*) I (corriente total para cada caso)

a) La resistencia equivalente en serie (ecuación 18.2) es

$$R_s = R_1 + R_2 + R_3 = 1.0\ \Omega + 2.0\ \Omega + 3.0\ \Omega = 6.0\ \Omega$$

Nuestro resultado es mayor que la mayor resistencia, como se esperaba.

b) La resistencia equivalente en paralelo se determina con la ecuación 18.3

$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{1.0\ \Omega} + \frac{1}{2.0\ \Omega} + \frac{1}{3.0\ \Omega}$$

$$= \frac{6.0}{6.0\ \Omega} + \frac{3.0}{6.0\ \Omega} + \frac{2.0}{6.0\ \Omega} = \frac{11}{6.0\ \Omega}$$

o, luego de hacer la inversión,

$$R_p = \frac{6.0\ \Omega}{11} = 0.55\ \Omega$$

que es un valor más bajo que el de la menor resistencia, como también se esperaba.

(continúa en la siguiente página)

c) A partir de la resistencia equivalente en serie y el voltaje de la batería:

$$I = \frac{V}{R_s} = \frac{12\ \text{V}}{6.0\ \Omega} = 2.0\ \text{A}$$

Calculemos la caída de voltaje a través de cada resistor:

$$V_1 = IR_1 = (2.0\ \text{A})(1.0\ \Omega) = 2.0\ \text{V}$$
$$V_2 = IR_2 = (2.0\ \text{A})(2.0\ \Omega) = 4.0\ \text{V}$$
$$V_3 = IR_3 = (2.0\ \text{A})(3.0\ \Omega) = 6.0\ \text{V}$$

Advierta que para garantizar que la corriente a través de cada resistor sea la misma, *los mayores resistores requieren más voltaje, cuando están en serie.* Como verificación, note que la suma de las caídas de voltaje en los resistores ($V_1 + V_2 + V_3$) es igual al voltaje de la batería.

Para el arreglo en paralelo, la corriente total es:

$$I = \frac{V}{R_p} = \frac{12\ \text{V}}{0.55\ \Omega} = 22\ \text{A}$$

Observe que la corriente para la combinación en paralelo es mucho mayor que para la combinación en serie. (¿Por qué?) Ahora es posible determinar la corriente a través de cada uno de los resistores, ya que cada resistor tiene un voltaje de 12 V. Por lo tanto,

$$I_1 = \frac{V}{R_1} = \frac{12\ \text{V}}{1.0\ \Omega} = 12\ \text{A}$$

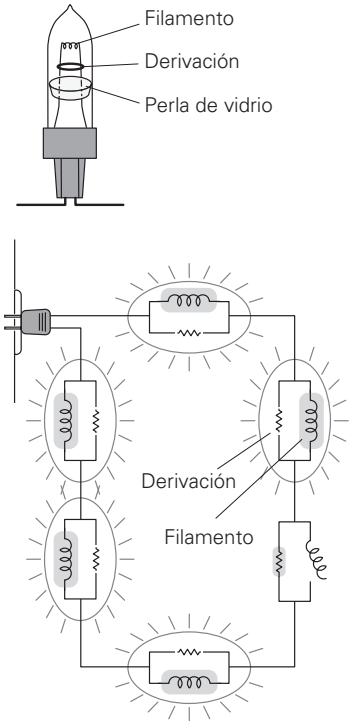
$$I_2 = \frac{V}{R_2} = \frac{12\ \text{V}}{2.0\ \Omega} = 6.0\ \text{A}$$

$$I_3 = \frac{V}{R_3} = \frac{12\ \text{V}}{3.0\ \Omega} = 4.0\ \text{A}$$

Para verificar, observe que la suma de las tres corrientes sea igual a la corriente a través de la batería.

Como podrá ver, para resistores en paralelo, el resistor con la menor resistencia recibe la mayor parte de la corriente total porque los resistores en paralelo experimentan el mismo voltaje. (Note que para los arreglos en paralelo, la menor resistencia nunca tiene *toda* la corriente, sólo la mayor parte.)

Ejercicio de refuerzo. *a*) Calcule la potencia entregada a cada resistor para ambos arreglos en este ejemplo. *b*) ¿Qué generalizaciones podría hacer a partir de esto? Por ejemplo, ¿qué resistor en serie recibe la mayor potencia? ¿Y en paralelo? *c*) Para cada arreglo, ¿la potencia total entregada a todos los resistores es igual a la salida de potencia de la batería? (*Las respuestas de todos los ejercicios de refuerzo se presentan al final del libro.*)



▲ **FIGURA 18.5 Luces de un árbol de Navidad cableadas en derivación** Una derivación (puente o *shunt*) en paralelo con el filamento de la bombilla reestablece un circuito completo cuando uno de los filamentos se quema (abajo a la derecha). Sin la derivación, si una de las bombillas se fundiera, todas las demás se apagarían.

Como una aplicación para el cableado, considere las luces que se utilizan para adornar los árboles de Navidad. En el pasado, esas luces estaban conectadas en serie. Cuando una se fundía, todas las demás luces se apagaban y se tenía que localizar la bombilla defectuosa. Ahora, las nuevas guirnaldas de luces tienen bombillas más pequeñas y, aunque una se funda, las demás permanecen encendidas. ¿Significa esto que las luces están conectadas en paralelo? No, una conexión en paralelo daría una menor resistencia y una mayor corriente, lo que sería peligroso.

En lugar de ello, se utiliza una derivación, también conocida como puente o *shunt*, que se conecta en paralelo con el filamento de cada bombilla (◂figura 18.5). Cuando una bombilla está en operación, la derivación no conduce corriente porque está aislada de los cables del filamento. Cuando el filamento se rompe y la bombilla "se quema", *momentáneamente* el circuito queda abierto y no hay corriente en la guirnalda de luces. La diferencia de voltaje a través del circuito abierto en el filamento roto será entonces el voltaje doméstico de 120 V. Esto causará una chispa que quemará el material de aislamiento de la derivación. Al hacer contacto con los cables del filamento, la derivación completa de nuevo el circuito y el resto de las luces de la guirnalda continúan encendidas. (La derivación, un cable con muy poca resistencia, está señalada con el pequeño símbolo de resistencia en el diagrama del circuito de la figura 18.5. En operación normal, hay una abertura, el aislamiento, entre la derivación y el alambre del filamento.) Para comprender el efecto de una bombilla fundida sobre el resto de las luces, considere el siguiente ejemplo.

Ejemplo conceptual 18.2 ■ Las brillantes luces de un árbol de Navidad

Considere una guirnalda de luces para árbol de Navidad con puentes de derivación. Si el filamento de una bombilla se quema y la derivación completa el circuito, ¿las demás luces *a*) brillarán con más intensidad, *b*) brillarán un poco más débilmente o *c*) no se verán afectadas?

Razonamiento y respuesta. Si el filamento de una bombilla se quema y su derivación completa el circuito, habrá menos resistencia total en este último, porque la resistencia de la derivación es mucho menor que la resistencia del filamento. (Advierta que los filamentos de las bombillas buenas y la derivación de la bombilla quemada están en serie, por lo que las resistencias se suman.)

Con menos resistencia total, habrá más corriente en el circuito, y las bombillas buenas restantes brillarán con un poco más de fuerza porque la salida de luz de una bombilla está directamente relacionada con la potencia que recibe. (Recuerde que la potencia eléctrica está relacionada con la corriente mediante $P = I^2R$). La respuesta correcta es entonces la *a*. Por ejemplo, suponga que la guirnalda de luces tiene originalmente 18 bombillas idénticas. Como el voltaje total a lo largo de la guirnalda es de 120 V, la caída de voltaje en cualquiera de las bombillas es (120 V)/18 = 6.7 V. Si una de ellas se quema (y se hace la derivación), el voltaje a través de cada una de las bombillas en funcionamiento sería de (120 V)/17 = 7.1 V. Este voltaje incrementado hace que la corriente se incremente. Ambos incrementos contribuyen a que cada bombilla reciba más potencia y, por consiguiente, a que las luces sean más brillantes (recuerde la expresión alternativa para la potencia eléctrica, $P = IV$).

Ejercicio de refuerzo. En este ejemplo, si usted retira una de las bombillas, ¿cuál sería el voltaje a través *a*) del enchufe vacío y *b*) cualquiera de las bombillas restantes? Explique su respuesta.

PHYSLET®
Ilustración 30.1 Circuitos completos

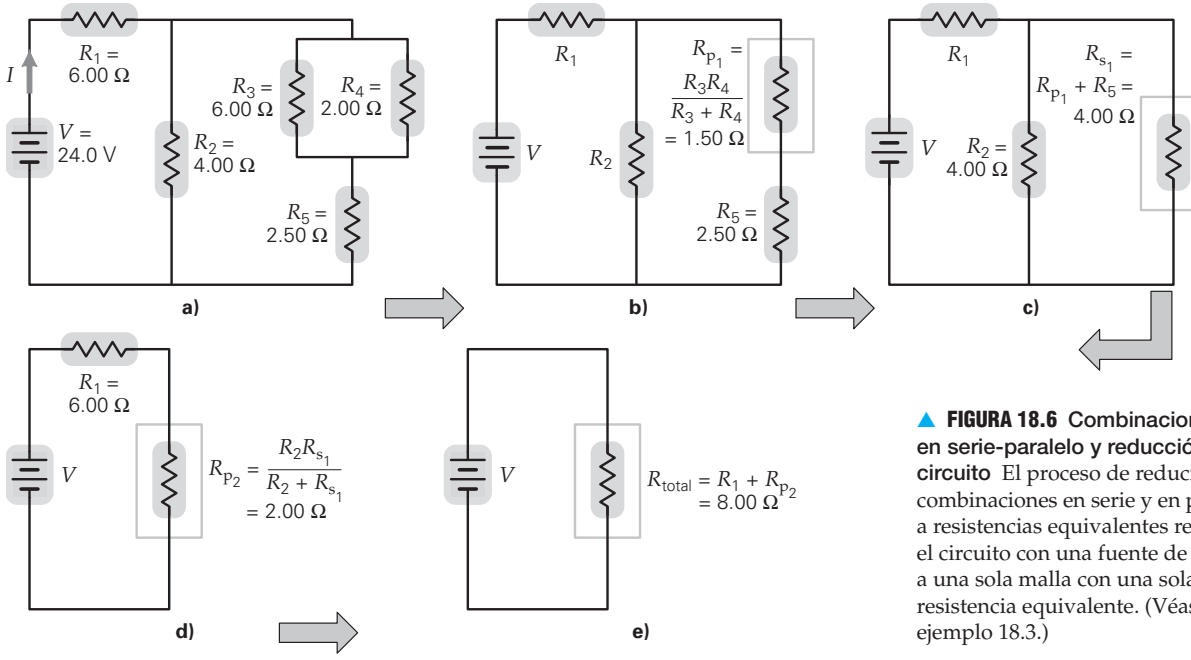
Combinaciones de resistores en serie-paralelo

Los resistores pueden conectarse en un circuito según varias combinaciones en serie-paralelo. Como se muestra en la ▼figura 18.6, los circuitos con una sola fuente de voltaje en ocasiones se reducen a una sola malla equivalente, que contenga justo la fuente de voltaje y una resistencia equivalente, aplicando los resultados en serie y en paralelo.

A continuación se describe un procedimiento para analizar circuitos (determinando el voltaje y la corriente para cada elemento de circuito) para tales combinaciones:

1. Determine qué bloques de resistores están en serie y cuáles están en paralelo, y reduzca todos los bloques a resistencias equivalentes, usando las ecuaciones 18.2 y 18.3.

PHYSLET®
Ilustración 30.2 Interruptores, voltajes y circuitos completos



▲ **FIGURA 18.6 Combinaciones en serie-paralelo y reducción de circuito** El proceso de reducir combinaciones en serie y en paralelo a resistencias equivalentes reduce el circuito con una fuente de voltaje a una sola malla con una sola resistencia equivalente. (Véase el ejemplo 18.3.)

2. Reduzca más aún el circuito tratando las resistencias equivalentes separadas (del paso 1) como resistores individuales. Continúe hasta que obtenga una sola malla con un valor de la resistencia total (o equivalente).
3. Encuentre la corriente entregada al circuito reducido usando $I = V/R_{\text{total}}$.
4. Expanda el circuito reducido de regreso al circuito real invirtiendo los pasos de reducción, uno a la vez. Use la corriente del circuito reducido y encuentre las corrientes y voltajes para los resistores en cada paso.

Para ver cómo se utiliza este procedimiento, considere el siguiente ejemplo.

Ejemplo 18.3 ■ Combinación en serie-paralelo de resistores: ¿mismo voltaje o misma corriente?

¿Cuáles son los voltajes y la corriente en cada uno de los resistores R_1 a R_5 en la figura 18.6a?

Razonamiento. Aplicamos los pasos descritos previamente; antes de comenzar, es importante identificar las combinaciones en serie y en paralelo. Es claro que R_3 está en paralelo con R_4 (lo que se expresa como $R_3 \| R_4$). Esta combinación en paralelo está en serie con R_5. Además, el tramo $R_3 \| R_4 + R_5$ están en paralelo con R_2. Finalmente, esta combinación en paralelo está en serie con R_1. Combinando los resistores paso a paso nos permite determinar la resistencia equivalente total del circuito (paso 2). A partir de ese valor, es posible calcular la corriente total. Luego, procediendo hacia atrás, podemos encontrar la corriente y el voltaje en cada resistor.

Solución. Para evitar errores de redondeo, los resultados se tomarán con tres cifras significativas.

Dado: Valores en la figura 18.6a ***Encuentre:*** Corriente y voltaje en cada resistor (figura 18.6a)

La combinación en paralelo en el lado derecho del diagrama del circuito se reduce a la resistencia equivalente R_{p_1} (véase la figura 18.6b), mediante la ecuación 18.3:

$$\frac{1}{R_{p_1}} = \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} = \frac{1}{6.00\ \Omega} + \frac{1}{2.00\ \Omega} = \frac{4}{6.00\ \Omega}$$

Esta expresión es equivalente a

$$R_{p_1} = 1.50\ \Omega$$

Esta operación deja una combinación en serie de R_{p_1} y R_5 de ese lado, que se reduce a R_{s_1} usando la ecuación 18.2 (figura 18.6c):

$$R_{s_1} = R_{p_1} + R_5 = 1.50\ \Omega + 2.50\ \Omega = 4.00\ \Omega$$

Entonces, R_2 y R_{s_1} están en paralelo y se reducen (usando de nuevo la ecuación 18.3) a R_{p_2} (figura 18.6d):

$$\frac{1}{R_{p_2}} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_{s_1}} = \frac{1}{4.00\ \Omega} + \frac{1}{4.00\ \Omega} = \frac{2}{4.00\ \Omega}$$

Esta expresión es equivalente a

$$R_{p_2} = 2.00\ \Omega$$

Esta operación deja dos resistencias (R_1 y R_{p_2}) en serie. Estas resistencias se combinan para dar la resistencia equivalente total (R_{total}) del circuito (figura 18.6e):

$$R_{\text{total}} = R_1 + R_{p_2} = 6.00\ \Omega + 2.00\ \Omega = 8.00\ \Omega$$

Así, la batería entrega una corriente de

$$I = \frac{V}{R_{\text{total}}} = \frac{24.0\ \text{V}}{8.00\ \Omega} = 3.00\ \text{A}$$

Ahora procedemos hacia atrás y "reconstruimos" el circuito real. Note que la corriente de la batería es la misma que la corriente por R_1 y R_{p_2}, ya que están en serie. (En la figura 18.6d, $I = I_1 = 3.00$ A e $I = I_{p_2} = 3.00$ A.) Por lo tanto, los voltajes a través de esos resistores son

$$V_1 = I_1 R_1 = (3.00\ \text{A})(6.00\ \Omega) = 18.0\ \text{V}$$

y

$$V_{p_2} = I_{p_2} R_{p_2} = (3.00\ \text{A})(2.00\ \Omega) = 6.00\ \text{V}$$

Como R_{p_2} está formada de R_2 y R_{s_1} (figura 18.6c y d), debe haber una caída de 6.00 V a través de esos dos resistores. Podemos usar esto para calcular la corriente a través de cada uno.

$$I_2 = \frac{V_2}{R_2} = \frac{6.00\ \text{V}}{4.00\ \Omega} = 1.50\ \text{A} \quad \text{e} \quad I_{s_1} = \frac{V_{s_1}}{R_{s_1}} = \frac{6.00\ \text{V}}{4.00\ \Omega} = 1.50\ \text{A}$$

Ahora, advierta que I_{s_1} es también la corriente en R_{p_1} y R_5, porque están en serie. (En la figura 18.6b, $I_{s_1} = I_{p_1} = I_5 = 1.50$ A.)

Por lo tanto, los voltajes individuales de los resistores son

$$V_{P_1} = I_{s_1}R_{P_1} = (1.50\ \text{A})(1.50\ \Omega) = 2.25\ \text{V}$$

y

$$V_5 = I_{s_1}R_5 = (1.50\ \text{A})(2.50\ \Omega) = 3.75\ \text{V}$$

respectivamente. (Como verificación, compruebe que los voltajes sumen 6.00 V.)

Finalmente, el voltaje a través de R_3 y R_4 es el mismo que V_{P_1} (¿por qué?), y

$$V_{P_1} = V_3 = V_4 = 2.25\ \text{V}$$

Con estos voltajes y resistencias que hemos obtenido, las dos últimas corrientes, I_3 e I_4, son

$$I_3 = \frac{V_3}{R_3} = \frac{2.25\ \text{V}}{6.00\ \Omega} = 0.38\ \text{A}$$

e

$$I_4 = \frac{V_4}{R_4} = \frac{2.25\ \text{V}}{2.00\ \Omega} = 1.13\ \text{A}$$

Se espera que la corriente (I_{s_1}) se divida en la unión $R_3 - R_4$. Se dispone entonces de la verificación: $I_3 + I_4$ es igual a I_{s_1}, dentro de los errores de redondeo.

Ejercicio de refuerzo. En este ejemplo, verifique que la potencia total entregada a todos los resistores es la misma que la salida de potencia de la batería.

18.2 Circuitos de múltiples mallas y reglas de Kirchhoff

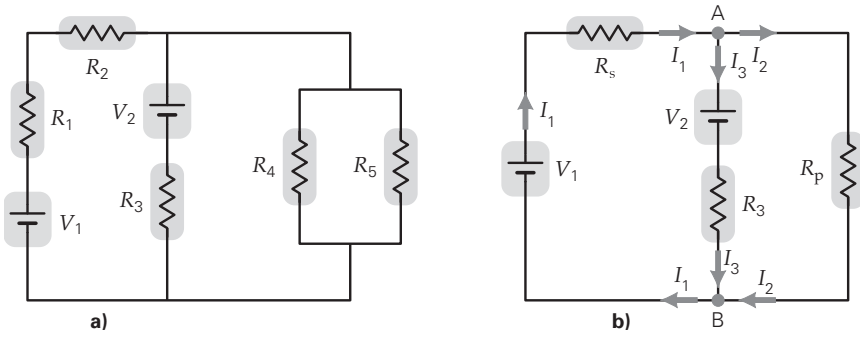
OBJETIVOS: *a*) Comprender los principios físicos en que se basan las reglas de los circuitos de Kirchhoff y *b*) aplicar esas reglas en el análisis de circuitos reales.

Los circuitos en serie-paralelo con una sola fuente de voltaje siempre pueden reducirse a una sola malla, como vimos en el ejemplo 18.3. Sin embargo, hay circuitos que contienen varias mallas, cada una con varias fuentes de voltaje, resistencias o ambas. En muchos casos, los resistores no están conectados en serie ni en paralelo. Un circuito de múltiples mallas, que no se presta para el método de análisis descrito en la sección 18.1, se ilustra en la ▼figura 18.7a. Aun cuando es posible reemplazar algunas combinaciones de resistores por sus resistencias equivalentes (figura 18.7b), este circuito puede reducirse sólo en tanto que se usen procedimientos en paralelo y en serie.

El análisis de esos tipos de circuitos requiere un enfoque más general, esto es, la aplicación de las **reglas de Kirchhoff**.* Estas reglas comprenden la conservación de la carga y la conservación de la energía. (Aunque no se mencionaron de manera específica, las reglas de Kirchhoff se aplicaron a los circuitos en serie y en paralelo analizados en la sección 18.1.) Ahora, es conveniente introducir la terminología que nos ayudará a describir circuitos complejos:

- Un punto en el que se conectan tres o más alambres se llama **unión** o **nodo**; por ejemplo, el punto A en la figura 18.7b.
- Una trayectoria que conecta dos uniones se llama **rama**. Una rama puede contener uno o más elementos de circuito y puede haber más de dos ramas entre dos uniones.

Nota: las reglas de Kirchhoff fueron desarrolladas por el físico alemán Gustav Kirchhoff (1824-1887).



◀ **FIGURA 18.7 Circuito de mallas múltiples** En general, un circuito que contiene fuentes de voltaje en más de una malla no puede reducirse más por métodos en serie y en paralelo. Sin embargo, algunas reducciones dentro de cada malla son posibles, como del inciso ***a*** al ***b***. En una unión de circuito, donde tres o más alambres se conectan, la corriente se divide o se une, como en las uniones A y B en el inciso *b*, respectivamente. La trayectoria entre dos uniones se llama rama. En *b* hay tres ramas, esto es, tres trayectorias diferentes entre las uniones A y B.

* Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887) fue un científico alemán que hizo importantes contribuciones a la teoría de los circuitos eléctricos y a la espectroscopia de la luz. Inventó el espectroscopio, un dispositivo que separa la luz en sus colores fundamentales y que permite estudiar la "huella" de varios elementos.

Teorema de la unión de Kirchhoff

La **primera regla de Kirchhoff** o **teorema de la unión** establece que la suma algebraica de las corrientes en cualquier unión es cero:

$$\Sigma I_i = 0 \qquad \textit{Suma de corrientes en una unión} \tag{18.4}$$

La suma de las corrientes que entran a una unión (tomadas como positivas) y las que salen (tomadas como negativas) es cero. Esta regla es sólo un enunciado de la conservación de la carga (ninguna carga se acumula en una unión, ¿por qué?). Para la unión en el punto A en la figura 18.7b, la suma algebraica de las corrientes es $I_1 - I_2 - I_3 = 0$; en forma equivalente,

$$I_1 = I_2 + I_3$$
$$\textit{corriente que entra} = \textit{corriente que sale}$$

(Esta regla se aplicó al analizar resistencias en paralelo en la sección 18.1.)

PHYSLET®

Ilustración 30.7 La regla de las mallas

Sugerencia para resolver problemas

A veces, al observar el diagrama de un circuito no se sabe si una corriente particular entra o sale de una unión. En este caso, *suponga* la dirección. Luego calcule las corrientes. Si una de sus suposiciones resulta opuesta a la dirección real de la corriente, entonces será una respuesta negativa para esa corriente. Este resultado significa que la dirección de la corriente es contraria a la dirección que inicialmente se eligió.

PHYSLET®

Ilustración 30.1 Análisis de circuitos

Teorema de las mallas de Kirchhoff

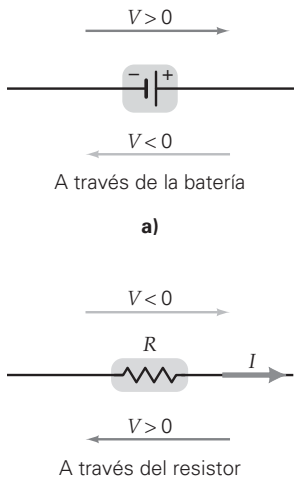
La **segunda regla de Kirchhoff** o **teorema de las mallas** establece que la suma algebraica de las diferencias de potencial (voltajes) a través de todos los elementos de cualquier malla cerrada es cero:

$$\Sigma V_i = 0 \qquad \textit{suma de voltajes alrededor de una malla} \tag{18.5}$$

Esta expresión significa que la suma de los aumentos de voltaje (un incremento en el potencial) es igual a la suma de las caídas de voltaje (un decremento en el potencial) alrededor de una malla cerrada, que debe ser así para que la energía se conserve. (Esta regla se empleó al analizar las resistencias en serie en la sección 18.1.)

Observe que al recorrer una malla de circuito en sentidos diferentes se tendrá un aumento o una caída de voltaje a través de cada elemento del circuito. Por eso se establece una convención de signos para los voltajes. Usaremos la convención ilustrada en la ◂figura 18.8. El voltaje a través de una batería se toma como positivo (elevación de voltaje) si la malla se recorre de la terminal negativa a la positiva (figura 18.8a); y es negativo si la malla se recorre en el sentido opuesto, de la terminal positiva a la negativa. (El sentido de la corriente en la batería no tiene *nada* que ver con el signo del voltaje a través de ésta. El signo del voltaje depende sólo del sentido en que elegimos recorrer la batería.)

El voltaje a través de un resistor se toma como negativo (un decremento) si se recorre en el mismo sentido que la corriente asignada, en esencia, cuando se recorre "hacia abajo" de acuerdo con el potencial (figura 18.8b). Es evidente que el voltaje será positivo si el resistor se recorre en el sentido contrario (en contra del sentido de la corriente, ganando potencial eléctrico). Juntas, estas convenciones de signo permiten sumar los voltajes alrededor de una malla cerrada, independientemente del sentido escogido para efectuar la suma. La ecuación 18.5 es la misma en cualquier caso. Note que el hecho de invertir el sentido elegido equivale simplemente a multiplicar la ecuación 18.5 (para el sentido original) por −1. Esta operación no altera la ecuación.



▲ **FIGURA 18.8 Convención de signos para las reglas de Kirchhoff** ***a)*** El voltaje a través de una batería se toma como positivo si ésta se recorre de la terminal negativa a la terminal positiva. Se asigna un valor negativo si la batería se recorre de la terminal positiva a la terminal negativa. ***b)*** El voltaje a través de un resistor se toma como negativo si éste se recorre en el sentido de la corriente asignada ("corriente abajo"). Se considera positivo si la resistencia se recorre en el sentido opuesto al de la corriente asignada a esa rama ("corriente arriba").

Sugerencia para resolver problemas

Al aplicar el teorema de la malla de Kirchhoff, el signo de un voltaje a través de un resistor está determinado por el sentido de la corriente en ese resistor. Sin embargo, hay situaciones en donde el sentido no es obvio. ¿Cómo se manejan los signos del voltaje en tales casos? Después de suponer un sentido para la corriente, siga la convención de signos del voltaje *con base en este sentido supuesto*. Esto garantiza que las dos convenciones de signos sean consistentes. Si resulta que el sentido real de la corriente es contrario a su elección, las caídas de voltaje reflejarán esto automáticamente.

Una interpretación gráfica del teorema de la malla de Kirchhoff se presenta en la sección Aprender dibujando de la p. 602. El Ejemplo integrado 18.4 muestra que nuestras consideraciones previas sobre serie-paralelo son congruentes con esas reglas. Al mismo tiempo, hay que reconocer la importancia de dibujar correctamente un diagrama de circuito, ya que sirve como guía.

Ejemplo integrado 18.4 ■ Un circuito simple: uso de las reglas de Kirchhoff

Dos resistores R_1 y R_2 están conectados en paralelo. Esta combinación se conecta en serie con un tercer resistor R_3, que tiene la mayor resistencia de los tres. Una batería completa el circuito, con un electrodo al principio y el otro al final de esta red. *a*) ¿Qué resistor llevará más corriente? 1) R_1, 2) R_2 o 3) R_3. Explique su respuesta. *b*) En este circuito suponga que $R_1 = 6.0\ \Omega$, $R_2 = 3.0\ \Omega$, $R_3 = 10.0\ \Omega$, y que el voltaje terminal de la batería es de 12.0 V. Aplique las reglas de Kirchhoff para determinar la corriente y el voltaje en cada resistor.

a) Razonamiento conceptual. Es mejor ver primero un diagrama del circuito con base en la descripción de la red (◂figura 18.9). Se podría pensar que el resistor con la menor resistencia lleva la mayor corriente. Pero esto es cierto sólo si *todos* los resistores están en paralelo. Los dos resistores en paralelo llevan, cada uno, sólo una fracción de la corriente total. Sin embargo, como el total de sus dos corrientes está en R_3, ese resistor lleva la corriente total y, por lo tanto, también la mayor. Por consiguiente, la respuesta correcta es la 3.

b) Razonamiento cuantitativo y solución.

Dado: $R_1 = 6.0\ \Omega$, $R_2 = 3.0\ \Omega$, $R_3 = 10.0\ \Omega$, $V = 12.0$ V ***Encuentre:*** la corriente y el voltaje en cada resistor

Hay tres corrientes incógnitas: la corriente total (I) y las corrientes en cada uno de los resistores en paralelo (I_1 e I_2). Como sólo hay una batería, la corriente debe ser en sentido de las manecillas del reloj (como se muestra en la figura). Aplicando el teorema de la unión de Kirchhoff a la primera unión (J en la figura 18.9a), tenemos

$$\Sigma I_i = 0 \quad \text{o} \quad I - I_1 - I_2 = 0 \tag{1}$$

Usando el teorema de la malla en sentido de las manecillas del reloj en la figura 18.9b, cruzamos la batería de la terminal negativa a la positiva y luego recorremos R_1 y R_2 para completar el circuito. La ecuación resultante (mostrando los signos de los voltajes explícitamente) es

$$\Sigma V_i = 0 \quad \text{o} \quad +V + (-I_1R_1) + (-IR_3) = 0 \tag{2}$$

Una tercera ecuación se obtiene aplicando el teorema de la malla, pero esta vez yendo a través de R_2 en vez de R_1 (figura 18.9c). Esto da

$$\Sigma V_i = 0 \quad \text{o} \quad +V + (-I_2R_2) + (-IR_3) = 0 \tag{3}$$

Poniendo en la batería el voltaje (en volts) y las resistencias (en ohms) y reordenando esas ecuaciones:

$$I = I_1 + I_2 \tag{1a}$$

$$12 - 6I_1 - 10I = 0 \quad \text{o} \quad 6 - 3I_1 - 5I = 0 \tag{2a}$$

$$12 - 3I_2 - 10I = 0 \tag{3a}$$

Sumando las ecuaciones (2a) y (3a) resulta $18 - 3(I_1 + I_2) - 15I = 0$. Sin embargo, de la ecuación (1a), $I = I_1 + I_2$. Por lo tanto,

$$18 - 3I - 15I = 0 \quad \text{o} \quad 18I = 18$$

y, al despejar la corriente total, se obtiene $I = 1.00$ A.

Con las ecuaciones (3a) y (1a) es posible calcular las corrientes restantes:

$$I_2 = \tfrac{2}{3}\text{A} \quad \text{e} \quad I_1 = \tfrac{1}{3}\text{A}$$

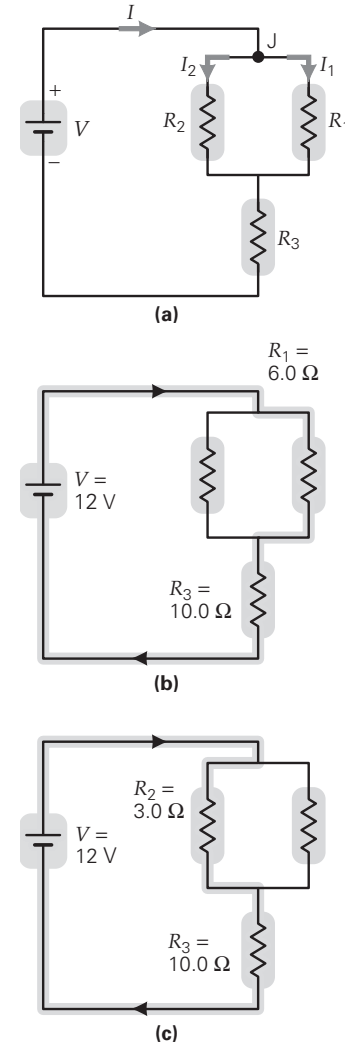
Estas respuestas son congruentes con nuestro razonamiento acerca del diagrama de circuito en el inciso *a*.

Como las corrientes y resistencias se conocen, los voltajes se obtienen con la ley de Ohm, $V = IR$. Así,

$$V_1 = I_1R_1 = \left(\tfrac{1}{3}\text{A}\right)(6.0\ \Omega) = 2.0\ \text{V}$$

$$V_2 = I_2R_2 = \left(\tfrac{2}{3}\text{A}\right)(3.0\ \Omega) = 2.0\ \text{V}$$

$$V_3 = I_3R_3 = (1.0\ \text{A})(10.0\ \Omega) = 10.0\ \text{V}$$



▲ **FIGURA 18.9** Diagramas de circuito usando las reglas de Kirchhoff ***a)*** Diagrama del circuito de la descripción en el Ejemplo integrado 18.4. ***b)*** y ***c)*** Las dos mallas usadas en el análisis del Ejemplo integrado 18.4.

PHYSLET®
Exploración 30.2 Bombillas de luz

(continúa en la página 603)

APRENDER DIBUJANDO

DIAGRAMAS DE KIRCHHOFF: UNA INTERPRETACIÓN GRÁFICA DEL TEOREMA DE LA MALLA DE KIRCHHOFF

El teorema de la malla de Kirchhoff tiene una representación geométrica que le ayudará a comprender mejor su significado y visualizar los cambios de potencial en un circuito e incluso anticipar los resultados de un análisis matemático o confirmarlos cualitativamente. (No olvide que para efectuar un análisis completo de los circuitos, debe usarse también el teorema de la unión de Kirchhoff; véase el ejemplo 18.5.)

La idea es hacer un trazo tridimensional a partir del diagrama del circuito. Los alambres y elementos del circuito forman la base para el plano x-y, o el "piso" del diagrama. De forma perpendicular a este plano, a lo largo del eje z, se tiene el valor del potencial eléctrico (V), con una selección apropiada para el cero. Un diagrama como éste se llama *diagrama de Kirchhoff* (figura 1).

Las reglas para construir un diagrama de Kirchhoff son simples: comience en un valor conocido del potencial y recorra una malla completa, terminando donde empezó. Como usted regresa al mismo lugar, la suma de todas las elevaciones de potencial (voltajes positivos) deben equilibrarse con la suma de las caídas (voltajes negativos). Este requisito es la expresión geométrica de la conservación de la energía, implicada matemáticamente en el teorema de la malla de Kirchhoff.

Si el potencial aumenta (digamos al recorrer una batería de la terminal negativa a la positiva), dibuje una elevación en la dirección z. La elevación representa el voltaje terminal de la batería. Si el potencial disminuye (por ejemplo, al recorrer un resistor en el sentido de la corriente), asegúrese de que el potencial cae. Trate de dibujar los aumentos y caídas (los voltajes) a escala. Es decir, si hay un aumento importante en el potencial (como la que se tendría a través de una batería de alto voltaje), dibújelo en proporción a los otros sobre el diagrama.

Para circuitos elaborados, este método gráfico quizá resulte demasiado complicado para uso práctico. Vale la pena tenerlo ya que ilustra la idea fundamental detrás del teorema de la malla.

Como ejemplo del poder de este método, considere el circuito en la figura 1: una batería con resistencia interna r conectada a un solo resistor externo R. El sentido de la corriente es del ánodo al cátodo a través del resistor externo. Escogemos el potencial del cátodo de la batería como cero. Comenzamos ahí y recorremos el circuito en el sentido de la corriente, mostramos un aumento en el potencial yendo del cátodo al ánodo. A continuación, mostramos que el potencial es constante conforme la corriente sigue a través de los alambres hasta el resistor externo. Esto es, no indicamos ninguna caída de voltaje *a lo largo* de los alambres conectores (¿por qué?).

En el resistor debe haber una caída considerable de potencial. Sin embargo, la caída no es hasta cero, porque debe haber algún voltaje restante para generar una corriente a través de la resistencia interna. Así, se observa por qué el voltaje terminal de la batería, V, debe ser menor que su fem (la elevación entre los puntos a y b).

La figura 2 muestra dos resistores en serie, y esa combinación en paralelo con un tercer resistor. Para simplificar, se supone que los tres resistores tienen la misma resistencia R, y que la resistencia interna de la batería es igual a cero. Comenzando en el punto a, se tiene una elevación en el potencial correspondiente al voltaje de la batería. Al trazar una malla a través del solo resistor, debe haber una sola caída en el potencial igual en magnitud a $\mathcal{E}$.

Si seguimos la malla que incluye los dos resistores, vemos que cada uno tiene sólo la mitad de la caída de voltaje total (¿por qué?). Así, cada uno llevará sólo la mitad de la corriente del resistor solo. Recuerde que en los circuitos paralelos, la mayor resistencia lleva la menor corriente. Observe cómo este enfoque geométrico le ayuda a desarrollar su intuición y le permite anticipar los resultados numéricos.

Trate de volver a dibujar la figura 2 tal como se vería si los resistores en serie tuvieran resistencias de R y $2R$. ¿Qué resistor tiene ahora el mayor voltaje? ¿Cómo se comparan las corrientes en los resistores con la situación anterior? Analice matemáticamente el circuito para confirmar sus expectativas.

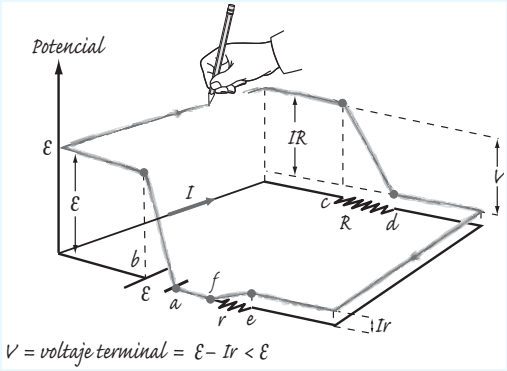


FIGURA 1 Diagramas de Kirchhoff: una estrategia gráfica para la resolución de problemas El esquema del circuito se traza en el plano x-y, y el potencial eléctrico se traza perpendicularmente a lo largo del eje z. El cero del potencial se toma como la terminal negativa de la batería. Se asigna un sentido para la corriente, y el valor del potencial se traza alrededor del circuito, siguiendo las reglas para las ganancias y las pérdidas de potencial. Este diagrama de Kirchhoff, muestra un aumento de potencial cuando la batería se recorre del cátodo al ánodo, una caída de potencial a través del resistor externo, y una menor caída del potencial a través de la resistencia interna de la batería.

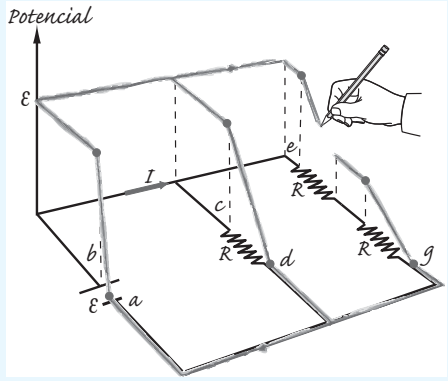


FIGURA 2 Diagrama de Kirchhoff de un circuito más complejo Imagine cómo cambiaría el trazo si variaran los valores de los tres resistores. Luego, analice el circuito matemáticamente para ver si el diagrama le permitirá anticipar los voltajes y las corrientes.

Como era de esperarse, las caídas de voltaje a través de los resistores en paralelo son iguales. A causa de esto, dos tercios de la corriente total está en el resistor con la menor resistencia. Además, el voltaje total a través de la red es de 12.0 V, como debe ser.

Una aclaración especial antes de terminar con este ejemplo: sabemos que las respuestas deben estar en amperes y volts porque se utilizaron amperes, volts y ohms de forma consistente. Si permanecemos dentro del sistema (esto es, si las cantidades se expresan en volts, amperes y ohms), no se necesita convertir las unidades; las respuestas, automáticamente, estarán en estas unidades. (Por supuesto, siempre es una buena idea verificar sus unidades si surge alguna duda.)

Ejercicio de refuerzo. *a*) En este ejemplo, trate de predecir lo que sucederá con cada una de las corrientes si R_2 se incrementa. Explique su razonamiento. *b*) Repita el inciso *b* de este ejemplo, cambiando R_2 a 8.0 Ω, y vea si su razonamiento es correcto.

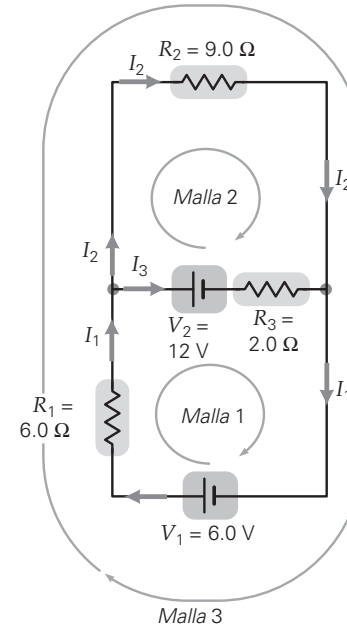
Aplicación de la reglas de Kirchhoff

El ejemplo integrado 18.4 podría haberse resuelto usando las expresiones para resistencias equivalentes. Sin embargo, los circuitos de múltiples mallas, más complicados, requieren de un método más estructurado. En este libro, usaremos los siguientes pasos generales al aplicar las reglas de Kirchhoff:

1. Asigne una corriente y un sentido de corriente a cada rama en el circuito. Esto se hace más convenientemente en las uniones.
2. Indique las mallas y los sentidos en los que se van a recorrer (▸figura 18.10). Cada rama *debe* estar por lo menos en una malla.
3. Aplique la primera regla de Kirchhoff (regla de la unión) para cada unión que da una ecuación única. (Este paso da un conjunto de ecuaciones que incluye *todas* las corrientes, pero es posible que haya ecuaciones redundantes para dos diferentes uniones.)
4. Recorra el número necesario de mallas para incluir todas las ramas. Al recorrer una malla, aplique la segunda regla de Kirchhoff, el teorema de la malla (utilizando $V = IR$ para cada resistor), y escriba las ecuaciones, considerando las convenciones de signos.

Si este procedimiento se aplica de forma adecuada, los pasos 3 y 4 dan un conjunto de N ecuaciones con N corrientes incógnitas. En esas ecuaciones se despejan las corrientes. Si se recorren más mallas de las necesarias, se tendrán ecuaciones redundantes. Es necesario sólo el número de mallas que incluye *una vez* cada rama.

Tal vez este procedimiento parezca complicado, pero en realidad es sencillo, como muestra el siguiente ejemplo.



▲ **FIGURA 18.10 Aplicación de las reglas de Kirchhoff** Para analizar un circuito como el del ejemplo 18.5, asigne una corriente y un sentido a cada rama en el circuito (conviene hacerlo en las uniones). Identifique cada malla y el sentido de recorrido. Luego escriba ecuaciones de corriente para cada unión independiente (usando el teorema de la unión de Kirchhoff). Además, escriba las ecuaciones de voltajes para tantas mallas como sea necesario para incluir cada rama (utilizando el teorema de la malla de Kirchhoff). Tenga cuidado de observar las convenciones de signos.

Ejemplo 18.5 ■ Corrientes en ramas: uso de las reglas de Kirchhoff

Para el circuito en la figura 18.10, encuentre la corriente en cada rama.

Razonamiento. Los cálculos en serie o en paralelo no pueden usarse aquí. (¿Por qué?) En lugar de ello, la solución comienza más bien asignando sentidos a la corriente ("mejores conjeturas") en cada malla, y luego se usa el teorema de la unión y de la malla (dos veces, una para cada malla) para generar tres ecuaciones, puesto que existen tres corrientes.

Solución.

Dado: Valores en la figura 18.10 ***Encuentre:*** La corriente en cada una de las tres ramas

Las corrientes y sus sentidos, así como los sentidos de recorrido elegidos de las mallas, se representan en la figura. (Recuerde, estos sentidos no son únicos; elíjalos, trabaje el problema y verifique los signos de la corriente final para ver si sus elecciones fueron correctas.) Hay una corriente en cada rama, y cada rama está en por lo menos una malla. (Algunas ramas están en más de una malla, lo que es aceptable.)

Aplicando la primera regla de Kirchhoff en la unión izquierda resulta

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0$$

o bien, después de reordenar,

$$I_1 = I_2 + I_3 \qquad (1)$$

(Para la otra unión, podríamos escribir $I_2 + I_3 - I_1 = 0$, pero esta ecuación es equivalente a la ecuación 1, como hemos hecho con las uniones.)

Circulando alrededor de la malla 1 como en la figura 18.10 y aplicando el teorema de la malla de Kirchhoff con la convención de signos, resulta

$$\sum V_i = +V_1 + (-I_1R_1) + (-V_2) + (-I_3R_3) = 0 \qquad (2)$$

Entonces, sustituyendo los valores numéricos, obtenemos

$$+6 - 6I_1 - 12 - 2I_3 = 0$$

(continúa en la siguiente página)

Al reordenar esta ecuación y dividir ambos lados entre 2, tenemos

$$3I_1 + I_3 = -3$$

Por conveniencia, se omiten las unidades (todas están en amperes y ohms, y, por lo tanto, son consistentes).

Para la malla 2, el teorema de la malla da

$$\Sigma V_i = +V_2 + (-I_2R_2) + (+I_3R_3) = 0 \qquad (3)$$

De nuevo, después de sustituir los valores y de reordenar, tenemos,

$$9I_2 - 2I_3 = 12 \qquad (3a)$$

Las ecuaciones (1), (2a) y (3a) forman un conjunto de tres ecuaciones con tres incógnitas. Las I se pueden despejar de varias maneras. Por ejemplo, sustituya la ecuación (1) en la ecuación (2) para eliminar I_1:

$$3(I_2 + I_3) + I_3 = -3$$

que, después de reordenarse y dividirse entre 3, se simplifica a

$$I_2 = -1 - \tfrac{4}{3}I_3 \qquad (4)$$

Luego, sustituyendo la ecuación (4) en la ecuación (3) se elimina I_2:

$$9\left(-1 - \tfrac{4}{3}I_3\right) - 2I_3 = 12$$

Se resuelve algebraicamente y se despeja I_3, para obtener

$$-14I_3 = 21 \qquad \text{o} \qquad I_3 = -1.5\ \text{A}$$

El signo menos en el resultado nos dice que se supuso un sentido equivocado para I_3.

Sustituyendo el valor de I_3 en la ecuación (4), obtenemos el valor de I_2:

$$I_2 = -1 - \tfrac{4}{3}(-1.5\ \text{A}) = 1.0\ \text{A}$$

Entonces, de la ecuación (1),

$$I_1 = I_2 + I_3 = 1.0\ \text{A} - 1.5\ \text{A} = -0.5\ \text{A}$$

Una vez más, el signo menos indica que el sentido de I_1 fue incorrecto.

Observe que este análisis no usó la malla 3. La ecuación para esta malla sería redundante, pues no contendría nueva información (¿se da cuenta?).

Ejercicio de refuerzo. Repita este ejemplo, usando el teorema de las uniones, así como las mallas 3 y 1 en vez de las 1 y 2.

18.3 Circuitos RC

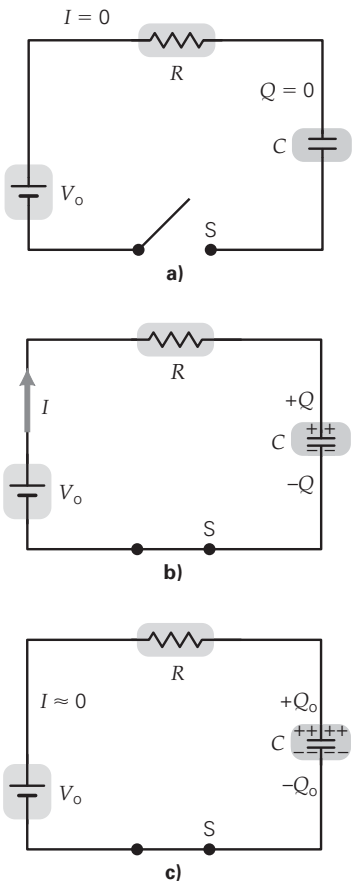
OBJETIVOS: *a*) Comprender la carga y descarga de un condensador a través de un resistor y *b*) calcular la corriente y el voltaje en tiempos específicos durante esos procesos.

Hasta ahora, sólo se han considerado circuitos de corrientes constantes. En algunos circuitos de corriente directa (cd), la corriente varía *con el tiempo* mientras mantiene un sentido constante (y sigue siendo "cd"). Tal es el caso con los **circuitos RC**, que, en general, constan de varios resistores y condensadores.

Carga de un condensador a través de un resistor

La carga por una batería de un condensador (o capacitor) inicialmente descargado se ilustra en la ◂figura 18.11. Después de que se cierra el interruptor, aun cuando hay una separación entre las placas del condensador, la carga *debe* fluir mientras el condensador se está cargando.

La carga máxima (Q_o) que el condensador puede acumular depende de la capacitancia (C) y del voltaje de la batería (V_o). Para determinar el valor de Q_o y comprender cómo es que tanto la corriente como la carga en el condensador varían con el tiempo, considere el siguiente argumento. A $t = 0$, no hay carga en el condensador, y, por lo tanto, tampoco hay voltaje a través de él. Mediante el teorema de la malla de Kirchhoff, esto significa que todo el voltaje de la batería debe aparecer a través del resistor, dando por resultado una corriente inicial (máxima) $I_o = V_o/R$. Conforme la carga aumenta en el condensador, también lo hace el voltaje a través de las placas, reduciendo el voltaje y la corriente del resistor. Finalmente, el condensador queda cargado al máximo, y la corriente disminuye a cero. En ese momento, el voltaje del resistor es cero y el voltaje del condensador debe ser V_o. A causa de la relación entre la carga en un condensador y su voltaje (capítulo 16, ecuación 16.19), la carga máxima del condensador está dada por $Q_o = CV_o$. (Esta secuencia se ilustra en la figura 18.11.)



▲ **FIGURA 18.11** Carga de un condensador en un circuito RC en serie ***a)*** Inicialmente no hay corriente ni carga en el condensador. ***b)*** Cuando el interruptor está cerrado, hay una corriente en el circuito hasta que el condensador se carga hasta su máximo valor. La tasa de carga (y descarga) depende de la constante de tiempo, τ (= RC). ***c)*** Para tiempos mucho más largos que τ, la corriente es muy cercana a cero, y el condensador está plenamente cargado.

La resistencia es uno de los dos factores que ayudan a determinar qué tan rápido se carga el condensador, ya que cuanto mayor es su valor, mayor es la resistencia al flujo de carga. La capacitancia es el otro factor que influye en la rapidez de carga, ya que toma más tiempo cargar un condensador más grande. El análisis de este tipo de circuito requiere de matemáticas que están más allá del nivel de este libro. Sin embargo, se puede mostrar que el voltaje a través del condensador aumenta exponencialmente con el tiempo de acuerdo con la ecuación

$$V_C = V_o[1 - e^{-t/(RC)}] \quad \textit{(voltaje del condensador cargándose en un circuito RC)} \tag{18.6}$$

donde e tiene un valor aproximado de 2.718. (Recuerde que el número irracional e es la base del sistema de *logaritmos naturales*.) Una gráfica de V_C *versus* t se muestra en la ▸figura 18.12a. Como es de esperarse, V_C tiende a V_o, el voltaje máximo del condensador, después de "largo" tiempo.

Una gráfica de I *versus* t se presenta en la figura 18.12b. La corriente varía con el tiempo de acuerdo con la ecuación

$$I = I_o e^{-t/(RC)} \tag{18.7}$$

La corriente disminuye exponencialmente con el tiempo y tiene su valor máximo al inicio, como se esperaba.

De acuerdo con la ecuación 18.6, tomaría un tiempo infinito para que el condensador se cargara por completo. Sin embargo, en la práctica, los condensadores quedan cargados en tiempos relativamente cortos. Es común usar un valor especial para expresar el "tiempo de carga". Este valor, llamado **constante de tiempo (τ)**, se expresa como

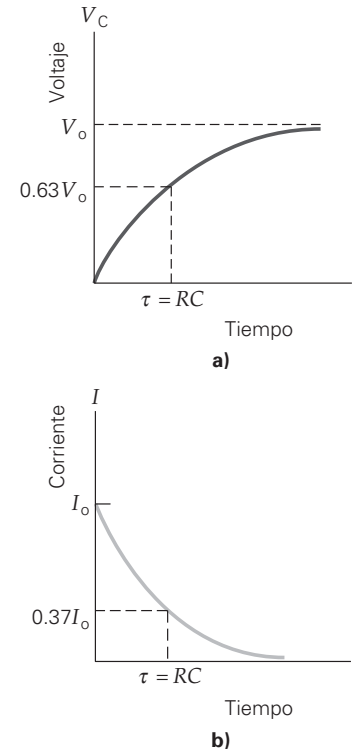
$$\tau = RC \quad \textit{constante de tiempo para circuitos RC} \tag{18.8}$$

(Sería conveniente que usted demostrara que R_C tiene unidades de segundos.) Después de que ha transcurrido un tiempo igual a una constante de tiempo, $t = \tau = RC$, el voltaje a través del condensador en proceso de carga se ha elevado al 63% del máximo posible. Esto se ve evaluando V_C (ecuación 18.6), al reemplazar t con τ ($= RC$):

$$V_C = V_o(1 - e^{-\tau/\tau}) = V_o(1 - e^{-1})$$
$$\approx V_o\left(1 - \frac{1}{2.718}\right) = 0.63V_o$$

Como $Q \propto V_C$, esto implica que el condensador está cargado en un 63% de su máximo posible después de que ha transcurrido un tiempo igual a una constante de tiempo. Usted debería demostrar que después de una constante de tiempo, la corriente ha caído al 37% de su (máximo) valor inicial (I_o).

Al final de dos constantes de tiempo, $t = 2\tau = 2RC$, el condensador está cargado a más del 86% de su valor máximo; en $t = 3\tau = 3RC$, el condensador está cargado al 95% de su valor máximo, y así sucesivamente. Como regla general, el condensador se considera "plenamente cargado", después que han transcurrido "varias constantes de tiempo".



▲ **FIGURA 18.12 Carga de un condensador en un circuito RC en serie** ***a)*** En un circuito RC, conforme el condensador se carga, el voltaje a través de él aumenta no linealmente con el tiempo, alcanzando 63% de su voltaje máximo (V_o) en una constante de tiempo τ. ***b)*** La corriente en este circuito es inicialmente un máximo ($I_o - V_o/R$) y disminuye exponencialmente, cayendo al 37% de su valor inicial en una constante de tiempo, τ.

Descarga de un condensador a través de un resistor

La ▸figura 18.13a muestra un condensador siendo *descargado* a través de un resistor. En este caso, el voltaje a través del condensador *disminuye* exponencialmente con el tiempo, como lo hace también la corriente. La expresión para la caída del voltaje del condensador (desde su voltaje máximo V_o) es

$$V_C = V_o e^{-t/(RC)} = V_o e^{-t/\tau} \quad \textit{(descarga del voltaje del condensador en un circuito RC)} \tag{18.9}$$

Por ejemplo, en una constante de tiempo, el voltaje a través del condensador cae a 37% de su valor original (figura 18.13b). La corriente en el circuito decae exponencialmente, de acuerdo con la ecuación 18.7. Éste también es el comportamiento de un condensador en un desfibrilador cardiaco conforme descarga su energía almacenada (como un flujo de carga o corriente) a través del corazón (resistencia R) en un tiempo de descarga de 0.1 s. Los circuitos RC también son parte integral de los marcapasos cardiacos, que alternativamente cargan un condensador, transfieren la energía al corazón y repiten este proceso a una tasa determinada por la constante de tiempo. Para conocer más detalles sobre estos interesantes e importantes instrumentos, véase la sección A fondo 18.1, sobre las aplicaciones de los circuitos RC a la cardiología, en la p. 608. Otras aplicaciones interesantes de los circuitos RC en el campo médico se mencionan en los ejercicios 107 y 108. Como un ejemplo práctico, considere su uso en las modernas cámaras fotográficas en el ejemplo 18.6.

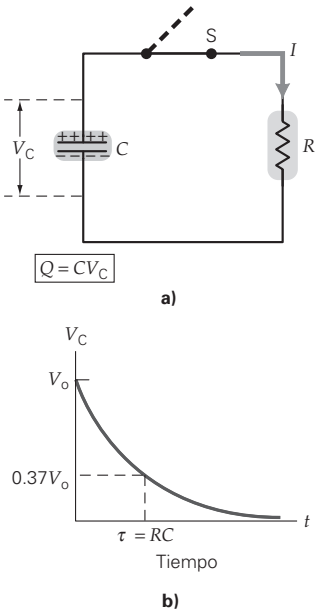
PHYSLET®

Ilustración 30.6 Circuito RC

PHYSLET®

Exploración 30.6 Constante de tiempo RC

Nota: la mayoría de las calculadoras cuentan con un botón e^x. Para cálculos exponenciales, practique utilizándolo. Por ejemplo, asegúrese de que su calculadora le dé $e^{-1} \approx 0.37$.



▲ **FIGURA 18.13 Descarga de un condensador en un circuito RC en serie** ***a)*** El condensador está inicialmente cargado. Cuando el interruptor se cierra, aparece corriente en el circuito conforme el condensador comienza a descargarse. ***b)*** En este caso, el voltaje a través del condensador (y la corriente en el circuito) decae exponencialmente con el tiempo, cayendo al 37% de su valor inicial en una constante de tiempo, τ.

Ejemplo 18.6 ■ Circuitos RC en cámaras fotográficas: encender el flash es tan fácil como disminuir un logaritmo

En muchas cámaras fotográficas, el flash integrado se enciende con la energía almacenada en un condensador. Este último se mantiene cargado usando baterías de larga vida con voltajes que, por lo regular, son de 9.00 V. Una vez que se enciende el flash, el condensador debe cargarse rápidamente, por medio de un circuito RC interno. Si el condensador tiene un valor de 0.100 F, ¿cuál debe ser la resistencia de forma que el condensador quede cargado al 80% de su carga máxima (la cantidad mínima de carga para encender la luz de nuevo) en 5.00 s?

Razonamiento. Después de una constante de tiempo, el condensador se carga al 63% de su voltaje y carga máximos. Como el condensador necesita el 80%, la constante de tiempo debe ser menor que 5.00 s. Podemos usar la ecuación 18.6 (junto con una calculadora) para determinar la constante de tiempo. A partir de ahí, es posible calcular el valor de resistencia que se requiere.

Solución. Los datos incluyen el voltaje final a través del condensador, V_C, que es el 80% del voltaje de la batería, lo que significa que Q es el 80% de la carga máxima.

Dado: $C = 0.100$ F; $V_B = V_o = 9.00$ V; $V_C = 0.80V_o = 7.20$ V; $t = 5.00$ s

Encuentre: R (la resistencia requerida de forma que el condensador esté cargado al 80% en 5.00 s)

Insertando los datos en la ecuación 18.6, $V_C = V_o(1 - e^{-t/\tau})$, tenemos

$$7.20 = 9.00(1 - e^{-5.00/\tau})$$

Reordenando esta ecuación, se obtiene $e^{-500/\tau} = 0.20$, y el recíproco de esta expresión (para hacer positivo el exponente) es

$$e^{5.00/\tau} = 5.00$$

Para despejar la constante de tiempo, recuerde que si $e^a = b$, entonces a es el *logaritmo natural* (ln) de b. Así, en nuestro caso, $5.00/\tau$ es el logaritmo natural de 5.00. Usando una calculadora, encontramos que ln 5.00 = 1.61. Por lo tanto,

$$\frac{5.00}{\tau} = \ln 5.00 = 1.61$$

o

$$\tau = RC = \frac{5.00}{1.61} = 3.11 \text{ s}$$

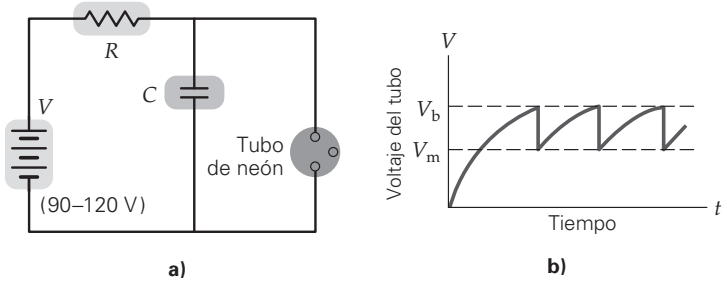
Despejando R, obtenemos

$$R = \frac{3.11 \text{ s}}{C} = \frac{3.11 \text{ s}}{0.10 \text{ F}} = 31\ \Omega$$

Como se esperaba, la constante de tiempo es menor que 5.0 s, porque alcanzar el 80% del voltaje máximo requiere un periodo más prolongado que una constante de tiempo.

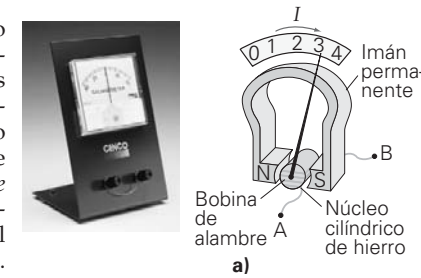
Ejercicio de refuerzo. *a*) En este ejemplo, ¿cómo se compara la energía almacenada en el condensador (después de 5.00 s) con el almacenamiento máximo de energía? Explique por qué no es el 80%. *b*) Si usted se esperara 10.00 s para cargar el condensador, ¿cuál sería su voltaje? ¿Por qué no es el doble del voltaje que existe a través del condensador después de 5.00 s?

Una aplicación de un circuito RC se presenta en la ▼figura 18.14a. Este circuito se llama *circuito de destellos* (u *oscilador de relajación de tubo neón*). El resistor y condensador están inicialmente conectados en serie, y entonces un tubo neón en miniatura se conecta en paralelo con el condensador.



▶ **FIGURA 18.14 Circuito de destellos** ***a)*** Cuando un tubo de neón se conecta a través del condensador en un circuito RC en serie que tiene la fuente apropiada de voltaje, el voltaje a través del tubo oscilará con el tiempo. Como resultado, el tubo emite periódicamente destellos. ***b)*** Una gráfica del voltaje *versus* el tiempo muestra el efecto oscilante entre V_b, el voltaje "de ruptura", y V_m, el voltaje "de mantenimiento". Véase el texto para una explicación detallada.

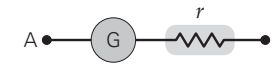
Cuando el circuito está cerrado, el voltaje a través del condensador (y el tubo neón) se eleva de 0 a V_b, que es el *voltaje de ruptura* del gas neón en el tubo (aproximadamente 80 V). A ese voltaje, el gas se ioniza (es decir, los electrones se liberan de los átomos, creando cargas positivas y negativas que tienen libertad de movimiento). Entonces, el gas comienza a conducir electricidad, y el tubo se ilumina. Cuando el tubo está en un estado conductor, el condensador se descarga a través de él, y el voltaje cae rápidamente (figura 18.14b). Cuando el voltaje cae por debajo de V_m, llamado *voltaje de mantenimiento*, la ionización en el tubo ya no puede sostenerse, y el tubo deja de conducir. El condensador empieza a cargarse de nuevo, el voltaje se eleva de V_m a V_b, y el ciclo se repite. La repetición continua de este ciclo ocasiona que el tubo lance destellos.



18.4 Amperímetros y voltímetros

OBJETIVOS: *a*) Comprender cómo los galvanómetros se usan como amperímetros y voltímetros, *b*) cómo se construyen las versiones con diferentes escalas de esos dispositivos y *c*) cómo se conectan para medir corriente y voltaje en circuitos reales.

Como sus nombres implican, un **amperímetro** mide corriente *a través* de elementos de circuito y un **voltímetro** mide voltajes a través de elementos de circuito. Un componente básico de esos dos tipos de medidores es un **galvanómetro** (▸figura 18.15a). El galvanómetro opera con base en principios magnéticos, que se estudiarán en el capítulo 19. En este capítulo, el galvanómetro se considerará simplemente como un elemento de circuito que tiene una resistencia interna r (por lo general, alrededor de 50 Ω); las desviaciones de su aguja son directamente proporcionales a la corriente en él (figura 18.15b).

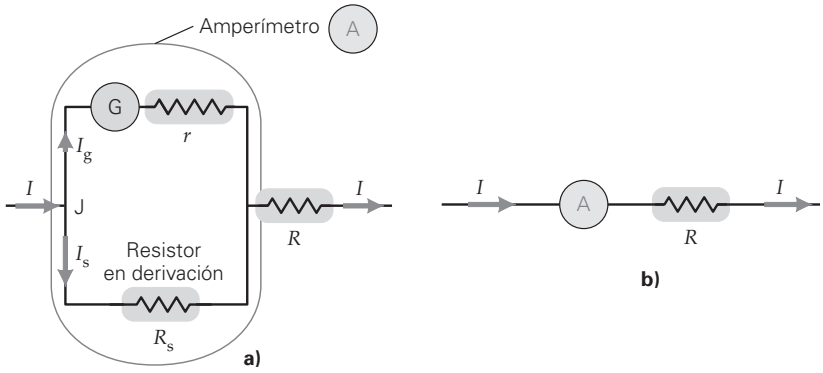


▲ **FIGURA 18.15 El galvanómetro** ***a)*** Un galvanómetro es un dispositivo sensible a la corriente; las desviaciones de su aguja son proporcionales a la corriente a través de su bobina. ***b)*** El símbolo de circuito para un galvanómetro es un círculo que contiene una G. La resistencia interna (r) del medidor se indica explícitamente como r.

Amperímetros

Un galvanómetro mide corriente, pero por la pequeña resistencia en su bobina, sólo es posible medir las corrientes en el rango de microamperios sin quemar los alambres de la bobina. Sin embargo, hay una manera de construir un amperímetro para medir mayores corrientes con un galvanómetro. Para lograrlo, se conecta un pequeño *resistor en derivación* (con una resistencia R_s) en paralelo con un galvanómetro. El trabajo del resistor en derivación (o simplemente, derivación, para abreviar) consiste en tomar la mayor parte de la corriente (▾figura 18.16). Esto requiere que la derivación tenga mucho menos resistencia que el galvanómetro ($R_s \ll r$). El siguiente ejemplo ilustra cómo se determina la resistencia de la derivación en el diseño de un amperímetro.

Nota: los amperímetros se conectan en serie con el elemento cuya corriente están midiendo (figura 18.16b).



◀ **FIGURA 18.16 Un amperímetro cd** Aquí, R es la resistencia del resistor cuya corriente se está midiendo. ***a)*** Un galvanómetro en paralelo con un resistor en derivación (R_s) es un amperímetro capaz de medir varios rangos de corriente, dependiendo del valor de R_s. ***b)*** El símbolo en un circuito para un amperímetro es un círculo con una A dentro. (Véase el ejemplo 18.7 para una explicación detallada del diseño de un amperímetro.)

Ejemplo 18.7 ■ Diseño de un amperímetro usando las reglas de Kirchhoff: selección de un resistor en derivación

Suponga que tiene un galvanómetro capaz de conducir con seguridad una corriente máxima en su bobina de 200 μA (esto se llama *su sensibilidad a escala plena*) y que tiene una resistencia en la bobina de 50 Ω. Se va a utilizar en un amperímetro diseñado para leer corrientes de hasta 3.0 A (a escala plena). ¿Cuál es la resistencia en derivación requerida? (Véase la figura 18.16a.)

Razonamiento. El galvanómetro sólo puede llevar una corriente pequeña, por lo que la mayor parte de la corriente tendrá que ser desviada, o "derivada", a través del resistor en derivación. Así, esperamos que la resistencia en derivación sea mucho menor que la resis-

PHYSLET®
Exploración 30.4 Galvanómetros y amperímetros

(continúa en la siguiente página)

tencia interna del galvanómetro. Como el resistor en derivación y la resistencia de la bobina, en realidad, son dos resistores están en paralelo, tienen el mismo voltaje. Esta información —junto con las leyes de Kirchhoff—, nos permite determinar el valor de R_s.

Solución. Se listan los datos

Dado: $I_g = 200\ \mu A = 2.00 \times 10^{-4}$ A ***Encuentre:*** R_s (resistencia en derivación)

$r = 50\ \Omega$

$I_{máx} = 3.0$ A

Como los voltajes a través del galvanómetro y el resistor en derivación son iguales, podemos escribir (usando subíndices "g" para galvanómetro y "s" para derivación; véase la figura 18.16a)

$$V_g = V_s \qquad \text{o} \qquad I_g r = I_s R_s$$

Usando la regla de unión de Kirchhoff en el punto J, la corriente I en el circuito externo es $I = I_g + I_s$ o $I_s = I - I_g$. Sustituyendo esto en la ecuación anterior, tenemos

$$I_g r = (I - I_g)R_s$$

A FONDO 18.1 APLICACIONES DE LOS CIRCUITOS RC A LA CARDIOLOGÍA

El corazón humano, en condiciones normales, late entre 60 y 70 veces por minuto, y cada latido bombea unos 70 mL de sangre (alrededor de un galón por minuto). El corazón es, en esencia, una bomba compuesta por células musculares especializadas. Las células se activan para latir cuando reciben señales eléctricas (figura 1). Estas señales (véase la sección A fondo 16.1 referente a la transmisión nerviosa en el capítulo 16) son enviadas por células especiales, llamadas *células marcapaso*, localizadas en el *nodo sinoauricular* (*nodo SA*, para abreviar) en una de las cámaras superiores o aurículas del corazón.

Durante un ataque cardiaco o después de un choque eléctrico, el corazón adopta un patrón irregular de latidos. Si un individuo no recibe tratamiento, esta condición resulta fatal en pocos minutos. Por fortuna, es posible hacer que el corazón recobre su patrón normal al pasarle una corriente eléctrica. El instrumento que hace posible esto se llama *desfibrilador cardiaco*. El componente principal de un desfibrilador es un condensador cargado a un alto voltaje.*

Se requieren varios cientos de joules de energía eléctrica para restablecer el ritmo cardiaco. Las placas de alto y bajo voltaje del condensador se ponen en contacto con la piel del paciente mediante dos electrodos que se colocan justo por encima de ambos lados del corazón (figura 2a y 2b). Cuando se enciende el interruptor, la corriente fluye a través del corazón y así se transfiere la energía del condensador a este órgano en un intento por restablecer el número correcto de latidos.

*Como las baterías portátiles no son capaces de dar altos voltajes, el proceso de carga se basa en un fenómeno llamado inducción electromagnética, que se estudiará en el capítulo 20.

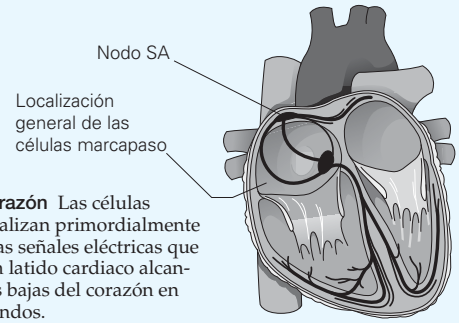


FIGURA 1 El corazón Las células marcapaso se localizan primordialmente en el nodo SA. Las señales eléctricas que desencadenan un latido cardiaco alcanzan las áreas más bajas del corazón en unos 50 milisegundos.

Esta descarga es la de un circuito RC. Por lo general, el condensador tiene un valor de 10 μF y está cargado a 1000 V. (Avances recientes en dieléctrica han permitido fabricar condensadores de 1 F o más. Esto reduce la necesidad de alto voltaje porque la energía almacenada es proporcional a la capacitancia, $U_C = CV^2/2$). La resistencia del corazón (R_h) es, por lo regular, de 1000 Ω, lo que da una constante de tiempo (para descarga) de $\tau = R_h C = 10^{-2}$ s = 10 ms.

En virtud de esta constante de tiempo de descarga de 10 ms, el condensador se descarga por completo después de 50 ms. El condensador debe recargarse en unos 5 s (figura 2c). De esta forma, la constante de tiempo de *carga* debería ser de 1 s. Esto significa que el resistor de carga debe tener un valor aproximado (R_c) de $R_c = \tau/C \approx 10^5\ \Omega$.

En algunos tipos de ataque al corazón, los latidos cardiacos son irregulares por problemas con las células marcapaso. El corazón puede recobrar su latido normal gracias a un dispositivo (que se implanta), llamado *marcapasos cardiaco*. Estas unidades tienen el tamaño de una caja de cerillos, poseen una batería de larga vida y se insertan quirúrgicamente cerca del nodo SA.

La mayoría de los marcapasos están controlados mediante un complejo circuito de activación que les permite enviar señales al corazón sólo si es necesario (marcapasos "de demanda"; véanse las figuras 3a y 3b). El circuito de activación envía una señal al marcapasos para que se "encienda" si el corazón deja de latir; si late normalmente, el interruptor del condensador se queda en la posición de carga total, en espera de una señal de encendido.

Para nuestros propósitos, el marcapasos es un circuito RC. El condensador (por lo común de 10 μF) se queda cargado gracias a la batería y debe estar listo para liberar su energía tan rápido como 70 veces por minuto (en el caso del peor escenario, cuando las propias células marcapaso del corazón no funcionan en absoluto). La resistencia del músculo cardiaco entre los electrodos del marcapasos es de 100 W, lo que significa que la constante de tiempo de descarga del dispositivo es $\tau \approx 1$ ms. Por lo tanto, se descarga por completo en 5 ms.

Para operar 70 veces por segundo, el condensador tiene que cargarse, encenderse y recargarse en $1/70 \approx 14$ ms. Como tarda aproximadamente 5 ms en descargarse, tiene unos 9 ms para recargarse, lo que da una constante de tiempo de recarga de 2 ms. Esto requiere que el resistor de recarga R_C (el resistor en el circuito a través del cual se carga el condensador) esté, cuando mucho, a 200 Ω (figura 3c).

Por lo tanto, la resistencia en derivación R_s es

$$R_s = \frac{I_g r}{I_{máx} - I_g}$$
$$= \frac{(2.00 \times 10^{-4}\ \text{A})(50\ \Omega)}{3.0\ \text{A} - 2.00 \times 10^{-4}\ \text{A}}$$
$$= 3.3 \times 10^{-3}\ \Omega = 3.3\ \text{m}\Omega$$

La resistencia en derivación es muy pequeña comparada con la resistencia de la bobina, lo que permite el paso de la mayor parte de la corriente (2.9998 A a escala plena) a través del resistor en derivación. El amperímetro leerá corrientes linealmente hasta 3.0 A. Por ejemplo, si una corriente de 1.5 A fluyera en el amperímetro, habría una corriente de 100 μA en la bobina del galvanómetro (la mitad de la máxima permitida), lo que daría una lectura de media escala, o 1.5 A.

Ejercicio de refuerzo. En este ejemplo, si hubiéramos usado una resistencia en derivación de 1.0 mΩ, ¿cuál sería la lectura de escala plena (máxima lectura de corriente) del amperímetro?

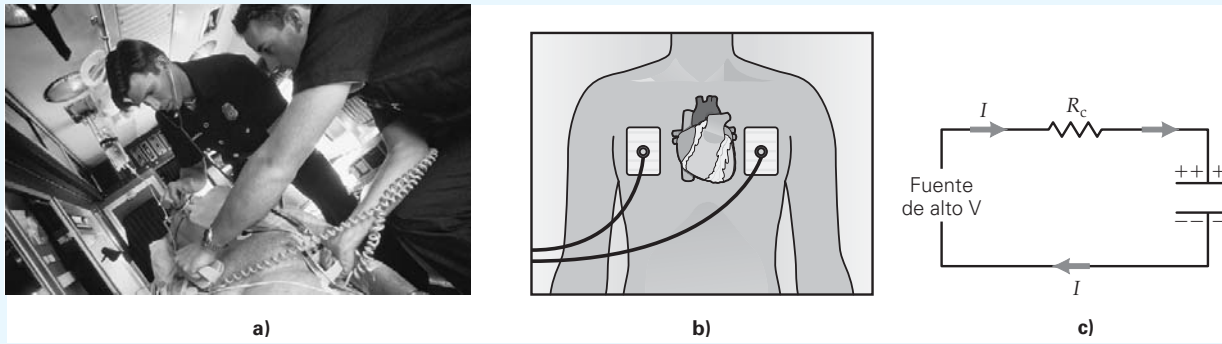


FIGURA 2 ¡Reactiven el corazón! ***a)*** Los electrodos se colocan externamente a ambos lados del corazón, y la energía de un condensador cargado pasa a través de él para ayudarlo a restablecer su patrón normal de latidos. ***b)*** Esta figura muestra un diagrama del uso corrector del desfibrilador. La descarga es la de un circuito RC. ***c)*** Recarga del condensador del desfibrilador para dejarlo listo otra vez, mediante un resistor (de carga) $R_C \approx 10^5\ \Omega$.

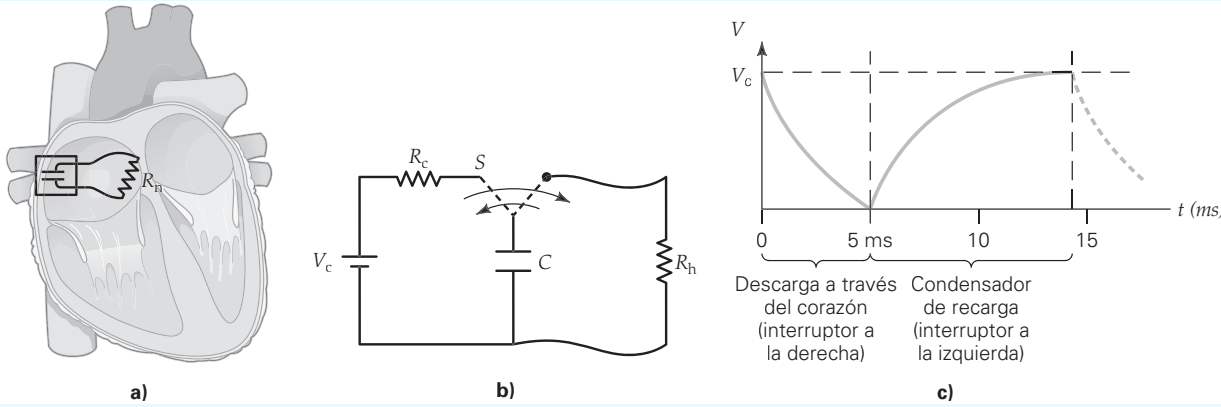
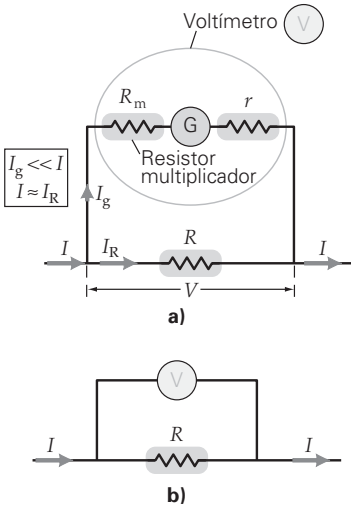


FIGURA 3 Marcapasos cardiaco ***a)*** Un marcapasos común (mostrado como un condensador en una caja) se implanta quirúrgicamente sobre o cerca de la superficie del corazón, con sus cables conectados al músculo cardiaco (resistencia R_n). (El circuito de carga del condensador no se muestra.) Otros cables (no ilustrados) reciben señales del corazón para determinar si el marcapasos necesita "encenderse". ***b)*** El circuito sensor determina la posición del "interruptor" del condensador. Si el corazón no late, el circuito sensor da vuelta al interruptor hacia la derecha, iniciando la descarga de energía a través del músculo cardiaco. Si el corazón late adecuadamente, el circuito sensor deja el interruptor a la izquierda, manteniendo el condensador cargado por completo. ***c)*** Si el marcapasos está en operación, un ciclo completo toma 15 ms. Se necesitan unos 5 ms para la descarga a través del músculo cardiaco y otros 10 ms para recargar el condensador. La recarga se completa gracias a una batería de larga vida, V_c.



▲ **FIGURA 18.17** Un voltímetro cd
Aquí, R es la resistencia del resistor cuyo voltaje se está midiendo. ***a)*** Un galvanómetro en serie con un resistor multiplicador (R_m) es un voltímetro capaz de medir varios rangos de voltaje, dependiendo del valor de R_m. ***b)*** El símbolo de circuito para un voltímetro es un círculo con una V dentro. (Véase el ejemplo 18.8 para una explicación detallada del diseño de un voltímetro.)

Voltímetros

Un voltímetro que es capaz de leer voltajes superiores al rango de microvolts (cualquier voltaje mayor quemaría el galvanómetro si éste estuviera solo) se construye conectando un gran *resistor multiplicador en serie* con un galvanómetro (◂figura 18.17). Como el voltímetro tiene una gran resistencia, a causa del resistor multiplicador, extrae poca corriente del elemento de circuito cuyo voltaje mide. Sin embargo, la corriente que existe en el voltímetro es proporcional al voltaje a través del elemento del circuito. Así, el voltímetro se calibra en volts. Para comprender mejor esta configuración, considere el ejemplo 18.8.

Ejemplo 18.8 ■ Diseño de un voltímetro: uso de la reglas de Kirchhoff para escoger un resistor multiplicador

Suponga que el galvanómetro del ejemplo 18.7 se usará en un voltímetro con una lectura completa de 3.0 V. ¿Cuál es la resistencia requerida del multiplicador?

Razonamiento. Para convertir un galvanómetro en un voltímetro, necesitamos una reducción de la corriente, lo que se logra añadiendo un "resistor multiplicador" grande en serie. Todos los datos necesarios para calcular la resistencia del multiplicador se dan aquí y en el ejemplo 18.7.

Solución. Primero, se lista los datos:

Dado: $Ig = 200\ \mu\text{A}$
$= 2.00 \times 10^{-4}$ A (a partir del ejemplo 18.7)
$r = 50\ \Omega$ (del ejemplo 18.7)
$V_{\text{máx}} = 3.0$ V

Encuentre: R_m (resistencia del multiplicador)

Las resistencias del galvanómetro y del multiplicador están en serie. Esta combinación está en paralelo con el elemento de circuito externo (R). Por lo tanto, el voltaje a través del elemento de circuito externo es la suma de los voltajes a través del galvanómetro y multiplicador (figura 18.17):

$$V = V_g + V_m$$

Los voltajes a través del galvanómetro y los resistores multiplicadores son

$$V_g = I_g r \qquad \text{y} \qquad V_m = I_g R_m$$

Combinando esas tres ecuaciones, tenemos

$$V = V_g + V_m = I_g r + I_g R_m = I_g(r + R_m)$$

Despejando la resistencia del multiplicador, tenemos

$$R_m = \frac{V - I_g r}{I_g}$$
$$= \frac{3.0\ \text{V} - (2.00 \times 10^{-4}\ \text{A})(50\ \Omega)}{2.00 \times 10^{-4}\ \text{A}}$$
$$= 1.5 \times 10^4\ \Omega = 15\ \text{k}\Omega$$

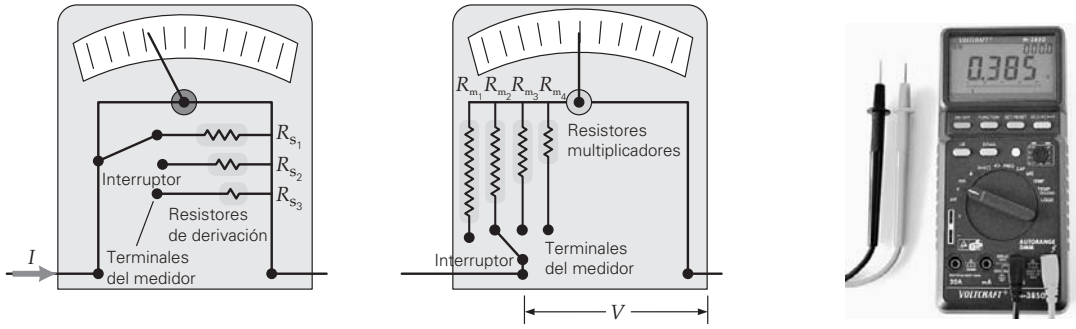
Observe que el segundo término en el numerador ($I_g r$) es insignificante comparado con la lectura plena de 3.0 V. Así, con una buena aproximación, $R_m \approx V/I_g$ o $V \propto I_g$. El voltaje medido es proporcional a la corriente en el galvanómetro.

Ejercicio de refuerzo. El voltímetro en este ejemplo se usa para medir el voltaje de un resistor en un circuito. Una corriente de 3.00 A fluye a través del resistor (1.00 Ω) *antes* de conectar el voltímetro. Suponiendo que la corriente total *que llega* (I en la figura 18.17b) permanece igual después de que se conecta el voltímetro, calcule la corriente en el galvanómetro.

Nota: los voltímetros se conectan en paralelo o a través del elemento cuyo voltaje están midiendo (figura 18.17b).

PHYSLET®
Exploración 30.5 Voltímetros

Por versatilidad, los amperímetros y voltímetros se fabrican con diferentes escalas. Esta tarea se logra dando al usuario varias opciones de resistores en derivación o resistores multiplicadores (▸figura 18.18a y b). También se fabrican combinaciones de estos medidores y se conocen como *multímetros*, que miden voltaje, corriente y, a menudo, resistencia. Los multímetros digitales electrónicos son comunes (figura 18.18c). En lugar de galvanómetros mecánicos, esos dispositivos usan circuitos electrónicos que analizan señales digitales para calcular voltajes, corrientes y resistencias, que se despliegan en la pantalla.



a) Amperímetro con escalas múltiple **b) Voltímetro con escalas múltiple** **c)**

▲ **FIGURA 18.18 Medidores de varias escalas** ***a)*** Un amperímetro o ***b)*** un voltímetro se utilizan para medir diversos rangos de corriente y de voltaje, si se conectan entre diferentes resistores de derivación o multiplicadores, respectivamente. (En lugar de un interruptor, hay una terminal exterior para cada rango.) ***c)*** Ambas funciones se combinan en un solo multimedidor, que se muestra aquí a la izquierda midiendo el voltaje a través de una bombilla de luz. (¿Cómo se sabe que no está midiendo la corriente?)

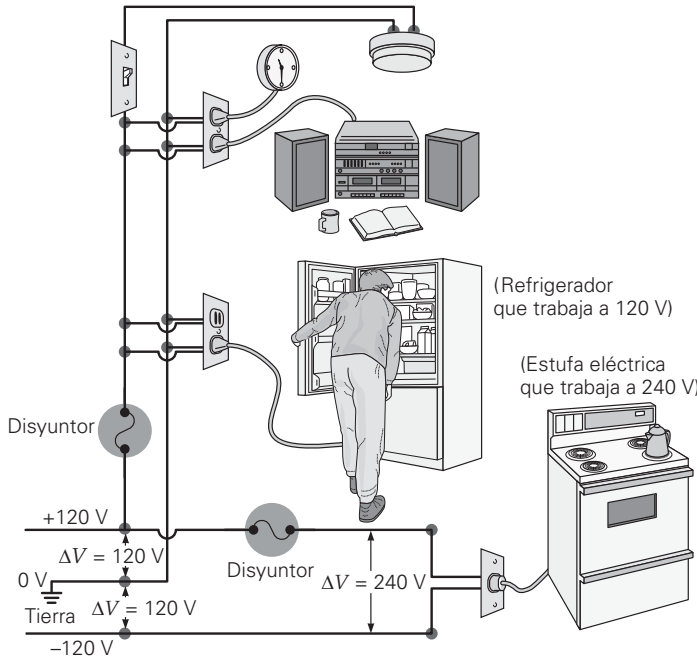
18.5 Circuitos domésticos y seguridad eléctrica

OBJETIVOS: *a*) Comprender cómo los circuitos domésticos están cableados y *b*) conocer los principios que rigen sobre los dispositivos eléctricos de seguridad.

Aunque los circuitos domésticos usan generalmente corriente alterna, que aún no hemos estudiado, usted comprenderá su operación (y muchas de sus aplicaciones prácticas) gracias a los principios de los circuitos que ya hemos visto.

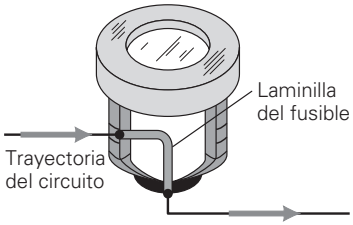
Por ejemplo, ¿esperaría usted que los elementos (lámparas, aparatos, etc.) de un circuito doméstico estén conectados en serie o en paralelo? A partir del análisis de las bombillas de un árbol de Navidad (sección 18.1), debería ser aparente que los elementos domésticos deben conectarse en paralelo. Por ejemplo, cuando la bombilla de una lámpara se funde, otros elementos del circuito continúan trabajando. Además, los dispositivos domésticos y lámparas generalmente están clasificados para funcionar a 120 V. Si esos elementos estuvieran conectados en serie, ninguno de los elementos individuales del circuito tendría un voltaje de 120 V.

La energía eléctrica se suministra a una casa por medio de un sistema de tres cables (▼figura 18.19). Existe una diferencia de potencial de 240 V entre los dos cables "calientes"



◀ **FIGURA 18.19 Cableado doméstico** Un circuito de 120 V se obtiene conectando cualquiera de las líneas "calientes" y la línea de tierra. Un voltaje de 240 V (para grandes aparatos como estufas eléctricas) se obtiene conectando las dos líneas "calientes" de polaridad contraria. (*Nota:* para obtener mayor claridad, la línea de tierra [la tercera línea que tiene las puntas redondeadas], no se muestra.)

Nota: el voltaje doméstico fluctúa, en condiciones normales, entre 110 y 120 V. De manera similar, las conexiones a 240 V pueden estar tan bajas como 220 V y aun así se les considera normales.



a)

b)

▲ **FIGURA 18.20** Fusibles ***a)*** Un fusible contiene una tira o una cinta metálica que se funde cuando la corriente excede cierto valor establecido. Esto abre el circuito y evita el sobrecalentamiento. ***b)*** Los fusibles base de Edison (a la izquierda) tienen una rosca similar a la de las bombillas de luz. Las roscas son idénticas en este tipo de fusibles; así, es posible intercambiar fusibles con diferente clasificación de amperaje. Los fusibles tipo S (a la derecha) tienen roscas distintas para clasificaciones diferentes, por lo que no es posible intercambiarlos.

o de alto potencial. Cada uno de esos cables "calientes" tiene una diferencia de potencial de 120 V con respecto a la tierra. El tercer cable se lleva a tierra en el punto donde los cables entran a la casa, generalmente por medio de una barra metálica empotrada en el suelo. Este cable se define como el potencial cero y se le llama *cable a tierra* o *neutro*.

La diferencia en potencial de 120 V necesaria para la mayor parte de los aparatos domésticos se obtiene conectándolos entre el cable a tierra y cualquiera de los cables de alto potencial. El resultado es el mismo en cualquiera de los casos, porque $\Delta V = 120\text{ V} - 0\text{ V} = 120\text{ V}$ o $\Delta V = 0\text{ V} - (-120\text{ V}) = 120\text{ V}$. (Véase la figura 18.19.)

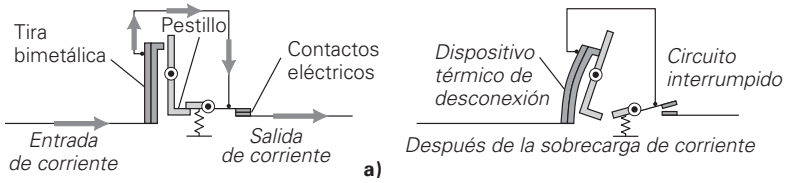
Aun cuando el cable a tierra tiene cero potencial, es portador de corriente por ser parte del circuito completo. Grandes dispositivos como acondicionadores centrales de aire, hornos y calentadores de agua necesitan operar a 240 V. Este voltaje se obtiene conectándolos entre los dos cables calientes: $\Delta V = 120\text{ V} - (-120\text{ V}) = 240\text{ V}$. Aunque la corriente a través de un dispositivo (en condiciones de operación por debajo de 120 V) se indica en una etiqueta de clasificación, también puede determinarse a partir de la clasificación de potencia (usando $I = P/V$). Por ejemplo, un estéreo clasificado a 180 W extraería una corriente promedio de 1.5 A (porque $I = P/V = 180\text{ W}/120\text{ V} = 1.50\text{ A}$).

Hay limitaciones sobre el número de aparatos que pueden ponerse en un circuito y sobre la corriente *total* en ese circuito. Específicamente, el calor de joule (o pérdida I^2R) en los cables debe tomarse en consideración. Cuanto más elementos en paralelo, menor es la resistencia equivalente del circuito. Añadir aparatos (encendidos) incrementa la corriente total. Recuerde que los cables tienen alguna resistencia y quedarán sometidos a un considerable calor de joule si la corriente es suficientemente grande. Por lo tanto, al agregar demasiados aparatos, se corre el riesgo de sobrecargar un circuito doméstico y producir demasiado calor *en los cables*. Este calor podría fundir el aislante e iniciar un incendio.

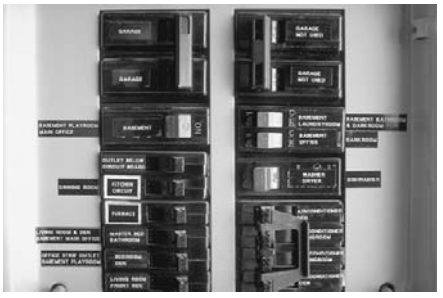
La sobrecarga se previene limitando la corriente en un circuito por medio de dos tipos de dispositivos: fusibles y disyuntores (o *breakers*). Los **fusibles** (◂figura 18.20) son comunes en las casas antiguas. Un fusible de base Edison tiene cuerdas o roscas como las que existen en la base de una bombilla de luz. (Véase la figura 18.20b.) Dentro del fusible existe una franja metálica que se funde cuando la corriente es mayor que el valor de clasificación (por lo regular de 15 A para un circuito de 120 V). El fundido de la franja rompe (o abre) el circuito, y la corriente cae a cero.

Los **disyuntores** se utilizan exclusivamente en el cableado de casas modernas. Un tipo (▾figura 18.21) usa una franja bimetálica (véase el capítulo 10). Cuando aumenta la corriente en la franja, ésta se calienta y se dobla. Al llegar al valor de clasificación de la corriente, la franja se doblará lo suficiente para abrir el circuito. La franja se enfría entonces rápidamente, y el disyuntor puede reinstalarse. Sin embargo, un fusible quemado o un disyuntor desconectado indica que ¡el circuito está intentando extraer demasiada corriente! *Encuentre y corrija el problema antes de reemplazar el fusible o de reinstalar el disyuntor.* Además, en ninguna circunstancia, debe reemplazarse (ni siquiera temporalmente) un fusible fundido por otro de una clasificación más alta de corriente (¿por qué?). Si no se dispone de un fusible de la correcta clasificación, por seguridad, es mejor dejar el circuito abierto (a menos que controle elementos necesarios en caso de emergencia o que sean cruciales para la vida) hasta que se encuentre el fusible correcto.

Los interruptores, fusibles y disyuntores se colocan en el lado "caliente" (de alto potencial) del circuito. Por supuesto, también pueden trabajar si se les coloca en el lado conectado a tierra. Para ver por qué no es conveniente esto último, considere lo siguiente. Si se les colocara ahí, aun cuando el interruptor estuviera abierto, el fusible fundido o el disyuntor disparado, los aparatos seguirían conectados a un potencial elevado, lo cual resultaría potencialmente peligroso si una persona hace contacto eléctrico (▸figura 18.22a).

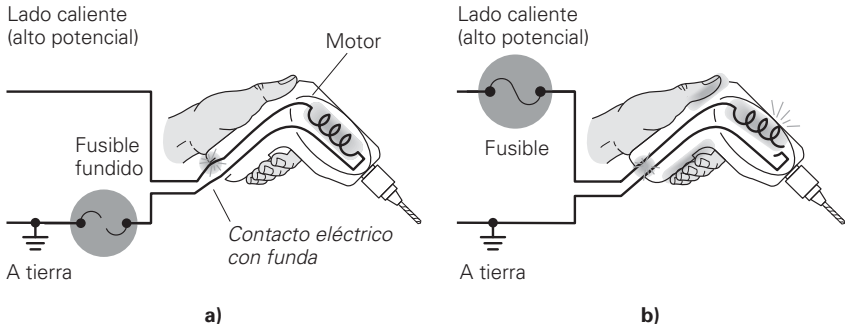


a)

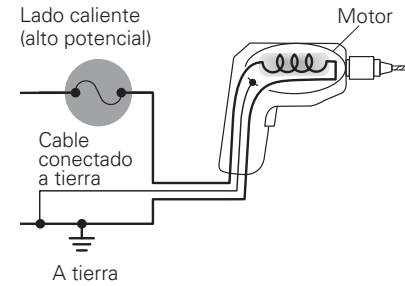


b)

▲ **FIGURA 18.21** Disyuntores de circuito ***a)*** Diagrama de un dispositivo térmico de desconexión. Al aumentar la corriente y el calor de joule, el elemento se dobla hasta que se abre el circuito para algún valor prefijado de la corriente. También existen dispositivos de desconexión que utilizan principios magnéticos. ***b)*** Un conjunto de disyuntores domésticos comunes.



▲ **FIGURA 18.22 Seguridad eléctrica** ***a)*** Los interruptores y fusibles o disyuntores siempre deben estar conectados en el lado de alto potencial de la línea, no en el lado a tierra como se muestra en la figura. Si esos elementos se colocaran en el lado a tierra, la línea (y la cubierta metálica de un aparato) quedaría a un alto potencial aun cuando el fusible se queme o se abra un interruptor. ***b)*** Aunque el fusible o el disyuntor esté en el lado "caliente", existe una situación potencialmente peligrosa. Si un cable interno entra en contacto con la cubierta metálica de un aparato o herramienta de potencia, ésta tendrá un alto voltaje y, si una persona la toca, recibirá un choque eléctrico.



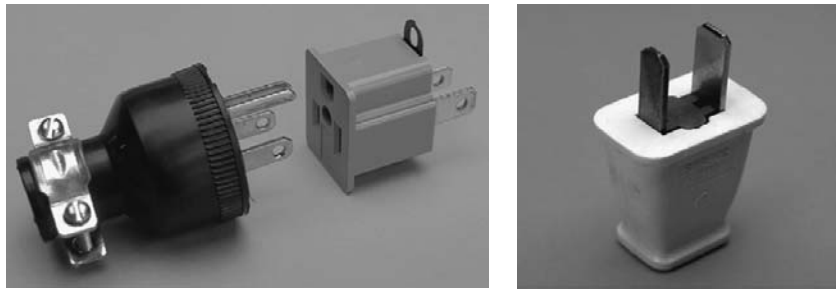
▲ **FIGURA 18.23 Dirigido a tierra** Por seguridad, un tercer cable se conecta de un aparato o de una herramienta de potencia al suelo. Este cable destinado a tierra por lo común no lleva corriente (en oposición al cable del circuito conectado a tierra). Si un cable caliente entra en contacto con la cubierta metálica, la corriente seguirá el cable conectado a tierra (trayectoria de menor resistencia) en lugar de atravesar el cuerpo de la persona que sostiene el aparato. El enchufe que se utiliza para esto se observa en la figura 18.24.

Aun con fusibles o disyuntores conectados correctamente en el lado de alto potencial de la línea, existe la posibilidad de provocar un choque eléctrico de un aparato defectuoso que tenga una cubierta metálica, como un taladro de mano. Por ejemplo, si un cable interior se afloja y hace contacto con la cubierta, ésta alcanzaría un potencial elevado (figura 18.22b). El cuerpo de una persona puede formar una trayectoria a tierra y convertirse en parte del circuito sufriendo un choque. Para conocer más acerca de los efectos de los choques eléctricos, véase la sección A fondo 18.2, que trata el tema electricidad y seguridad personal en la p. 614.

Para prevenir un choque, se agrega al circuito un tercer cable que lleva a tierra la cubierta metálica de los aparatos o herramientas de potencia (▸figura 18.23). Este cable ofrece una trayectoria de muy baja resistencia, pasando de lado a la herramienta. Este alambre normalmente no lleva corriente. Si un alambre caliente entra en contacto con la cubierta, el circuito se completa gracias a este cable a tierra. Entonces, el fusible se funde o el disyuntor se dispara, ya que la mayor parte de la corriente estaría en el tercer cable a tierra y no en usted. En tal caso, lo más probable es que usted no resulte dañado. Sin embargo, recuerde que si se reinstala el disyuntor, continuará disparándose a menos que se encuentre el origen del problema y se repare.

En las **clavijas de tres dientes**, el diente redondo grande se conecta con el cable de tierra. Se pueden utilizar adaptadores entre una clavija de tres dientes y una toma de corriente con entrada para dos dientes. Tales adaptadores tienen una agarradera o un cable que hace tierra (▾figura 18.24a) y que debe asegurarse a una caja receptáculo con un tornillo de seguridad. La caja receptáculo está conectada al cable que hace tierra. Si la agarradera o el cable del adaptador no están conectados, el sistema queda desprotegido, lo cual frustra el propósito del dispositivo de seguridad dedicado a hacer tierra.

Tal vez usted ha notado que existe otro tipo de clavija, una de dos dientes que se ajusta en el enchufe sólo en una dirección pues uno de los dientes es más ancho que el otro y una de las ranuras del receptáculo también es mayor (figura 18.24b). Este tipo de



◀ **FIGURA 18.24 Enchufe a tierra** ***a)*** Para alojar el cable a tierra (figura 18.23), se utiliza una clavija de tres dientes. El adaptador que aquí se observa permite conectar la clavija de tres dientes en un tomacorriente con entrada para dos dientes. La agarradera en el adaptador se debe conectar al tornillo asegurador de la placa en el receptáculo conectado a tierra; de otra forma, se perdería la seguridad del dispositivo. ***b)*** Una clavija polarizada. Los dientes de diferente tamaño permiten la identificación de los lados alto y de tierra de la línea. Véase el texto para conocer más detalles.

clavija se llama **clavija polarizada**. La *polarización* en el sentido eléctrico es un método de identificar los lados calientes y a tierra de la línea de forma que se puedan hacer conexiones particulares.

Esas clavijas polarizadas y las tomas de corriente son ahora una medida de seguridad común. Los receptáculos de pared están cableados de forma que la ranura pequeña se conecta con el lado caliente, y la ranura grande con el lado neutral o tierra. Si se identifica el lado caliente en esta forma, son posibles dos salvaguardias. Primero, el fabricante de un aparato eléctrico podrá diseñarlo de manera que el interruptor siempre esté del lado caliente de la línea. Así, todo el cableado del aparato, más allá del interruptor, será neutro cuando el interruptor esté abierto y el aparato quede desconectado. Es más, el fabricante conecta la cubierta del aparato al lado de tierra por medio de una clavija polarizada. Si algún cable caliente dentro del aparato se afloja y hace contacto con la cubierta metálica, el efecto será similar al que ocurre en el sistema conectado a tierra. El lado caliente de la línea será acortado hacia la tierra, lo cual fundirá un fusible o disparará un disyuntor.

Otro dispositivo eléctrico de seguridad, el interruptor de tierra falsa, se verá en el capítulo 20.

A FONDO 18.2 ELECTRICIDAD Y SEGURIDAD PERSONAL

Las medidas de seguridad son necesarias para evitar lesiones cuando se trabaja con electricidad. Los conductores de electricidad (como los cables) están recubiertos con materiales aislantes para poderlos manejar sin peligro. Sin embargo, cuando una persona entra en contacto con un conductor cargado, podría existir una diferencia de potencial a través de parte de su cuerpo. Un pájaro se puede posar sobre una línea de alto voltaje sin ningún problema porque sus dos patas están al mismo potencial; por lo tanto, *no hay diferencia de potencial* que genere una corriente en el pájaro. Pero si una persona que lleva una escalera de aluminio (conductor) toca con ella una línea eléctrica, existirá una diferencia de potencial entre la línea y el suelo, y la escalera y la persona se convierten entonces en parte de un circuito portador de corriente.

El grado de lesión que sufre la persona en este caso depende de la cantidad de corriente eléctrica que fluye a través de su cuerpo y de la trayectoria del circuito. Sabemos que la corriente en el cuerpo está dada por $I = V/R_{\text{cuerpo}}$. Es evidente que la corriente depende de la resistencia del cuerpo.

Sin embargo, la resistencia del cuerpo varía. Si la piel está seca, la resistencia puede ser de 0.50 MΩ ($0.50 \times 10^6\ \Omega$) o mayor. Para una voltaje de 120 V, se tendría una corriente de un cuarto de miliampere, porque

$$I = \frac{V}{R_{\text{cuerpo}}} = \frac{120\ \text{V}}{0.50 \times 10^6\ \Omega} = 0.24 \times 10^{-3}\ \text{A} = 0.24\ \text{mA}$$

Esta corriente es muy débil para sentirla (tabla 1). Pero si la piel está húmeda, entonces la R_{cuerpo} es de sólo 5.0 kΩ ($5.0 \times 10^3\ \Omega$), y la corriente será de 24 mA (demuestre esto), un valor potencialmente peligroso. (Véase de nuevo la tabla 1.)

Una precaución básica que se debe tomar es evitar entrar en contacto con un conductor eléctrico que pudiera causar una diferencia de potencial a través de cualquier parte del cuerpo. El efecto de ese contacto depende de la trayectoria de la corriente a través del cuerpo. Si esta trayectoria va del dedo meñique al pulgar de la misma mano, una corriente grande puede causar una quemadura. Sin embargo, si la trayectoria va de una a otra mano a través del pecho (y, por lo tanto, a través del corazón), el efecto será peor. En la tabla 1 se dan algunos de los efectos posibles de esta trayectoria de circuito.

Las lesiones son el resultado de que la corriente interfiere con las funciones musculares y de que provoca quemaduras. Las funciones musculares están reguladas por impulsos eléctricos que viajan por los nervios (véase el capítulo 16) y éstos reciben influencia de las corrientes externas. Una corriente de unos cuantos miliamperios provocará una reacción muscular y dolor. A 10 mA, la parálisis muscular que sobreviene evitará que una persona se libere del conductor. Cerca de 20 mA se presenta una contracción de los músculos del pecho, que dificulta o impide la respiración. La muerte puede presentarse en pocos minutos. A 100 mA hay movimientos rápidos no coordinados de los músculos del corazón (*fibrilación ventricular*), que evitan un bombeo adecuado, condición que resulta fatal en unos cuantos segundos. Para trabajar con seguridad con la electricidad se requiere un conocimiento de los principios eléctricos fundamentales *y* sentido común. La electricidad debe ser tratada con respeto.

Ejercicios relacionados: 94 y 95

TABLA 1 Efectos de la corriente eléctrica sobre el cuerpo humano*

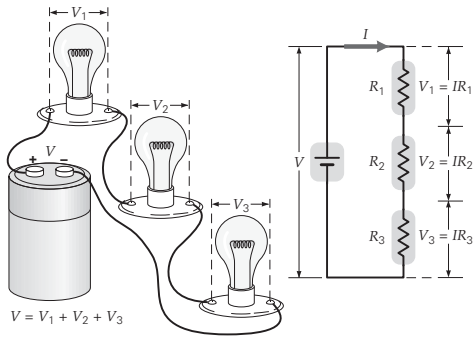
Corriente (aproximada)	*Efecto*
2.0 mA (0.002 A)	Choque suave o calentamiento
10 mA (0.01 A)	Parálisis de músculos motores
20 mA (0.02 A)	Parálisis de músculos del pecho, causando paro respiratorio; fatal en unos cuantos minutos
100 mA (0.1 A)	Fibrilación ventricular, que impide la coordinación de los latidos del corazón; fatal en unos pocos segundos
1000 mA (1 A)	Quemaduras serias; fatal casi instantáneamente

*El efecto sobre el cuerpo humano de una cantidad dada de corriente depende de varias condiciones. Esta tabla da sólo descripciones generales y relativas, que suponen una trayectoria circular que incluye el pecho superior.

Repaso del capítulo

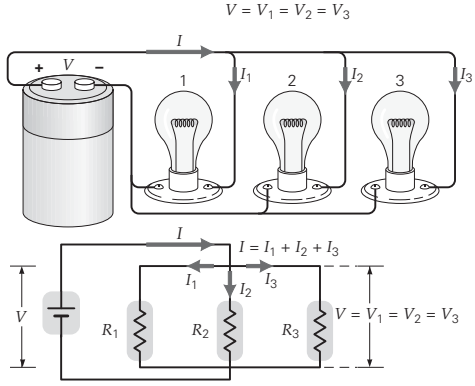
- Cuando los resistores están conectados en **serie**, la corriente a través de cada uno es la misma. La **resistencia equivalente** de los resistores en serie es

$$R_s = R_1 + R_2 + R_3 + \cdots = \Sigma R_i \qquad (18.2)$$



- Cuando los resistores están conectados en **paralelo**, el voltaje a través de cada uno es el mismo. La **resistencia equivalente** es

$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \cdots = \Sigma \frac{1}{R_i} \qquad (18.3)$$

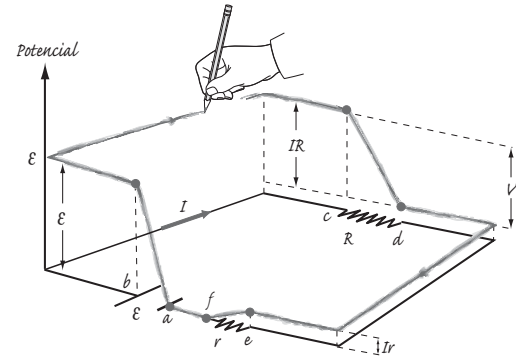


- El **teorema de la unión de Kirchhoff** establece que la corriente total que entra en cualquier **unión** es igual a la corriente total que sale de esa unión (conservación de la carga eléctrica).

$$\Sigma I_i = 0 \quad \textit{suma de corrientes en una unión} \qquad (18.4)$$

- El **teorema de las mallas de Kirchhoff** establece que al recorrer una malla de un circuito completo, la suma algebraica de las ganancias y pérdidas de voltaje es cero, o que la suma de las ganancias de voltaje es igual a la suma de las pérdidas de voltaje (conservación de la energía en un circuito eléctrico). En términos de voltajes, esto se escribe como

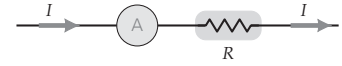
$$\Sigma V_i = 0 \quad \textit{suma de voltajes alrededor de una malla cerrada} \qquad (18.5)$$



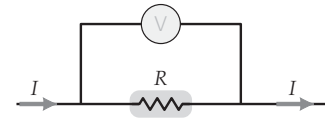
- La **constante de tiempo (τ)** para un circuito RC es un tiempo característico por medio del cual medimos la tasa de carga y descarga de un condensador. τ está dada por

$$\tau = RC \qquad (18.8)$$

- Un **amperímetro** es un dispositivo que sirve para medir corriente; consiste en un galvanómetro y un resistor derivador en paralelo. Los amperímetros se conectan en serie, con el elemento del circuito llevando la corriente que se va a medir, y tienen muy poca resistencia.



- Un **voltímetro** es un dispositivo para medir voltaje; consiste en un galvanómetro y en un resistor multiplicador conectados en serie. Los voltímetros se conectan en paralelo, con el elemento del circuito experimentando el voltaje que se va a medir, y tienen gran resistencia.



Ejercicios

Los ejercicios designados **OM** *son preguntas de opción múltiple; los* **PC** *son preguntas conceptuales; y los* **EI** *son ejercicios integrados. A lo largo del texto, muchas secciones de ejercicios incluirán ejercicios "apareados". Estos pares de ejercicios, que se identifican con números subrayados, pretenden ayudar al lector a resolver problemas y aprender. El primer ejercicio de cada pareja (el de número par) se resuelve en la Guía de estudio, que puede consultarse si se necesita ayuda para resolverlo. El segundo ejercicio (de número impar) es similar, y su respuesta se da al final del libro.*

18.1 Combinaciones de resistencias en serie, en paralelo y en serie-paralelo

1. **OM** ¿Cuál de las siguientes cantidades siempre es la misma para resistores en serie? *a*) voltaje; *b*) corriente; *c*) potencia; *d*) energía.

2. **OM** ¿Cuál de las siguientes cantidades siempre es la misma para resistores en paralelo? *a*) voltaje; *b*) corriente; *c*) potencia; *d*) energía.

3. **OM** Dos resistores (A y B) están conectados en serie a una batería de 12 V. El resistor A es de 9 V. ¿Cuál resistor tiene la menor resistencia? *a*) A, *b*) B, *c*) ambos tienen la misma resistencia, *d*) no es posible determinarlo a partir de los datos.

4. **OM** Dos resistores (A y B) están conectados en paralelo a una batería de 12 V. El resistor A tiene 2.0 A y la corriente total en la batería es de 3.0 A. ¿Cuál resistor tiene la mayor resistencia? *a*) A, *b*) B, *c*) ambos tienen la misma resistencia, *d*) no es posible determinarlo a partir de los datos.

5. **OM** Dos resistores (uno con una resistencia de 2.0 Ω y el otro con una resistencia de 6.0 Ω) están conectados en paralelo a una batería. ¿Cuál de los dos produce el mayor calor de joule? *a*) el de 2.0 Ω, *b*) el de 6.0 Ω, *c*) ambos producen el mismo calor de joule, *d*) no es posible determinarlo a partir de los datos.

6. **OM** Dos bombillas de luz (la bombilla A es de 100 W *a 120 V*, y la B es de 60 W *a 120 V*) están conectadas en serie a un tomacorriente a 120 V. ¿Cuál de ellas produce la mayor luz? *a*) A, *b*) B, *c*) ambas producen la misma, *d*) no es posible determinarlo a partir de los datos.

7. **PC** ¿Las caídas de voltaje a través de resistores en serie generalmente son iguales? Si no es así, ¿en cuál o cuáles circunstancias podrían ser iguales?

8. **PC** ¿Las corrientes en resistores en paralelo generalmente son iguales? Si no es así, ¿en cuál o cuáles circunstancias podrían ser iguales?

9. **PC** Si un resistor grande y uno pequeño están conectados en serie, ¿la resistencia efectiva estará más cercana en valor a la resistencia grande o a la pequeña? ¿Y si están conectados en paralelo?

10. **PC** Los fabricantes de las bombillas de luz marcan en éstas la salida de potencia. Por ejemplo, se supone que una bombilla de 60 W se conectará a una fuente de 120 V. Suponga que usted tiene dos bombillas: una de 60 W va seguida por otra de 40 W en serie con una fuente de 120 V. ¿Cuál de ellas brilla más? ¿Por qué? ¿Qué sucede si usted invierte el orden de las bombillas? ¿Alguna de ellas está a su clasificación máxima de potencia? Explique su respuesta.

11. **PC** Tres resistores idénticos están conectados a una batería. Dos están conectados en paralelo, y esta combinación va seguida en serie por el tercer resistor. ¿Cuál resistor (o resistores) tiene *a*) la mayor corriente, *b*) el mayor voltaje y *c*) la mayor salida de potencia?

12. **PC** Tres resistores tienen valores de 5, 2 y 1 Ω. El primero va seguido en serie por los dos últimos, que están conectados en paralelo. Cuando este arreglo se conecta a una batería, ¿cuál resistor (o resistores) tiene *a*) la mayor corriente, *b*) el mayor voltaje y *c*) la mayor salida de potencia?

13. ● Se van a conectar tres resistores que tienen valores de 10, 20 y 30 Ω. *a*) ¿Cómo deben conectarse para obtener la resistencia equivalente máxima, y cuál es este valor máximo? *b*) ¿Cómo deben conectarse para obtener la resistencia equivalente mínima, y cuál es este valor mínimo?

14. ● Dos resistores (*R*) idénticos están conectados en serie y luego en paralelo a un resistor de 20 Ω. Si la resistencia equivalente total es de 10 Ω, ¿cuál es el valor de *R*?

15. ● Dos resistores (*R*) idénticos están conectados en paralelo y luego en serie a un resistor de 40 Ω. Si la resistencia equivalente total es de 55 Ω, ¿cuál es el valor de *R*?

16. **EI** ● *a*) ¿En cuántas formas diferentes pueden conectarse tres resistores de 4.0 Ω? 1) Tres, 2) cinco o 3) siete. *b*) Dibuje las diferentes formas que usted encontró en el inciso *a* y determine la resistencia equivalente de cada una.

17. ● Tres resistores con valores de 5.0, 10 y 15 Ω, respectivamente, están conectados en serie en un circuito con una batería de 9.0 V. *a*) ¿Cuál es la resistencia equivalente total? *b*) ¿Cuál es la corriente en cada resistor? *c*) ¿A qué tasa se entrega energía al resistor de 15 Ω?

18. ● Encuentre las resistencias equivalentes para todas las posibles combinaciones de dos o más de los tres resistores en el ejercicio 17.

19. ● Tres resistores con valores de 1.0, 2.0 y 4.0 Ω, respectivamente, están conectados en paralelo en un circuito con una batería de 6.0 V. ¿Cuáles son *a*) la resistencia equivalente total, *b*) el voltaje a través de cada resistor y *c*) la potencia entregada al resistor de 4.0 Ω?

20. **EI** ●● *a*) Si usted tiene un número infinito de resistores de 1.0 Ω, ¿cuál es el número mínimo de resistores requeridos para tener una resistencia equivalente de 1.5 Ω?

1) Dos, 2) tres o 3) cuatro *b*) Describa o muestre con un diagrama cómo deben conectarse los resistores.

21. **EI** ●● Un trozo de alambre con resistencia R se corta en dos segmentos iguales. Luego, los segmentos se trenzan entre sí para formar un conductor con la mitad de la longitud del tramo original. *a*) La resistencia del conductor acortado es 1) $R/4$, 2) $R/2$ o 3) R. *b*) Si la resistencia del alambre original es de 27 $\mu\Omega$ y el alambre se corta en tres segmentos iguales, ¿cuál es la resistencia del conductor acortado?

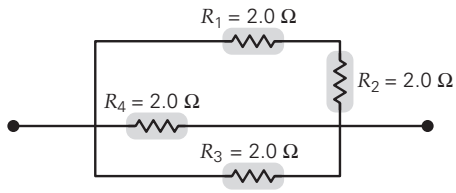
22. **EI** ●● Usted tiene cuatro resistores de 5.00 Ω. *a*) ¿Es posible conectar todos los resistores para producir una resistencia efectiva total de 3.75 Ω? *b*) Describa cómo los conectaría.

23. ●● Tres resistores con valores de 2.0, 4.0 y 6.0 Ω, respectivamente, están conectados en serie en un circuito con una batería de 12 V. *a*) ¿Cuánta corriente entrega la batería al circuito? *b*) ¿Cuál es la corriente en cada resistor? *c*) ¿Cuánta potencia se entrega a cada resistor? *d*) ¿Cómo se compara esta potencia con la potencia entregada a la resistencia equivalente total?

24. ●● Suponga que los resistores en el ejercicio 23 están conectados en paralelo. *a*) ¿Cuánta corriente entrega la batería al circuito? *b*) ¿Cuál es la corriente en cada resistor? *c*) ¿Cuánta potencia se entrega a cada resistor? *d*) ¿Cómo se compara esta potencia con la potencia entregada a la resistencia equivalente total?

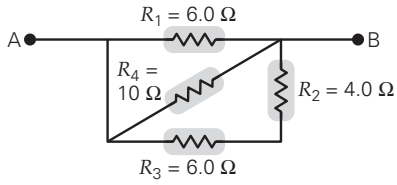
25. ●● Dos resistores de 8.0 Ω están conectados en paralelo, al igual que dos resistores de 4.0 Ω. Esas dos combinaciones se conectan entonces en serie en un circuito con una batería de 12 V. ¿Cuál es la corriente en cada resistor y el voltaje a través de cada uno?

26. ●● ¿Cuál es la resistencia equivalente de los resistores en la ▼figura 18.25?



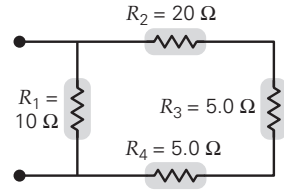
▲ **FIGURA 18.25 Combinación serie-paralelo** Véanse los ejercicios 26 y 34.

27. ●● ¿Cuál es la resistencia equivalente entre los puntos A y B en la ▼figura 18.26?



▲ **FIGURA 18.26 Combinación serie-paralelo** Véanse los ejercicios 27 y 36.

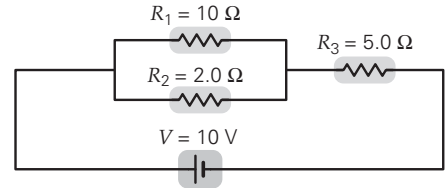
28. ●● ¿Cuál es la resistencia equivalente del arreglo de resistores mostrado en la ▼figura 18.27?



▲ **FIGURA 18.27 Combinación serie-paralelo** Véase el ejercicio 28.

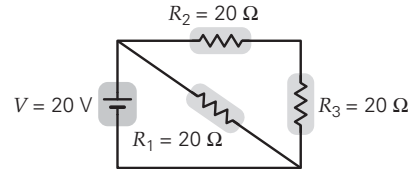
29. ●● Varias bombillas de luz de 60 W están conectadas en paralelo a una fuente de 120 V. La última bombilla funde un fusible de 15 A en el circuito. *a*) Dibuje un diagrama del circuito para mostrar el fusible en relación con las bombillas. *b*) ¿Cuántas bombillas hay en el circuito (incluyendo la última)?

30. ●● Encuentre la corriente y el voltaje del resistor de 10 Ω mostrado en la ▼figura 18.28.



▲ **FIGURA 18.28 Corriente y caída de voltaje en un resistor** Véanse los ejercicios 30 y 52.

31. ●● Para el circuito de la ▼figura 18.29, encuentre *a*) la corriente en cada resistor, *b*) el voltaje a través de cada resistor y *c*) la potencia total entregada.



▲ **FIGURA 18.29 Reducción del circuito** Véanse los ejercicios 31 y 53.

32. ●● Un circuito a 120 V tiene un disyuntor clasificado para desconectarse (crear un circuito abierto) a 15 A. ¿Cuántos resistores de 300 Ω pueden conectarse en paralelo sin desconectar el disyuntor?

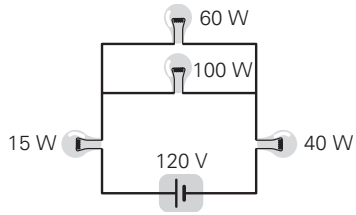
33. ●● En su dormitorio, usted tiene dos bombillas de 100 W, un televisor a colores de 150 W, un refrigerador de 300 W, un secador de pelo a 900 W y una computadora de 200 W (incluyendo el monitor). Si se tiene un disyuntor de 15 A en la línea de 120 V, ¿el disyuntor abrirá el circuito?

34. ●● Suponga que el arreglo de resistores en la figura 18.25 está conectado a una batería de 12 V. ¿Cuál será *a*) la corriente en cada resistor, *b*) la caída de voltaje a través de cada resistor y *c*) la potencia total entregada?

35. ●● Para preparar té caliente, usted usa un calentador de 500 W conectado a una línea de 120 V para calentar 0.20 kg de agua de 20 a 80°C. Suponiendo que no hay pérdida de calor aparte del que se entrega al agua, ¿cuánto dura este proceso?

36. ●●● Las terminales de una batería de 6.0 V están conectadas a los puntos A y B en la figura 18.26. *a*) ¿Cuánta corriente hay en cada resistor? *b*) ¿Cuánta potencia se entrega a cada uno? *c*) Compare la suma de las potencias individuales con la potencia entregada a la resistencia equivalente del circuito.

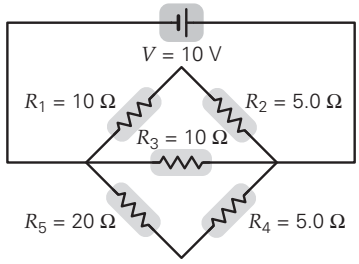
37. ●●● Bombillas con las potencias indicadas (en watts) en la ▼figura 18.30 están conectadas en un circuito como se muestra. *a*) ¿Qué corriente entrega la fuente de voltaje al circuito? *b*) Encuentre la potencia entregada a cada bombilla. (Considere que las resistencias de las bombillas son las mismas que cuando operan a su voltaje normal.)



▲ **FIGURA 18.30 ¿Qué sucede?** Véase el ejercicio 37.

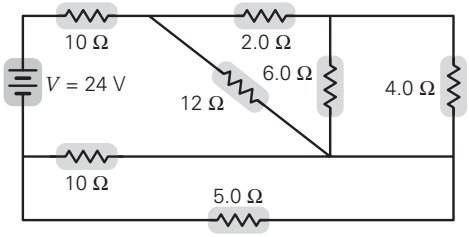
38. ●●● Dos resistores R_1 y R_2 están en serie con una batería de 7.0 V. Si R_1 tiene una resistencia de 2.0 Ω y R_2 recibe energía a razón de 6.0 Ω, ¿cuál es la corriente (o corrientes) del circuito? (Es probable que haya más de una respuesta.)

39. ●●● Para el circuito en la ▼figura 18.31, encuentre *a*) la corriente en cada resistor y *b*) el voltaje a través de cada uno.



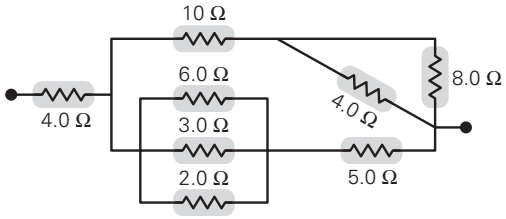
▲ **FIGURA 18.31 Resistores y corriente** Véase el ejercicio 39.

40. ●●● ¿Cuál es la potencia total entregada al circuito que se ilustra en la ▼figura 18.32?



▲ **FIGURA 18.32 Disipación de potencia** Véase el ejercicio 40.

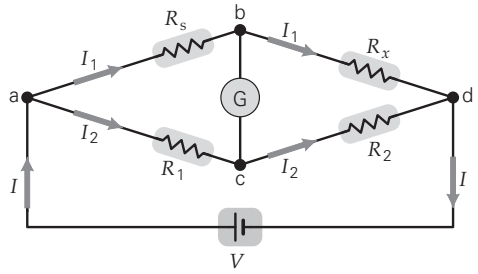
41. ●●● ¿Cuál es la resistencia equivalente del arreglo mostrado en la ▼figura 18.33?



▲ **FIGURA 18.33 Resistencia equivalente** Véase el ejercicio 41.

42. ●●● El circuito de la ▼figura 18.34, llamado *puente de Wheatstone*, en honor de Sir Charles Wheatstone (1802-1875), sirve para medir resistencia sin las correcciones a veces necesarias cuando se emplean mediciones de amperímetros y voltímetros. (Véase, por ejemplo, los ejercicios 88 y 89.) Las resistencias R_1, R_2 y R_s son conocidas, y R_x es la resistencia desconocida. R_s es variable y se ajusta hasta que el circuito puente está equilibrado, esto es, cuando el galvanómetro (G) arroja una lectura de cero (ninguna corriente). Demuestre que cuando el puente está equilibrado, R_x, está dada por la siguiente relación:

$$R_x = \left(\frac{R_2}{R_1}\right)R_s.$$



▲ **FIGURA 18.34 Puente de Wheatstone** Véase el ejercicio 42.

18.2 Circuitos con múltiples mallas y reglas de Kirchhoff

43. **OM** Se tiene un circuito de múltiples mallas con una batería. Después de abandonar la batería, la corriente encuentra una unión entre dos alambres. Uno conduce 1.5 A y el otro 1.0 A. ¿Cuál es la corriente en la batería? *a*) 2.5 A, *b*) 1.5 A, *c*) 1.0 A, *d*) 5.0 A, *e*) no es posible determinarlo a partir de los datos?

44. **OM** Con nuestra convención de signos, si un resistor se recorre en la dirección de la corriente, ¿qué puede decirse acerca del signo del cambio en el potencial eléctrico (el voltaje)? *a*) Es negativo, *b*) es positivo, *c*) es cero o *d*) no es posible determinarlo a partir de los datos.

45. **OM** Con nuestra convención de signos, si una batería se recorre en la dirección real de la corriente que hay en ella, ¿qué puede decirse acerca del signo del cambio en el potencial eléctrico (el voltaje terminal de la batería)? *a*) Es negativo, *b*) es positivo, *c*) es cero o *d*) no es posible determinarlo a partir de los datos.

46. **OM** Usted tiene un circuito de malla múltiple con una batería que tiene un voltaje terminal de 12 V. Después de

abandonar la terminal positiva de la batería, un alambre corto lo lleva a una unión donde la corriente se divide en tres alambres. Desde ese punto hasta que usted regresa a la terminal negativa de la batería, ¿qué puede decir acerca de la suma de voltajes en cada alambre? *a*) Da un total de +12 V, *b*) da un total de −12 V, *c*) su magnitud es menor de 12 V o *d*) su magnitud es mayor de 12 V.

47. PC ¿La corriente en una batería (en un circuito completo) siempre debe viajar de su terminal negativa a la positiva? Explique su respuesta. Si no es así, dé un ejemplo.

48. PC Utilice el teorema de la unión de Kirchhoff para explicar por qué la resistencia equivalente total de un circuito se reduce al conectar un segundo resistor en paralelo con otro.

49. PC Utilice el teorema de la malla de Kirchhoff para explicar por qué una bombilla de 60 W produce más luz que una de 100 W cuando están conectadas en serie a una fuente de 120 V. [*Sugerencia:* recuerde que las clasificaciones de potencia son significativas sólo a 120 V.]

50. ● Recorra la malla 3 de la figura 18.10 en sentido contrario al que se indica y demuestre que la ecuación resultante es la misma que si hubiera seguido el sentido de las flechas.

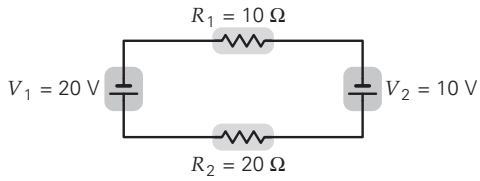
51. ● Para el circuito mostrado en la figura 18.10, invierta las direcciones de las mallas 1 y 2 y demuestre que se obtienen ecuaciones equivalentes a las del ejemplo 18.5.

52. ●● Use el teorema de las mallas de Kirchhoff para encontrar la corriente en cada resistor en la figura 18.28.

53. ●● Aplique las reglas de Kirchhoff al circuito en la figura 18.29 para encontrar la corriente en cada resistor.

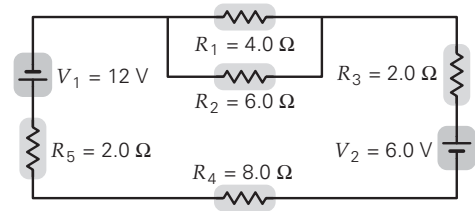
54. **EI** ●● Dos baterías, con voltajes terminales de 10 y 4 V, respectivamente, están conectadas con sus terminales positivas juntas. Un resistor de 12 Ω está alambrado entre sus terminales negativas. *a*) La corriente en el resistor es 1) 0 A, 2) entre 0 A y 1.0 A o 3) mayor que 1.0 A. ¿Por qué? *b*) Use el teorema de las mallas de Kirchhoff para encontrar la corriente en el circuito y la potencia entregada al resistor. *c*) Compare este resultado con la salida de potencia de cada batería.

55. ●● Usando las reglas de Kirchhoff, encuentre la corriente en cada resistor en la ▼figura 18.35.



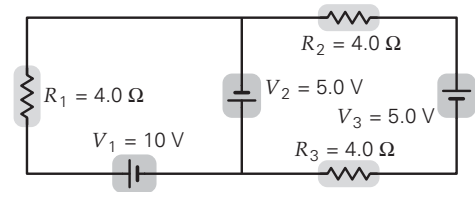
▲ **FIGURA 18.35 Circuito de malla simple** Véase el ejercicio 55.

56. ●● Aplique las reglas de Kirchhoff al circuito en la ▶figura 18.36 y encuentre *a*) la corriente en cada resistor y *b*) la tasa a la que la energía se entrega al resistor de 8.0 Ω.



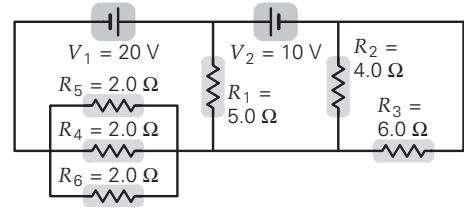
▲ **FIGURA 18.36 Malla dentro de una malla** Véase el ejercicio 56.

57. ●●● Encuentre la corriente en cada resistor en el circuito que se ilustra en la ▼figura 18.37.



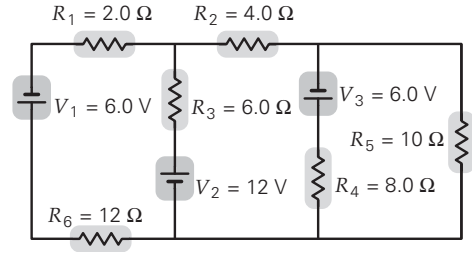
▲ **FIGURA 18.37 Circuito de doble malla** Véase el ejercicio 57.

58. ●●● Encuentre las corrientes en las ramas del circuito en la ▼figura 18.38.



▲ **FIGURA 18.38 ¿Cuántas mallas?** Véase el ejercicio 58.

59. ●●● Para el circuito de mallas múltiples de la ▼figura 18.39, ¿cuál es la corriente en cada rama?



▲ **FIGURA 18.39 Circuito de tres mallas** Véase el ejercicio 59.

18.3 Circuitos RC

60. OM Cuando un condensador se descarga a través de un resistor, el voltaje a través del condensador es máximo *a*) al principio del proceso, *b*) cerca de la mitad del proceso, *c*) al final del proceso o *d*) después de una constante de tiempo.

61. **OM** Cuando un condensador se descarga a través de un resistor, la corriente en el circuito es mínima *a*) al principio del proceso, *b*) cerca de la mitad del proceso, *c*) al final del proceso o *d*) después de una constante de tiempo.

62. **OM** Un condensador cargado se descarga a través de un resistor (que llamaremos #1). Si el valor del resistor entonces se duplica y se permite que el condensador idéntico se descargue de nuevo (al que llamaremos #2), ¿cómo se comparan las constantes de tiempo? *a*) $\tau_1 = 2\tau_2$, *b*) $\tau_1 = \tau_2$, *c*) $\tau_1 = \frac{1}{2}\tau_2$, *d*) $\tau_2 = 4\tau_1$.

63. **OM** Un condensador se descarga a través de un resistor (que llamaremos #1). El condensador entonces se recarga al doble de la carga inicial en el #1, y la descarga ocurre a través del mismo resistor (al que llamaremos #2). ¿Cómo se comparan las constantes de tiempo? *a*) $\tau_1 = 2\tau_2$, *b*) $\tau_1 = \tau_2$, *c*) $\tau_1 = \frac{1}{2}\tau_2$, *d*) no es posible determinarlo a partir de los datos.

64. **PC** Otra forma de describir el tiempo de descarga de un circuito RC es utilizar un intervalo de tiempo llamado *vida media*, que se define como el tiempo para que el condensador pierda la mitad de su carga inicial. ¿La constante de tiempo es mayor o menor que la vida media? Explique su razonamiento.

65. **PC** ¿El hecho de cargar un condensador en un circuito RC al 25% de su valor máximo tardará más o menos que una constante de tiempo? Explique su respuesta.

66. **PC** Explique por qué la corriente en un circuito RC en proceso de carga disminuye conforme el condensador se está cargando.

67. ● En la figura 18.11b, el interruptor se cierra en $t = 0$, y el condensador comienza a cargarse. ¿Cuál es el voltaje a través del resistor y a través del condensador, expresados como fracciones de V_o (con dos cifras significativas), *a*) justo después de que se cierra el interruptor, *b*) después de que han transcurrido dos constantes de tiempo y *c*) después de que han transcurrido muchas constantes de tiempo?

68. ● Un condensador en una malla simple de un circuito RC se carga al 63% de su voltaje final en 1.5 s. Encuentre *a*) la constante del tiempo para el circuito y *b*) el porcentaje del voltaje final del circuito después de 3.5 s.

69. **EI** ● En una lámpara con luz neón destellante, se desea tener una cierta constante de tiempo. *a*) Para incrementar esta constante de tiempo se debe 1) incrementar la capacitancia, 2) disminuir la capacitancia o 3) no usar un condensador. ¿Por qué? *b*) Si se desea una constante de tiempo de 2.0 s y usted tiene un condensador de 1.0 μF, ¿qué resistencia debería usar en el circuito?

70. ●● ¿Cuántas constantes de tiempo tardará un condensador inicialmente cargado en descargarse a la mitad de su voltaje inicial?

71. ●● Un condensador de 1.00 μF, inicialmente cargado a 12 V, está conectado en serie con un resistor. *a*) ¿Qué resistencia es necesaria para que el condensador tenga sólo el 37% de su carga inicial 1.50 s después de iniciar la descarga? *b*) ¿Cuál es el voltaje a través del condensador en $t = 3\tau$ si el condensador se *carga* con la misma batería a través del mismo resistor?

72. ●● Un circuito RC con $C = 40\ \mu$F y $R = 6.0\ \Omega$ tiene una fuente de 24 V. Con el condensador inicialmente descargado, se cierra un interruptor abierto en el circuito. *a*) ¿Cuál es el voltaje a través del resistor inmediatamente después? *b*) ¿Cuál es el voltaje a través del condensador en ese tiempo? *c*) ¿Cuál es la corriente en el resistor en ese tiempo?

73. ●● *a*) Para el circuito en el ejercicio 72, después que el interruptor ha estado cerrado $t = 4\tau$, ¿cuál es la carga sobre el condensador? *b*) Después que ha transcurrido un largo tiempo, ¿cuáles son los voltajes a través del condensador y del resistor?

74. ●●● Un circuito RC con un resistor de 5.0 MΩ y un condensador de 0.40 μF está conectado a una fuente de 12 V. Si el condensador está inicialmente descargado, ¿cuál es el cambio en voltaje a través de éste entre $t = 2\tau$ y $t = 4\tau$?

75. ●●● Un resistor de 3.0 MΩ está conectado en serie con un condensador de 0.28 μF. Este arreglo se conecta entonces a través de cuatro baterías de 1.5 V (también en serie). *a*) ¿Cuál es la máxima corriente en el circuito y cuándo ocurre esto? *b*) ¿Qué porcentaje de la máxima corriente está en el circuito después de 4.0 s? *c*) ¿Cuál es la máxima carga en el condensador y cuándo ocurre esto? *d*) ¿Qué porcentaje de la carga máxima está en el condensador después de 4.0 s?

18.4 Amperímetros y voltímetros

76. **OM** Para medir de manera precisa el voltaje a través de un resistor de 1 kΩ, el voltímetro debería tener una resistencia que es *a*) mucho mayor que 1 kΩ, *b*) mucho menor que 1 kΩ, *c*) aproximadamente igual que 1kΩ, *d*) cero.

77. **OM** Para medir de manera precisa la corriente en un resistor de 1 kΩ, el amperímetro debería tener una resistencia que es *a*) mucho mayor que 1 kΩ, *b*) mucho menor que 1 kΩ, *c*) aproximadamente igual que 1kΩ, *d*) tan grande como sea posible, de hecho, infinita si es posible.

78. **OM** Para medir correctamente el voltaje a través de un elemento de circuito, un voltímetro debe conectarse *a*) en serie con el elemento, *b*) en paralelo con el elemento, *c*) entre el lado de alto potencial del elemento y tierra, *d*) ninguna de las opciones anteriores es correcta.

79. **PC** *a*) ¿Qué pasaría si un amperímetro se conectara en paralelo con un elemento de circuito portador de corriente? *b*) ¿Qué pasaría si un voltímetro se conectara en serie con un elemento de circuito portador de corriente?

80. **PC** Explique claramente, utilizando las leyes de Kirchhoff, por qué la resistencia de un voltímetro ideal es infinita.

81. **PC** Si se diseña adecuadamente, ¿un buen amperímetro debe tener una resistencia muy pequeña? ¿Por qué? Explíquelo claramente empleando las leyes de Kirchhoff.

82. **EI** ● Un galvanómetro con una sensibilidad a escala plena de 2000 μA tiene una resistencia de bobina de 100 Ω. Va a utilizarse en un amperímetro con una lectura a plena escala de 30 A. *a*) ¿Debería usarse 1) un resistor en derivación, 2) un resistor cero o 3) un resistor multiplicador? ¿Por qué? *b*) ¿Cuál es la resistencia necesaria?

83. **EI** ● El galvanómetro en el ejercicio 82 va a utilizarse en un voltímetro con una lectura a escala plena de 15 V. *a*) ¿Debería usarse 1) un resistor en derivación, 2) un resistor cero o 3) un resistor multiplicador? ¿Por qué? *b*) ¿Cuál es la resistencia requerida?

84. ● Un galvanómetro con una sensibilidad a escala plena de 600 μA y una resistencia en su bobina de 50 Ω va a usarse

para construir un amperímetro que debe leer 5.0 A escala plena. ¿Cuál es la resistencia en derivación requerida?

85. ●● Un galvanómetro tiene una resistencia de 20 Ω en su bobina. Una corriente de 200 μA desvía la aguja 10 divisiones a escala plena. ¿Qué resistencia es necesaria para convertir el galvanómetro a un voltímetro de 10 V a escala plena?

86. ●● Un amperímetro tiene una resistencia de 1.0 mΩ. Encuentre la corriente en el amperímetro cuando está adecuadamente conectado a un resistor de 10 Ω y una fuente de 6.0 V. (Exprese su respuesta con cinco cifras significativas para mostrar cómo difiere de 0.60 A.)

87. ●● Un voltímetro tiene una resistencia de 30 kW. ¿Cuál es la corriente en el medidor cuando está adecuadamente conectado a través de un resistor de 10 Ω que está conectado a una fuente de 6.0 V?

88. **El** ●●● Un amperímetro y un voltímetro pueden medir el valor de un resistor. Suponga que el amperímetro está conectado en serie con el resistor y que el voltímetro está colocado sólo a través del resistor. *a*) Para una medición exacta, la resistencia interna del voltímetro debería ser 1) cero, 2) igual a la resistencia por medirse o 3) infinita. ¿Por qué? *b*) Explique por qué la resistencia correcta no está dada por $R = \frac{V}{I}$. *c*) Demuestre que la resistencia correcta en realidad es mayor que el resultado en el inciso *b* y que está dada por $R = \frac{V}{I - (V/R_V)}$ donde V es el voltaje medido por el voltímetro, I es la corriente medida por el amperímetro y R_V es la resistencia del voltímetro. *d*) Demuestre que el resultado en el inciso *c* se reduce a $R = \frac{V}{I}$ para un voltímetro ideal.

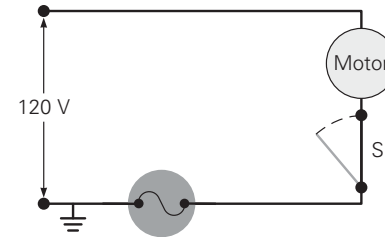
89. **El** ●●● Un amperímetro y un voltímetro pueden medir el valor de un resistor. Suponga que el amperímetro está conectado en serie con el resistor y que el voltímetro está colocado a través del amperímetro y del resistor. *a*) Para una medición exacta, la resistencia interna del amperímetro debería ser 1) cero, 2) igual a la resistencia por medirse o 3) infinita. ¿Por qué? *b*) Explique por qué la resistencia correcta no está dada por $R = \frac{V}{I}$. *c*) Demuestre que la resistencia correcta en realidad es menor que el resultado en el inciso *b* y que está dada por $R = (V/I) - R_A$ donde V es el voltaje medido por el voltímetro, I es la corriente medida por el amperímetro y R_A es la resistencia del amperímetro. *d*) Demuestre que el resultado en el inciso *c* se reduce a $R = \frac{V}{I}$ para un amperímetro ideal.

18.5 Circuitos domésticos y seguridad eléctrica

90. OM El cable a tierra en una instalación doméstica *a*) es un cable que conduce corriente, *b*) está a un voltaje de 240 V respecto a uno de los cables "calientes", *c*) no lleva corriente o *d*) ninguna de las opciones anteriores es correcta.

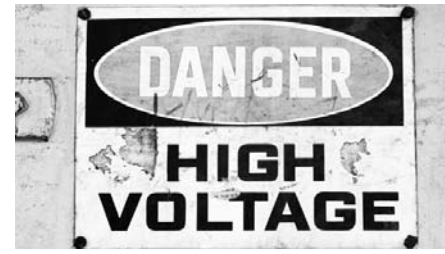
91. OM Un cable conectado a tierra *a*) es la base para la clavija polarizada, *b*) es necesario para un disyuntor, *c*) normalmente no conduce corriente o *d*) ninguna de las opciones anteriores es correcta.

92. PC En términos de seguridad eléctrica, explique qué está mal en el circuito en la ▸figura 18.40 y por qué.



▲ **FIGURA 18.40 ¿Un problema de seguridad?** Véase el ejercicio 92.

93. PC La severidad de las lesiones por electrocución dependen de la magnitud de la corriente y de su trayectoria. Por otra parte, es común ver letreros preventivos con la leyenda "Peligro: alto voltaje" (▾figura 18.41). ¿Esos letreros no deberían referirse a una "elevada corriente"? Explique su respuesta.



▲ **FIGURA 18.41 Peligro, alto voltaje** ¿No debería decir más bien "elevada corriente" en lugar de "alto voltaje"? Véase el ejercicio 93.

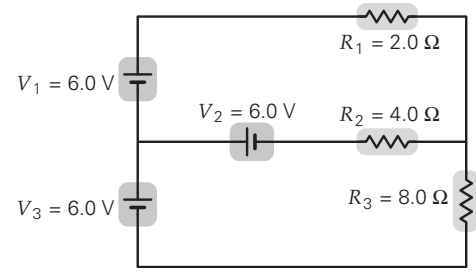
94. PC Explique por qué es seguro que los pájaros se posen con ambas patas sobre el mismo cable de alto voltaje, aun cuando el aislante esté totalmente desgastado.

95. PC Después de una colisión con un poste de transmisión de energía eléctrica, usted queda atrapado en su automóvil, con una línea de alto voltaje en contacto con el capó del vehículo. ¿Es más seguro salir del automóvil con un pie a la vez o saltar con ambos pies? Explique su razonamiento.

96. PC La mayoría de los códigos eléctricos requieren que la cubierta metálica de un secador eléctrico de ropa tenga un cable que vaya de la cubierta a una llave cercana (o cualquier pieza metálica de fontanería). Explique por qué.

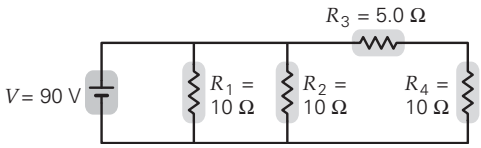
Ejercicios adicionales

97. Encuentre la corriente en cada resistor en el circuito de la ▾figura 18.42.



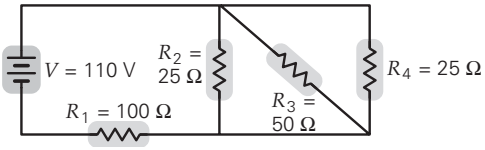
▲ **FIGURA 18.42 Reglas de Kirchhoff** Véase el ejercicio 97.

98. Cuatro resistores están conectados a una fuente de 90 V como se muestra en la ▼figura 18.43. *a*) ¿Cuál resistor (o resistores) recibe la mayor potencia, y cuánto es eso? *b*) ¿Cuál es la potencia total entregada al circuito por la fuente de potencia?



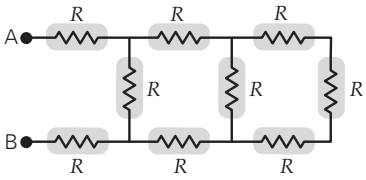
▲ **FIGURA 18.43 ¿Cuánta potencia se entrega?** Véase el ejercicio 98.

99. Cuatro resistores están conectados en un circuito con una fuente de 110 V como se ilustra en la ▼figura 18.44. *a*) ¿Cuál es la corriente en cada resistor? *b*) ¿Cuánta potencia se entrega a cada resistor?



▲ **FIGURA 18.44 Pérdidas de calor de joule** Véase el ejercicio 99.

100. Nueve resistores, cada uno de valor R, están conectados en forma escalonada como se observa en la ▼figura 18.45. *a*) ¿Cuál es la resistencia efectiva de esta red entre los puntos A y B? *b*) Si $R = 10\ \Omega$ y una batería de 12.0 V está conectada del punto A al punto B, ¿cuánta corriente hay en cada resistor?

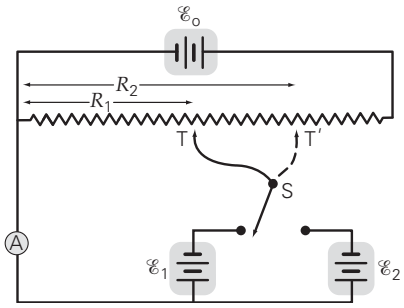


▲ **FIGURA 18.45 Una escalera de resistencias** Véase el ejercicio 100.

101. Un resistor de 4.0 Ω y otro de 6.0 Ω están conectados en serie. Un tercer resistor está conectado en paralelo con el de 6.0 Ω. Toda la configuración da una resistencia equivalente total de 7.0 Ω. ¿Cuál es el valor del tercer resistor?

102. Un galvanómetro con una resistencia interna de 50 Ω y una sensibilidad a escala plena de 200 μA se emplea para construir un voltímetro de escala múltiple. ¿Qué valores de resistores multiplicadores permiten tres lecturas de voltaje a escala plena de 20 V, 100 V y 200 V? (Véase la figura 18.18b.)

103. Un galvanómetro con una resistencia interna de 100 Ω y una sensibilidad a escala plena de 100 μA se utiliza para construir un amperímetro con varias graduaciones. ¿Qué valores de resistores en derivación permiten tres lecturas de corriente a escala plena de 1.0 A, 5.0 A y 10 A? (Véase la figura 18.18a.)



◀ **FIGURA 18.46 El potenciómetro** Véase el ejercicio 104.

104. La ▲figura 18.46 muestra el funcionamiento de un *potenciómetro*, un dispositivo muy exacto para determinar la fem de suministros de potencia. Consta de tres baterías, un amperímetro y varios resistores, incluyendo un alambre largo uniforme cuya longitud puede fijarse para dar una fracción específica de su resistencia total. $\mathscr{E}_o$ es la fem de una batería en funcionamiento, $\mathscr{E}_1$ designa una batería con una fem conocida de forma precisa, y $\mathscr{E}_2$ es una batería cuya fem se desconoce. El interruptor S es accionado hacia la batería 1, y el punto T (que se va a "fijar") se mueve a lo largo del resistor hasta que el amperímetro lee cero. La resistencia de este arreglo es R_1. Este procedimiento se repite con el interruptor accionado hacia la batería 2, y el punto T se mueve a T′ hasta que el amperímetro de nuevo lee cero. La resistencia de este arreglo es R_2. Demuestre que la fem desconocida se determina mediante la siguiente relación: $\mathscr{E}_2 = \dfrac{R_2}{R_1}\mathscr{E}_1$.

105. Si una combinación de tres resistores de 30 Ω recibe energía a razón de 3.2 W cuando está conectada a una batería de 12 V, ¿cómo están conectados en el circuito los resistores?

106. Una batería tiene tres celdas, cada una con una resistencia interna de 0.020 Ω y una fem de 1.50 V. La batería está conectada en paralelo con un resistor de 10.0 Ω. *a*) Determine el voltaje a través del resistor. *b*) ¿Cuánta corriente hay en cada celda? (Las celdas en una batería están en serie.)

107. Un condensador de 10.0 μF en un desfibrilador cardiaco se carga por completo mediante un suministro de potencia de 10 000 V. Cada placa del condensador está conectada al pecho de un paciente mediante cables y dos electrodos, que se colocan uno a cada lado del corazón. La energía almacenada en el condensador se entrega a través de un circuito RC, donde R es la resistencia del cuerpo entre los dos electrodos. Los datos indican que el voltímetro tarda 75.1 ms para caer a 20.0 V. *a*) Encuentre la constante de tiempo. *b*) Determine la resistencia, R. *c*) ¿Cuánto tiempo tarda el condensador en perder el 90% de su energía almacenada?

108. Durante una operación quirúrgica, uno de los instrumentos eléctricos tiene su cubierta metálica en corto con el cable "caliente" de 120 V que lo alimenta. El médico está aislado de tierra por las suelas de sus zapatos, que son de goma, e inadvertidamente toca la cubierta del instrumento con su codo, al tiempo que la mano opuesta hace contacto con el pecho del paciente. Este último, que yace sobre una mesa metálica, está bien conectado a tierra. Si la resistencia de la cabeza a tierra del paciente es de 2200 Ω, ¿cuál es la resistencia mínima para el médico de manera que ambos sientan, a lo sumo, un choque "de

PHYSLET® Los siguientes problemas de física Physlet se pueden usar con este capítulo.
30.1, 30.2, 30.3, 30.4, 30.6, 30.7, 30.8, 30.11, 30.12

CAPÍTULO 19

MAGNETISMO

19.1 Imanes, polos magnéticos y dirección del campo magnético 624

19.2 Intensidad del campo magnético y fuerza magnética 626

19.3 Aplicaciones: partículas cargadas en campos magnéticos 629

19.4 Fuerzas magnéticas sobre conductores con corriente eléctrica 632

19.5 Aplicaciones: conductores con corriente en campos magnéticos 635

19.6 Electromagnetismo: la fuente de los campos magnéticos 637

19.7 Materiales magnéticos 641

*19.8 Geomagnetismo: el campo magnético terrestre 644

HECHOS DE FÍSICA

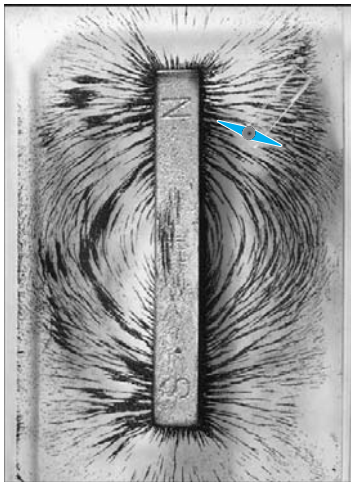
- La unidad de corriente del SI, el ampere o el coulomb por segundo, se define oficialmente en términos del campo magnético que crea y la fuerza magnética que ese campo puede ejercer sobre otra corriente.
- Nikola Tesla (1856-1943) fue un investigador serbio-estadounidense conocido por la bobina de Tesla, que es capaz de producir altos voltajes (véase el capítulo 20) y que se estudia comúnmente en la preparatoria. El nombre de Tesla se convirtió en la unidad del SI para el campo magnético. Cuando Westinghouse obtuvo los derechos de patente para sus diseños de corriente alterna, esto desencadenó una batalla entre el sistema de corriente directa de Edison y el sistema de corriente alterna de Tesla-Westinghouse. Finalmente, este último ganó y se convirtió en el medio primordial de distribuir energía eléctrica por todo el mundo.
- Pierre Curie (1859-1906) fue pionero en diversas áreas que van desde el magnetismo a la radiactividad. Descubrió que las sustancias ferromagnéticas presentan una transición de temperatura por arriba de la cual pierden su comportamiento ferromagnético. Esto se conoce ahora como la temperatura Curie.

Cuando se menciona el magnetismo, tendemos a pensar en una atracción, pues se sabe que es posible levantar algunos objetos con un imán. Usted probablemente ha visto picaportes magnéticos que sujetan puertas de casilleros, o imanes para pegar notas sobre la puerta del refrigerador. Es menos probable que alguien piense en la repulsión. Sin embargo, existen las fuerzas magnéticas de repulsión, y son tan útiles como las de atracción.

A este respecto, la fotografía que abre este capítulo muestra un ejemplo interesante. A primera vista, el vehículo se ve como un tren ordinario; pero ¿dónde están las ruedas? De hecho, dista mucho de ser un tren convencional; es uno de alta velocidad que opera mediante *levitación magnética*. El tren no toca físicamente los "rieles". Más bien "flota" sobre ellos, sostenido por las fuerzas de repulsión que producen poderosos imanes. Las ventajas son obvias: si no hay ruedas, no hay fricción de rodadura y no hay chumaceras que lubricar; de hecho, hay muy pocas partes móviles de cualquier tipo.

Pero, ¿de dónde provienen las fuerzas magnéticas? Durante siglos, las fuerzas de atracción de los imanes se atribuyeron a fenómenos sobrenaturales. Los materiales que presentaban esa cualidad se llamaban piedras imán. Hoy, el magnetismo se asocia con la electricidad, porque los físicos descubrieron que en realidad ambas cosas son en realidad distintos aspectos de una sola fuerza: la fuerza electromagnética. El electromagnetismo se aplica en motores, generadores, radios y muchas otras aplicaciones comunes. En el futuro, el desarrollo de materiales superconductores a altas temperaturas (capítulo 17) abrirá el camino a la aplicación práctica de muchos artefactos más que hoy sólo se encuentran en el laboratorio.

Aunque la electricidad y el magnetismo son manifestaciones de la misma fuerza fundamental, es conveniente desde el punto de vista didáctico considerarlas primero en forma individual, para después unirlas, por así decirlo, en el electromagnetismo. En este capítulo y el siguiente se investigará el magnetismo y su relación íntima con la electricidad.



▲ **FIGURA 19.1 Imán recto** Las limaduras de hierro indican los polos, o centros de fuerza, de un imán recto común. La dirección de la brújula identifica a estos polos como norte (N) y sur (S). (Véase la figura 19.3.)

PHYSLET®

Ilustración 27.2 *Campo magnético de la Tierra*

19.1 Imanes, polos magnéticos y dirección del campo magnético

OBJETIVOS: *a*) Aprender la regla de fuerza entre polos magnéticos y *b*) explicar cómo se determina la dirección de un campo magnético con una brújula.

Una de las propiedades de una barra de imán común es que tiene dos "centros" de fuerza, llamados *polos* cerca de cada uno de sus extremos (◂figura 19.1). Para evitar confusiones con la notación de la carga eléctrica, positiva y negativa, a esos polos se les llama norte (N) y sur (S). Esta terminología proviene del primer uso que se dio a la brújula magnética, es decir, el de determinar la dirección. El polo norte de un imán de brújula se definió históricamente como el extremo *que da hacia el norte,* que es el que apunta al *norte* de la Tierra. El otro extremo se llamó sur o polo sur.

Al usar dos imanes en forma de barra o rectos, se pueden determinar en forma experimental las fuerzas de atracción y repulsión que actúan entre sus extremos. Cada polo de un imán recto es atraído hacia el polo opuesto del otro, y es repelido por el mismo polo del otro. Tenemos así la **ley de fuerza entre polos**, o **ley de los polos**:

> Los polos magnéticos iguales se repelen, y los polos magnéticos diferentes se atraen (▾figura 19.2).

Un resultado inmediato (y a veces confuso) de la definición histórica de un polo norte tiene que ver con el campo magnético terrestre. Como el polo norte de un imán recto es atraído hacia la región *polar* boreal (es decir, el norte *geográfico*), esa región debe funcionar, desde el punto de vista magnético, como el polo (magnético) sur. (Véase la sección 19.8 para conocer más detalles sobre la geofísica del campo magnético de la Tierra.) Así que el polo magnético sur de la Tierra se encuentra en la cercanía de su polo geográfico norte.

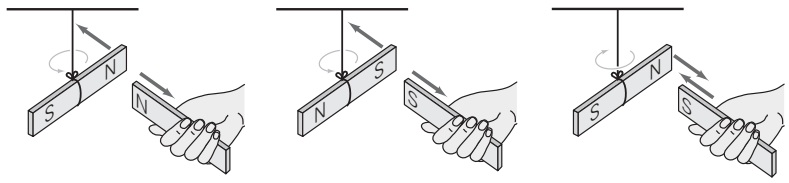
Dos polos magnéticos opuestos, como los de un imán recto, forman un *dipolo magnético.* A primera vista, el campo del imán recto podría parecer el análogo magnético del dipolo eléctrico. Sin embargo, existen diferencias fundamentales entre los dos. Por ejemplo, los imanes permanentes siempre tienen dos polos, nunca uno solo. Tal vez se podría pensar que romper un imán recto a la mitad daría por resultado dos polos aislados. Sin embargo, los trozos resultantes del imán siempre se convierten en dos imanes más cortos, *cada uno con su propio conjunto de polos norte y sur.* Mientras que podría existir un solo polo magnético (un *monopolo magnético*) en teoría, todavía se debe encontrar en forma experimental.

El hecho de que no haya analogía magnética con la carga eléctrica es una clave de las diferencias entre los campos eléctricos y magnéticos. Por ejemplo, la fuente real del magnetismo es la carga eléctrica, al igual que sucede con el campo eléctrico. Sin embargo, como se verá en las secciones 19.6 y 19.7, los campos magnéticos se producen sólo cuando las cargas eléctricas están *en movimiento,* como las corrientes eléctricas en circuitos y los electrones que giran en los átomos. Estos últimos son, en realidad, la fuente del campo del imán recto.

Dirección del campo magnético

El método que se utilizó en el pasado para analizar el campo magnético de un imán recto consistía en expresar la fuerza magnética entre los polos en una forma matemática parecida a la ley de Coulomb de la fuerza eléctrica (capítulo 15). De hecho, Coulomb estableció esa ley usando intensidades de polos magnéticos en lugar de cargas eléctricas. Sin embargo, en la actualidad rara vez se usa esa ley, porque no concuerda con nuestra interpretación moderna, basada en el hecho de que nunca se han encontrado polos magnéticos aislados. En lugar de ello, la descripción moderna usa el concepto del *campo magnético.*

Recuerde que las cargas eléctricas producen un campo eléctrico, que se representa mediante líneas de campo eléctrico. El campo eléctrico (vector) se define como la fuerza por unidad de carga en cualquier punto en el espacio, $\vec{\mathbf{E}} = \vec{\mathbf{F}}_e/q_o$. De manera simi-



Los polos iguales se repelen

Los polos diferentes se atraen

▶ **FIGURA 19.2 La ley de la fuerza polar o ley de los polos** Los polos iguales (N y N, o S y S) se repelen, y los polos distintos (N y S) se atraen.

lar, las interacciones magnéticas se describen en función del **campo magnético**, una cantidad vectorial representada por el símbolo $\vec{\mathbf{B}}$. Así como existen campos eléctricos en la cercanía de cargas eléctricas, los campos magnéticos rodean a los imanes permanentes. Se puede hacer visible el conjunto de líneas magnéticas que rodean a un imán, esparciendo limaduras de hierro sobre un imán recto cubierto por una hoja de papel o una lámina de vidrio (figura 19.1). A causa del campo magnético, las limaduras de hierro se magnetizan convirtiéndose en pequeños imanes (básicamente en agujas de brújula) y se alinean en dirección del campo $\vec{\mathbf{B}}$, comportándose como pequeñas brújulas.

Como el campo magnético es un campo vectorial, se debe especificar tanto la magnitud (que a veces se llama "intensidad" o "fuerza") como la dirección. La dirección de un campo magnético (al que con frecuencia se le llama "campo *B*") se define en términos de una brújula calibrada con la dirección del campo magnético terrestre:

> La dirección de un campo magnético ($\vec{\mathbf{B}}$) en cualquier lugar es la dirección hacia donde apuntaría el norte de una brújula si ésta se colocara en ese lugar.

Ilustración 27.1 Imanes y agujas de brújula

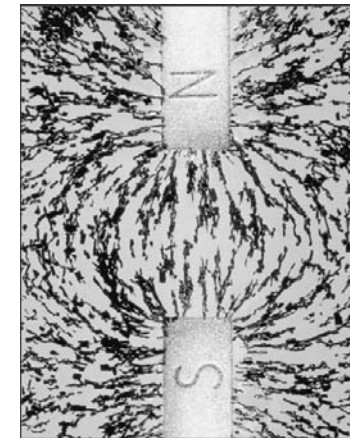
Esta definición ofrece un método para trazar un mapa de un campo magnético, moviendo una pequeña brújula en diversos puntos del campo. En cualquier lugar, la brújula se alineará en la dirección del campo *B* que exista allí. Si la brújula se mueve después en la dirección que señala su aguja (el extremo norte), la trayectoria de la aguja describe una *línea de fuerza magnética,* como se ilustra en la ▼figura 19.3a.

Como el extremo norte de una brújula se aleja del polo norte de un imán recto, las líneas de campo del imán recto se alejan de ese polo y apuntan hacia su polo sur. Las reglas que gobiernan la interpretación de las líneas de campo magnético son iguales que las que se aplican a las líneas de campo eléctrico:

> Cuanto más cercanas están entre sí las líneas del campo B, más intenso es éste. En cualquier lugar, la dirección del campo magnético es tangente a la línea de campo, o, de manera equivalente, a la dirección en la que apunta el extremo norte de una brújula.

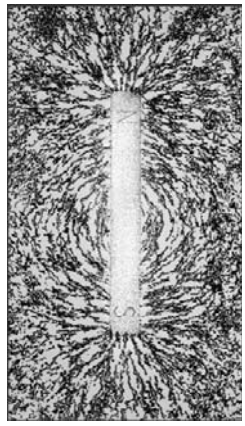
Observe la concentración de las limaduras de hierro en las regiones polares (figura 19.3b y c). Esto indica que las líneas de campo están muy próximas y, en consecuencia, hay un campo magnético relativamente intenso o fuerte, en comparación con el que existe en otros lugares. En cuanto a la dirección del campo, observe que justo fuera de la mitad del imán, el campo apunta directamente hacia abajo, tangente a la línea de campo en ese punto (figura 19.3a, punto P).

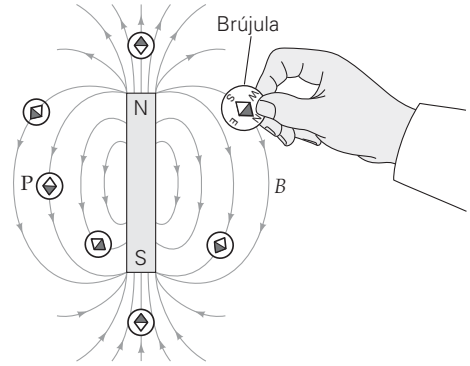
El lector pensará que se podría definir la magnitud de $\vec{\mathbf{B}}$ como la fuerza magnética por unidad de intensidad de polo, en forma análoga a $\vec{\mathbf{E}}$. Sin embargo, como no existen los monopolos magnéticos, la magnitud de $\vec{\mathbf{B}}$ se define en función de la fuerza magnética que se ejerce sobre una carga eléctrica en movimiento, como se describirá a continuación.



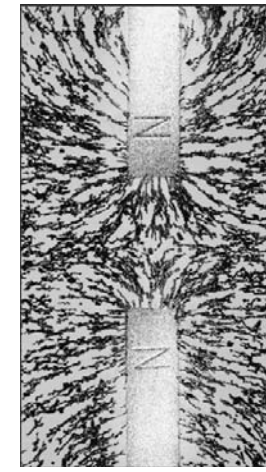
b)

▼ **FIGURA 19.3** Campos magnéticos ***a)*** Es posible visualizar y trazar las líneas del campo magnético con limaduras de hierro o con una brújula, como se ve en el caso del campo magnético provocado por un imán recto. Las limaduras se comportan como diminutas brújulas y se alinean con el campo. Cuanto más próximas estén entre sí las líneas de campo, el campo magnético es más intenso. ***b)*** La figura que forman las limaduras de hierro para el campo magnético entre polos diferentes; las líneas de campo convergen. ***c)*** Figura que forman las limaduras de hierro para el campo magnético entre polos iguales; las líneas de campo divergen.

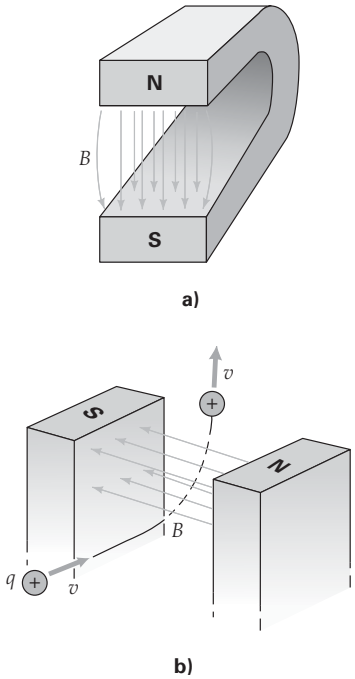




a)



c)



▲ **FIGURA 19.4 Fuerza sobre una partícula en movimiento con carga eléctrica** ***a)*** Un imán de herradura, formado doblando un imán recto permanente, produce un campo bastante uniforme entre sus polos. ***b)*** Cuando una partícula con carga eléctrica entra a un campo magnético, actúa sobre ella una fuerza cuya dirección es obvia por la desviación que tiene respecto a su trayectoria original.

19.2 Intensidad del campo magnético y fuerza magnética

OBJETIVOS: *a*) Definir la intensidad del campo magnético y *b*) determinar la fuerza magnética que ejerce un campo magnético sobre una partícula cargada.

Los experimentos indican que una cantidad importantes para determinar la fuerza *magnética* sobre una partícula es su carga *eléctrica*. El estudio de estas interacciones se llama **electromagnetismo**. Examinemos la siguiente interacción electromagnética. Supongamos que una partícula con carga positiva se mueve a velocidad constante al entrar a un campo magnético uniforme. Para simplificar, supongamos también que su velocidad es perpendicular al campo. (Un campo magnético B bastante uniforme existe entre los polos de un imán "de herradura" como el que se observa en ◂la figura 19.4a.) Cuando la partícula cargada entra al campo, es *desviada* adoptando una trayectoria curva hacia arriba, que en realidad es parte de una trayectoria circular (si el campo B es uniforme), como se aprecia en la figura 19.4b.

A partir de nuestro estudio del movimiento circular (sección 7.3), para que una partícula se mueva describiendo un arco circular debe existir una fuerza centrípeta perpendicular a su velocidad. Pero, ¿qué origina esta fuerza? No hay campo eléctrico. La fuerza gravitacional, además de ser demasiado débil para provocar esa desviación, desviaría a la partícula para que siguiera un arco parabólico hacia abajo y no uno circular hacia arriba. Es claro que la fuerza es magnética y que se debe a la interacción entre la carga en movimiento y el campo magnético. Esto indica que *un campo magnético puede ejercer una fuerza sobre una partícula eléctricamente cargada en movimiento.*

Según cuidadosas mediciones, la magnitud de esta fuerza es directamente proporcional a la carga y a su rapidez. Cuando la velocidad de la partícula ($\vec{\mathbf{v}}$) es perpendicular al campo magnético ($\vec{\mathbf{B}}$), la magnitud del campo o la intensidad del *campo B* se define como:

$$B = \frac{F}{qv} \quad \textit{(válida sólo cuando } \vec{\mathbf{v}} \textit{ es perpendicular a } \vec{\mathbf{B}}\textit{)} \tag{19.1}$$

Unidad SI del campo magnético:
newton por ampere-metro [N/(A · m), o tesla (T)]

Físicamente, B representa la fuerza magnética ejercida sobre una partícula cargada, *por unidad de carga* (coulomb) y *por unidad de velocidad* (m/s). A partir de esta relación, las unidades de B son N/(C · m/s) o N/(A · m), ya que 1 A = 1 C/s. A esta combinación de unidades se le llama **tesla (T)**, en honor de Nikola Tesla (1856-1943). Así, 1 T = 1 N/(A · m). La mayor parte de las intensidades de campos magnéticos cotidianos, como las de los imanes permanentes, son mucho menores que 1 T. En esos casos, es común expresar las intensidades de campo magnético en militeslas (1 mT = 10^{-3} T) o en microteslas (1 μT = 10^{-6} T). Una unidad que no pertenece al SI, pero que utilizan los geólogos y geofísicos es el *gauss* (G), que equivale a un diezmilésimo de Tesla (1 G = 10^{-4} T = 0.1 mT). Por ejemplo, el campo magnético terrestre mide varias décimas de gauss o de varias centésimas de un militesla. Por otra parte, los imanes convencionales de laboratorio producen campos hasta de 3 T, y los imanes superconductores generan campos de 25 T o incluso mayores.

Nota: el campo magnético desempeña un papel vital en la obtención de imágenes por resonancia magnética (MRI), una técnica muy usada en los diagnósticos médicos.

Una vez determinada la intensidad del campo magnético (ecuación 19.1), es posible calcular la fuerza sobre una partícula cargada que se mueva a cualquier velocidad.* La fuerza se despeja en la ecuación 19.1:

$$F = qvB \quad \textit{(válida sólo cuando } \vec{\mathbf{v}} \textit{ es perpendicular a } \vec{\mathbf{B}}\textit{)} \tag{19.2}$$

La velocidad de la partícula *no* será perpendicular al campo magnético. Entonces la magnitud de la fuerza depende del seno del ángulo (θ) entre el vector velocidad y el vector campo magnético. En general, la magnitud de la fuerza magnética es

$$F = qvB \operatorname{sen} \theta \quad \textit{fuerza magnética sobre una partícula con carga eléctrica} \tag{19.3}$$

Esto significa que la fuerza magnética es cero cuando $\vec{\mathbf{v}}$ y $\vec{\mathbf{B}}$ son paralelos ($\theta = 0°$), o con dirección contraria ($\theta = 180°$), ya que sen 0° = sen 180° = 0. La fuerza alcanza su valor máximo cuando esos dos vectores son perpendiculares. Si $\theta = 90°$ (sen 90° =1), este valor máximo es $F = qvB$ sen 90° = qvB.

*En sentido estricto las velocidades deben ser considerablemente menores que la velocidad de la luz para evitar complicaciones de relatividad.

La regla de la mano derecha para fuerzas sobre cargas en movimiento

La *dirección* de la fuerza magnética sobre cualquier partícula cargada en movimiento se determina por la orientación de la velocidad de la partícula en relación con el campo magnético. Los experimentos demuestran que la dirección de la fuerza magnética se determina con la **regla de la mano derecha** (▾figura 19.5a):

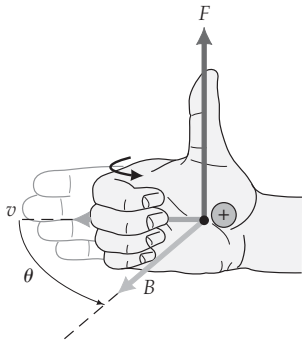
> Cuando los dedos de la mano derecha apuntan en la dirección de la velocidad $\vec{\mathbf{v}}$ de una partícula cargada, y se flexionan después (en el ángulo menor) hacia el vector $\vec{\mathbf{B}}$, el pulgar extendido apunta en dirección de la fuerza magnética $\vec{\mathbf{F}}$ que actúa sobre una carga *positiva*. Si la partícula tiene carga negativa, la fuerza magnética tiene dirección opuesta a la del pulgar.

Nota: los campos *B* que se dirigen hacia el plano de la página se representan por ×. Los campos *B* que se dirigen saliendo del plano de la página se representan por •. Visualice estos símbolos, como si indicaran el estabilizador (la cola) y la punta de una flecha, respectivamente.

El lector podría imaginar que los dedos de la mano derecha giran físicamente o hacen girar el vector $\vec{\mathbf{v}}$ hacia $\vec{\mathbf{B}}$ para que $\vec{\mathbf{v}}$ y $\vec{\mathbf{B}}$ queden alineados.

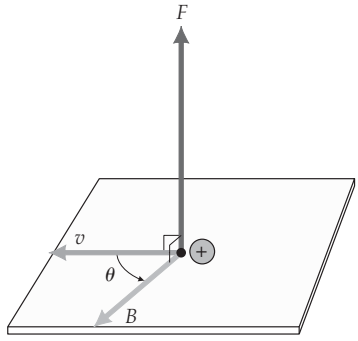
Advierta que la fuerza magnética siempre es *perpendicular al plano formado por* $\vec{\mathbf{v}}$ *y* $\vec{\mathbf{B}}$ (figura 19.5b). Como la fuerza es perpendicular a la dirección del movimiento de la partícula ($\vec{\mathbf{v}}$), no puede realizar trabajo sobre ésta. (Esto se deduce de la definición de trabajo en el capítulo 5, con un ángulo recto entre la fuerza y el desplazamiento, $W = Fd \cos 90° = 0$.) Por consiguiente, un campo magnético no cambia la rapidez (es decir, la energía cinética) de la partícula, sólo su dirección.

En la figura 19.5c se presentan algunas reglas alternativas (y físicamente equivalentes) de la mano derecha. Se sugiere que, para cargas negativas, el lector comience suponiendo que la carga es positiva. A continuación determine la dirección de la fuerza empleando la regla de la mano derecha. Por último, *invierta* esa dirección, para determinar la de la fuerza real sobre la carga negativa. Para ver cómo se aplica esta regla a cargas de uno y otro signo, considere el siguiente ejemplo conceptual.

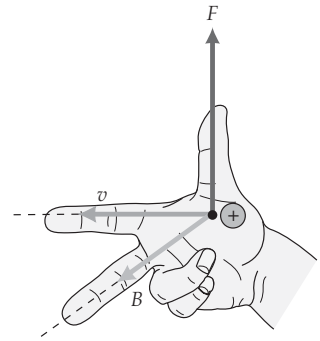


a)

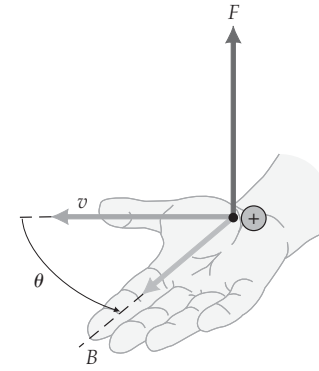
▶ **FIGURA 19.5 Reglas de la mano derecha para la fuerza magnética** ***a)*** Cuando los dedos de la mano derecha tienen la dirección de $\vec{\mathbf{v}}$ y luego se doblan hacia la dirección de $\vec{\mathbf{B}}$, el pulgar extendido apunta en dirección de la fuerza $\vec{\mathbf{F}}$ sobre una carga *positiva.* ***b)*** La fuerza magnética siempre es perpendicular al plano de $\vec{\mathbf{B}}$ y $\vec{\mathbf{v}}$, y, en consecuencia, siempre es perpendicular a la dirección del movimiento de la partícula. ***c)*** Cuando el índice extendido de la mano derecha apunta en la dirección de $\vec{\mathbf{v}}$ y el dedo medio apunta en la dirección de $\vec{\mathbf{B}}$, el pulgar extendido de la misma mano apunta en la dirección de $\vec{\mathbf{F}}$ sobre una carga *positiva.* ***d)*** Cuando los dedos de la mano derecha apuntan en la dirección de $\vec{\mathbf{B}}$ y el pulgar en la dirección de $\vec{\mathbf{v}}$, la palma queda en dirección de la fuerza $\vec{\mathbf{F}}$ sobre una carga *positiva.* (Independientemente de la regla empleada, recuerde siempre utilizar la mano derecha e invertir la dirección cuando la carga es negativa.)



b)



c)



d)

Ejemplo conceptual 19.1 ■ Hasta los "zurdos" utilizan la regla de la mano derecha

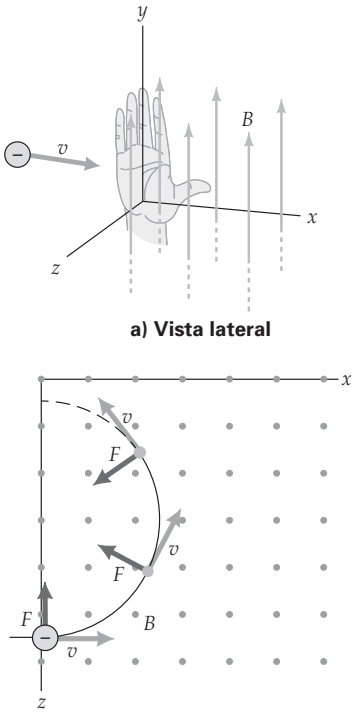
En un acelerador lineal de partículas, un haz de protones viaja horizontalmente hacia el norte. Para desviar los protones hacia el este con un campo magnético uniforme, ¿en qué dirección debe apuntar ese campo? *a*) Vertical hacia abajo, *b*) hacia el oeste, *c*) vertical hacia arriba o *d*) hacia el sur.

Razonamiento y respuesta. Como la fuerza es perpendicular al plano de $\vec{\mathbf{v}}$ y $\vec{\mathbf{B}}$, el campo magnético *no* puede ser horizontal. Si así fuera, desviaría a los protones hacia abajo o hacia arriba. A continuación, se aplica la regla de la mano derecha, para ver si $\vec{\mathbf{B}}$ podría estar hacia abajo (respuesta *a*). Es conveniente verificar que, para un campo magnético hacia abajo, la fuerza debe ser hacia el oeste. Por consiguiente, la respuesta debe ser *c*. El campo magnético debe apuntar hacia arriba para desviar los protones hacia el este.

Ejercicio de refuerzo. ¿Hacia qué dirección se desviarían las partículas en este ejemplo si fueran electrones que se mueven hacia el sur?

PHYSLET®

Ilustración 27.3 Un espectrómetro de masa



▲ **FIGURA 19.6** Trayectoria de una partícula cargada en un campo magnético ***a)*** Una partícula cargada que entra en un campo magnético uniforme se desvía, en este caso hacia el plano *xy*, de acuerdo con la regla de la mano derecha, porque la carga es negativa. ***b)*** En el campo, la fuerza siempre es perpendicular a la velocidad de la partícula. Esta última se mueve en trayectoria circular si el campo es constante, y si entra en dirección perpendicular a la del campo. (Véase el ejemplo 19.2.)

Las partículas cargadas en campos magnéticos uniformes describen trayectorias de arcos circulares. Véamos el ejemplo 19-2 para conocer más detalles.

Ejemplo 19.2 ■ Movimiento circular: fuerza sobre una carga en movimiento

Una partícula con carga de -5.0×10^{-4} C y masa de 2.0×10^{-9} kg se mueve con una velocidad de 1.0×10^3 m/s en dirección de $+x$. Entra en un campo magnético uniforme de 0.20 T, cuya dirección es +y (véase la ◂figura 19.6a). *a*) ¿En qué dirección se desviará la partícula tan pronto como entra en el campo? *b*) ¿Cuál es la magnitud de la fuerza sobre la partícula tan pronto como entra en el campo? *c*) ¿Cuál es el radio del arco circular por el que viajará la partícula mientras está en el campo?

Razonamiento. La desviación inicial de la partícula tiene la dirección de la fuerza magnética inicial. Se espera una trayectoria en arco circular, porque la fuerza magnética es perpendicular a la velocidad de la partícula. La magnitud de la fuerza magnética sobre una sola carga se determina con la ecuación 19.3. Ésta es la única fuerza significativa sobre el electrón; también es la fuerza neta. La segunda ley de Newton nos permitirá determinar el radio de la órbita circular.

Solución. Se listan los datos.

Dado: $q = -5.0 \times 10^{-4}$ C
$v = 1.0 \times 10^3$ m/s (dirección $+x$)
$m = 2.0 \times 10^{-9}$ kg
$B = 0.20$ T (dirección $+y$)

Encuentre: *a*) La dirección de la desviación inicial
b) La magnitud de la fuerza magnética inicial F
c) El radio *r* de la órbita

a) Según la regla de la mano derecha, la fuerza sobre una carga positiva tendría la dirección $+z$ (dirección de la palma). Como la carga es negativa, la fuerza tiene la dirección opuesta, y la partícula se comenzará a desviar hacia la dirección $-z$.

b) La magnitud de la fuerza se determina mediante la ecuación 19.3. Como sólo interesa su magnitud, se ignora el signo de *q*. Entonces

$$F = qvB \operatorname{sen}\theta$$
$$= (5.0 \times 10^{-4}\ \text{C})(1.0 \times 10^3\ \text{m/s})(0.20\ \text{T})(\operatorname{sen} 90°) = 0.10\ \text{N}$$

c) Como la fuerza magnética es la única fuerza que actúa sobre la partícula, también es la fuerza neta (figura 19.6b). Esta fuerza neta apunta hacia el centro del círculo se llama fuerza centrípeta ($\vec{\mathbf{F}}_{\text{neta}} = \vec{\mathbf{F}}_c$; véase el capítulo 7). Por lo tanto, al describir el movimiento circular, la segunda ley de Newton se convierte en

$$\vec{\mathbf{F}}_c = m\vec{\mathbf{a}}_c$$

Ahora se sustituye la fuerza magnética (de la ecuación 19.2, ya que $\theta = 90°$) como fuerza neta, y la ecuación de la aceleración centrípeta ($a_c = v^2/r$; véase la sección 7.3), para obtener:

$$qvB = \frac{mv^2}{r} \quad \text{o} \quad r = \frac{mv}{qB}$$

Por último, se sustituyen los valores numéricos

$$r = \frac{mv}{qB} = \frac{(2.0 \times 10^{-9}\ \text{kg})(1.0 \times 10^3\ \text{m/s})}{(5.0 \times 10^{-4}\ \text{C})(0.20\ \text{T})} = 2.0 \times 10^{-2}\ \text{m} = 2.0\ \text{cm}$$

Ejercicio de refuerzo. En este ejemplo, si la partícula fuera un protón que viaja inicialmente en la dirección $+z$, *a*) ¿en qué dirección se desviaría inicialmente? *b*) Si el radio de su trayectoria circular fuera 10 cm y su velocidad fuera 1.0×10^6 m/s, ¿cuál sería la intensidad del campo magnético?

19.3 Aplicaciones: partículas cargadas en campos magnéticos

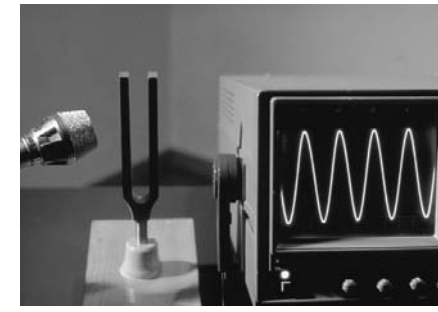
OBJETIVO: Comprender cómo se usa la fuerza magnética en las partículas cargadas en varias aplicaciones prácticas.

Hemos visto que una partícula cargada en movimiento en un campo magnético, por lo general, experimenta una fuerza magnética. Esta fuerza desvía a la partícula en un grado que depende de su masa, carga y velocidad (rapidez y dirección), así como de la intensidad del campo. Veamos cómo es que esta fuerza desempeña un papel fundamental en algunos aparatos, máquinas e instrumentos comunes.

El tubo de rayos catódicos (CRT): pantallas de osciloscopio, televisores y monitores de computadora*

El **tubo de rayos catódicos** (**CRT,** siglas en inglés para *cathode-ray tube*) es un tubo de vacío que se usa como pantalla de presentación en un instrumento de laboratorio llamado *osciloscopio* (▸figura 19.7). El funcionamiento básico tanto del osciloscopio como del cinescopio de un televisor se muestra en la ▾figura 19.8. Un filamento metálico caliente emite electrones, que son acelerados por un voltaje aplicado entre el cátodo (−) y el ánodo (+) en un "cañón de electrones". En un diseño, esos instrumentos usan bobinas conductoras para producir un campo magnético (sección 19.6), que controla la desviación del haz de electrones. Al variar rápidamente la intensidad del campo, el haz de electrones barre la pantalla fluorescente en una fracción de segundo. Cuando los electrones llegan al material fluorescente hacen que sus átomos emitan luz (sección 27.4). En un televisor blanco y negro, las señales reproducen una imagen en la pantalla, en forma de mosaico de puntos brillantes y oscuros, dependiendo de si el haz está encendido o apagado en determinado instante.

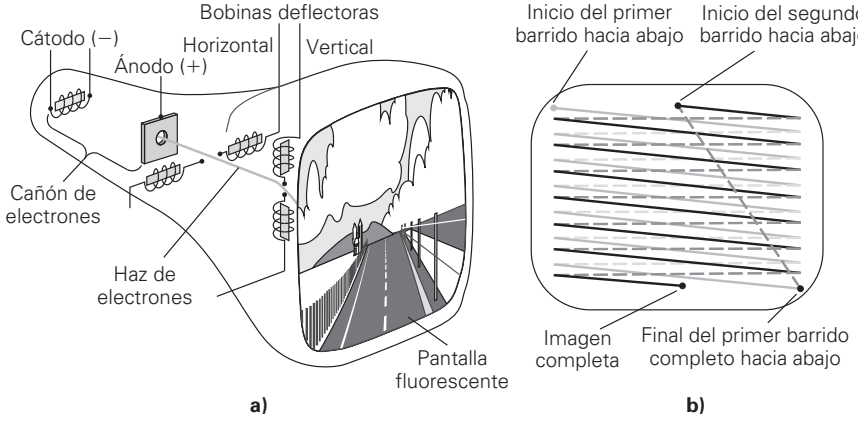
Generar imágenes en un televisor a color o en un monitor a color de computadora es un poco más complicado. Un cinescopio a color común tiene tres haces, uno para cada uno de los colores primarios (rojo, verde y azul; capítulo 25). Puntos fosforescentes en la pantalla se arreglan en grupos de tres (tríadas), con un punto para cada color primario. La excitación de los puntos correspondientes y la emisión resultante (fluorescencia) de una combinación de colores produce una imagen a color.



▲ **FIGURA 19.7 Tubo de rayos catódicos** (CRT) El movimiento del haz desviado describe una figura sobre una pantalla fluorescente.

El selector de velocidad y el espectrómetro de masas

¿Alguna vez ha imaginado cómo se mide la masa de un átomo o una molécula? Los campos eléctricos y magnéticos permiten hacer esto gracias a un **espectrómetro de masas**. Los espectrómetros de masas realizan muchas funciones en los laboratorios modernos. Por ejemplo, se utilizan para seguir moléculas de vida corta en estudios bioquímicos de los organismos vivos. También permiten determinar la estructura de grandes moléculas orgánicas, para analizar la composición de mezclas complejas, por ejemplo, una muestra de aire cargado de esmog. En criminología, los químicos forenses utilizan el espectrómetro de masas para identificar huellas de materiales, por ejemplo, en una marca de pintu-



◀ **FIGURA 19.8 Cinescopio de televisión** ***a)*** Un cinescopio de televisión es un tubo de rayos catódicos (de electrones) o CRT. Los electrones son acelerados entre el cátodo y el ánodo, y después son desviados al lugar adecuado de una pantalla fluorescente, mediante los campos magnéticos producidos por las bobinas conductoras de corriente. ***b)*** En este diseño, el haz barre una línea sí y otra no sobre la pantalla, en su paso hacia abajo que dura $\frac{1}{60}$ s, y después barre las líneas intermedias en un segundo paso de $\frac{1}{60}$ s. Con lo anterior se forma una imagen completa de 525 líneas en $\frac{1}{30}$ de segundo.

*Las pantallas planas están sustituyendo a las pantallas basadas en tubos de vacío, gracias al empleo de materiales como los cristales líquidos. En la actualidad, cada vez son más frecuentes los televisores de pantalla LCD y los monitores planos de computadora, que no requieren de fuerzas magnéticas para su operación.

ra que quedó en un accidente automovilístico. En otros campos de conocimiento, como la arqueología y la paleontología, esos instrumentos sirven para separar átomos y determinar la edad de rocas y de artefactos que utilizaron nuestros ancestros. En los hospitales modernos, los espectrómetros de masas son esenciales para medir y mantener la composición adecuada de medicamentos en estado gaseoso, como los gases anestésicos que se administran en una operación quirúrgica.

Nota: la diferencia entre las masas de un átomo o molécula neutros y sus contrapartes con carga (iones) es igual tan sólo a la masa de uno o dos electrones; por consiguiente, es insignificante en la mayor parte de los casos.

En realidad, lo que se mide en el espectrómetro de masas son las masas de los *iones* o moléculas cargadas.* Se producen iones con una carga conocida ($+q$) quitando electrones a átomos y moléculas. En este punto, el haz de iones que resulta tendría una distribución de velocidades, y no una sola velocidad. Si estas partículas entraran a un espectrómetro de masas, entonces los iones de diferente velocidad tomarían distintas trayectorias en el aparato. Así, antes de que entren al espectrómetro de masas, se seleccionan los iones con una velocidad específica mediante un *selector de velocidad*. Este instrumento consiste en un campo eléctrico y un campo magnético en ángulo recto entre sí.

Este arreglo permite que las partículas que se mueven con una velocidad única pasen sin desviarse. Para visualizar lo anterior, considere un ion positivo que se acerca a los campos cruzados, y forma con ambos ángulo recto. El campo eléctrico produce una fuerza hacia abajo ($F_e = qE$), y el campo magnético produce una fuerza hacia arriba ($F_m = qvB_1$). (Verifique la dirección de cada fuerza en la ▼figura 19.9.)

Si el haz no se va a desviar, la fuerza resultante o neta sobre cada partícula debe ser cero. En otras palabras, estas dos fuerzas se anulan, al ser iguales en magnitud y tener direcciones contrarias. Igualando las dos magnitudes de fuerzas,

$$F_e = F_m \qquad \text{o} \qquad qE = qvB_1$$

de donde se puede despejar una velocidad "seleccionada":

$$v = \frac{E}{B_1}$$

Si las placas son paralelas, el campo eléctrico entre ellas se determina mediante $E = V/d$, donde V es el voltaje a través de las placas y d es la distancia entre ellas. Una versión más práctica de la ecuación anterior

PHYSLET®

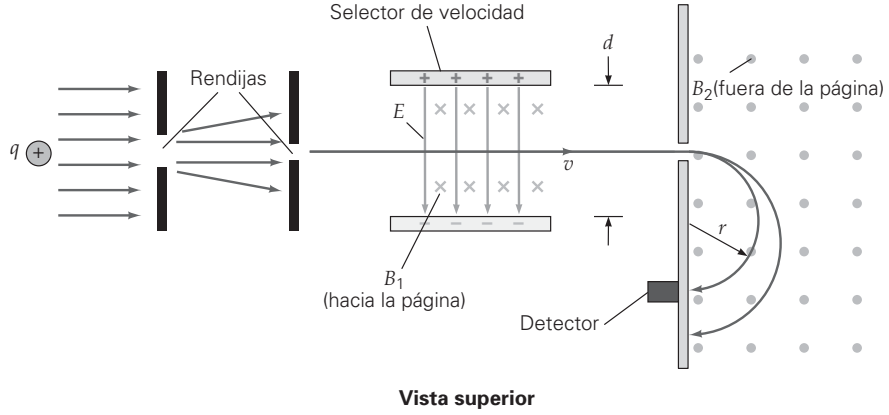
Exploración 27.2 Selector de velocidad

$$v = \frac{V}{B_1 d} \qquad \textit{Velocidad seleccionada en un selector de velocidad} \tag{19.4}$$

La velocidad deseada se puede seleccionar modificando V, en tanto que B_1 y d son difíciles de cambiar.

Adelante del selector de velocidad, el haz pasa por una rendija y llega a otro campo magnético ($\vec{\mathbf{B}}_2$), que es perpendicular a la dirección del haz. En este punto, el haz de partículas se flexiona y forma un arco circular. El análisis es idéntico al del ejemplo 19.2 y, en consecuencia

$$F_c = ma_c \qquad \text{o} \qquad qvB_2 = m\frac{v^2}{r}$$



▶ **FIGURA 19.9 Principio del espectrómetro de masas** Los iones pasan por el selector de velocidad; sólo aquellos que tienen determinada velocidad ($v = E/B_1$) entran en un campo magnético (B_2). Esos iones son desviados; el radio de su trayectoria circular depende de la masa y la carga que tengan. Trayectorias con dos radios distintos indican que el haz contiene iones de dos masas distintas (suponiendo que tienen la misma carga).

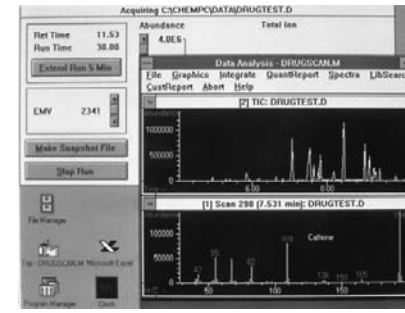
*Recuerde que al quitar o agregar electrones a un átomo o molécula se produce un ion. Sin embargo, la masa de un ion tiene una diferencia insignificante con respecto a la masa de su átomo neutral, porque la masa del electrón es muy pequeña en comparación con las masas de los protones y neutrones en los núcleos atómicos.

Se utiliza la ecuación 19.4, y la masa de la partícula es

$$m = \left(\frac{qdB_1B_2}{V}\right)r \quad \textit{(masa determinada con un espectrómetro de masas)} \tag{19.5}$$

La cantidad entre paréntesis es una constante (suponiendo que todos los iones tengan la misma carga). Por lo tanto, cuanto mayor sea la masa de un ion, el radio de su trayectoria circular será mayor. En la figura 19.9 se observan dos trayectorias circulares de radios distintos. Esto indica que el haz en realidad contiene iones de dos masas distintas. Si se mide el radio (por ejemplo, registrando la posición donde los iones se encuentran con un detector), es posible calcular la masa del ion mediante la ecuación 19.5.

En un espectrómetro de masas con diseño un poco diferente, el detector está en una posición fija. En este caso, el instrumento funciona variando la magnitud del campo magnético (B_2) en el tiempo, y la computadora registra y almacena la lectura del detector como una función del tiempo. Advierta que en este diseño, m es proporcional a B_2. Para observar esto, rescriba la ecuación 19.5 como $m = (qdB_1r/v)B_2$. Como la cantidad dentro del paréntesis es una constante, entonces $m \propto B_2$. Al variar B_2, los datos del detector en conexión con la computadora de alta velocidad nos permiten determinar las masas y números relativos (esto es, el porcentaje) de iones de cada masa. Independientemente del diseño, el resultado, que se llama *espectro de masas* (la cantidad de iones graficada en función de su masa), se muestra normalmente en una pantalla de osciloscopio o de computadora, y se digitaliza para fines de almacenamiento y análisis (▸figura 19.10). El siguiente ejemplo describe los cálculos en un espectrómetro de masas.



▲ **FIGURA 19.10 Espectrómetro de masas** Pantalla de un espectrómetro de masas, donde el número de moléculas se grafica en el eje vertical, y la masa molecular en el horizontal. La molécula que se analiza es de mioglobina, una proteína que almacena oxígeno en el tejido muscular. Para esa mioglobina, cada pico en la pantalla representa la masa de un fragmento ionizado. Esas gráficas, que son los *espectros de masas*, ayudan a determinar la composición y la estructura de moléculas grandes. El espectrómetro de masas también sirve para identificar cantidades diminutas en una mezcla compleja.

PHYSLET®

Exploración 27.3 Espectrómetro de masas

Ejemplo 19.3 ■ La masa de una molécula: un espectrómetro de masas

A una molécula de metano se le quita un electrón antes de que entre a un espectrómetro de masas, como el de la figura 19.9. Después de pasar por el selector de velocidad, el ion tiene una velocidad de 1.00×10^3 m/s. A continuación entra en la región del campo magnético principal, cuya intensidad es de 6.70×10^{-3} T. De ahí, describe una trayectoria circular y llega a 5.00 cm de la entrada al campo. Calcule la masa de esta molécula. (Ignore la masa del electrón que se removió.)

Razonamiento. La fuerza magnética que actúa sobre la molécula cargada da la fuerza centrípeta para la trayectoria en arco circular. Como la velocidad y el campo magnético forman ángulo recto, la fuerza magnética se determina con la ecuación 19.2. Si se aplica la segunda ley de Newton al movimiento circular, es posible determinar la masa de la molécula.

Solución. Primero se listan los datos.

Dado: $q = 1.60 \times 10^{-19}$ C (electrón)
$r = d/2 = (5.00\text{ cm})/2 = 0.0250$ m
$B_2 = 6.70 \times 10^{-3}$ T
$v = 1.00 \times 10^3$ m/s

Encuentre: m (masa de una molécula de metano)

La fuerza centrípeta sobre el ion ($F_c = mv^2/r$) la da la fuerza magnética ($F_m = qvB_2$):

$$\frac{mv^2}{r} = qvB_2$$

Se despeja m en esta ecuación y se sustituyen los valores numéricos:

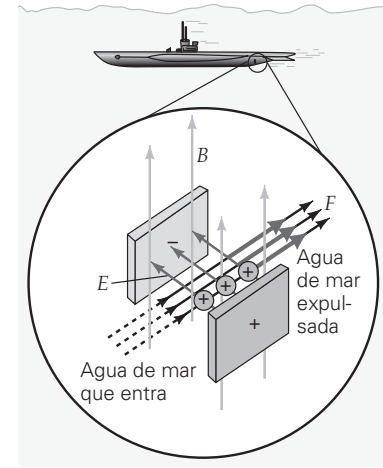
$$m = \frac{qB_2r}{v} = \frac{(1.60 \times 10^{-19}\text{ C})(6.70 \times 10^{-3}\text{ T})(0.0250\text{ m})}{1.00 \times 10^3\text{ m/s}} = 2.68 \times 10^{-26}\text{ kg}$$

Ejercicio de refuerzo. En este ejemplo, si el campo magnético entre las placas paralelas del selector de velocidad, que están a 10.0 mm de distancia, es 5.00×10^{-2} T. ¿Qué voltaje se debe aplicar a las placas?

Propulsión silenciosa: magnetohidrodinámica

Buscando métodos silenciosos y eficientes de propulsión en el mar, los ingenieros inventaron un sistema basado en la *magnetohidrodinámica*, el estudio de las interacciones de fluidos en movimiento con campos magnéticos. Este método se basa en la fuerza magnética y no requiere de partes móviles como motores, chumaceras o ejes. Para evitar la detección, la característica de "funcionamiento silencioso" tiene especial importancia en el diseño de los submarinos modernos.

En esencia, el agua de mar entra por el frente de la unidad y se expulsa a alta velocidad por atrás (▸figura 19.11). Un electroimán superconductor se usa para producir un gran campo magnético y al mismo tiempo, un generador eléctrico produce un alto voltaje de cd y envía una corriente por el agua de mar. [Recuerde que el agua de mar es un



▲ **FIGURA 19.11 Propulsión magnetohidrodinámica** En la propulsión magnetohidrodinámica, se hace pasar una corriente eléctrica por agua de mar, con voltaje de cd. Un campo magnético ejerce una fuerza sobre la corriente, empujando al agua hacia fuera del submarino o bote. La fuerza de reacción empuja al barco en dirección contraria.

buen conductor, porque tiene una elevada concentración de sodio (Na^+) y cloro (Cl^-).] La fuerza magnética sobre la corriente eléctrica impulsa al agua hacia atrás, y se expulsa un chorro de agua. De acuerdo con la tercera ley de Newton, una fuerza de reacción impulsa al submarino hacia delante, permitiéndole acelerar en silencio.

19.4 Fuerzas magnéticas sobre conductores con corriente eléctrica

OBJETIVOS: *a*) Calcular la fuerza magnética sobre un conductor con corriente eléctrica y el momento de torsión sobre un circuito con corriente y *b*) explicar el concepto del momento magnético de una espira o bobina.

Cualquier carga eléctrica que se mueve en un campo magnético experimenta una fuerza magnética. Como una corriente eléctrica se compone de cargas en movimiento, cabe esperar que un conductor con corriente eléctrica, cuando se coloca en un campo magnético, también esté sometido a esa fuerza. La suma de las fuerzas magnéticas individuales sobre las cargas en movimiento debe ser igual a la fuerza magnética total sobre el conductor.

Nota: recuerde que considerar una corriente en términos de cargas positivas sólo es una convención útil. En realidad, los electrones negativos son los portadores de la carga en la corriente eléctrica ordinaria.

La dirección de la "corriente convencional" supone que la corriente eléctrica en un conductor se debe al movimiento de cargas positivas, ▼figura 19.12.* La fuerza magnética está en su máximo porque $\theta = 90°$. En un momento t, una carga q_i se movería, en promedio, una longitud $L = vt$, donde v es la velocidad promedio de deriva. Como todas las cargas en movimiento (carga total $= \Sigma q_i$) que hay en este tramo de conductor están bajo la acción de una fuerza magnética en la misma dirección, la magnitud de la fuerza total sobre este tramo de alambre (ecuación 19.2) es

$$F = (\Sigma q_i)vB$$

Se sustituye v por L/t y se reordena, para obtener

$$F = (\Sigma q_i)\left(\frac{L}{t}\right)B = \left(\frac{\Sigma q_i}{t}\right)LB$$

PHYSLET®

Ilustración 27.4 Fuerzas magnéticas sobre corrientes

Pero $\Sigma q_i/t$ no es más que la corriente (I). En términos de la corriente del circuito, escribimos

$$F = ILB \quad \text{(\textit{válido sólo cuando la corriente y el campo eléctrico son perpendiculares})} \tag{19.6}$$

Este resultado da la fuerza máxima en el conductor. Si la corriente forma un ángulo θ con respecto a la dirección del campo, entonces la fuerza magnética sobre el mismo será menor. En general, la fuerza sobre un tramo de conductor con corriente, dentro de un campo magnético uniforme, es

$$F = ILB \operatorname{sen}\theta \quad \textit{fuerza magnética sobre un conductor con corriente} \tag{19.7}$$

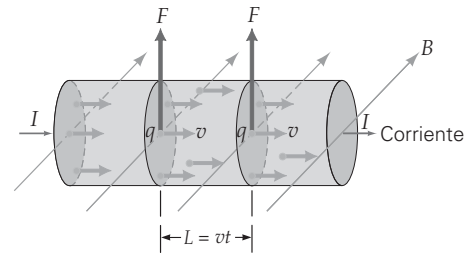
Si la corriente está en paralelo o en dirección opuesta al campo, la fuerza sobre el conductor es cero.

La dirección de la fuerza magnética sobre un conductor con corriente también se determina mediante una regla de la mano derecha. Como en el caso de las partículas cargadas individuales, hay varias versiones equivalentes de la **regla de la mano derecha para la fuerza sobre un conductor con corriente**, y la más común es la siguiente:

PHYSLET®

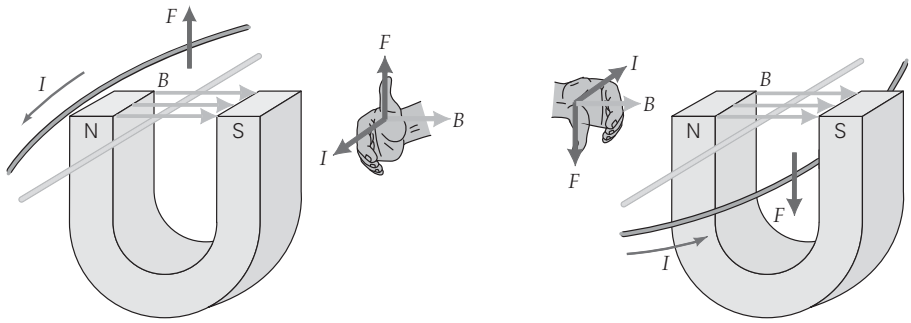
Exploración 27.1 Trace el mapa de las líneas de campo y determine fuerzas

> Cuando los dedos de la mano derecha apuntan en la dirección de la corriente convencional I, y después se curvan hacia el vector $\vec{\mathbf{B}}$, el pulgar extendido apunta en dirección de la fuerza magnética sobre el conductor (véase las figuras 19.13a y b).



▶ **FIGURA 19.12 Fuerza sobre un segmento de alambre** Los campos magnéticos ejercen fuerzas sobre conductores con corriente, porque la corriente eléctrica está formada por partículas cargadas en movimiento. Se indica la fuerza magnética máxima sobre un tramo de un alambre con corriente porque el ángulo entre la velocidad de la carga y el campo es de 90°.

*Use la regla de la fuerza de la mano derecha para que se convenza de que los electrones que viajan hacia la izquierda tendrán la misma dirección de la fuerza magnética.



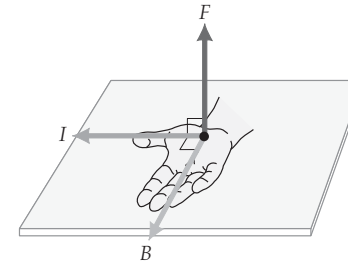
a) b)

◀ **FIGURA 19.13 Una regla de la mano derecha para conductores con corriente eléctrica** La dirección de la fuerza se obtiene apuntando los dedos de la mano derecha en dirección de la corriente convencional I, y luego doblándolos hacia $\vec{\mathbf{B}}$. El pulgar extendido apunta en dirección de $\vec{\mathbf{F}}$. La fuerza es ***a)*** hacia arriba y ***b)*** hacia abajo.

En la ▸figura 19.14 se presenta una alternativa equivalente:

> Cuando los dedos de la mano derecha se estiran en la dirección del campo magnético y el pulgar apunta en dirección de la corriente convencional *I* en el conductor, la palma de la mano derecha queda hacia la dirección de la fuerza magnética sobre el conductor.

Ambas reglas dan como resultado la misma dirección, porque son extensiones de las reglas de la mano derecha sobre cargas individuales. Para visualizar cómo interactúan magnéticamente dos conductores portadores de corriente eléctrica, considere el siguiente ejemplo.



▲ **FIGURA 19.14 Una regla alternativa de la mano derecha** Cuando los dedos de la mano derecha se extienden en dirección del campo magnético $\vec{\mathbf{B}}$ y el pulgar se apunta en la dirección de la corriente convencional I, la palma queda hacia la dirección de $\vec{\mathbf{F}}$. Compruebe que así se obtiene la misma dirección que con la regla equivalente descrita en la figura 19.13.

Ejemplo integrado 19.4 ■ Fuerzas magnéticas sobre conductores suspendidos en el ecuador

Como un conductor con corriente experimenta una fuerza magnética, podría ser factible suspender ese conductor en reposo sobre el suelo, usando el campo magnético terrestre. *a*) Un conductor largo y recto está en el ecuador. ¿En qué dirección debe ir la corriente en el conductor para lograr esto? 1) Hacia arriba, 2) hacia abajo, 3) hacia el este o 4) hacia el oeste. *b*) Calcule la corriente necesaria para suspender el conductor, suponiendo que el campo magnético de la Tierra es de 0.40 G en el ecuador, que el conductor mide 1.0 m de longitud, y que su masa es de 30 g.

a) Razonamiento conceptual. La dirección requerida en la fuerza es hacia arriba, porque la gravedad actúa hacia abajo (▸figura 19.15). El campo magnético terrestre en el ecuador es paralelo al suelo, y apunta al norte. Como la fuerza magnética es perpendicular a la corriente y al campo magnético a la vez, no puede dirigirse hacia arriba ni hacia abajo, lo que elimina las dos primeras opciones. Para decidir entre el este y el oeste, simplemente se elige uno de los casos y se ve si funciona o no. Suponga que la corriente es hacia el oeste. Si se aplica la regla de la mano derecha para la fuerza, se ve que la fuerza actúa hacia abajo. Como eso no es correcto, entonces la única respuesta que queda es la 3: hacia el este. Compruebe que esta opción es correcta aplicando directamente la regla de la mano derecha.

b) Razonamiento cuantitativo y solución. Se conoce la masa del conductor, y, por lo tanto, es posible calcular su peso. Éste debe ser igual y opuesto a la fuerza magnética. La corriente y el campo forman ángulo recto entre sí; así que la fuerza magnética se determina con la ecuación 19.6 y, a partir de esta información, se puede calcular la corriente.

Primero se listan los datos (y se convierten a unidades SI al mismo tiempo):

Dado: $m = 30\text{ g} = 3.0 \times 10^{-2}\text{ kg}$
$B = (0.40\text{ G})(10^{-4}\text{ T/G}) = 4.0 \times 10^{-5}\text{ T}$
$L = 1.0\text{ m}$

Encuentre: I (la corriente requerida para suspender el conductor)

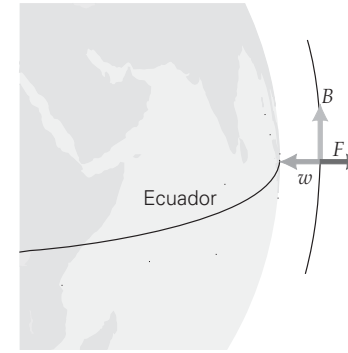
El peso del conductor es $w = mg = (3.0 \times 10^{-2}\text{kg})(9.8\text{ m/s}^2) = 0.29\text{ N}$. Con el conductor suspendido, esto debe ser igual a la fuerza magnética, es decir,

$$w = ILB$$

Por consiguiente,

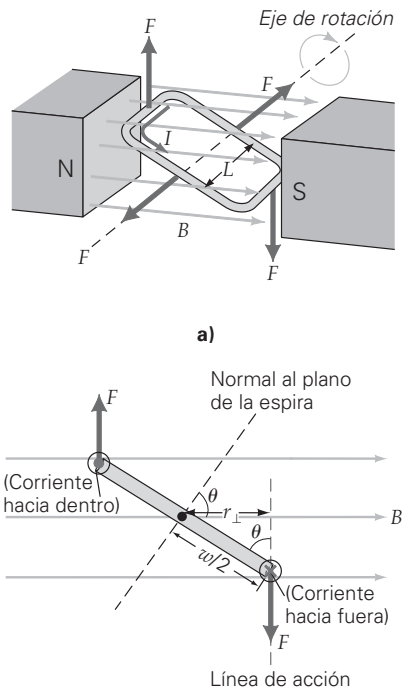
$$I = \frac{w}{LB} = \frac{0.29\text{ N}}{(1.0\text{ m})(4.0 \times 10^{-5}\text{ T})} = 7.4 \times 10^3\text{ A}$$

Es una corriente enorme, por lo que suspender el conductor de esta forma no es una idea práctica.



▲ **FIGURA 19.15 ¿Desafío de la gravedad con un campo magnético?** Cerca del ecuador terrestre existe la posibilidad teórica de anular el tirón de la gravedad con una fuerza magnética hacia arriba sobre un conductor. ¿Cuál debe ser la dirección y la magnitud de la corriente? (Véase el Ejemplo integrado 19.4.)

(continúa en la siguiente página)



▲ **FIGURA 19.16** **Fuerza y momento de torsión sobre una espira giratoria con corriente eléctrica** ***a)*** Una espira rectangular con corriente eléctrica, orientada dentro de un campo magnético como se observa aquí, está bajo la acción de una fuerza en cada uno de sus lados. Sólo las fuerzas sobre los lados paralelos al eje de rotación producen un momento de torsión que hace girar a la espira. ***b)*** En la vista lateral se presenta la geometría para determinar el momento de torsión. (Para conocer los detalles, véase el texto.)

Nota: una *bobina* consiste en *N* espiras del mismo tamaño y por todas ellas pasa la misma corriente *I* en serie.

Ejercicio de refuerzo. *a*) Con la regla de la mano derecha demuestre que suspender un conductor no funcionaría en el polo sur ni en el polo norte terrestres. *b*) ¿Cuál sería la masa que debería tener el conductor para que quedara suspendido al conducir una corriente más razonable de 10 A? ¿Parece una masa razonable para un tramo de 1 m de longitud?

Momento de torsión sobre una espira con corriente eléctrica

Otro uso importante del magnetismo consiste en ejercer fuerzas y momentos de torsión sobre espiras conductoras de corriente (la espira rectangular de la ◂figura 19.16a). Suponga que la espira tiene rotación libre alrededor de un eje que pasa por dos lados opuestos. No hay fuerza ni momento de torsión netos que se deban a las fuerzas que actúan en los lados pivoteados de la espira. Las fuerzas sobre ellos son iguales y opuestas, y están en el plano de la espira, por lo que no producen momento de torsión ni fuerza netos. Las fuerzas iguales y opuestas sobre los dos lados de la espira que son *paralelos* al eje de rotación, aunque no crean una fuerza neta, sí producen un momento de torsión neto (véase el capítulo 8).

Para visualizar lo anterior, examine la figura 19.16b. La magnitud de la fuerza magnética F sobre cada lado no pivoteado (longitud L) está dada por $F = ILB$. El momento de torsión producido por una fuerza (sección 8.2) es $\tau = r_\perp F$, donde $r_\perp$ es la distancia perpendicular (el brazo de palanca) del eje de rotación a la línea de acción de la fuerza. De acuerdo con la figura 19.16b, $r_\perp \frac{1}{2} w \operatorname{sen}\theta$, donde w es el ancho de la espira y θ es el ángulo que forman la normal al plano de la espira y la dirección del campo magnético. El momento de torsión neto τ se debe a los momentos de torsión de ambas fuerzas y es la suma de los dos, o el doble de uno de ellos (¿por qué?)

$$\begin{aligned}\tau &= 2r_\perp F = 2\left(\tfrac{1}{2}w \operatorname{sen}\theta\right)F = wF \operatorname{sen}\theta \\ &= w(ILB) \operatorname{sen}\theta\end{aligned}$$

Entonces, ya que wL es el área (A) de la espira, se puede expresar la magnitud del momento de torsión sobre una espira única pivoteada y con corriente, como sigue:

$$\tau = IAB \operatorname{sen}\theta \quad \textit{momento de torsión sobre una espira con corriente} \tag{19.8}$$

La ecuación 19.8 es válida para una espira plana de *cualquier* forma y área. Una *bobina* está formada por N espiras, o vueltas, conectadas en serie (donde $N = 2, 3, \ldots$). Así, en una bobina, el momento de torsión es N veces el de una espira (ya que, en cada una, la corriente es la misma). Por lo tanto, el momento de torsión en una bobina es

$$\tau = NIAB \operatorname{sen}\theta \quad \textit{momento de torsión sobre una espira con corriente} \tag{19.9}$$

La magnitud del vector **momento magnético** de una bobina, m, se define como

$$m = NIA \quad \textit{momento magnético de una bobina} \tag{19.10}$$

(Las unidades SI del momento magnético son: ampere · metro^2, o A · m^2)

La dirección del vector momento magnético $\vec{\mathbf{m}}$ se determina doblando en círculo los dedos de la mano derecha, en dirección de la corriente (convencional). El pulgar apunta en dirección del vector. Note que $\vec{\mathbf{m}}$ siempre es perpendicular al plano de la bobina (▸figura 19.17a). La ecuación 19.10 se puede replantear en términos del momento magnético:

$$\tau = mB \operatorname{sen}\theta \tag{19.11}$$

El momento de torsión magnético tiende a alinear al vector momento magnético ($\vec{\mathbf{m}}$) con la dirección del campo magnético. Observe que una espira o bobina en un campo magnético está sujeta a un momento de torsión hasta que $\operatorname{sen}\theta = 0$ (es decir, $\theta = 0°$), y en ese punto las fuerzas que producen el momento de torsión son paralelas al plano de la espira (véase la figura 19.17b). Esta situación se da cuando el plano de la espira es perpendicular al campo. Si la espira parte del reposo, de tal manera que su momento magnético forma cierto ángulo con el campo magnético, sufrirá una aceleración angular que la hará girar hasta la posición en que el ángulo es cero. La inercia rotacional la hará pasar del punto de equilibrio (ángulo cero, figura 19.17c) hacia el otro lado. Ahí, el momento de torsión desacelerará la espira, la detendrá y luego la volverá a acelerar de regreso hacia el equilibrio. El momento de torsión sobre la espira es de *restitución,* y tiende a hacer que el momento magnético oscile respecto a la dirección del campo, en forma muy parecida a la de una brújula que se va deteniendo hasta que apunta al norte.

Ejemplo 19.5 ■ Momento magnético: ¿causa el giro?

Un técnico de laboratorio forma una bobina circular con 100 vueltas de alambre delgado de cobre, cuya resistencia es de 0.50 Ω. El diámetro de la bobina es de 10 cm, y está conectada con una batería de 6.0 V. *a*) Determine el momento magnético (magnitud) de la bobina. *b*) Determine el momento de torsión (magnitud) máximo en la bobina, si se coloca entre los polos de un imán, donde la intensidad de campo es de 0.40 T.

Razonamiento. El momento magnético incluye la cantidad de vueltas y el área de la bobina, y la corriente en los conductores. Para calcular la corriente se utiliza la ley de Ohm. El momento de torsión máximo es cuando el ángulo entre el vector momento magnético y el campo B es de 90°, de acuerdo con la ecuación 19.11.

Solución. Se listan los datos; el radio del círculo se expresa en unidades SI:

Dado: $N = 100$ vueltas
$r = d/2 = 5.0\text{ cm} = 5.0 \times 10^{-2}\text{ m}$
$R = 0.50\ \Omega$
$V = 6.0\text{ V}$

Encuentre: *a*) m (momento magnético de la bobina)
b) τ (momento de torsión máximo sobre la bobina)

a) El momento magnético se calcula con la ecuación 19.10, el área y la corriente:

$$A = \pi r^2 = (3.14)(5.0 \times 10^{-2}\text{ m})^2 = 7.9 \times 10^{-3}\text{ m}^2$$

e

$$I = \frac{V}{R} = \frac{6.0\text{ V}}{0.50\ \Omega} = 12\text{ A}$$

Por consiguiente, la magnitud del momento magnético es

$$m = NIA = (100)(12\text{ A})(7.9 \times 10^{-3}\text{ m}^2) = 9.5\text{ A}\cdot\text{m}^2$$

b) La magnitud del momento de torsión máximo (utilizando $\theta = 90°$, en la ecuación 19.11) es:

$$\tau = mB\,\text{sen}\,\theta = (9.5\text{ A}\cdot\text{m}^2)(0.40\text{ T})(\text{sen }90°) = 3.8\text{ m}\cdot\text{N}$$

Ejercicio de refuerzo. En este ejemplo, *a*) demuestre que si se gira la bobina de tal manera que su vector momento magnético quede a 45°, el momento de torsión *no* sería la mitad del momento de torsión máximo. *b*) ¿A qué ángulo el momento de torsión sería la mitad del máximo?

19.5 Aplicaciones: conductores con corriente en campos magnéticos

OBJETIVO: Explicar el funcionamiento de diversos instrumentos cuyas funciones dependen de interacciones electromagnéticas entre corrientes y campos magnéticos.

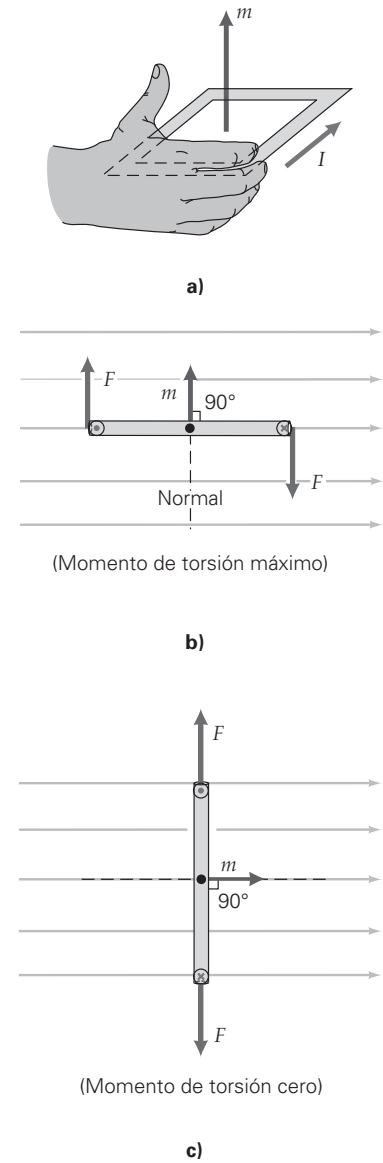
Con los principios de las interacciones electromagnéticas, se comprenderá el funcionamiento de algunos dispositivos que se incluyen en esta sección.

El galvanómetro: base del amperímetro y el voltímetro

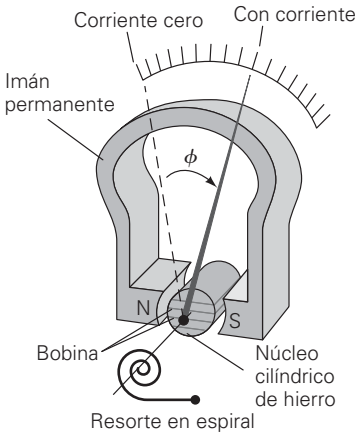
Recuerde que los amperímetros y voltímetros utilizan un *galvanómetro* como parte esencial de su diseño.* Ahora explicaremos cómo funciona. En la ▼figura 19.18a, un galvanómetro está formado por una bobina de espiras de alambre sobre un núcleo de hierro, que gira entre los polos de un imán permanente. Cuando pasa una corriente por la bobina, se ejerce un momento de torsión. Un pequeño resorte produce el momento de torsión contrario y, cuando los dos momentos se anulan (al llegar al equilibrio), una aguja indica un ángulo de desviación ϕ que es proporcional a la corriente en la bobina.

Surge un problema cuando el campo magnético del galvanómetro no tiene la forma correcta. Si la bobina girara de su posición de momento de torsión máximo ($\theta = 90°$), el momento de torsión sería menor, y la desviación ϕ de la aguja *no* sería proporcional a la corriente. Para evitarlo, las caras polares deben ser curvas, que abarquen a la bobina devanada sobre un núcleo cilíndrico de hierro. El núcleo concentra las líneas de campo, y $\vec{\mathbf{B}}$ siempre es perpendicular al lado no pivoteado de la bobina (figura 19.18b). Con este diseño, el ángulo de desviación es proporcional a la corriente que pasa por el galvanómetro ($\phi \propto I$), como se requiere.

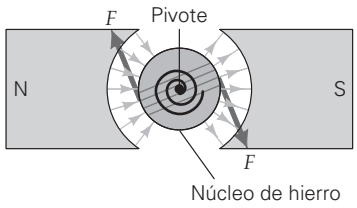
*Aun cuando muchos voltímetros y amperímetros son digitales, es útil comprender cómo sus versiones mecánicas emplean fuerzas magnéticas para hacer mediciones eléctricas.



▲ **FIGURA 19.17 Momento magnético de una espira con corriente** ***a)*** Con la regla de la mano derecha se determina la dirección del vector momento magnético de la espira, $\vec{\mathbf{m}}$. Los dedos envuelven la espira en dirección de la corriente, y el pulgar señala la dirección de m. ***b)*** Condición para momento de torsión máximo. ***c)*** Condición de momento de torsión cero. Si la espira gira libremente, su vector momento magnético tenderá a alinearse con la dirección del campo magnético externo.



a)



b)

▲ **FIGURA 19.18** El galvanómetro ***a)*** La desviación (ϕ) de la aguja, respecto a su posición cuando la corriente es cero, es proporcional a la corriente que pasa por la bobina. En consecuencia, un galvanómetro puede detectar y medir corrientes. ***b)*** Se usa un imán con zapatas polares curvas, para que las líneas de campo siempre sean perpendiculares a la superficie del núcleo, y el momento de torsión no varíe en función de ϕ.

El motor de corriente directa (cd)

Un motor eléctrico es un dispositivo que convierte energía eléctrica en energía mecánica. Esa conversión ocurre durante el movimiento de la aguja de un galvanómetro. Sin embargo, no se considera que un galvanómetro sea un motor, porque un **motor de cd** práctico debe girar continuamente para entregar energía en forma continua.

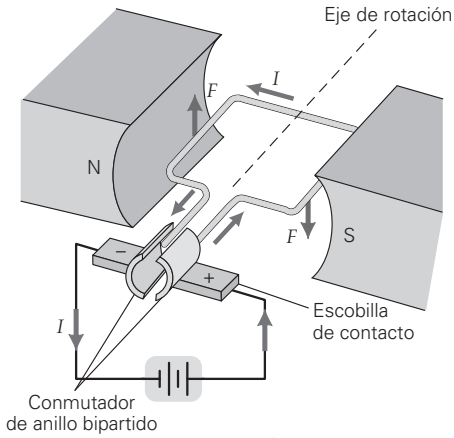
Una bobina con corriente, pivoteada y dentro de un campo magnético girará, pero sólo media vuelta. Cuando el campo magnético y el momento magnético de la bobina se alinean (sen $\theta = 0$), el momento de torsión sobre la bobina es cero, y esta última se encontrará en equilibrio.

Para obtener una rotación continua, se invierte la corriente cada medio giro, para que se inviertan las fuerzas productoras del momento de torsión. Esto se logra mediante un *conmutador de anillo bipartido,* que consiste en un arreglo de dos medios anillos metálicos, aislados entre sí (▼figura 19.19a). Los extremos del alambre de la bobina están fijos a los medios anillos, y giran juntos. La corriente se suministra a la bobina a través del conmutador, mediante escobillas de contacto. A continuación, con medio anillo eléctricamente positivo y el otro medio anillo negativo, la bobina y los medios anillos giran. Cuando han descrito media vuelta, los medios anillos entran en contacto con las escobillas opuestas. Como su polaridad está invertida, la corriente en la bobina también tiene la dirección opuesta. Esta acción invierte las direcciones de las fuerzas magnéticas y mantiene al momento de torsión en el mismo sentido (figura 19.19b). Aun cuando el momento de torsión sea cero en la posición de equilibrio, la bobina está en equilibrio inestable y tiene suficiente el movimiento de rotación para rebasar el punto de equilibrio, después del cual aparece el momento de torsión y la bobina gira otro medio ciclo. El proceso se repite de forma continua. En un motor real, al eje giratorio se le llama *armadura.*

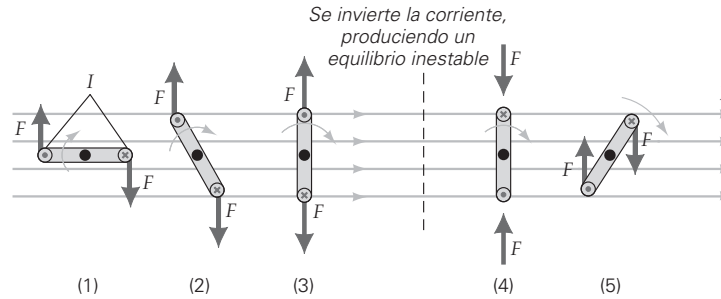
La báscula electrónica

Las básculas tradicionales de laboratorio miden masas equilibrando el peso de una masa desconocida con el de una masa conocida. Las nuevas básculas electrónicas digitales (▸figura 19.20a) funcionan con un principio diferente. En su diseño sigue habiendo una barra suspendida con un platillo en uno de sus extremos, donde se coloca el objeto por pesar, pero no se necesitan masas conocidas. La fuerza equilibrante hacia abajo es suministrada por bobinas conductoras de corriente, en el campo de un imán permanente (figura 19.20b). Las bobinas se mueven hacia arriba y hacia abajo dentro del espacio libre cilíndrico del imán, y la fuerza hacia abajo es proporcional a la corriente en las bobinas. El peso del objeto se determina a partir de la corriente que pasa por la bobina, que produce una fuerza suficiente para equilibrar la barra. La báscula determina la masa del objeto utilizando el valor local para g, en la fórmula $m = w/g$.

▼ **FIGURA 19.19** Un motor de cd ***a)*** Un conmutador de anillo bipartido invierte la polaridad y la dirección de la corriente cada medio ciclo, de manera que la bobina gira en forma continua. ***b)*** Vista desde el extremo, que muestra las fuerzas sobre la bobina y su orientación durante un medio ciclo. [Para simplificar, se muestra una sola espira, pero la bobina tiene muchas (N).] Observe la inversión de la corriente (notación de puntos y cruces) entre las situaciones (3) y (4).

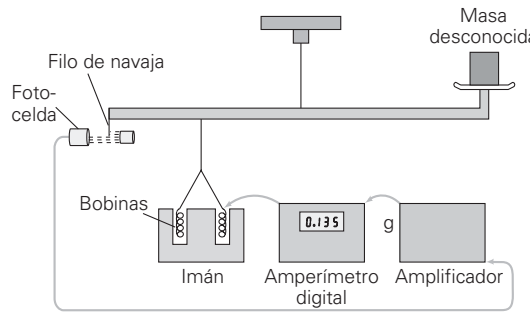


a)



b) Vista lateral de la espira, mostrando una secuencia de rotación en el sentido de las manecillas del reloj

a)



b)

◀ **FIGURA 19.20 Báscula electrónica** ***a)*** Una báscula electrónica digital. ***b)*** Diagrama del principio de una báscula electrónica. La fuerza de equilibrio es suministrada mediante electromagnetismo.

La corriente necesaria para producir el equilibrio se controla de forma automática mediante fotoceldas y una bobina electrónica de retroalimentación. Cuando la barra está en equilibrio y en posición horizontal, una obstrucción en forma de navaja corta una parte de la luz de una fuente, que incide sobre un "ojo eléctrico" fotosensible, cuya resistencia depende de la cantidad de luz que recibe. Esta resistencia controla la corriente que manda un amplificador por la bobina. Si la barra se inclina de manera que el filo de la navaja sube y a la fotocelda llega más luz, aumenta la corriente contrarrestar la inclinación. Así, la barra se mantiene electrónicamente casi en equilibrio horizontal. La corriente que mantiene la barra en posición horizontal se indica en un amperímetro digital, calibrado en gramos o miligramos, y no en amperes.

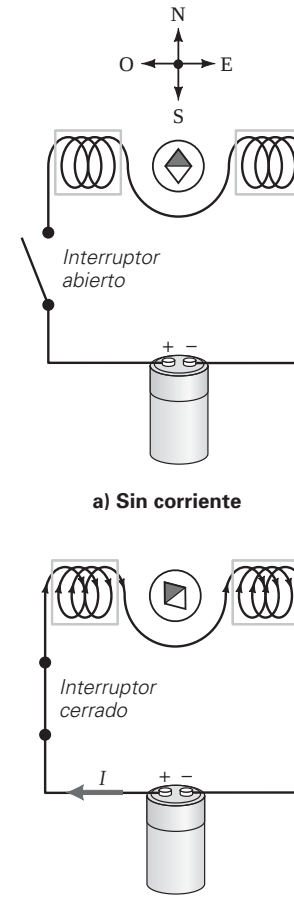
19.6 Electromagnetismo: la fuente de los campos magnéticos

OBJETIVOS: *a*) Comprender la producción de un campo magnético por corrientes eléctricas, *b*) calcular la intensidad del campo magnético en casos sencillos y *c*) aplicar la regla de la mano derecha para determinar la dirección del campo magnético a partir de la dirección de la corriente que lo produce.

Los fenómenos eléctricos y magnéticos, se relacionan en forma estrecha y fundamental. La fuerza *magnética* sobre una partícula depende de su carga *eléctrica*. Pero, ¿de dónde proviene el campo magnético? El físico danés Hans Christian Oersted contestó esta pregunta en 1820, cuando encontró que las *corrientes eléctricas producen campos magnéticos*. Sus estudios marcaron el inicio de la disciplina llamada **electromagnetismo**, que estudia la relación entre corrientes eléctricas y campos magnéticos.

Oersted observó primero que una corriente eléctrica es capaz de desviar la aguja de una brújula. Esta propiedad se puede demostrar con un dispositivo como el de la ▸figura 19.21. Cuando el circuito está abierto y no pasa corriente, la brújula apunta, en dirección al norte. Sin embargo, cuando se cierra el interruptor y hay corriente en el circuito, la brújula apunta a otra dirección, indicando que existe otro campo magnético que afecta a la aguja.

El desarrollo de ecuaciones para determinar el campo magnético que generan diversas configuraciones de conductores de corriente requiere de matemáticas más complicadas. Así, en esta sección sólo se presentarán los resultados para los campos magnéticos en varias configuraciones comunes de corriente.

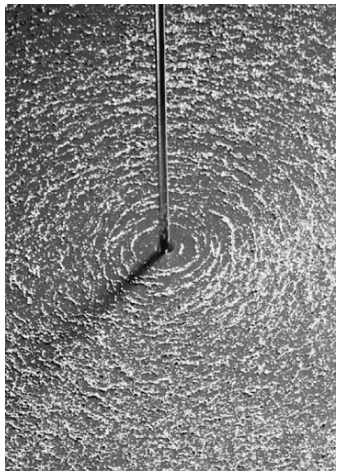


▲ **FIGURA 19.21 Corriente eléctrica y campo magnético** ***a)*** Sin corriente en el alambre, la brújula apunta hacia el norte. ***b)*** Cuando pasa corriente por el alambre, la brújula se desvía e indica la presencia de un campo magnético adicional, sobrepuesto al de la Tierra. En este caso, la intensidad del campo adicional es aproximadamente igual a la del campo terrestre. ¿Por qué se afirma esto?

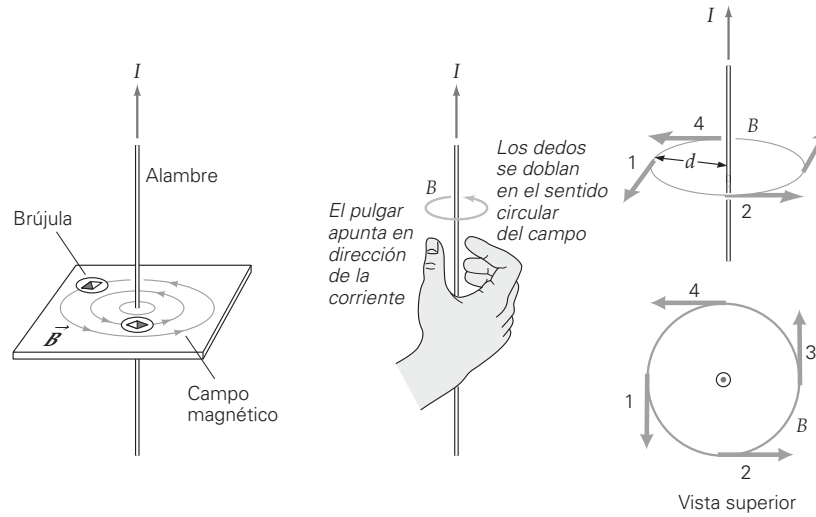
Campo magnético cerca de un conductor largo y recto con corriente

A una distancia perpendicular d desde un conductor largo y recto con corriente I (▾figura 19.22), la magnitud de $\vec{\mathbf{B}}$ se determina mediante

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi d} \quad \textit{campo magnético debido a un alambre largo y recto} \tag{19.12}$$



a)



b)

▲ **FIGURA 19.22** Campo magnético en torno a un conductor largo recto con corriente ***a)*** Las líneas de campo forman círculos concéntricos en torno al conductor, como revela esta figura que forman las limaduras de hierro. ***b)*** El sentido circular de las líneas de campo se determina con la regla de la mano derecha, y el vector campo magnético es tangente a la línea circular de campo en cualquier punto.

en donde $\mu_o = 4\pi \times 10^{-7}\ \mathrm{T \cdot m/A}$ es una constante de proporcionalidad llamada **permeabilidad magnética del espacio libre**. Sólo para conductores largos y rectos, las líneas de campo son círculos cerrados con centro en el conductor (figura 19.22a). Observe en la figura 19.22b que la dirección de $\vec{\mathbf{B}}$, que se debe a una corriente en un conductor largo y recto, está dada por la **regla de la mano derecha**:

> Si se empuña un conductor largo y recto con corriente con la mano derecha, con el pulgar extendido apuntando en la dirección de la corriente (*I*), los demás dedos doblados indican el sentido circular de las líneas del campo magnético.

Ejemplo 19.6 ■ Campos comunes: campo magnético de un conductor con corriente

La corriente doméstica máxima en un conductor es, de 15 A. Si esta corriente pasa por un conductor largo y recto, y su dirección es de oeste a este (◂figura 19.23), ¿cuáles son la magnitud y la dirección del campo magnético que produce la corriente a 1.0 cm por debajo del alambre?

Razonamiento. Para calcular la magnitud del campo, se usa la ecuación 19.12. La dirección del campo se establece con la regla de la mano derecha.

Solución. Se listan los datos:

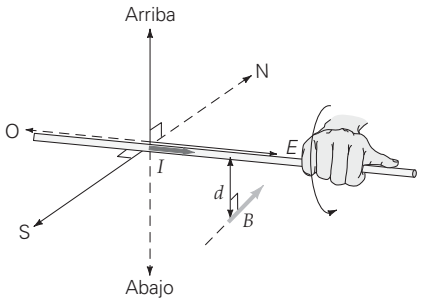
Dado: $I = 15\ \mathrm{A}$ ***Encuentre:*** $\vec{\mathbf{B}}$ (magnitud y dirección)
$d = 1.0\ \mathrm{cm} = 0.010\ \mathrm{m}$

De acuerdo con la ecuación 19.12, la magnitud del campo en el punto localizado a 1.0 cm directamente por debajo del conductor es

$$B = \frac{\mu_o I}{2\pi d} = \frac{(4\pi \times 10^{-7}\ \mathrm{T \cdot m/A})(15\ \mathrm{A})}{2\pi(0.010\ \mathrm{m})} = 3.0 \times 10^{-4}\ \mathrm{T}$$

De acuerdo con la regla de la mano derecha (figura 19.23), la dirección del campo en ese punto es hacia el norte.

Ejercicio de refuerzo. *a*) En este ejemplo, ¿cuál es la dirección del campo magnético en un punto localizado 5 cm arriba del conductor? *b*) ¿Qué corriente se necesita para producir en ese punto un campo magnético con la mitad de la intensidad del campo en el ejemplo?

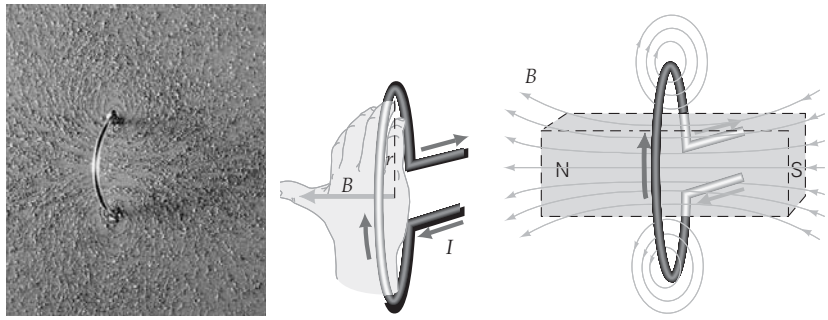


▲ **FIGURA 19.23** Campo magnético Determinación de la magnitud y dirección del campo magnético producido por un conductor largo y recto que lleva corriente. (Véase el ejemplo 19.6.)

Campo magnético en el centro de una espira circular con corriente eléctrica

En el *centro* de una bobina circular formada por *N* vueltas, cada una con radio *r* y conduciendo la misma corriente *I* (la ▸figura 19.24a muestra sólo una de esas espiras), la magnitud de $\vec{\mathbf{B}}$ es

$$B = \frac{\mu_o N I}{2r} \quad \textit{campo magnético en el centro de una bobina circular de N vueltas} \qquad (19.13)$$



◀ **FIGURA 19.24 Campo magnético provocado por una espira circular con corriente eléctrica** ***a)*** Figura que forman las limaduras de hierro para una espira con corriente. Observe que el campo magnético en el centro de la espira es perpendicular al plano de ésta. ***b)*** La dirección del campo en el área encerrada por la espira se obtiene mediante la regla de la mano derecha. Con los dedos abarcando la espira en dirección de la corriente convencional, el pulgar indica la dirección de $\vec{\mathbf{B}}$ en el plano de la espira. ***c)*** El campo magnético general de una espira circular con corriente es similar al de un imán recto.

En este caso (y en todas las configuraciones donde la corriente describe un círculo, como en los solenoides, que se describirán más adelante), es conveniente determinar la dirección del campo magnético aplicando una regla de la mano derecha que es un poco distinta, pero equivalente, a la de los conductores rectos:

> Si se coloca la mano en una espira circular de conductores con corriente, de tal forma que los dedos se doblen en la dirección de la corriente, la dirección del campo magnético dentro del área circular formada por la espira se determina con la dirección en que apunta el pulgar extendido (véase la figura 19.24b).

Ilustración 28.1 *Campo de conductores y espiras*

En todos los casos, las líneas magnéticas forman circuitos cerrados, cuya dirección se determina mediante la regla de la mano derecha. Sin embargo, recuerde que la dirección de $\vec{\mathbf{B}}$ es tangente a la línea de campo y, por lo tanto, depende de su ubicación (figura 19.24c). Observe que el campo general de la espira es similar geométricamente al de un imán recto. Se hablará más de esto posteriormente.

Campo magnético en un solenoide con corriente

Un *solenoide* se forma devanando un alambre largo en forma de una bobina apretada, o hélice, con muchas espiras o vueltas circulares, como se ve en la ▼figura 19.25. Si el radio del solenoide es pequeño en comparación con su longitud (L), el campo magnético en el interior es paralelo al eje longitudinal del solenoide, y su magnitud es constante. Cuanto más largo es el solenoide, más uniforme será el campo interno. Observe cómo el campo del solenoide (figura 19.25) se parece mucho al de un imán recto permanente.

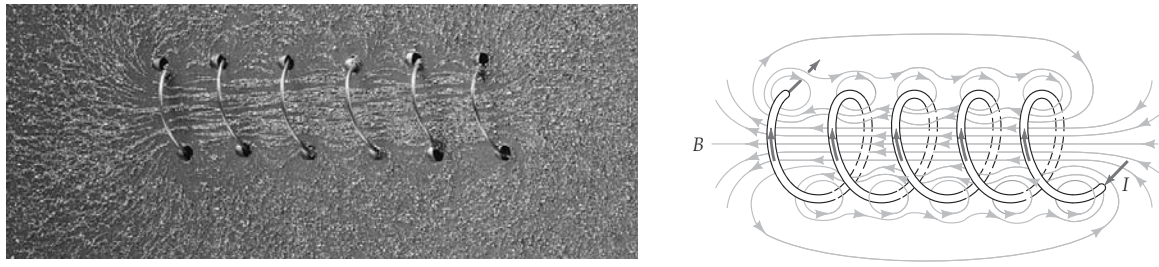
Como es habitual, la dirección del campo en el interior del solenoide se determina con la regla de la mano derecha con geometría circular. Si el solenoide tiene N vueltas y cada una conduce una corriente I, la magnitud del campo eléctrico cerca de su centro es

$$B = \frac{\mu_o N I}{L} \qquad \textit{campo magnético cerca del centro de un solenoide} \qquad (19.14)$$

Hay que advertir que el campo del solenoide depende de qué tan próximas estén las vueltas del conductor; en otras palabras, depende de cuánta densidad tengan (note la relación N/L). Por lo tanto, n se define como $n = N/L$, para hacer una cuantificación. Sus unidades son vueltas por metro, y a esto se le llama *densidad lineal de vueltas*. En estos términos, la ecuación 19.14 se expresa en ocasiones en la forma $B = \mu_o n I$.

Para ver por qué el solenoide resulta más conveniente para aplicaciones magnéticas que requieren de un gran campo magnético, considere el siguiente ejemplo.

▼ **FIGURA 19.25 Campo magnético de un solenoide** ***a)*** El campo magnético de un solenoide con corriente eléctrica es bastante uniforme cerca del eje central, como se ve en esta figura que forman las limaduras de hierro. ***b)*** La dirección del campo en el interior se determina aplicando la regla de la mano derecha a cualquiera de las espiras. Observe la semejanza con el campo cerca de un imán recto.



Ejemplo 19.7 ■ Comparación entre un alambre y un solenoide: concentración del campo magnético

Un solenoide tiene 0.30 m de longitud, con 300 vueltas, y conduce una corriente de 15.0 A. *a*) ¿Cuál es la magnitud del campo magnético en el centro de este solenoide? *b*) Compare su resultado con el campo cerca del conductor único del ejemplo 19.6.

Razonamiento. El campo B depende de la cantidad de vueltas (N), de la longitud del solenoide (L) y de la corriente (I). Ésta es una aplicación directa de la ecuación 19.14.

Solución.

Dado: $I = 15.0$ A, $N = 300$ vueltas, $L = 0.30$ m

Encuentre: *a*) B (la magnitud del campo magnético cerca del centro del solenoide) *b*) Compare la respuesta con el ejemplo 19.6, para un conductor largo y recto

a) Según la ecuación 19.14,

$$B = \frac{\mu_o N I}{L} = \frac{(4\pi \times 10^{-7}\ \mathrm{T \cdot m/A})(300)(15.0\ \mathrm{A})}{0.30\ \mathrm{m}} = 6\pi \times 10^{-3}\ \mathrm{T} \approx 18.8\ \mathrm{mT}$$

b) Observe que es unas *60 veces mayor* que el campo cercano al alambre del ejemplo 19.6. Enrollar muchas espiras muy juntas en forma de hélice incrementa el campo y permite el paso de la misma corriente. La razón es que el campo del solenoide es igual a la suma vectorial de los campos de 300 vueltas, las direcciones individuales del campo magnético son aproximadamente iguales.

Ejercicio de refuerzo. Si la corriente se redujera a 1.0 A, y el solenoide se acortara a 0.10 m, ¿cuántas vueltas se necesitarían para crear el mismo campo magnético?

En el siguiente Ejemplo integrado intervienen los aspectos del electromagnetismo: fuerzas sobre corrientes eléctricas y la producción de campos magnéticos por corrientes eléctricas. Estúdielo, en especial el uso de la regla de la mano derecha.

Ejemplo integrado 19.8 ■ Atracción o repulsión: fuerza magnética entre dos conductores paralelos

Dos conductores largos y paralelos tienen corrientes en la misma dirección, como se ilustra en la ◂figura 19.26a. *a*) La fuerza magnética entre esos conductores ¿es de 1) atracción o 2) de repulsión? Realice un esquema que muestre cómo llegó al resultado. *b*) Si por cada conductor pasa una corriente de 5.0 A, si tienen longitudes de 50 cm y la distancia entre ellos es de 3.0 mm, calcule la magnitud de la fuerza sobre cada conductor.

a) Razonamiento conceptual. Se elige un conductor y se determina la dirección del campo magnético que produce en el otro conductor. En la figura 19.26b se eligió el conductor 1. El campo que produce la corriente en el conductor 1 es el campo en el que se coloca el conductor 2. Se aplica la regla de la mano derecha en el conductor 2 y se determina la dirección de la fuerza sobre éste. El resultado (figura 19.26c) es una fuerza de atracción, por lo que la respuesta 1 es la correcta. Demuestre que el conductor 2 ejerce una fuerza de atracción sobre el conductor 1, según la tercera ley de Newton.

b) Razonamiento cuantitativo y solución. Para calcular la intensidad del campo magnético producido por el conductor 1, se usará la ecuación 19.12. Como el campo magnético forma ángulo recto con la corriente en el conductor 2, la magnitud de la fuerza sobre ese conductor es ILB. Los símbolos aparecen en la figura 19.26. Se listan los datos y se hace la conversión a unidades SI.

Dado: $I_1 = I_2 = 5.0$ A, $d = 3.0$ mm $= 3.0 \times 10^{-3}$ m, $L = 50$ cm $= 5.0 \times 10^{-1}$ m

Encuentre: F (la magnitud de la fuerza entre los conductores)

El campo magnético que se debe a I_1 en el conductor 2 es

$$B_1 = \frac{\mu_o I_1}{2\pi d} = \frac{(4\pi \times 10^{-7}\ \mathrm{T \cdot m/A})(5.0\ \mathrm{A})}{2\pi(3.0 \times 10^{-3}\ \mathrm{m})} = 3.3 \times 10^{-4}\ \mathrm{T}$$

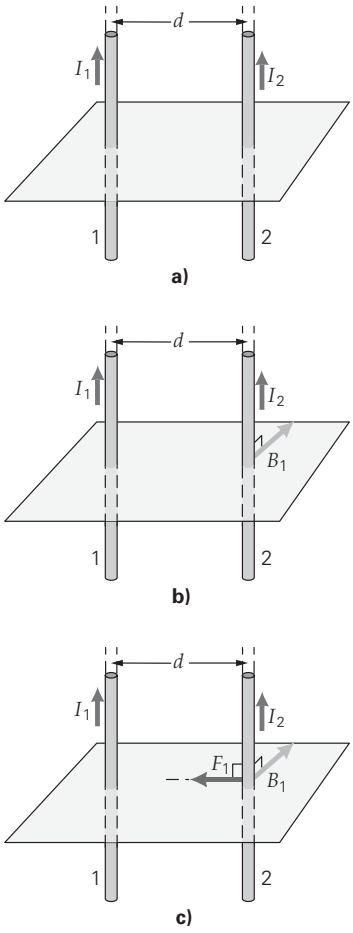
La magnitud de la fuerza magnética sobre el conductor 2 es

$$F_2 = I_2 L B_1 = (5.0\ \mathrm{A})(0.50\ \mathrm{m})(3.3 \times 10^{-4}\ \mathrm{T}) = 8.3 \times 10^{-4}\ \mathrm{N}$$

Ejercicio de refuerzo. *a*) En este ejemplo, determine la dirección de la fuerza, si se invierte la dirección de la corriente en cualquiera de los dos. *b*) Si la magnitud de la fuerza entre los conductores permanece igual que en este ejemplo, pero se triplica la corriente, ¿qué tan separados están los conductores?

PHYSLET®

Ilustración 28.2 Fuerzas entre conductores



▲ **FIGURA 19.26** Interacción mutua entre conductores paralelos con corriente eléctrica ***a)*** Dos conductores paralelos llevan corriente en la misma dirección. ***b)*** El conductor 1 forma un campo magnético por donde pasa el conductor 2. ***c)*** El conductor 2 es atraído hacia el alambre 1 por una fuerza. (Para más detalles, véase el Ejemplo integrado 19.8.)

La fuerza magnética entre conductores paralelos dispuestos como en la configuración analizada en el Ejemplo integrado 19.8 constituye la base para definir al ampere. El National Institute of Standards and Technology (NIST) define al ampere como

> la corriente que, si se mantiene en cada uno de dos conductores largos y paralelos separados por una distancia de 1 m en el espacio libre, produce una fuerza magnética entre ellos exactamente igual a 2×10^{-7} N por cada metro de conductor.

19.7 Materiales magnéticos

OBJETIVOS: *a*) Explicar cómo es que los materiales ferromagnéticos aumentan los campos magnéticos externos, *b*) comprender el concepto de permeabilidad magnética de un material, *c*) explicar cómo se producen los imanes "permanentes" y *d*) explicar cómo se puede destruir el magnetismo "permanente".

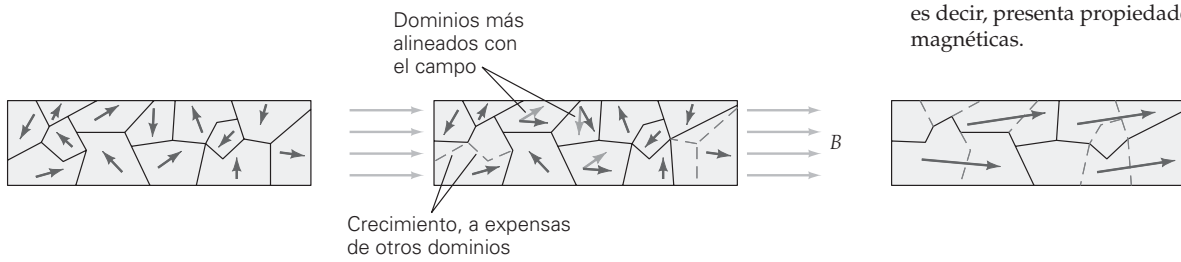
¿Por qué algunos materiales son magnéticos o se magnetizan con facilidad? ¿Cómo puede un imán recto crear un campo magnético, si no conduce corriente eléctrica en forma obvia? Se sabe que se necesita una corriente para producir un campo magnético. Si se comparan los campos magnéticos de un imán recto y de un solenoide largo (véase las figuras 19.1 y 19.25), parece que el campo magnético del imán recto se debe a corrientes *internas*. Quizá estas corrientes "invisibles" se deban a los electrones en órbita en torno a los núcleos atómicos, o por el espín de los electrones. Sin embargo, un análisis detallado de la estructura atómica demuestra que el campo magnético neto producido por los movimientos orbitales es cero, o muy pequeño.

¿Cuál *es* la fuente del magnetismo producido por los materiales magnéticos? La teoría cuántica moderna dice que el magnetismo del tipo permanente, como el que presenta un imán recto de hierro, se produce por el *espín del electrón*. En la física clásica se compara un electrón con espín, con la Tierra que gira en torno a su eje. Sin embargo, esta analogía mecánica *no* es en realidad ilustrativa. El espín del electrón es un efecto mecánico cuántico, sin una analogía clásica directa. No obstante, la imagen de que los electrones giratorios crean campos magnéticos es útil para la deducción y el razonamiento cualitativos. Cada electrón "giratorio" produce un campo similar al de una espira de corriente (figura 19.24c). Esta figura, que se parece a la de un pequeño imán recto, nos permite considerar a los electrones como agujas de brújulas diminutas.

En los átomos con varios electrones, éstos se arreglan *normalmente* por pares, con sus espines alineados en forma opuesta (un "espín hacia arriba" y un "espín hacia abajo", en lenguaje químico). Sus campos magnéticos se anulan entre sí, y el material no puede ser magnético. Uno de esos materiales es el aluminio.

Sin embargo, en los **materiales ferromagnéticos**, los campos que se deben a los espines de los electrones en los átomos individuales no se anulan. Por consiguiente, cada átomo tiene un momento magnético. Hay una fuerte interacción entre esos momentos contiguos, que conduce a la formación de regiones llamadas **dominios magnéticos**. En un dominio dado, muchos de los espines electrónicos están alineados en la misma dirección, y se produce un campo magnético (neto) relativamente fuerte. No hay muchos materiales ferromagnéticos en la naturaleza. Los más comunes son el hierro, el níquel y el cobalto. El gadolinio y algunas aleaciones manufacturadas —como el neodimio y otras raras aleaciones— también son ferromagnéticos.

En un material ferromagnético no magnetizado, los dominios tienen orientación aleatoria, y no hay magnetización neta (▼figura 19.27a). Pero cuando se pone un mate-



▼ **FIGURA 19.27** Dominios magnéticos ***a)*** Cuando no hay campo magnético externo, los dominios magnéticos de un material ferromagnético se orientan al azar, y el material no se magnetiza. ***b)*** En un campo magnético externo, los dominios con orientación paralela al campo crecen a expensas de otros, y las orientaciones de algunos dominios pueden alinearse más con el campo. ***c)*** Como resultado, el material se magnetiza, es decir, presenta propiedades magnéticas.

A FONDO 19.1 LA FUERZA MAGNÉTICA EN LA MEDICINA DEL FUTURO

Desde tiempos ancestrales, los humanos han buscado el poder curativo en el magnetismo. Con frecuencia se afirma de que el magnetismo reduce las inflamaciones, elimina problemas en las articulaciones y cura el cáncer, pero ninguna se ha podido sustentar teóricamente. Sin embargo, existen diversas aplicaciones del magnetismo en la medicina moderna, como el sistema de imágenes por resonancia magnética (MRI).

Ciertos tipos de bacterias son capaces de crear minúsculos imanes permanentes en su interior (véase la sección A fondo 19.2, sobre el magnetismo en la naturaleza). Los científicos han propuesto cultivar estos diminutos imanes, que son tan pequeños como para pasar a través de una aguja hipodérmica. Estos imanes podrían unirse a moléculas de medicamentos. Al colocar un campo magnético cerca del sitio de interés, las moléculas serían atraídas y permanecerían ahí. Mantener a las moléculas de un medicamento en el lugar adecuado aumentaría su efectividad y reduciría los efectos colaterales que se presentan cuando los medicamentos circulan por otras partes del cuerpo.

Un problema que entraña esta propuesta es la necesidad de desarrollar técnicas para extraer los diminutos imanes bacteriales y producirlos en grandes cantidades. Algunas propuestas alternativas incluyen crear minúsculas piezas no magnetizadas de hierro por medios químicos, unirlas a las moléculas de los medicamentos y hacer que se muevan alrededor de campos magnéticos en una versión microscópica de limaduras de hierro. Ambas propuestas implican riesgos, como el hecho de que las moléculas de los medicamentos se atraigan entre sí formando grumos, que bloquearían el flujo sanguíneo.

Tal vez, en lugar de ello, microesferas magnéticas podrían llenarse con medicamentos o material radiactivo y dirigirse al lugar preciso manteniéndolas ahí mediante campos magnéticos. Una aplicación sería en el tratamiento de las úlceras que sufren los diabéticos, comúnmente en los pies; se trata de lesiones difíciles de sanar. La herida se cubriría con imanes delgados, pero fuertes, con la ayuda de una venda. Luego, se aplicaría una inyección de microesferas llenas con medicamentos de lenta liberación, como un antibiótico. Los imanes atraerían a las microesferas hacia el lugar preciso de la úlcera y las mantendrían ahí. Conforme las microesferas se rompan en el curso de varias semanas, liberarían los medicamentos lentamente, ayudando al cuerpo a sanar la herida. Microesferas llenas con material radiactivo podrían ayudar en el tratamiento de tumores en el hígado, pulmones, cerebro y en algunos otros órganos.

Otra terapia experimental utiliza calor inducido magnéticamente (técnicas *hipertérmicas*) para tratar el cáncer de seno. Esta terapia sería especialmente importante para destruir los pequeños tumores que ahora se localizan fácilmente con técnicas modernas que generan imágenes del cuerpo. Para estos tumores, se inyectaría magnetita fluida (Fe_3O_4) directamente en el tumor. En los tumores mayores que unos cuantos milímetros cúbicos, las partículas de hierro se distribuirían a través del sistema circulatorio luego de unirse a biomoléculas que se dirigen a las células cancerígenas.

En presencia de un campo magnético externo, las partículas de hierro se calentarían gracias a corrientes inducidas (véase el capítulo 20 sobre inducción electromagnética). Un aumento en la temperatura de unos cuantos grados Celsius por encima de la temperatura normal del cuerpo puede matar células cancerígenas. En teoría, este calentamiento ocurriría sólo en los tumores y sería una técnica poco invasiva. Experimentos iniciales han dado resultados positivos, de manera que el panorama es alentador.

PHYSLET®

Ilustración 27.5 Imanes permanentes y ferromagnetismo

rial ferromagnético (como un imán recto de hierro) en un campo magnético externo, los dominios cambian su orientación y tamaño (figura 19.27b). Recuerde la imagen del electrón como una pequeña brújula; los electrones comienzan a "alinearse" en un campo magnético externo. Conforme el campo externo y la barra de hierro comienzan a interactuar, el hierro presenta los dos efectos siguientes:

1. Los contornos de los dominios cambian, y los dominios con orientaciones magnéticas en dirección del campo externo crecen a expensas de los demás.
2. La orientación magnética de algunos dominios puede cambiar un poco, para alinearse más con el campo.

Al remover los campos externos, los dominios de hierro permanecen más o menos alineados en la dirección del campo externo original, creando así su propio campo magnético general "permanente".

Ahora también comprenderá por qué una pieza de hierro no imanada es atraída hacia un imán, y por qué las limaduras de hierro se alinean con un campo magnético. En esencia, las piezas de hierro se transforman en imanes inducidos (figura 19.27c). Algunos usos de los imanes permanentes y de las fuerzas magnéticas en la medicina moderna se describen en la sección A fondo 19.1, en esta página.

Electroimanes y permeabilidad magnética

Los materiales ferromagnéticos se usan para fabricar electroimanes, casi siempre devanando un alambre de acero en torno a un núcleo de hierro (▸figura 19.28a). La corriente en la bobina crea un campo magnético en el hierro, que a su vez crea su propio campo, que, por lo general, es muchas veces mayor que el de la bobina. Si se conecta y desconecta la corriente, se puede activar y desactivar el campo magnético a voluntad. Cuando la corriente está conectada, induce magnetismo en los materiales ferromagnéticos (como en el caso de los trozos de hierro de la figura 19.28b) y, si las fuerzas son suficientemente intensas, puede utilizarse para cargar grandes cantidades de chatarra (figura 19.28c).

El hierro que se usa en un electroimán se llama *hierro suave*. Cuando se le elimina un campo externo, los dominios magnéticos se desalinean y el hierro se desmagnetiza. El adjetivo "suave" se refiere a sus propiedades magnéticas. Cuando un electroimán está encendido (dibujo inferior de la figura 19.28a), el núcleo de hierro se magnetiza y contribuye al campo del solenoide. El campo total se expresa como sigue:

$$B = \frac{\mu N I}{L} \quad \text{campo magnético en el centro de un solenoide con núcleo de hierro} \tag{19.15}$$

Observe que esta ecuación es idéntica a la del campo magnético de un solenoide con núcleo de aire (ecuación 19.14), excepto porque contiene μ en lugar de μ_o. Aquí, μ representa la **permeabilidad magnética** del *material del núcleo*, y no el espacio libre. El papel que juega la permeabilidad en el magnetismo es similar al de la permisividad ε en electricidad (capítulo 16). Para los materiales magnéticos, la permeabilidad magnética se define en función de su valor en el espacio libre; es decir,

$$\mu = \kappa_m \mu_o \tag{19.16}$$

donde κ_m es la permeabilidad *relativa* (adimensional), y es el análogo magnético de la constante dieléctrica κ.

El valor de κ_m para el vacío es igual a la unidad. Como para los materiales ferromagnéticos, el campo magnético total es mayor que el de un alambre enrollado, se deduce que $\mu \gg \mu_o$ y que $\kappa_m \gg 1$. Un núcleo de un material ferromagnético con una gran permeabilidad, en un electroimán, aumenta ese campo miles de veces, en comparación con un núcleo de aire. Los materiales ferromagnéticos tienen valores de κ_m del orden de los miles.

Ejemplo 19.9 ■ Ventaja magnética: uso de materiales ferromagnéticos

Un solenoide de laboratorio con 200 vueltas en una longitud de 30 cm está limitado a conducir una corriente máxima de 2.0 A. Los científicos necesitan un campo magnético interno cuya intensidad sea, por lo menos, de 2.0 T y están debatiendo acerca de si necesitan emplear un núcleo ferromagnético. *a*) ¿Es posible ese campo si ningún material llena el núcleo? *b*) Si no, determine la permeabilidad magnética mínima del material ferromagnético que podría formar el núcleo.

Razonamiento. El campo B depende del número de vueltas (N), de la longitud del solenoide (L), de la corriente (I) y de la permeabilidad del material del núcleo (μ). Ésta es una aplicación directa de las ecuaciones 19.14 y 19.15.

Solución.

Dado: $I_{máx} = 2.0$ A, $N = 200$ vueltas, $L = 0.30$ m

Encuentre: *a*) ¿Es posible $B = 2.0$ T sin material en el núcleo? *b*) La permeabilidad magnética requerida para que $B = 2.0$ T

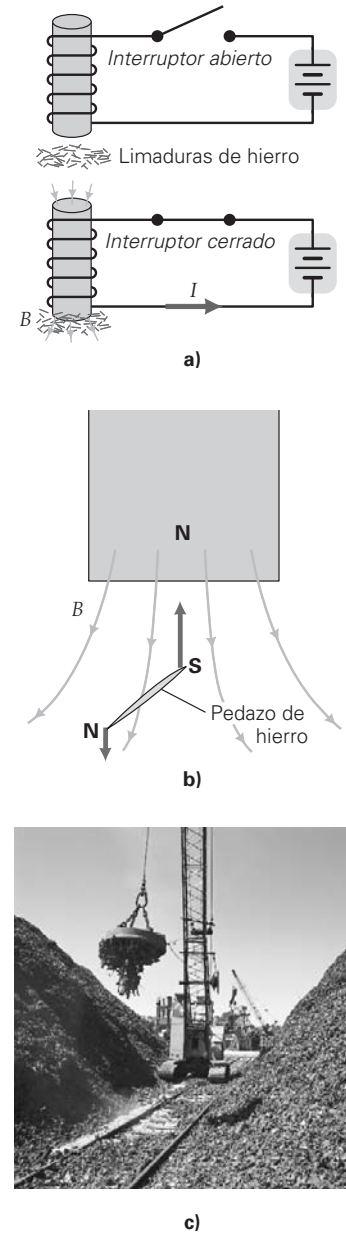
a) De acuerdo con la ecuación 19.14, sin ningún material en el núcleo, es evidente que el campo interno no sería suficientemente grande.

$$B = \frac{\mu_o N I}{L} = \frac{(4\pi \times 10^{-7}\ \text{T}\cdot\text{m/A})(200)(2.0\ \text{A})}{0.30\ \text{m}} = 1.7 \times 10^{-3}\ \text{T} = 1.7\ \text{mT}$$

b) El campo que se requiere es de $2.0\ \text{T}/1.7 \times 10^{-3}$ T o unas 1200 veces más fuerte que la respuesta al inciso *a*. Por lo tanto, como $B \propto \mu$ si todo lo demás permanece constante, para alcanzar un valor de 2.0 T se requiere una permeabilidad $\mu \geq 1200\,\mu_o$ o $\mu \geq 1.5 \times 10^{-3}\ \text{T}\cdot\text{m/A}$.

Ejercicio de refuerzo. En este ejemplo, si los científicos encontraran una forma para que el solenoide pudiera conducir 5.0 A, ¿cuál sería la nueva permeabilidad requerida?

Según la ecuación 19.15, la intensidad del campo magnético de un electroimán depende de la corriente en los conductores. Las corrientes grandes producen campos grandes, pero esa generación de campos va acompañada de un calentamiento joule (pérdidas I^2R) mayor en los conductores; por eso, se requieren tubos de enfriamiento de agua. El problema se puede reducir usando alambres superconductores, porque tienen resistencia cero y, no tiene calentamiento joule. Para uso comercial, los imanes superconductores todavía no son prácticos, por la gran cantidad de energía que se requiere para enfriar y mantener los conductores en su estado superconductor, a bajas temperaturas. Si algún día se encuentran superconductores que funcionen a temperaturas cercanas a la tempe-



▲ **FIGURA 19.28** Electroimán *a*) (arriba) Cuando no hay corriente en el circuito, no hay fuerza magnética. *(abajo)* Sin embargo, cuando pasa corriente por la bobina, hay un campo magnético y el núcleo de hierro se magnetiza. ***b)*** Detalle del extremo inferior del electroimán del inciso *a*. El pedazo de hierro es atraído hacia el extremo del electroimán. ***c)*** Un electroimán levantando chatarra

ratura ambiente, los campos magnéticos de elevada intensidad serán comunes en muchos aparatos y aplicaciones.

La clase de hierro que retiene algo de su magnetismo después de haber estado en un campo magnético externo se llama *hierro duro,* y se usa para fabricar imanes permanentes. Seguramente habrá notado que un sujetapapeles o la hoja de un destornillador se magnetizan después de estar cerca de un imán. Los imanes permanentes se producen calentando en un horno piezas de un material ferromagnético y dejándolas enfriar dentro de un campo magnético intenso. En los imanes permanentes, los dominios *no* se desalinean cuando se elimina el campo magnético externo.

Un imán *permanente* no siempre es permanente, porque se puede destruir su magnetismo. Si se golpea con un objeto duro, o se deja caer al piso, se puede perder parte o todo el alineamiento de los dominios y así se reduce o elimina el campo magnético general del imán. Con el calentamiento también se pierde el magnetismo, porque provoca un aumento en los movimientos aleatorios (térmicos) de los átomos y tiende a perturbar el alineamiento de los dominios. Al dejar una cinta magnética de audio o de video sobre el tablero de instrumentos de un automóvil en un día caluroso, el movimiento térmico causado por el calor destruye parcialmente la señal magnética de audio o de video. Arriba de cierta temperatura crítica, llamada **temperatura de Curie** (o temperatura de transición magnética), se destruye el acoplamiento entre los dominios a causa de las mayores oscilaciones térmicas, y un material ferromagnético pierde su ferromagnetismo. El físico francés Pierre Curie (1859-1906), esposo de Marie Curie, descubrió este efecto. La temperatura de Curie del hierro es de 770 °C.

El alineamiento de los dominios ferromagnéticos desempeña un papel importante en la geología y la geofísica. Se sabe que, cuando se enfrían, los flujos de lava de los volcanes, que inicialmente contienen hierro arriba de su temperatura de Curie, retienen algo de su magnetismo como cuando la lava se enfriaba por debajo de la temperatura de Curie y se endurecía. Al medir la intensidad y la orientación del campo en estas antiguas corrientes de lava, en diversos lugares del mundo, los geofísicos han podido registrar los cambios en el campo magnético terrestre y en su polaridad, a través del tiempo.

Algunas de las primeras pruebas en que se apoya el estudio del movimiento tectónico se debieron a mediciones de la dirección de la polaridad magnética de muestras del lecho marino que contienen hierro.* Por ejemplo, el lecho marino cercano a la Cordillera Central Atlántica está formado por flujos de lava de volcanes submarinos. Se encontró que esas corrientes solidificadas tienen magnetismo permanente, pero que la polaridad varía con el tiempo conforme ha cambiado la polaridad magnética de la Tierra.

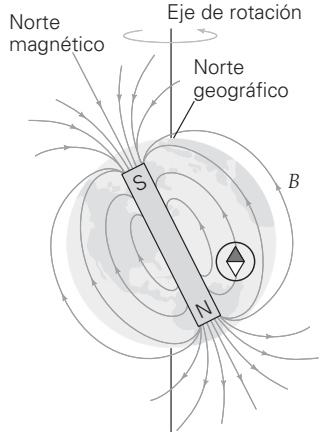
*19.8 Geomagnetismo: el campo magnético terrestre

OBJETIVOS: *a*) Presentar las características generales del campo magnético terrestre *b*) explicar algunas teorías acerca de sus posible causas y *c*) describir las formas en las que el campo magnético terrestre afecta el ambiente local de nuestro planeta.

El campo magnético de la Tierra se usó durante siglos, antes de que las personas tuvieran idea alguna sobre su origen. En la antigüedad, los navegantes usaron piedras imán, o agujas magnetizadas, para ubicar el norte. Algunas otras formas de vida, incluyendo ciertas bacterias y palomas mensajeras, también usan el campo magnético terrestre para navegar. (Véase la sección A fondo 19.2, sobre el magnetismo en la naturaleza.)

Sir William Gilbert, un científico inglés, estudió por primera vez el magnetismo alrededor del año 1600. Al investigar el campo magnético de una *piedra imán* de forma esférica, cortada especialmente para simular a la Tierra, concluyó que la Tierra funciona como un imán. Gilbert pensó que un gran cuerpo de material magnetizado permanentemente, en el interior de la Tierra, producía el campo magnético de ésta.

El campo magnético terrestre externo o *campo geomagnético* como se le llama, sí tiene una configuración parecida a la que produciría un imán recto gigantesco con su polo sur apuntando al norte (◂figura 19.29). La magnitud del componente horizontal del campo magnético terrestre en el ecuador magnético es de 10^{-5} T (0.4 G), y la del com-



▲ **FIGURA 19.29 El campo geomagnético** El campo magnético terrestre se parece al de un imán recto. Sin embargo, no podría existir un imán recto sólido dentro de la Tierra, por las altas temperaturas que se registran allí. Se cree que el campo magnético terrestre está relacionado con movimientos del núcleo externo líquido, a gran profundidad en el planeta.

*La capa sólida más externa de la corteza terrestre está formada por secciones o "placas".que están en movimiento constante: una velocidad normal es de un centímetro por año. En algunas de sus intersecciones, por ejemplo, la zona donde la placa del Pacífico se encuentra con la costa de Alaska, las placas chocan y originan volcanes y sismos. En otras intersecciones, como en la Cordillera Central del Atlántico, las placas se alejan entre sí, y sale material nuevo del interior de la Tierra en forma de lava caliente.

A FONDO 19.2 EL MAGNETISMO EN LA NATURALEZA

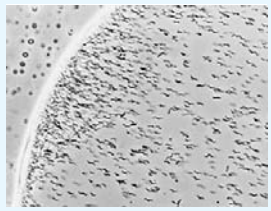


FIGURA 1 Migración de bacterias magnetotácticas Las bacterias en una gota de agua lodosa, vistas al microscopio, se alinean en dirección del campo magnético aplicado (el norte hacia la izquierda) y se acumulan en el borde. Cuando se invierte el campo, también se invierte la dirección de migración.

FIGURA 2 Una bacteria magnetotáctica elíptica Micrografía electrónica de una bacteria magnetotáctica de agua dulce. Se observan con claridad dos apéndices como látigos, o flagelos, junto con una cadena de partículas de magnetita.

Durante siglos, los seres humanos confiaron en las brújulas para obtener información sobre el rumbo que querían seguir (figura 19.29). Investigaciones recientes indican que algunos organismos parecen tener sus propios sensores direccionales incorporados. Por ejemplo, se sabe que algunas especies de bacterias son *magnetotácticas*, es decir, sienten la presencia y la dirección del campo magnético terrestre.

En la década de 1980, se hicieron experimentos con bacterias que comúnmente se encuentran en lodazales, pantanos o estanques.* En un campo magnético en el laboratorio, cuando se observaba al microscopio una gota de agua lodosa, había una especie de bacterias que siempre migraban en dirección del campo (figura 1), de la misma forma como lo hacen en su ambiente natural, con el campo de la Tierra. Además, cuando esas bacterias morían y ya no podían migrar, mantenían su alineamiento con el campo magnético, incluso cuando éste cambiaba su dirección. Se concluyó que los miembros de esta especie funcionan como dipolos magnéticos o brújulas biológicas. Una vez alineadas con el campo, emigran a lo largo de líneas de campo magnético, tan sólo moviendo sus *flagelos* (apéndices con forma de látigo), como se observa en la figura 2.

¿Qué es lo que hace que estas bacterias sean brújulas vivientes? Aun entre las especies magnetotácticas conocidas, las "nuevas" bacterias (formadas por división celular) carecen en principio de este sentido magnetotáctico. Sin embargo, si viven en una solución que contenga una mínima concentración de hierro, son capaces de sintetizar una cadena de diminutas partículas magnéticas (figura 2). Es raro, pero esas brújulas internas tienen la misma composición química que los antiguos trozos del mineral que usaban los marinos antiguos, y que se encuentra en la naturaleza: la magnetita (símbolo químico Fe_3O_4). Las partículas individuales en la cadena miden aproximadamente 50 nm transversales, y la cadena de una bacteria madura contiene, por lo general, unas 20 de esas partículas, cada una de las cuales es un dominio magnético independiente.

En esencia, las bacterias se dirigen pasivamente de acuerdo con sus brújulas internas. Pero, ¿por qué tiene importancia biológica que esas bacterias sigan la dirección del campo magnético terrestre? Se encontró una pieza importante de este rompecabezas cuando los investigadores estudiaban la misma especie en aguas del hemisferio sur. Esas bacterias emigran en sentido *contrario* a la dirección del campo terrestre, a diferencia de sus contrapartes en el hemisferio norte. Recuerde que en el hemisferio norte, el campo terrestre se inclina hacia abajo, y que sucede lo contrario en el hemisferio sur. Este descubrimiento condujo a los investigadores a creer que las bacterias usan la dirección del campo para sobrevivir. Como para ellas el oxígeno es tóxico, es más probable que sobrevivan en profundidades lodosas y ricas en nutrientes, y el campo magnético terrestre les indica la dirección (figura 3). Su sentido de orientación también les ayuda cerca del ecuador. Allí, el campo no las dirige hacia abajo, sino que las mantiene a una profundidad constante, con lo que evitan una migración hacia arriba, hacia las mortales aguas superficiales ricas en oxígeno.

No sólo se han encontrado pruebas de navegación con el campo magnético en las bacterias, sino también en organismos tan diversos como abejas, mariposas, palomas mensajeras y delfines.

*Véase, por ejemplo, R. P. Blakemore y R. B. Frankel, "Magnetic Navigation in Bacteria", *Scientific American*, diciembre de 1981. Agradecemos al profesor Frankel varias descripciones interesantes acerca de este tema.

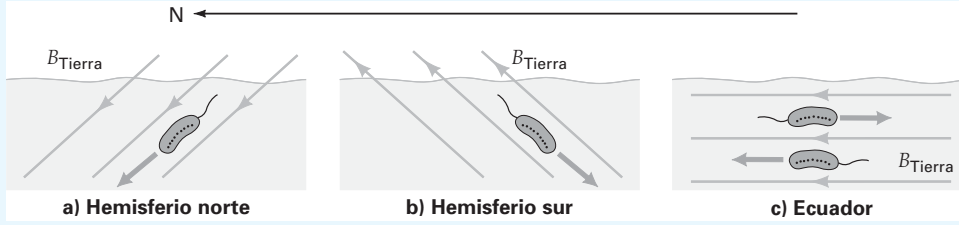


FIGURA 3 ¿Supervivencia del más apto? ***a)*** En el hemisferio norte, donde el campo magnético terrestre se inclina hacia abajo, las bacterias magnetotácticas siguen el campo para llegar a profundidades ricas en oxígeno. ***b)*** En el hemisferio sur, el campo geomagnético está inclinado hacia arriba, pero las bacterias emigran en dirección opuesta al campo, por lo que permanecen en aguas profundas, como sus parientes del hemisferio norte. ***c)*** Cerca del ecuador, las bacterias se mueven en dirección paralela a la superficie del agua, y se mantienen así alejadas de las aguas poco profundas, ricas en oxígeno y, por consiguiente, tóxicas.

ponente vertical en los polos geomagnéticos es de 10^{-4} T (aproximadamente 1 G). Se ha calculado que para que un material ferromagnético con magnetización máxima produzca ese campo, tendría que ocupar aproximadamente el 0.01% del volumen de la Tierra.

La idea de un imán ferromagnético de este tamaño dentro de la Tierra quizá no parezca irracional al principio, pero no es un modelo correcto. La temperatura interior de la Tierra está muy por arriba de las temperaturas de Curie del hierro y el níquel, que, al parecer, son los materiales ferromagnéticos más abundantes en el interior de la Tierra. Por ejemplo, para el hierro, la temperatura de Curie se alcanza a una profundidad de tan sólo 100 km con respecto a la superficie terrestre. La temperatura es incluso más elevada a mayores profundidades. Por consiguiente, no es posible la existencia de un imán permanente interno.

El conocimiento de que una corriente eléctrica produce un campo magnético ha hecho que los científicos especulen que el campo magnético terrestre está asociado con movimientos en el núcleo externo líquido, que, a su vez, podrían estar vinculados de alguna forma con la rotación de la Tierra. Se sabe que Júpiter, un planeta que es principalmente gaseoso y gira con mucha rapidez, tiene un campo magnético mucho mayor que el de la Tierra. Mercurio y Venus tienen campos magnéticos muy débiles; esos planetas se parecen más a la Tierra y giran con relativa lentitud.

Se han propuesto varios modelos teóricos para explicar el origen del campo magnético terrestre. Por ejemplo, se ha sugerido que éste se debe a corrientes asociadas con ciclos de convección térmica en el núcleo externo líquido, causados por el núcleo interno caliente. Pero todavía no se aclaran los detalles de este mecanismo.

Se sabe que el eje del campo magnético terrestre *no* coincide con el eje de rotación del planeta, que es el que define los polos geográficos. Por consiguiente, el polo magnético (sur) de la Tierra y el Polo Norte geográfico no coinciden (véase la figura 19.29). El polo magnético queda a miles de kilómetros al sur del Polo Norte geográfico (el norte verdadero). El polo norte magnético de la Tierra está todavía más desplazado con respecto a su polo sur geográfico, lo que significa que el eje magnético ni siquiera pasa por el centro de la Tierra.

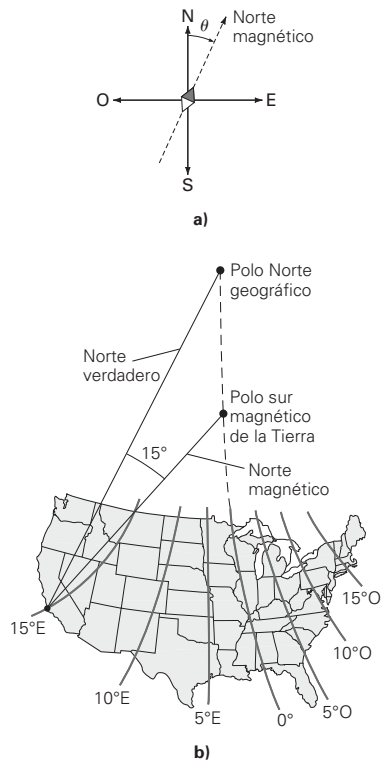
Una brújula indica la dirección del *norte magnético,* y no del norte "verdadero" o geográfico. La diferencia angular entre esas dos direcciones se llama *declinación magnética* (◂figura 19.30). La declinación magnética varía para distintos lugares. Como se podrá imaginar, el conocimiento de las variaciones de declinación magnética tiene especial importancia en la navegación precisa de aviones y barcos. Más recientemente, con la aparición de los sistemas de posicionamiento global (GPS), que son muy precisos, los viajeros ya no dependen de las brújulas tanto como antes.

El campo magnético terrestre también presenta una diversidad de fluctuaciones a través del tiempo. Como se explicó antes, el magnetismo permanente creado en rocas ricas en hierro, al enfriarse en el campo magnético terrestre, nos ha dado muchas evidencias de esas fluctuaciones a través de periodos prolongados. Por ejemplo, los polos magnéticos terrestres han intercambiado polaridad en diversas épocas del pasado; la última vez que sucedió esto fue hace unos 700 000 años. Durante un periodo de polaridad invertida, el polo sur magnético queda cerca del polo sur geográfico, lo contrario a la polaridad actual. El mecanismo por el que se realiza esta inversión de polaridad aún no está claro del todo y los científicos están en proceso de investigarlo.

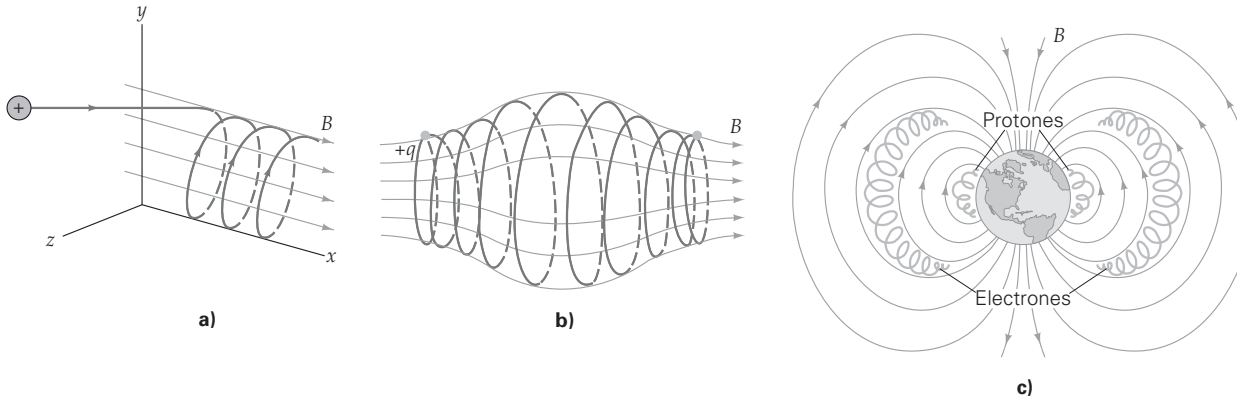
En escala de tiempos más cortos, los polos magnéticos también tienden a "deambular", es decir, a cambiar de lugar. Por ejemplo, el polo sur magnético (cerca del polo norte geográfico) se ha movido en fecha reciente aproximadamente 1° de latitud (unos 110 km o 70 mi) por década. Por alguna razón desconocida se ha movido hacia el norte en forma consistente, a partir de su latitud de 69°N en 1904, y también hacia el oeste, cruzando el meridiano 100°O. Esa deriva polar de largo plazo indica que el mapa de declinación magnética (figura 19.30b) varía a través del tiempo, y se debe actualizar en forma periódica.

En escalas de tiempo todavía más cortas, a veces hay corrimientos diarios hasta de 80 km (50 mi), seguidos por un regreso a la posición inicial. Se cree que esos corrimientos son causados por partículas cargadas que proceden del Sol y que llegan a la atmósfera superior de la Tierra formando corrientes que cambian el campo magnético general del planeta.

Las partículas cargadas que proceden del Sol y entran al campo magnético terrestre dan lugar a otros fenómenos. Una partícula cargada que entra en dirección *no* perpendicular a un campo magnético, describe una espiral en forma de hélice (▸figura 19.31a). Esto se debe a que el componente de la velocidad de la partícula, que es para-



▲ **FIGURA 19.30 Declinación magnética** ***a)*** La diferencia angular entre el norte magnético y el norte "verdadero" o geográfico se llama declinación magnética. ***b)*** La declinación magnética varía según el lugar y el tiempo. El mapa muestra las líneas *isogónicas* (líneas con la misma declinación magnética) para la zona continental de Estados Unidos. Para lugares sobre la línea de 0°, el norte magnético está en la misma dirección que el norte verdadero (o geográfico). A los lados de esa línea, una brújula tiene una inclinación hacia el este o hacia el oeste. Por ejemplo, sobre una línea de 15°E, una brújula tiene una declinación de 15° hacia el este. (El norte magnético se encuentra 15° al este del norte verdadero.)



▲ **FIGURA 19.31 Confinamiento magnético** ***a)*** Una partícula cargada que entra a un campo magnético uniforme, formando un ángulo distinto a 90°, describe una trayectoria en espiral. ***b)*** En un campo magnético no uniforme y convexo, las partículas van y vienen en espiral, como si estuvieran confinadas en una botella magnética. ***c)*** Las partículas cargadas quedan atrapadas en el campo magnético terrestre, y las regiones donde se concentran se llaman cinturones de Van Allen.

lelo al campo, no cambia. (Recuerde que un campo magnético sólo actúa a lo largo del componente perpendicular de la velocidad.) Los movimientos de las partículas cargadas en un campo no uniforme son bastante complicados. Sin embargo, para un campo convexo como el que se ve en la figura 19.31b, las partículas van y vienen en espiral, como si estuvieran dentro de una "botella magnética".

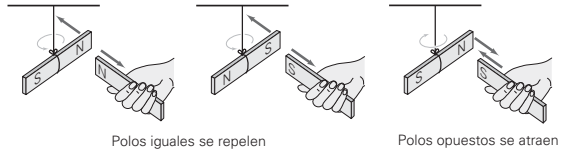
Un fenómeno análogo sucede en el campo magnético terrestre, dando lugar a regiones con concentraciones altas de partículas cargadas. Hay dos regiones en forma de dona, a varios miles de kilómetros de altitud, llamadas *cinturones de radiación de Van Allen* (figura 19.31c). En el cinturón de Van Allen inferior se producen emisiones luminosas llamadas *auroras*: la aurora boreal o luces del norte, en el hemisferio norte, y la aurora austral o luces del sur, en el hemisferio sur. Esas luces fantásticas y fluctuantes se observan con más frecuencia en las regiones polares de la Tierra, pero se han visto en zonas de menor latitud (▸figura 19.32).

Una aurora se forma cuando las partículas solares cargadas quedan atrapadas en el campo magnético de la Tierra. Se ha observado que la actividad máxima de la aurora ocurre después de una alteración solar, como las llamaradas solares, que son tormentas magnéticas violentas en el Sol que expelen grandes cantidades de partículas cargadas. Atrapadas en el campo magnético de la Tierra, estas partículas cargadas son guiadas hacia las regiones polares, donde excitan o ionizan los átomos de oxígeno y nitrógeno de la atmósfera. Cuando las moléculas excitadas retornan a su estado normal y los iones vuelven a tener su número normal de electrones, hay emisiones de luz, y la aurora brilla.

▲ **FIGURA 19.32 Aurora boreal: las luces del norte** Esta imagen espectacular se debe a partículas solares energéticas que quedan atrapadas en el campo magnético terrestre. Las partículas excitan, o ionizan, los átomos del aire; cuando estos últimos dejan de estar excitados (o cuando se recombinan), emiten luz. (Véase el pliego a color al final del libro.)

Repaso del capítulo

- La **ley de fuerza polar,** o **ley de los polos**, establece que los polos magnéticos opuestos se atraen y los polos iguales se repelen.



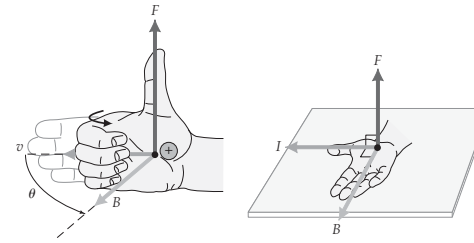
- El **campo magnético ($\vec{B}$)** se expresa en unidades SI de **tesla (T)**, y $1\,\mathrm{T} = 1\,\mathrm{N/(A \cdot m)}$. Los campos magnéticos pueden ejercer fuerzas sobre partículas cargadas en movimiento y sobre corrientes eléctricas. La fuerza magnética sobre una partícula cargada se expresa por

$$F = qvB \operatorname{sen} \theta \qquad (19.3)$$

La magnitud de la fuerza magnética sobre un conductor con corriente se expresa por

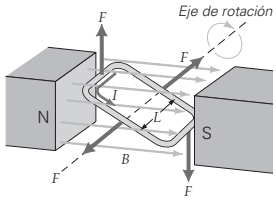
$$F = ILB \operatorname{sen} \theta \qquad (19.7)$$

- Para determinar la dirección de una *fuerza magnética* sobre una partícula cargada en movimiento, y sobre conductores con corriente, se usan las **reglas de la mano derecha**.



- Una serie de N espiras circulares con corriente, cada una con una área plana A y por la cual pasa una corriente I, experimenta un **momento de torsión magnético** al colocarse en un campo magnético. La ecuación para calcular la magnitud del momento de torsión sobre una configuración de este tipo es

$$\tau = NIAB \operatorname{sen} \theta \tag{19.9}$$



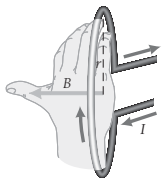
- La magnitud del **campo magnético** producido por un conductor largo y recto se determina con

$$B = \frac{\mu_o I}{2\pi d} \tag{19.12}$$

en donde $\mu_o = 4\pi \times 10^{-7}\ \mathrm{T \cdot m/A}$ es la **permeabilidad magnética del espacio libre**. Para conductores largos y rectos, las líneas de campo son círculos cerrados con centro en el conductor.

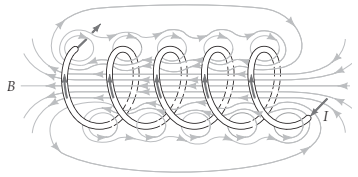
- La magnitud del campo magnético producido en el centro de una serie de N espiras de radio r es

$$B = \frac{\mu_o N I}{2r} \tag{19.13}$$

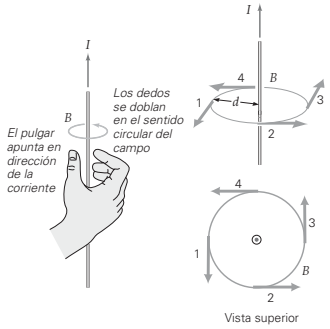


- La magnitud del campo magnético producido cerca del centro en el interior de un *solenoide* con N espiras y longitud L es

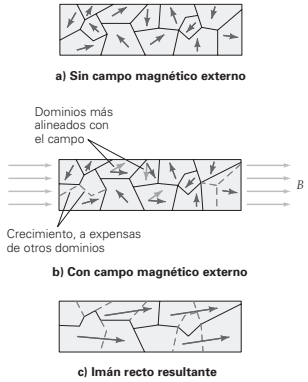
$$B = \frac{\mu_o N I}{L} \tag{19.14}$$



- Para determinar la dirección del campo magnético producido con diversas configuraciones de corriente, se usan las **reglas de la mano derecha**.



- En los **materiales ferromagnéticos** los espines se alinean, creando **dominios**. Cuando se aplica un campo externo, su efecto es aumentar el tamaño de los dominios que ya apuntan en dirección del campo, a expensas de los demás. Cuando se quita el campo magnético externo, queda un **imán permanente**.



Ejercicios

Los ejercicios designados **OM** *son preguntas de opción múltiple; los* **PC** *son preguntas conceptuales; y los* **EI** *son ejercicios integrados. A lo largo del texto, muchas secciones de ejercicios incluirán ejercicios "apareados". Estos pares de ejercicios, que se identifican con* números subrayados, *pretenden ayudar al lector a resolver problemas y aprender. El primer ejercicio de cada pareja (el de número par) se resuelve en la Guía de estudio, que puede consultarse si se necesita ayuda para resolverlo. El segundo ejercicio (de número impar) es similar, y su respuesta se da al final del libro.*

19.1 Imanes, polos magnéticos y dirección del campo magnético

1. **OM** Cuando los extremos de dos imanes rectos están cercanos entre sí, se atraen. Los extremos deben ser *a*) uno norte y el otro sur, *b*) uno sur y el otro norte, *c*) ambos norte, *d*) ambos sur o *e*) cualquiera de los casos *a* o *b*.

2. **OM** Una brújula calibrada en el campo magnético de la Tierra se coloca cerca del extremo de un imán recto permanente y apunta alejándose del extremo del imán. Se concluye que este extremo del imán *a*) actúa como un polo magnético norte, *b*) actúa como un polo magnético sur, *c*) no es posible concluir algo acerca de las propiedades magnéticas del imán permanente.

3. **OM** Si se ve directamente hacia abajo sobre el polo sur de un imán recto, el campo magnético apunta *a*) hacia la derecha, *b*) hacia la izquierda, *c*) alejándose del observador o *d*) hacia el observador.

4. **PC** Se tienen dos imanes rectos idénticos, uno de los cuales es permanente y el otro no está magnetizado. ¿Cómo se podría distinguir uno de otro, usando sólo los dos imanes?

5. **PC** La dirección de cualquier campo magnético se toma en la dirección en que apunta una brújula calibrada con la Tierra. Explique por qué esto significa que las líneas de campo magnético deben partir del polo norte de un imán recto permanente y entrar en su polo sur.

19.2 Intensidad del campo magnético y fuerza magnética

6. **OM** Un protón se mueve verticalmente hacia arriba, en dirección perpendicular a un campo magnético uniforme, y se desvía hacia la derecha mientras usted lo observa. ¿Cuál es la dirección del campo magnético? *a*) Directamente alejándose de usted, *b*) directamente hacia usted, *c*) hacia la derecha o *d*) hacia la izquierda.

7. **OM** Un electrón se mueve horizontalmente hacia el este en un campo magnético uniforme, que es vertical. Se encuentra que se desvía hacia el norte. ¿Cuál es la dirección del campo magnético? *a*) Hacia arriba, *b*) hacia abajo o *c*) no es posible determinar la dirección a partir de los datos.

8. **OM** Si una partícula con carga negativa se moviera hacia abajo, a lo largo del borde derecho de esta página, ¿cómo se debería orientar un campo magnético (perpendicular al plano del papel) para que la partícula se desviara inicialmente hacia la izquierda? *a*) Hacia fuera de la página, *b*) en el plano de la página o *c*) hacia dentro de la página.

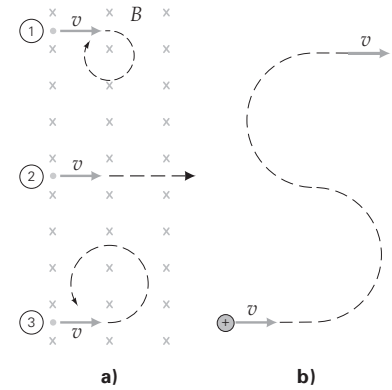
9. **OM** Un electrón pasa por un campo magnético sin ser desviado. ¿Qué se concluye acerca del ángulo entre la dirección del campo magnético y la de la velocidad del electrón, suponiendo que no actúan otras fuerzas sobre él? *a*) Podrían estar en la misma dirección, *b*) podrían ser perpendiculares, *c*) podrían ser contrarias o *d*) las opciones *a* y *c* son posibles.

10. **PC** Un protón y un electrón se mueven a la misma velocidad, perpendicularmente a un campo magnético constante. *a*) ¿Cómo se comparan las magnitudes de las fuerzas magnéticas sobre ellos. *b*) ¿Y las magnitudes de sus aceleraciones?

11. **PC** Si una partícula cargada se mueve en línea recta y no hay otras fuerzas, a excepción quizá de un campo magnético, ¿se puede decir con certeza que no hay campo magnético presente? Explique por qué.

12. **PC** Tres partículas entran a un campo magnético uniforme, como se ve en la ▸figura 19.33a. Las partículas 1 y 3 tienen velocidades iguales y cargas de igual magnitud. ¿Qué se concluye decir acerca de *a*) las cargas de las partículas y *b*) sus masas?

13. **PC** Se desea desviar una partícula con carga positiva para que su trayectoria sea una "S", como se ve en la figura 19.33b, usando sólo campos magnéticos. *a*) Explique cómo se podría lograr esto usando campos magnéticos perpendiculares al plano de la página. *b*) ¿Cómo se compara la magnitud de la velocidad de una partícula que sale del campo, comparada con su velocidad inicial?

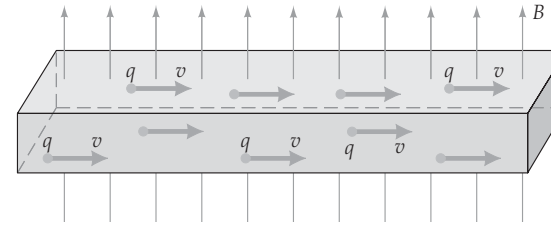


▲ **FIGURA 19.33 Cargas en movimiento** Véanse los ejercicios 12 y 13.

14. **El** ● Una carga positiva se mueve horizontalmente hacia la derecha, cruzando esta página, y entra en un campo magnético dirigido verticalmente hacia abajo en el plano de la página. *a*) ¿Cuál es la dirección de la fuerza magnética sobre la carga? 1) Hacia la página, 2) hacia fuera de la página, 3) hacia abajo en el plano de la página o 4) hacia arriba en el plano de la página. Explique por qué. *b*) Si la carga es de 0.25 C, su velocidad es 2.0×10^2 m/s, y sobre ella actúa una fuerza de 20 N, ¿cuál es la intensidad del campo magnético?

15. ● Una carga de 0.050 C se mueve verticalmente en un campo de 0.080 T, orientado a 45° con respecto a la vertical. ¿Qué velocidad debe tener la carga para que la fuerza que actúe sobre ella sea de 10 N?

16. ●● Se puede usar un campo magnético para determinar el signo de los portadores de carga en un conductor con corriente. Se tiene una banda conductora ancha dentro de un campo magnético orientado como se ve en la ▾figura 19.34. Los portadores de carga son desviados por la fuerza magnética y se acumulan en un lado de la banda, dando lugar a un voltaje medible a través de ella. (Este fenómeno se conoce como *efecto Hall*.) Si se desconoce el signo de los portadores de carga (que son cargas positivas que se mueven como indican las flechas en la figura, o bien, cargas negativas que se mueven en sentido contrario), ¿cómo se puede determinar el signo de la carga con la polaridad o el signo del voltaje medido? Suponga que sólo un tipo de portador de carga es el causante de la corriente.



▲ **FIGURA 19.34 El efecto Hall** Véase el ejercicio 16.

17. ●● Un haz de protones se acelera a una velocidad de 5.0×10^6 m/s en un acelerador de partículas, y sale de éste en dirección horizontal, entrando a un campo magnético uniforme. ¿Qué campo $\vec{\mathbf{B}}$ perpendicular a la velocidad del protón anularía la fuerza de gravedad y mantendría al haz moviéndose exactamente en dirección horizontal?

18. **El** ●● Un electrón se mueve en dirección $+x$ dentro de un campo magnético, y sobre él actúa una fuerza magnética en dirección $-y$. *a*) ¿En cuál de las siguientes direcciones podría orientarse el campo magnético? 1) $-x$, 2) $+y$, 3) $+z$ o 4) $-z$. Explique por qué. *b*) Si la velocidad del electrón es 3.0×10^6 m/s y la magnitud de la fuerza es 5.0×10^{-19} N, ¿cuál es la intensidad del campo magnético?

19. ●● Un electrón se mueve a una velocidad de 2.0×10^4 m/s a través de un campo magnético uniforme, cuya magnitud es 1.2×10^{-3} T. ¿Cuál es la magnitud de la fuerza magnética sobre el electrón, si su velocidad y el campo magnético *a*) son perpendiculares entre sí, *b*) forman un ángulo de 45°, *c*) son paralelos o *d*) son exactamente opuestos?

20. ●● ¿Qué ángulo(s) debe formar la velocidad de una partícula con la dirección del campo magnético para que la partícula esté sometida a la mitad de la fuerza magnética máxima posible?

21. ●●● Un haz de protones se acelera primero en línea recta hacia el este a una velocidad de 3.0×10^5 m/s en un acelerador de partículas. A continuación entra en un campo magnético uniforme de 0.50 T, que está orientado en un ángulo de 37° por arriba de la horizontal en relación con la dirección del haz. *a*) ¿Cuál es la aceleración inicial de un protón en el haz acelerado? *b*) ¿Qué sucedería si el campo magnético formara un ángulo de 37° por debajo de la horizontal? *c*) Si el haz fuera de electrones y no de protones, y el campo formara un ángulo de 37° hacia arriba, ¿cuál sería la diferencia de fuerzas sobre las partículas, al entrar el haz en el campo magnético?

19.3 Aplicaciones: partículas cargadas en campos magnéticos

22. **OM** En un espectrómetro de masas, dos iones con carga y rapidez idénticas se aceleran en dos arcos semicirculares diferentes. El arco del ion A tiene un radio de 25.0 cm y el radio del arco de B mide 50.0 cm. ¿Qué podría decirse acerca de sus masas relativas? *a*) $m_A = m_B$, *b*) $m_A = 2m_B$, *c*) $m_A = \frac{1}{2}m_B$ o *d*) no es posible afirmar algo a partir de los datos.

23. **OM** En un espectrómetro de masas, dos iones con masa y rapidez idénticas se aceleran en dos arcos semicirculares diferentes. El arco del ion A tiene un radio de 25.0 cm y el radio del arco de B mide 50.0 cm. ¿Qué podría decirse acerca de sus cargas netas? *a*) $q_A = q_B$, *b*) $q_A = 2q_B$, *c*) $q_A = \frac{1}{2}q_B$ o *d*) no es posible afirmar algo a partir de los datos.

24. **OM** En el selector de velocidad de la figura 19.9, ¿hacia dónde se desviará un ion si su velocidad es mayor que E/B_1? *a*) Hacia arriba, *b*) hacia abajo, *c*) no se desviará.

25. **PC** Explique por qué un imán cercano puede distorsionar la imagen en un monitor de computadora o en el cinescopio de un televisor (▼figura 19.35).

◀ **FIGURA 19.35 Perturbación magnética** Véase el ejercicio 25.

26. **PC** El círculo amplificado de la figura 19.11 muestra cómo los iones positivos (Na^+) en agua de mar son acelerados y expulsados por la parte trasera del submarino para suministrar una fuerza de propulsión. Pero, ¿qué sucede con los iones negativos (Cl^-) en el agua de mar? Como tienen carga de signo contrario, ¿acaso no se aceleran *hacia el frente* dando por resultado una fuerza neta de cero en el submarino? Explique su respuesta.

27. **PC** Explique claramente por qué la velocidad seleccionada en un selector de velocidad (similar al de la figura 19.9) no depende de las cargas en cualquiera de los iones que pasan a través de él.

28. ● Un deuterón ionizado (una partícula con carga $+e$) pasa por un selector de velocidad cuyos campos magnético y eléctrico perpendiculares tienen magnitudes de 40 mT y 8.0 kV/m, respectivamente. Calcule la rapidez del ion.

29. ● En un selector de velocidad, un imán grande produce el campo magnético uniforme de 1.5 T. Dos placas paralelas separadas 1.5 cm producen el campo eléctrico perpendicular. ¿Qué voltaje se debe aplicar a las placas para que *a*) un ion con una carga que se mueva a 8.0×10^4 m/s pase sin desviarse o *b*) un ion con doble carga que viaje con la misma velocidad pase sin desviarse?

30. ● Una partícula cargada se mueve sin desviarse a través de campos eléctricos y magnéticos perpendiculares, cuyas magnitudes son 3000 N/C y 30 mT, respectivamente. Calcule la rapidez de la partícula si es *a*) un protón o *b*) una partícula alfa. (Una partícula alfa es un núcleo de helio, es decir, un ion positivo con carga positiva doble.)

31. ●● En una técnica experimental de tratamiento de tumores profundos, se bombardean piones (π^+, partículas elementales cuya masa es 2.25×10^{-28} kg) con carga positiva para que penetren en el tejido y desintegren el tumor, liberando energía que mata las células cancerosas. Si se requieren piones con energía cinética de 10 keV y si se usa un selector de velocidad con una intensidad de campo eléctrico de 2.0×10^3 V/m, ¿cuál debe ser la intensidad del campo magnético?

32. ●● En un espectrómetro de masas, se selecciona un ion con una sola carga y con determinada velocidad usando un campo magnético de 0.10 T, perpendicular a un campo eléctrico de 1.0×10^3 V/m. Este mismo campo magnético se usa a continuación para desviar al ion, que describe una trayectoria circular de 1.2 cm de radio. ¿Cuál es la masa del ion?

33. ●● En un espectrómetro de masas se selecciona un ion con carga doble y determinada velocidad, usando un campo magnético de 100 mT, perpendicular a un campo eléctrico de 1.0 kV/m. Este mismo campo magnético se usa a continuación para desviar al ion, que describe una trayectoria circular de 15 mm de radio. Calcule *a*) la masa del ion y *b*) su energía cinética. *c*) ¿Aumenta la energía cinética del ion en la trayectoria circular? Explique por qué.

34. ●●● En un espectrómetro de masas un haz de protones entra en un campo magnético. Algunos protones describen exactamente un arco de un cuarto de círculo, de 0.50 m de radio. Si el campo siempre es perpendicular a la velocidad del protón, ¿cuál es la magnitud del campo, si los protones que salen tienen una energía cinética de 10 keV?

19.4 Fuerzas magnéticas sobre conductores con corriente eléctrica y 19.5 Aplicaciones: conductores con corriente en campos magnéticos

35. **OM** Un conductor largo, recto y horizontal está en el ecuador y lleva una corriente dirigida hacia el este. ¿Cuál es la dirección de la fuerza sobre el conductor que se debe al campo magnético terrestre? *a*) Hacia el este, *b*) hacia el oeste, *c*) hacia el sur o *d*) hacia arriba.

36. **OM** Un conductor largo, recto y horizontal está en el ecuador y conduce una corriente. ¿En qué dirección debería estar la corriente si se pretende que el objeto equilibre el peso del conductor con la fuerza magnética sobre él? *a*) Hacia el este, *b*) hacia el oeste, *c*) hacia el sur o *d*) hacia arriba.

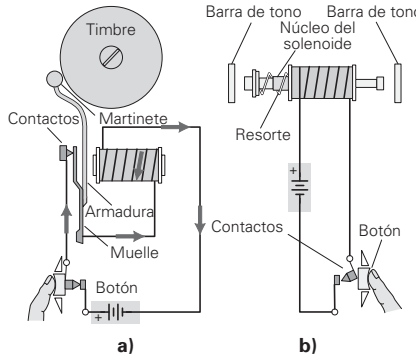
37. **OM** Usted está viendo horizontalmente hacia el oeste, directamente al plano circular de una bobina que conduce corriente. La bobina está en un campo magnético uniforme y vertical hacia arriba. Cuando se libera, la parte superior de la bobina comienza a tirar alejándose de usted conforme la parte inferior gira hacia usted. ¿Cuál es el sentido de la corriente en la bobina? *a*) El de las manecillas del reloj, *b*) contrario a las manecillas del reloj o *c*) no es posible determinarlo a partir de los datos.

38. **PC** Dos conductores rectos son paralelos entre sí y las corrientes en ellos tienen el mismo sentido. ¿Los conductores se atraerán o se repelerán? ¿Cómo se comparan las magnitudes de estas fuerzas sobre cada conductor?

39. **PC** Prediga qué sucede a la longitud de un resorte cuando pasa una gran corriente eléctrica por él. [*Sugerencia:* examine la dirección de la corriente en las espiras vecinas del resorte.]

40. **PC** ¿Es posible orientar una espira de corriente dentro de un campo magnético uniforme de tal manera que no exista un momento de torsión sobre ella? En caso afirmativo, describa la orientación (u orientaciones).

41. **PC** Explique el funcionamiento de un timbre eléctrico y de las campanillas eléctricas que se ilustran en la ▼figura 19.36.

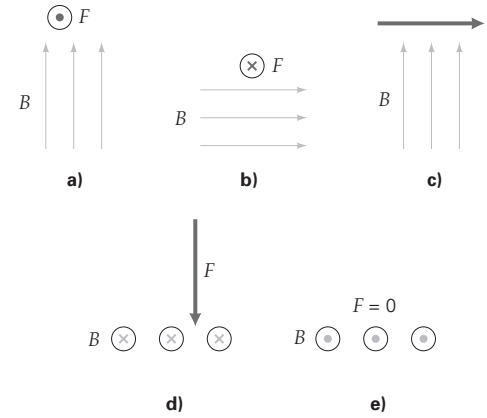


▲ **FIGURA 19.36 Aplicaciones del electromagnetismo** Tanto ***a)*** el timbre eléctrico como ***b)*** la campanilla eléctrica tienen electroimanes. Véase el ejercicio 41.

42. **EI** ● Un segmento de conductor, recto y horizontal, transporta una corriente en dirección $+x$ dentro de un campo magnético con la dirección $-z$. *a*) ¿La fuerza magnética sobre el conductor está dirigida hacia 1) $-x$, 2) $+z$, 3) $+y$ o 4. $-y$? Explique por qué. *b*) Si el conductor tiene 1.0 m de longitud y transporta una corriente de 5.0 A, y la magnitud del campo magnético es 0.30 T, ¿cuál es la magnitud de la fuerza sobre el conductor?

43. ● Un tramo de alambre de 2.0 m de longitud conduce una corriente de 20 A, dentro de un campo magnético uniforme de 50 mT, cuya dirección forma un ángulo de 37° con la dirección de la corriente. Determine la fuerza sobre el alambre.

44. ●● Demuestre cómo se puede aplicar una regla de la mano derecha para determinar la dirección de la corriente en un conductor dentro de un campo magnético uniforme, si se conoce la fuerza sobre el conductor. En la ▼figura 19.37 se muestran las fuerzas sobre algunos conductores específicos.



▲ **FIGURA 19.37 La regla de la mano derecha** Véase el ejercicio 44.

45. ●● Un conductor recto de 50 cm de longitud transporta una corriente de 4.0 A, dirigida verticalmente hacia arriba. Si sobre el conductor actúa una fuerza de 1.0×10^{-2} N en dirección al este, que se debe a un campo magnético en ángulo recto con el tramo de alambre, ¿cuáles son la magnitud y la dirección del campo magnético?

46. ●● Un campo magnético horizontal de 1.0×10^{-4} T forma un ángulo de 30° con la dirección de la corriente que pasa por un conductor largo y recto de 75 cm de longitud. Si el conductor lleva una corriente de 15 A, ¿cuál es la magnitud de la fuerza sobre él?

47. ●● Un alambre conduce 10 A de corriente en dirección $+x$, dentro de un campo magnético uniforme de 0.40 T. Calcule la magnitud de la fuerza por unidad de longitud, y la dirección de la misma, si el campo magnético apunta en dirección *a*) $+x$, *b*) $+y$, *c*) $+z$, *d*) $-y$ y *e*) $-z$.

48. ●● Un conductor recto de 25 cm de longitud está orientado verticalmente dentro de un campo magnético uniforme horizontal de 0.30 T, que apunta en dirección $-x$. ¿Qué corriente (incluyendo su dirección) hará que el conductor esté sometido a una fuerza de 0.050 N en la dirección $+y$?

49. ●● Por un conductor pasa una corriente de 10 A en la dirección $+x$. Calcule la fuerza por unidad de longitud del conductor, si se encuentra en un campo magnético cuyos componentes son $B_x = 0.020$ T, $B_y = 0.040$ T y $B_z = 0$ T.

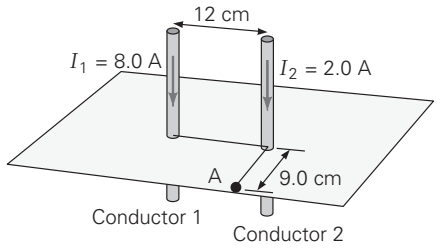
50. ●● Para arrancar un automóvil desde el acumulador de otro se usan unos cables pasacorriente para conectar las terminales de los dos acumuladores. Si por los cables pasan 15 A de corriente durante el arranque, y son paralelos y están a 15 cm de distancia, ¿cuál es la fuerza por unidad de longitud sobre los cables?

51. **EI** ●● Dos conductores largos, rectos y paralelos llevan corriente en la misma dirección. *a*) Aplique las reglas de la mano derecha para fuentes y para fuerzas, y determine si las fuerzas sobre los conductores son 1) de atracción o 2) de repulsión. *b*) Si los conductores están a 24 cm de distancia y las corrientes que conducen son de 2.0 A y 4.0 A, respectivamente, calcule la fuerza por unidad de longitud sobre cada uno.

52. **EI** ●● Dos conductores largos, rectos y paralelos están a 10 cm de distancia y conducen corrientes en sentidos contrarios. *a*) Utilice las reglas de la mano derecha para fuentes y para fuerzas, y determine si las fuerzas sobre los conductores son de 1) atracción o 2) repulsión. *b*) Si los alambres conducen corrientes iguales de 3.0 A, ¿cuál es la fuerza por unidad de longitud sobre ellos?

53. ●● Una línea de transmisión eléctrica cd casi horizontal, sobre las latitudes medias de América del Norte, conduce 1000 A de corriente, directamente hacia el este. Si el campo magnético terrestre en ese lugar es hacia el norte y con una magnitud de 5.0×10^{-5} T a un ángulo de 45° por debajo de la horizontal, ¿cuáles son la magnitud y la dirección de la fuerza magnética sobre un tramo de 15 m de la línea?

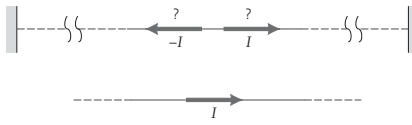
54. ●● ¿Cuál es la fuerza (incluyendo dirección) por unidad de longitud sobre el conductor 1 de la ▼figura 19.38?



▲ **FIGURA 19.38 Conductores paralelos con corriente** Véanse los ejercicios 54, 55, 67, 73 y 76.

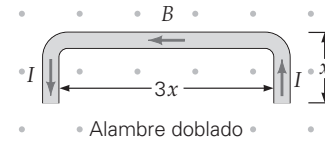
55. ●● ¿Cuál es la fuerza (incluyendo dirección) por unidad de longitud sobre el conductor 2 de la figura 19.38?

56. **EI** ●● Se coloca un alambre largo a 2.0 cm directamente debajo de otro rígidamente montado (▼figura 19.39). *a*) Utilice las reglas de la mano derecha para fuentes y para fuerzas, y determine si las corrientes en los alambres deberían tener 1) el mismo sentido o 2) sentido contrario para que el alambre inferior esté en equilibrio (es decir, para que "flote"). *b*) Si el alambre inferior tiene una densidad lineal de masa de 1.5×10^{-3} kg/m y los alambres conducen la misma corriente, ¿cuál debe ser esa corriente?



▲ **FIGURA 19.39 Levitación magnética** El alambre de abajo es atraído magnéticamente hacia el alambre de arriba (fijo rígidamente). Véase el ejercicio 56.

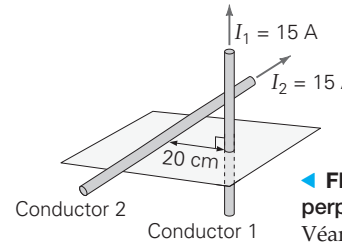
57. ●● Un alambre se dobla como en la ▼figura 19.40 y se coloca en un campo magnético de 1.0 T de magnitud, en la dirección indicada. Calcule la magnitud de la fuerza neta sobre cada segmento del conductor, si $x = 50$ cm, y si por él pasa una corriente de 5.0 A en la dirección que se indica.



◀ **FIGURA 19.40 Conductor con corriente en un campo magnético** Véase el ejercicio 57.

58. **EI** ●●● Una espira de alambre con corriente está en un campo magnético de 1.6 T. *a*) Para que el momento de torsión magnético sobre la espira sea máximo, el plano de la espira debe ser 1) paralelo, 2) perpendicular o 3) a 45° respecto al campo magnético? Explique por qué. *b*) Si la espira es rectangular, y sus dimensiones son 20 por 30 cm, y por ella pasa una corriente de 1.5 A, ¿cuál es la magnitud del momento magnético de la espira y cuál es el momento de torsión máximo? *c*) ¿Cuál sería el ángulo (o ángulos) entre el vector momento magnético y la dirección del campo magnético si la espira experimentara sólo el 20% de su momento de torsión máximo?

59. ●●● Dos conductores rectos forman ángulo recto entre sí como se ve en la ▼figura 19.41. ¿Cuál es la fuerza neta sobre cada uno? ¿Hay un momento de torsión neto sobre cada uno?



◀ **FIGURA 19.41 Conductores perpendiculares con corriente** Véanse los ejercicios 59 y 84.

60. ●●● Un alambre forma una espira rectangular con 0.20 m^2 de área y conduce 0.25 A de corriente. La espira puede girar libremente en torno a un eje perpendicular a un campo magnético uniforme de 0.30 T de intensidad. El plano de la espira forma un ángulo de 30° con la dirección del campo magnético. *a*) ¿Cuál es la magnitud del momento de torsión sobre la espira? *b*) ¿Cómo cambiaría el campo magnético para duplicar la magnitud del momento de torsión en el inciso *a*? *c*) ¿Podría duplicarse el momento de torsión en el inciso *a* sólo cambiando el ángulo? Explique su respuesta. Si es así, encuentre ese ángulo.

19.6 Electromagnetismo: la fuentes de los campos magnéticos

61. **OM** Un conductor largo y recto es paralelo al suelo y lleva una corriente constante hacia el este. En un punto directamente debajo de él, ¿cuál es la dirección del campo magnético que produce? *a*) Norte, *b*) este, *c*) sur, *d*) oeste.

62. **OM** Usted ve directamente hacia un extremo de un solenoide largo. El campo magnético en su centro apunta hacia usted. ¿Cuál es el sentido de la corriente en el solenoide, tal como usted la ve? *a*) El de las manecillas del reloj, *b*) contrario al de las manecillas del reloj, *c*) directamente hacia usted, *d*) directamente alejándose de usted.

63. **OM** Una espira de alambre que conduce corriente está en el plano de esta página. Fuera de la espira, su campo magnético apunta hacia la página. ¿Cuál es el sentido de la corriente en la espira? *a*) El de las manecillas del reloj, *b*) contrario al de las manecillas del reloj o *c*) no es posible determinarlo a partir de los datos.

64. **PC** Una espira circular con corriente yace plana sobre una mesa y crea un campo en su centro. Una brújula calibrada, cuando se coloca en el centro de la espira, apunta hacia abajo. Viéndola directamente hacia abajo, ¿cuál es la dirección de la corriente? Explique su razonamiento.

65. **PC** Si la distancia que hay entre usted y un conductor largo con corriente se duplica, ¿qué tendría que hacer a la corriente para conservar la intensidad del campo magnético que había en la posición cercana pero invirtiendo la dirección? Explique su respuesta.

66. **PC** Se tienen dos solenoides, uno con 100 vueltas y el otro con 200. Si ambos conducen la misma corriente, ¿el que tiene más vueltas producirá necesariamente un campo magnético más intenso en su centro? Explique por qué.

67. **PC** Para minimizar los efectos del campo magnético, la mayoría de los cables de los aparatos se colocan muy juntos. Explique cómo funciona esto para reducir el campo externo de la corriente en el cable.

68. **PC** Dos espiras de alambre circulares son coplanares (es decir, sus áreas están en el mismo plano) y tienen un centro común. La externa conduce una corriente de 10 A en el sentido de las manecillas del reloj. Para crear un campo magnético cero en su centro, ¿cuál debería ser la dirección de la corriente en la espira interior? ¿Su corriente debería ser de 10 A, mayor que 10 A, o menor que 10 A? Explique su razonamiento.

69. ● El campo magnético en el centro de una bobina de 50 vueltas y 15 cm de radio es de 0.80 mT. Calcule la corriente que pasa por la bobina.

70. ● Un alambre largo y recto conduce 2.5 A. Calcule la magnitud del campo magnético a 25 cm del alambre.

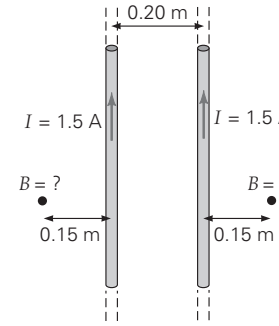
71. ● En un laboratorio de física, un alumno descubre que la magnitud de un campo magnético, a cierta distancia de un alambre largo, es 4.0 μT. Si el alambre conduce una corriente de 5.0 A, ¿cuál es la distancia del campo magnético al alambre?

72. ● Un solenoide tiene 0.20 m de longitud y está formado por 100 vueltas de alambre. En su centro, produce un campo magnético de 1.5 mT de intensidad. Calcule la corriente que pasa por la bobina.

73. ●● Dos conductores largos y paralelos llevan 8.0 A y 2.0 A (figura 19.38). *a*) ¿Cuál es la magnitud del campo magnético a la mitad de la distancia entre los conductores? *b*) ¿Dónde es igual a cero el campo magnético sobre una recta que une a los dos conductores y es perpendicular a ellos?

74. ●● Dos conductores largos y paralelos están a 50 cm de distancia y cada uno lleva una corriente de 4.0 A en dirección horizontal. Calcule el campo magnético a medio camino entre los conductores, si las corrientes tienen *a*) el mismo sentido y *b*) sentido contrario.

75. ●● Dos conductores largos y paralelos están a 0.20 m de distancia y llevan corrientes iguales de 1.5 A en la misma dirección. Calcule la magnitud del campo magnético a 0.15 m de cada conductor, en su lado opuesto al otro conductor (▼figura 19.42).



▲ **FIGURA 19.42 Suma de campos magnéticos** Véase el ejercicio 75.

76. ●● En la figura 19.38, determine el campo magnético (magnitud y dirección) en el punto A, que se encuentra a 9.0 cm del conductor 2, sobre una perpendicular a la recta que une los conductores.

77. ●● Supongamos que la corriente en el conductor 1 de la figura 19.38 tuviera sentido contrario. ¿Cuál sería el campo magnético a la mitad de la distancia entre los conductores?

78. ●● ¿Cuánta corriente debe pasar en una espira circular de 10 cm de radio para producir un campo magnético en su centro, de la misma magnitud que el componente horizontal del campo magnético terrestre en el ecuador (aproximadamente de 0.40 G)?

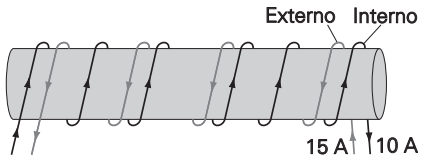
79. ●● Una bobina circular de cuatro vueltas y 5.0 cm de radio conduce una corriente de 2.0 A en el sentido de las manecillas del reloj, vista desde arriba de su plano. ¿Cuál es el campo magnético en su centro?

80. **El** ●● Una espira circular de alambre en el plano horizontal conduce una corriente en sentido contrario al de las manecillas del reloj, vista desde arriba. *a*) Utilice la regla de la mano derecha para fuentes y determine si la dirección del campo magnético en el centro de la espira 1) es hacia el observador o 2) se aleja del observador. *b*) Si el diámetro de la espira es de 12 cm y la corriente es de 1.8 A, ¿cuál es la magnitud del campo magnético en el centro de la espira?

81. ●● Una espira circular de alambre, de 5.0 cm de radio, conduce una corriente de 1.0 A. Otra espira circular es concéntrica a la primera (esto es, las dos espiras tienen un centro común) y tiene un radio de 10 cm. El campo magnético en el centro de las espiras es el doble de lo que produciría la primera por sí sola, pero con dirección opuesta. ¿Cuál es el radio de la segunda espira?

82. ●●● Se devana un solenoide de 10 cm de longitud con 1000 vueltas de alambre. En el centro del solenoide se produce un campo magnético de 4.0×10^{-4} T. *a*) ¿Qué tan largo debe ser el solenoide para producir un campo de 6.0×10^{-4} T en su centro? *b*) Si sólo se ajustan las vueltas, ¿qué número se necesitará para producir un campo de 8.0×10^{-4} T en el centro? *c*) ¿Qué corriente en el solenoide será necesaria para producir un campo de 9.0×10^{-4} T pero con dirección opuesta?

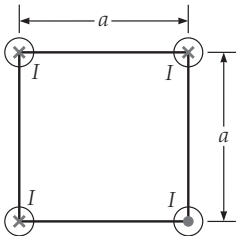
83. ●●● Se devana un solenoide con 200 vueltas de alambre por centímetro. Sobre este devanado se enrolla una segunda capa de alambre aislado con 180 vueltas por centímetro. Cuando el solenoide funciona, la capa interior conduce una corriente de 10 A y la exterior una de 15 A, en sentido contrario a la de la capa interior (▼figura 19.43). *a*) ¿Cuál es la magnitud del campo magnético en el centro de este solenoide con dos devanados? *b*) ¿Cuál es la dirección del campo magnético en el centro de esta configuración?



▲ **FIGURA 19.43 ¿Se duplica?** Véase el ejercicio 83.

84. ●●● Dos conductores largos y perpendiculares entre sí conducen corrientes de 15 A, como se muestra en la figura 19.41. ¿Cuál es la magnitud del campo magnético a media distancia de la línea que une a los conductores?

85. ●●● Cuatro alambres ocupan las esquinas de un cuadrado de lado *a*, como se ve en la ▼figura 19.44, y conducen corrientes iguales *I*. Calcule el campo magnético en el centro del cuadrado, en función de estos parámetros.



◀ **FIGURA 19.44 Conductores con corriente en un arreglo cuadrado** Véase el ejercicio 85.

86. ●●● Una partícula de carga *q* y masa *m* se mueve en un plano horizontal, en ángulo recto respecto a un plano magnético uniforme vertical *B*. *a*) ¿Cuál es la frecuencia *f* del movimiento circular de la partícula, en función de *a*, *B* y *m*? (Ésta es la llamada *frecuencia ciclotrónica.*) *b*) Demuestre que el tiempo necesario para que cualquier partícula cargada describa una revolución completa es independiente de su velocidad y de su radio. *c*) Calcule el radio de la trayectoria a la frecuencia ciclotrónica, si la partícula es un electrón con velocidad $v = 1.0 \times 10^5$ m/s, y la intensidad del campo es $B = 1.0 \times 10^{-4}$ T.

19.7 Materiales magnéticos

87. OM La fuente principal de magnetismo en los materiales magnéticos la constituye(n) *a*) las órbitas de los electrones, *b*) el espín del electrón, *c*) los polos magnéticos o *d*) las propiedades magnéticas.

88. OM Cuando se coloca un material ferromagnético en un campo magnético externo, *a*) la orientación de los dominios puede cambiar, *b*) las fronteras de los dominios pueden cambiar, *c*) se crean nuevos dominios o *d*) tanto *a* como *b* son válidas.

89. PC Si se ve hacia abajo sobre el plano de la órbita de un electrón en un átomo de hidrógeno, y el electrón la recorre en sentido contrario al de las manecillas del reloj, ¿cuál es la dirección del campo magnético que el electrón produce en el protón?

90. PC ¿Cuál es la finalidad del núcleo de hierro que se usa con frecuencia en el centro de un solenoide?

91. PC Explique varias formas de destruir o reducir el campo magnético de un imán permanente.

92. ●● Un solenoide con 100 vueltas por centímetro tiene un núcleo de hierro cuya permeabilidad relativa es de 2000. Por el solenoide pasa una corriente de 0.040 A. *a*) ¿Cuál es el campo magnético en el centro del solenoide? *b*) ¿Cuántas veces es mayor el campo magnético con el núcleo de hierro que sin él?

93. ●●● En el centro de la órbita circular del electrón en un átomo de hidrógeno, ¿cuál es el campo magnético (generado sólo por el electrón)? El radio de la órbita es de 0.0529 nm. [*Sugerencia:* calcule el periodo del electrón, teniendo en cuenta la fuerza centrípeta.]

*19.8 Geomagnetismo: el campo magnético terrestre

94. OM El campo magnético terrestre *a*) tiene polos que coinciden con los polos geográficos, *b*) sólo existe en los polos, *c*) invierte su polaridad luego de unos cuantos siglos o *d*) ninguna de las opciones anteriores es verdadera.

95. OM Las auroras boreales (véase la figura 19.32) *a*) sólo se presentan en el hemisferio norte, *b*) se relacionan con el cinturón inferior de Van Allen, *c*) suceden por las inversiones de los polos magnéticos terrestres o *d*) suceden principalmente cuando no hay perturbaciones solares.

96. OM Si la dirección de su brújula calibrada apuntara en línea recta hacia abajo, ¿dónde estaría usted? *a*) Cerca del polo norte geográfico, *b*) cerca del ecuador o *c*) cerca del polo sur geográfico.

97. OM Si un protón estuviera en órbita por encima del ecuador de la Tierra en el cinturón de Van Allen, ¿en qué dirección tendría que estar orbitando? *a*) Hacia el oeste, *b*) hacia el este o *c*) en cualquiera de las dos direcciones.

98. PC Determine la dirección de la fuerza que ejerce el campo magnético terrestre sobre un electrón cerca del ecuador para cada una de las siguientes situaciones. La velocidad del electrón se dirige *a*) al sur, *b*) al noroeste o *c*) hacia arriba?

99. PC Se supone que en un tiempo relativamente corto en términos geológicos, se invertirá la dirección del campo magnético de la Tierra. Después de eso, ¿cuál sería la polaridad del polo magnético cerca del polo norte geográfico de la Tierra?

Ejercicios adicionales

100. Un haz de protones se acelera desde el reposo, mediante una diferencia de potencial de 3.0 kV. Después, entra en una región donde su velocidad es inicialmente perpendicular a un campo eléctrico. El campo se produce con dos placas paralelas a 10 cm de distancia, y con una diferencia de potencial de 250 V entre ellas. Calcule la magnitud del

campo magnético (perpendicular a $\vec{\mathbf{E}}$) necesario para que el haz de protones pase sin desviarse entre las placas.

101. Un solenoide de 10 cm de longitud tiene 3000 vueltas de alambre, y por él pasa una corriente de 5.0 A. Lo rodea de forma concéntrica una bobina de 2000 vueltas de alambre, de la misma longitud (concéntrico significa que los dos dispositivos tienen un mismo eje central). Por la bobina externa pasa una corriente de 10 A, en la misma dirección que la corriente en el solenoide interior. Calcule el campo magnético en el centro común.

102. **EI** Un haz horizontal de electrones va de norte a sur en un tubo de descarga localizado en el hemisferio norte. *a*) La dirección de la fuerza magnética sobre el electrón se dirige 1) hacia el oeste, 2) hacia el este, 3) hacia el sur o 4) hacia el norte. Explique por qué. *b*) Si la velocidad del electrón es 1.0×10^3 m/s y se sabe que el componente vertical del campo magnético terrestre es 5.0×10^{-5} T, ¿cuál es la magnitud de la fuerza sobre cada electrón?

103. Un protón entra en un campo magnético uniforme que forma ángulo recto con su velocidad. La intensidad del campo es de 0.80 T, y el protón describe una trayectoria circular de 4.6 cm de radio. ¿Cuál es *a*) la cantidad de movimiento y *b*) la energía cinética del protón?

104. Al salir de un acelerador lineal, un haz horizontal y delgado de protones viaja en línea recta hacia el norte. Si 1.75×10^{13} protones pasan por un punto dado por segundo, determine la dirección del campo magnético y su intensidad a 2.40 m al este del haz. ¿Es probable que éste interfiera con la banda magnética de una tarjeta bancaria de cajero automático en comparación con el campo de la Tierra.

105. Una bobina circular de alambre de 200 vueltas tiene un radio de 10.0 cm y una resistencia total de 0.115 Ω. En su centro, la intensidad del campo magnético es de 7.45 mT. Determine el voltaje del suministro de potencia que genera la genera la corriente en la bobina.

106. Una bobina circular de 100 vueltas tiene un radio de 20.0 cm y conduce una corriente de 0.400 A. La normal al área de la bobina apunta en línea recta hacia el este. Cuando se coloca una brújula en el centro de la bobina, no apunta hacia el este, sino, en lugar de ello, forma un ángulo de 60° al norte del este. Con estos datos, determine *a*) la magnitud del componente horizontal del campo de la Tierra en ese lugar y *b*) la magnitud del campo de la Tierra en ese lugar si forma un ángulo de 55° por debajo de la horizontal.

107. **EI** Dos conductores largos y rectos están orientados de forma perpendicular a esta página. El conductor 1 lleva una corriente de 20.0 A hacia la página y, a 15.0 cm a su izquierda, el conductor 2 lleva una corriente de 5.00 A. En algún lugar de la línea que une a los dos conductores, hay un campo magnético igual a cero. *a*) ¿Cuál es la dirección de la corriente en el conductor 2? 1) Hacia fuera de la página, 2) hacia la página o 3) no es posible determinarla a partir de los datos. *b*) Encuentre el lugar donde el campo magnético es igual a cero.

108. **EI** Una bobina circular de alambre tiene la normal a su área apuntando hacia arriba. Una segunda bobina, más pequeña y concéntrica, conduce una corriente en sentido contrario. *a*) ¿En qué lugar del plano de estas bobinas, el campo magnético podría ser cero? 1) Sólo dentro de la de menor tamaño, 2) sólo entre la interior y la exterior, 3) sólo afuera de la más grande o 4) dentro de la más pequeña y fuera de la más grande. *b*) La de mayor tamaño es una bobina de alambre de 200 vueltas con un radio de 9.50 cm y conduce una corriente de 11.5 A. La segunda es de 100 vueltas y tiene un radio de 2.50 cm. Determine la corriente en la bobina interior de manera que el campo magnético en su centro común sea cero. Ignore el campo de la Tierra.

109. Un solenoide de 50 cm de largo tiene 100 vueltas de alambre y conduce una corriente de 0.95 A. Tiene un núcleo ferromagnético que llena por completo su interior, donde el campo es de 0.71 T. Determine *a*) la permeabilidad magnética y *b*) la permeabilidad relativa del material.

Los siguientes problemas de física Physlet pueden utilizarse con este capítulo.
27.1, 27.2, 27.3, 27.4, 27.5, 27.6, 27.7, 27.8, 27.9, 27.10, 28.1, 28.6

CAPÍTULO 20

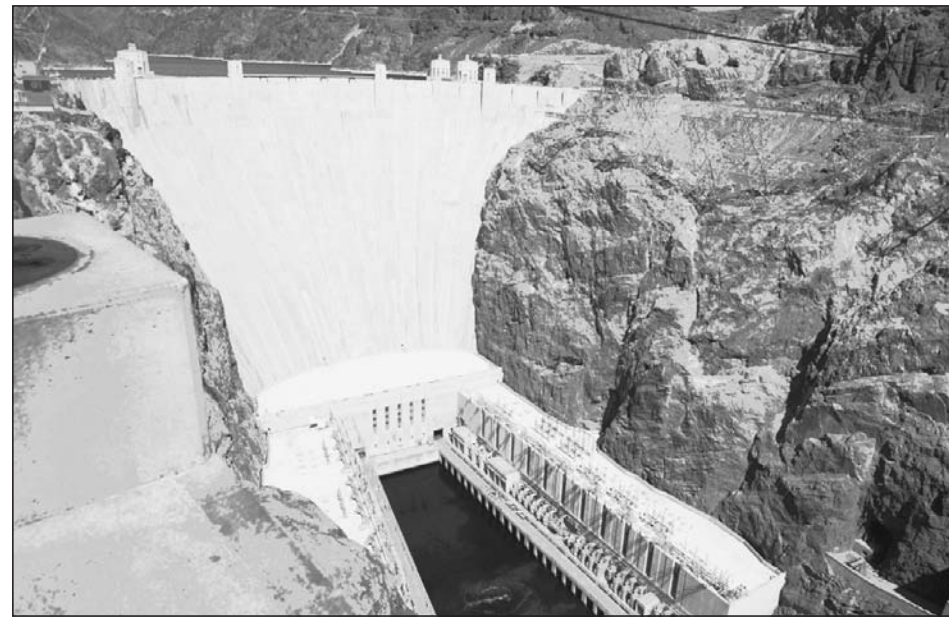
INDUCCIÓN Y ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

20.1 Fem inducida: ley de Faraday y ley de Lenz 657

20.2 Generadores eléctricos y contra fem 663

20.3 Transformadores y transmisión de energía 668

20.4 Ondas electromagnéticas 672



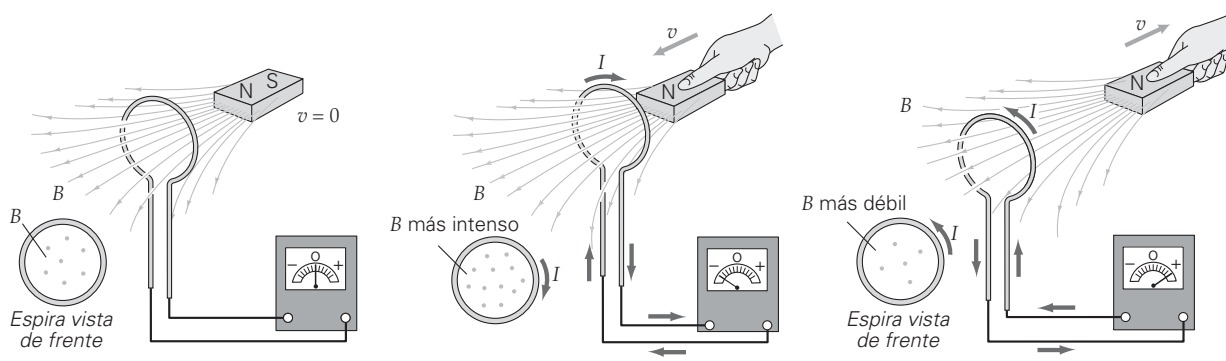
HECHOS DE FÍSICA

- Nikola Tesla (1856-1943), el científico e inventor serbio-estadounidense cuyo apellido es la unidad SI de intensidad de campo magnético, inventó los dínamos, transformadores y motores de ca. Vendió los derechos de patente de estos aparatos a George Westinghouse. Esto desembocó en una lucha entre los sistemas de cd de Thomas Edison y la versión de ca de Westinghouse de generación y distribución de energía eléctrica. Finalmente, este último ganó e instaló el primer generador eléctrico a gran escala en las cataratas del Niágara.
- Para demostrar la seguridad de la energía eléctrica ante un público escéptico a principios del siglo XX, Tesla organizó exhibiciones de lámparas eléctricas y permitía que la electricidad fluyera por su cuerpo. Westinghouse utilizó su sistema para iluminar la exposición World's Columbian en Chicago, en 1893. Tesla demostró que la Tierra podría servir como conductor y, sin la ayuda de cables, encendió 200 lámparas a una distancia de 25 millas. Con su transformador gigante (una bobina de Tesla), Westinghouse creó iluminación artificial, produciendo rayos que medían unos 100 pies (30 metros) de largo.
- Las ondas de radio, radar, luz visible y rayos X son ondas electromagnéticas. Mejor conocidas como luz, todas ellas obedecen las mismas relaciones matemáticas; sólo difieren en su frecuencia y longitud de onda. En el vacío, todas ellas viajan exactamente con la misma rapidez, c (3.00×10^8 m/s).
- El físico escocés James Clerk Maxwell (1831-1879) desarrolló e integró por completo las ecuaciones de electricidad y magnetismo. En conjunto, se conocen como las ecuaciones de Maxwell, y su interpretación de las mismas fue uno de los mayores logros en la física del siglo XIX.

Como se vio en el capítulo anterior, una corriente eléctrica produce un campo magnético. Pero la relación entre la electricidad y el magnetismo no termina ahí. En este capítulo explicaremos que, en las condiciones adecuadas, un campo magnético produce una corriente eléctrica. ¿Cómo sucede esto? En el capítulo 19 sólo se consideraron campos magnéticos *constantes*. En una espira de alambre estacionaria en un campo magnético constante no se induce ninguna corriente. Sin embargo, si cambia el campo magnético al paso del tiempo, o si la espira de alambre se mueve a través del campo, o si gira en él, *sí* se induce una corriente.

Los usos prácticos de esta interrelación entre electricidad y magnetismo son numerosos. Un ejemplo se presenta durante la reproducción de una cinta de video, que en realidad es una cinta magnética con información codificada de acuerdo con las variaciones en su magnetismo. Con esas variaciones se producen corrientes eléctricas que, a su vez, son amplificadas y la señal se envía al televisor para su reproducción. Cuando se guarda información en un disco de computadora o cuando se recupera información se realizan procesos similares.

En mayor escala está la generación de energía eléctrica, la base de nuestra civilización moderna. En las plantas hidroeléctricas, como la que aparece en la fotografía, se utiliza una de las fuentes de energía más antiguas y sencillas del mundo —la caída del agua— para generar electricidad. La energía potencial gravitacional del agua se convierte en energía cinética, y parte de esta energía cinética se transforma finalmente en energía eléctrica. Pero, ¿cómo sucede este último paso? Independientemente de cuál sea la fuente inicial de la energía —como la combustión de petróleo, carbón o gas, un reactor nuclear o la caída de agua—, la conversión real a energía eléctrica se hace mediante campos magnéticos e inducción electromagnética. En este capítulo no sólo se examinan los principios electromagnéticos básicos que hacen posible esa conversión, sino también se describen varias aplicaciones prácticas. Además, también se verá que la creación y propagación de la radiación electromagnética se relaciona estrechamente con la inducción electromagnética.



a) Sin movimiento entre el imán y la espira **b) El imán recto se acerca a la espira** **c) El imán se aleja de la espira**

▲ **FIGURA 20.1 Inducción electromagnética** ***a)*** Cuando no hay movimiento relativo entre el imán y la espira de alambre, la cantidad de líneas de campo que pasan por la espira (7 en este caso) es constante, y el galvanómetro no indica variación. ***b)*** Al acercar el imán hacia la espira aumenta la cantidad de líneas de campo que la atraviesan (ahora son 12), y se detecta una corriente inducida. ***c)*** Al alejar el imán de la espira disminuye (a 5) la cantidad de líneas de campo que atraviesan esta última. Ahora la corriente inducida tiene dirección contraria. (Observe la desviación de la aguja.)

20.1 Fem inducida: ley de Faraday y ley de Lenz

OBJETIVOS: *a*) Definir el flujo magnético y explicar cómo se crea una corriente inducida y *b*) determinar las fuerzas electromagnéticas inducidas y las corrientes

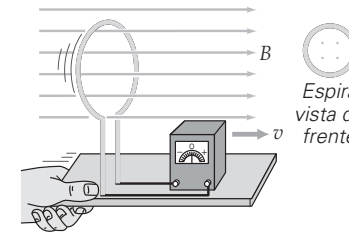
Recuerde que en el capítulo 17 vimos que *fem* significa *f*uerza *e*lectro*m*otriz, que es un voltaje o diferencia de potencial eléctrico capaz de crear una corriente eléctrica. Se observa en forma experimental que un imán que se mantiene estacionario cerca de una espira de alambre conductor *no* induce una fem (y, por lo tanto, no produce corriente) en esa espira (▲figura 20.1a). Sin embargo, si el imán se acerca a la espira, como se ve en la figura 20.1b, la desviación de la aguja de un galvanómetro indica que existe corriente en la espira, pero sólo durante el movimiento. Además, si el imán se aleja de la espira, como se ve en la figura 20.1c, la aguja del galvanómetro se desvía en dirección contraria, indicando una inversión de la dirección de la corriente; pero de nuevo, esto sólo sucede durante el movimiento.

Los movimientos de la aguja del galvanómetro, que indican la presencia de *corrientes inducidas*, también se registran si la espira se mueve acercándose o alejándose de un imán estacionario. Por lo tanto, el efecto depende del movimiento *relativo* de la espira y del imán. También se deduce que la corriente inducida depende de la rapidez de ese movimiento. Sin embargo, según los experimentos, hay una excepción notable. Si una espira se mueve (sin girar) dentro de un campo magnético *uniforme*, como se muestra en la ▸figura 20.2, no se induce corriente. Más adelante, en este apartado, veremos por qué esto es así.

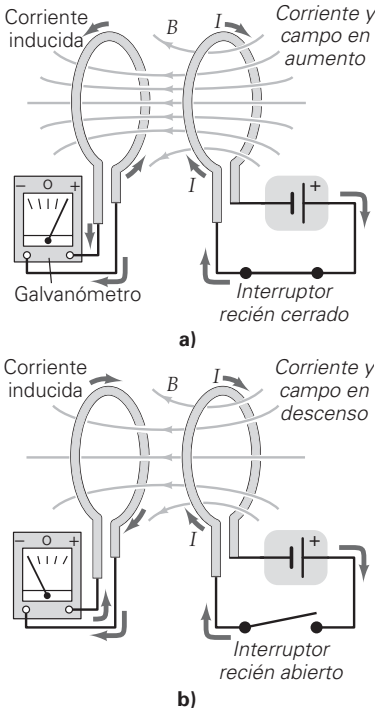
Hay otra forma de inducir una corriente en una espira estacionaria de alambre, que consiste en variar la corriente en otra espira cercana. Cuando en el circuito de la ▾figura 20.3a se cierra el interruptor de la batería, la corriente en la espira derecha pasa de cero a algún valor constante, en un breve lapso. Sólo durante ese tiempo el campo magnético provocado por la corriente en esa espira aumenta en la región de la espira izquierda. En ese momento, la aguja del galvanómetro se mueve, indicando que hay corriente en la espira izquierda. Cuando la corriente en la espira derecha llega a su valor estable, el campo magnético que produce se vuelve constante, y la corriente en la espira izquierda baja a cero. De igual manera, cuando se abre el interruptor de la espira derecha (figura 20.3b), su corriente y su campo disminuyen hasta llegar a cero, y el galvanómetro se desvía en dirección contraria, indicando una inversión de la dirección de la corriente inducida en la espira izquierda. El hecho que hay que hacer notar es que *la corriente inducida en una espira sólo se presenta cuando cambia el campo magnético en esa espira*.

En la figura 20.1, al mover el imán, cambia el ambiente magnético en una espira, y provoca una fem inducida, que, a la vez, causa una corriente inducida. Para el caso de *dos* espiras estacionarias (figura 20.3), una corriente variable en la espira derecha produjo un ambiente magnético variable en la espira izquierda, induciendo así una fem y una corriente en ella.* Hay una forma práctica de resumir lo que sucede tanto en la figura 20.1 como en la figura 20.3: para inducir corrientes en una espira o en un circuito completo —proceso que se llama **inducción electromagnética**—, lo que importa es si cambia el campo magnético por la espira o circuito.

*Se usa el término *inducción mutua* para describir el caso en el que se inducen fuerzas electromotrices y corrientes entre dos o más espiras.



▲ **FIGURA 20.2 Movimiento relativo sin inducción** Cuando una espira se mueve en dirección paralela a la de un campo magnético uniforme, no cambia la cantidad de líneas de campo que pasan por ella y, en consecuencia, no hay corriente inducida.



▲ **FIGURA 20.3 Inducción mutua** ***a)*** Cuando está cerrando el interruptor en el circuito de la espira de la derecha, la acumulación de corriente produce un campo magnético que cambia en la otra espira, e induce una corriente en ella. ***b)*** Cuando se abre el interruptor, el campo magnético desaparece y el campo magnético en la espira de la izquierda disminuye. La corriente inducida tiene entonces la dirección contraria. Las corrientes inducidas sólo se producen cuando cambia el campo magnético que atraviesa una espira y desaparecen cuando el campo alcanza un valor constante.

Michael Faraday, en Inglaterra, y Joseph Henry, en Estados Unidos, realizaron experimentos detallados con la inducción electromagnética, alrededor de 1830. Faraday determinó que el factor importante en la inducción electromagnética es la rapidez de cambio de la cantidad de líneas magnéticas que pasan por el área de la espira o el circuito. Esto es, descubrió que

> se produce una fem inducida en una espira o en un circuito completo siempre que cambia la cantidad de líneas de campo magnético que pasan por el plano de la espira o del circuito.

Flujo magnético

Puesto que la fem inducida en una espira depende de la rapidez de cambio de la cantidad de líneas de campo magnético que pasan por ella, para determinarla se necesita cuantificar la cantidad de líneas de campo que pasan por ella. Consideremos una espira de alambre dentro de un campo magnético uniforme (▾figura 20.4a). La cantidad de líneas de campo que pasan por ella dependen de su área, de su orientación en relación con el campo, y de la intensidad de ese campo. Para describir la orientación de la espira se emplea el concepto de un *vector área* ($\vec{\mathbf{A}}$). Su dirección es normal al plano de la espira, y su magnitud es igual a esa área. Para medir la orientación relativa, se usa un ángulo θ, formado entre el vector campo magnético ($\vec{\mathbf{B}}$) y el vector área ($\vec{\mathbf{A}}$). Por ejemplo, en la figura 20.4a, $\theta = 0°$, lo que significa que los dos vectores tienen la misma dirección o, de forma alternativa, que el plano del área es perpendicular al campo magnético.

Para el caso de un campo magnético que no varía dentro del área, la cantidad de líneas de campo magnético que pasan por esa área particular (el área dentro de la espira, en nuestro caso) es proporcional al **flujo magnético (Φ)**, que se define como

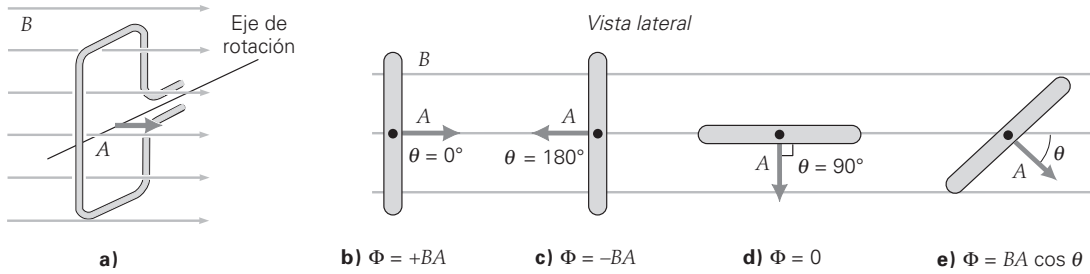
$$\Phi = BA\cos\theta \quad \textit{flujo magnético (en un campo magnético constante)} \tag{20.1}$$

La unidad SI de flujo magnético es tesla-metro cuadrado ($\mathrm{T \cdot m^2}$), o weber (Wb)*

La unidad SI de campo magnético es el tesla y las unidades SI de flujo magnético son $\mathrm{T \cdot m^2}$. En ocasiones, esta combinación se expresa como weber, que se define como $1\ \mathrm{Wb} = 1\ \mathrm{T \cdot m^2}$. La orientación de la espira con respecto al campo magnético afecta la cantidad de líneas de campo que pasan por ella, y este factor se explica por el término de coseno en la ecuación 20.1. A continuación se describirán varias orientaciones posibles:

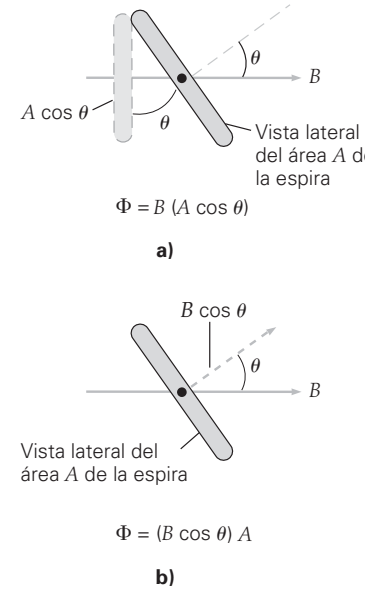
- Si $\vec{\mathbf{B}}$ y $\vec{\mathbf{A}}$ son paralelos ($\theta = 0°$), entonces el flujo magnético es positivo y tiene un valor máximo $\Phi_{\text{máx}} = BA\cos 0° = +BA$. Por la espira pasa la cantidad máxima posible de líneas de campo magnético en esta orientación (figura 20.4b).
- Si $\vec{\mathbf{B}}$ y $\vec{\mathbf{A}}$ tienen dirección contraria ($\theta = 180°$), entonces la magnitud del flujo magnético de nuevo es máxima, pero de signo contrario: $\Phi_{180°} = BA\cos 180° = -BA = -\Phi_{\text{máx}}$ (figura 20.4c).

▼ **FIGURA 20.4 Flujo magnético** ***a)*** El flujo magnético Φ es una medida de la cantidad de líneas de campo que pasan por una área A. El área se puede representar con un vector $\vec{\mathbf{A}}$ perpendicular al plano del área. ***b)*** Cuando el plano de una espira es perpendicular al campo y $\theta = 0°$, entonces $\Phi = \Phi_{\text{máx}} = +BA$. ***c)*** Cuando $\theta = 180°$, el flujo magnético tiene la misma magnitud, pero su dirección es contraria: $\Phi = -\Phi_{\text{máx}} = -BA$. ***d)*** Cuando $\theta = 90°$, entonces $\Phi = 0$. ***e)*** Conforme cambia la orientación del plano de la espira desde perpendicular al campo a una más paralela a éste, hay menos área abierta a las líneas de campo y, por lo tanto, disminuye el flujo. En general, $\Phi = BA\cos\theta$.



*Wilhelm Eduard Weber (1804-1891), un físico alemán, fue reconocido por sus investigaciones en magnetismo y electricidad, en especial, por sus estudios del magnetismo terrestre. La unidad *weber* se adoptó como la unidad SI de flujo magnético en 1935.

- Si $\vec{\mathbf{B}}$ y $\vec{\mathbf{A}}$ son perpendiculares, no hay líneas de campo que pasen por el plano de la espira, y el flujo es cero: $\Phi_{90°} = BA \cos 90° = 0$ (figura 20.4d).
- Para los casos de orientaciones en ángulos intermedios, el flujo tiene un valor menor que el máximo, pero es distinto de cero (figura 20.4e). Se puede interpretar que $A \cos \theta$ es el área efectiva de la espira, perpendicular a las líneas de campo (▸figura 20.5a). De manera alternativa, se puede considerar que $B \cos \theta$ es el componente perpendicular del campo que pasa por toda el área A de la espira, como se ve en la figura 20.5b. Así, se puede pensar que la ecuación 20.1 es $\Phi = (B \cos \theta)A$, o $\Phi = B(A \cos \theta)$, dependiendo de la interpretación. En cualquiera de estos casos, el resultado es el mismo.



▲ **FIGURA 20.5 Flujo magnético a través de una espira: una interpretación alternativa** En lugar de definir el flujo (Φ) ***a)*** en función del campo magnético (B) que pasa por una área reducida ($A \cos \theta$), se puede definir ***b)*** en función del componente perpendicular ($B \cos \theta$) del campo magnético que atraviesa a A. En cualesquiera de las formas, Φ es una medida de la cantidad de líneas de campo que pasan por A, y se determina mediante $\Phi = BA \cos \theta$ (ecuación 20.1).

Ley de Faraday de inducción y ley de Lenz

Con base en experimentos cuantitativos, Faraday determinó que la fem ($\mathscr{E}$) inducida en una bobina (que, por definición, consiste en una serie de N espiras individuales o vueltas) depende de la rapidez de cambio de la cantidad de líneas de campo magnético que pasan por todas las vueltas, es decir, *la rapidez de cambio del flujo magnético por todas las vueltas (flujo total)*. Esta dependencia se llama **ley de Faraday de la inducción** y se expresa en forma matemática como sigue:

$$\mathscr{E} = -N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{\Delta(N\Phi)}{\Delta t} \qquad \textit{ley de Faraday para fem inducida} \qquad (20.2)$$

donde $\Delta\Phi$ es el cambio de flujo que pasa por una espira. En una bobina de N vueltas de alambre, el cambio total de flujo es $N\Delta\Phi$. Observe que la fem inducida en la ecuación 20.2 es un valor promedio para el intervalo de tiempo Δt (¿por qué?).

En la ecuación 20.2 se incluye el signo menos para indicar la *dirección*, de la fem inducida, que no hemos analizado aún. El físico ruso Heinrich Lenz (1804-1865) descubrió la ley que establece la dirección de la fem inducida. La **ley de Lenz** se enuncia como sigue:

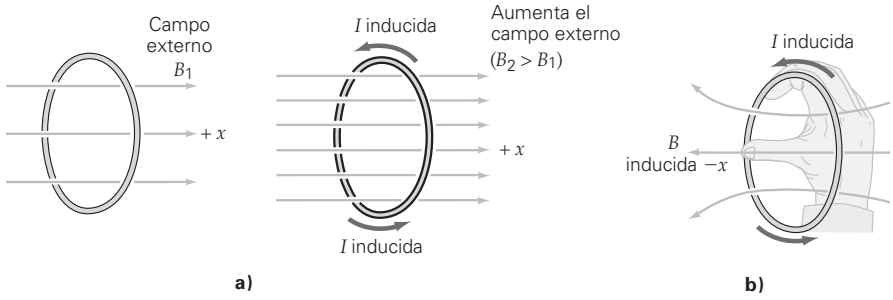
> Una fem inducida en una espira o bobina de alambre tiene una dirección tal que la corriente que origina genera su propio campo magnético, que se opone al cambio de flujo magnético que pasa por esa espira o bobina.

Esta ley significa que el campo magnético *generado por la corriente inducida* tiene una dirección que trata de evitar que cambie el flujo que pasa por la espira. Por ejemplo, si el flujo aumenta en la dirección $+x$, el campo magnético generado por la corriente inducida tendrá la dirección $-x$ (▾figura 20.6a). Este efecto tiende a anular el aumento de flujo, es decir, a *oponerse al cambio*. En esencia, el campo magnético generado por la corriente inducida trata de mantener el flujo magnético existente. A veces, este efecto se conoce como "inercia electromagnética" por analogía de la tendencia que tienen los objetos a resistirse a los cambios en su velocidad. A la larga, la corriente inducida no puede evitar que cambie el flujo magnético. Sin embargo, mientras cambia el flujo magnético que pasa por la espira, el campo magnético inducido se opondrá al cambio.

La dirección de la corriente inducida se establece con la **regla de la mano derecha para corriente inducida**:

> Cuando el pulgar de la mano derecha apunta en la dirección del campo inducido, los demás dedos apuntan en dirección de la corriente inducida.

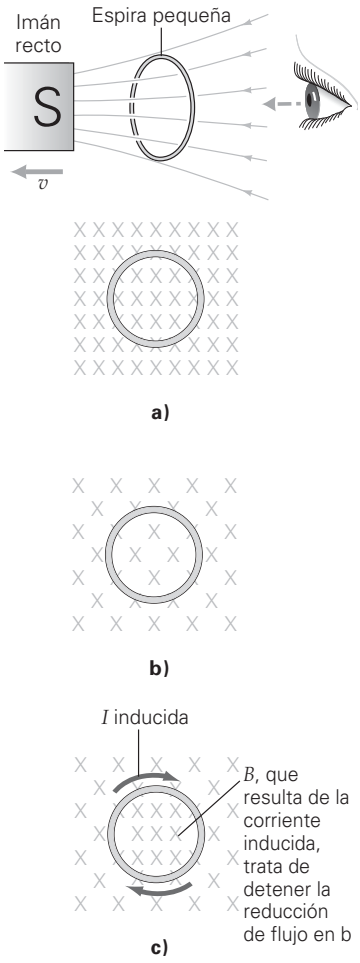
(Véase la figura 20.6b y el Ejemplo integrado 20.1.) Tal vez usted reconozca que esta regla es una versión de las reglas de mano derecha, con las que se determina la dirección de un campo magnético producido por una corriente (capítulo 19). En este caso se usa



◀ **FIGURA 20.6 Determinación de la dirección de la corriente** ***a)*** Un campo magnético externo que aumenta hacia la derecha. La corriente inducida crea su propio campo magnético para tratar de contrarrestar el cambio de flujo. ***b)*** La regla de la mano derecha (para fuentes) para la corriente (inducida) determina la dirección de esta última. Aquí, la dirección del campo magnético inducido es hacia la izquierda. Cuando el pulgar de la mano derecha apunta en esa dirección, los demás dedos indican la dirección de la corriente.

PHYSLET®
Ilustración 29.2 Espira en un cambio magnético variable

PHYSLET®
Exploración 29.1 Ley de Lenz



▲ **FIGURA 20.7** Inducción de corrientes mediante un imán recto ***a)*** El extremo sur de un imán recto se aleja rápidamente de una pequeña espira de alambre. ***b)*** Una vista de la espira desde la derecha revela que el campo magnético apunta alejándose del observador (es decir, en dirección hacia la página) y que, además, disminuye. ***c)*** Para tratar de contrarrestar la pérdida de flujo magnético hacia la página, se induce corriente en el sentido de las manecillas del reloj, para formar su propio campo magnético también hacia la página. Véase el Ejemplo integrado 20.1.

PHYSLET®

Exploración 29.3 Espira cerca de un cable

a la inversa. Por lo general, se conoce la dirección del campo inducido (por ejemplo, $-x$ en la figura 20.6b), y se desea conocer la dirección de la corriente que lo produce. En el Ejemplo integrado 20.1 se ilustra una aplicación de la ley de Lenz.

Ejemplo integrado 20.1 ■ La ley de Lenz y las corrientes inducidas

a) El extremo sur de un imán recto se aleja de una pequeña bobina de alambre (véase la ◀figura 20.7a.) Viendo desde atrás de la bobina hacia el extremo sur del imán (figura 20.7b), ¿qué dirección tiene la corriente inducida? 1) Sentido contrario al de las manecillas del reloj, 2) sentido de las manecillas del reloj o 3) no hay corriente inducida. *b*) Suponga que inicialmente el campo magnético que cruza el área de la bobina tiene un valor constante de 40 mT; el radio de la bobina mide 2.0 mm, y esta última tiene 100 vueltas de alambre. Calcule la magnitud de la fem promedio inducida en la bobina, si se retira el imán recto en 0.75 s.

a) Razonamiento conceptual. Al principio hay flujo magnético *que entra* en el plano de la bobina (figura 20.7b) y, más adelante, cuando el imán está muy alejado de la bobina, no hay flujo magnético: el flujo cambió. Así, debe haber algo de fem inducida, y se sabe que la respuesta 3 no es correcta. Conforme se aleja el imán recto, el campo se debilita, pero mantiene su dirección. La fem inducida entonces producirá una corriente (inducida) que, a la vez, producirá un campo magnético hacia la página, para tratar de evitar la disminución del flujo. La fem inducida y la corriente siguen el sentido de las manecillas del reloj, según se determina aplicando la regla de la mano derecha para corriente inducida (figura 20.7c). La respuesta correcta es la 2.

b) Razonamiento cuantitativo y solución. Este ejemplo es una aplicación directa de la ecuación 20.2. El flujo inicial es el máximo posible. Se listan los datos y se hace la conversión a unidades SI:

Dado: $B_i = 40\text{ mT} = 0.040\text{ T}$
$r = 2.00\text{ mm} = 2.00 \times 10^{-3}\text{ m}$
$N = 100$ vueltas
$\Delta t = 0.75\text{ s}$

Encuentre: la fem $\mathscr{E}$ inducida (magnitud)

Para determinar el flujo magnético inicial que atraviesa una espira de la bobina, se utiliza la ecuación 20.1, con el ángulo $\theta = 0°$. (¿Por qué?) El área es $A = \pi r^2 = \pi(2.00 \times 10^{-3}\text{ m})^2 = 1.26 \times 10^{-5}\text{ m}^2$. Así, el flujo inicial Φ_1 que atraviesa una espira es positivo (¿por qué?) y está dado por

$$\Phi_i = B_i A \cos\theta = (0.040\text{ T})(1.26 \times 10^{-5}\text{ m}^2)\cos 0° = +5.03 \times 10^{-7}\text{ T}\cdot\text{m}^2$$

Como el flujo final es cero, $\Delta\Phi = \Phi_f - \Phi_i = 0 - \Phi_i = -\Phi_i$. Entonces, el valor absoluto de la fem promedio inducida es

$$|\mathscr{E}| = N\frac{|\Delta\Phi|}{\Delta t} = (100\text{ vueltas})\frac{(5.03 \times 10^{-7}\text{ T}\cdot\text{m}^2\text{ vuelta})}{(0.75\text{ s})} = 6.70 \times 10^{-5}\text{ V}$$

Ejercicio de refuerzo. En este ejemplo, *a*) ¿qué dirección tiene la corriente inducida si un polo norte magnético se acerca a la bobina rápidamente? Explique por qué. *b*) En este ejemplo, ¿cuál sería la corriente promedio inducida si la bobina tuviera una resistencia total de 0.2 Ω? (*Las respuestas de todos los ejercicios de refuerzo aparecen al final del libro.*)

La ley de Lenz incorpora el principio de la conservación de la energía. Imagine un caso en el que por una espira de alambre pasa un flujo magnético creciente. Contraviniendo la ley de Lenz, suponga que el campo magnético producido por la corriente inducida *se sumará* al flujo, en vez de mantenerlo en su valor original. Este aumento de flujo produciría una corriente inducida todavía mayor. Esta mayor corriente inducida produciría un flujo magnético todavía mayor, lo que produciría una mayor corriente inducida, y así sucesivamente. Es un caso en el que se da algo de energía por nada, lo que viola la ley de la conservación de la energía.

Para comprender la dirección de la fem inducida en una espira, en función de fuerzas, considere un imán en movimiento (como, el de la figura 20.1b). Una espira con corriente eléctrica crea su propio campo magnético, semejante al de un imán recto (figuras 19.3 y 19.25). Así, la corriente inducida establece un campo magnético en la espira, y ésta funciona como un imán recto, cuya polaridad se opone al movimiento del imán recto real (▸figura 20.8). Trate de demostrar que si el imán recto se aleja de la espira, ésta ejerce una *atracción* magnética, para evitar que el imán se aleje: es la inercia electromagnética en acción.

Si se sustituye la ecuación 20.1 para el flujo magnético (Φ) en la ecuación 20.2, se obtiene

$$\mathscr{E} = -N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{N\Delta(BA\cos\theta)}{\Delta t} \qquad (20.3)$$

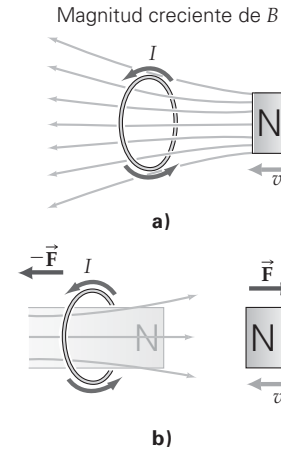
Por consiguiente, se produce una fem inducida si

1. cambia la intensidad del campo magnético,
2. cambia el área de la espira, y/o
3. cambia el ángulo entre el área de la espira y la dirección del campo.

En el caso 1, se produce un cambio de flujo a causa de un campo magnético variable en el tiempo, como el que se puede obtener de una corriente variable en el tiempo, en un circuito cercano, o al acercar un imán a una bobina, como en la figura 20.1 (o al acercar la bobina al imán).

En el caso 2, se produce un cambio de flujo a causa de un área de espira variable. Esto ocurre si una espira tiene circunferencia ajustable (como una espira que rodea a un globo al inflarlo; véase el ejercicio 23).

Por último, en el caso 3, se produce un cambio de flujo como resultado de un *cambio en la orientación de la espira*. Este caso se presenta cuando gira una bobina en un campo magnético. Es evidente el cambio en la cantidad de líneas de campo que atraviesan a la espira en las secuencias de la figura 20.4. La rotación de una bobina dentro de un campo magnético es una forma frecuente de inducir una fem, y se explicará por separado en el apartado 20.2. Las fem producidas al cambiar la intensidad del campo y el área de la espira se analizan en los dos ejemplos siguientes. (Véase también la sección A fondo 20.1, en la p. 664, en torno a algunas aplicaciones de la inducción electromagnética en relación con la lucha antiterrorista y con su contribución para hacer nuestra vida más fácil y segura.)



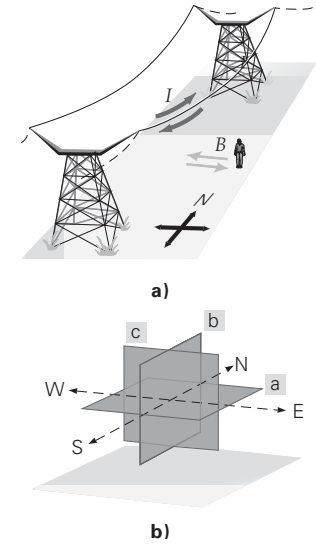
▲ **FIGURA 20.8** Descripción de la ley de Lenz en función de fuerzas ***a)*** Si el extremo norte de un imán recto se acerca con rapidez a una espira de alambre, se induce en ella la corriente en la dirección que se indica. ***b)*** Mientras existe la corriente inducida, la espira funciona como un pequeño imán recto con su "polo norte" cercano al extremo norte del imán real. Por consiguiente, hay una repulsión magnética. Es una forma alternativa de visualizar la ley de Lenz: inducir una corriente para tratar de evitar que cambie el flujo; en este caso, se trata de mantener alejado el imán y de mantener el valor inicial del flujo, es decir, cero.

Ejemplo conceptual 20.2 ■ Campos en los campos: la inducción electromagnética

En las áreas rurales donde las líneas de transmisión eléctrica pasan en camino a las grandes ciudades, es posible generar pequeñas corrientes eléctricas mediante la inducción en una espira conductora. Las líneas aéreas conducen corrientes alternas relativamente grandes, que invierten su dirección 60 veces por segundo. ¿Cómo debería orientarse el plano de la espira para maximizar la corriente inducida, si las líneas eléctricas van de norte a sur? *a*) De forma paralela a la superficie del terreno, *b*) perpendicular a la superficie del terreno, en dirección norte-sur o *c*) perpendicular a la superficie del terreno, en dirección este-oeste. (Véase la ▸figura 20.9a.)

Razonamiento y respuesta. Las líneas de campo magnético que se originan en conductores largos tienen forma circular. (Véase la figura 19.23.) Según la regla de la mano derecha para fuentes, la dirección del campo magnético a nivel del terreno es paralela a la superficie del mismo, pero alterna su dirección. Las opciones de orientación se muestran en la figura 20.9b. Ni la respuesta *a* ni la *c* son correctas, porque en esas orientaciones *nunca* habrá flujo magnético que pase por la espira. En este caso, el flujo sería constante y no habría fem inducida. Por consiguiente, la respuesta correcta es la *b*. Si la espira está orientada perpendicularmente a la superficie terrestre, con su plano en la dirección norte-sur, el flujo que la atraviesa variaría de cero hasta su valor máximo, y de regreso, 60 veces por segundo; esto maximiza la fem inducida y la corriente en la espira.

Ejercicio de refuerzo. Sugiera formas posibles de aumentar la corriente inducida en este ejemplo, cambiando sólo las propiedades de la espira y no de los cables aéreos.



▲ **FIGURA 20.9** Fem inducidas debajo de las líneas de transmisión ***a)*** Si las líneas eléctricas tienen la dirección norte-sur, entonces, directamente por debajo de la corriente alterna se produce un campo magnético que oscila entre este y oeste. ***b)*** Hay tres opciones para orientar la espira en el Ejemplo conceptual 20.2.

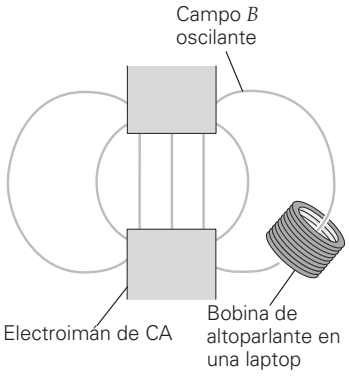
Ejemplo 20.3 ■ Corrientes inducidas: ¿riesgo potencial para los equipos?

Los instrumentos eléctricos se pueden dañar si hay un campo magnético que cambie con rapidez. Esto ocurre cuando un instrumento está cerca de un electroimán que funcione con corriente alterna; es posible que el campo externo del electroimán produzca un flujo magnético variable dentro de un instrumento cercano. Si las corrientes inducidas son suficientemente fuertes, podrían dañar el instrumento. Considere una bocina de una computadora que está cerca de ese electroimán (▾figura 20.10, p. 662). Suponga que el electroimán expone a la bocina a un campo magnético máximo de 1.00 mT, que invierte su dirección cada 1/120 s.

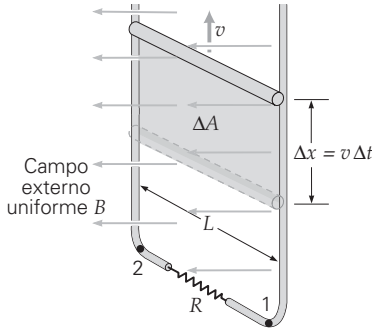
Suponga que la bobina del altavoz tiene 100 vueltas circulares de alambre (cada una de 3.00 cm de radio) y que su resistencia total es de 1.00 Ω. De acuerdo con el fabricante de la bocina, la corriente que pase por la bobina no debe exceder 25.0 mA. *a*) Calcule la magnitud de la fem promedio inducida en la bobina durante el intervalo de 1/120 s. *b*)¿es probable que la corriente inducida dañe la bobina de la bocina?

Razonamiento. *a*) El flujo pasa de un valor (máximo) positivo hasta un valor (máximo) negativo, en 1/120 s. El cambio de flujo magnético se determina utilizando la ecuación 20.1, con $\theta = 0°$ y $\theta = 180°$. La fem promedio inducida se calcula entonces con la ecuación 20.2. *b*) Una vez conocida la fem, se calcula la corriente inducida con $I = \mathscr{E}/R$.

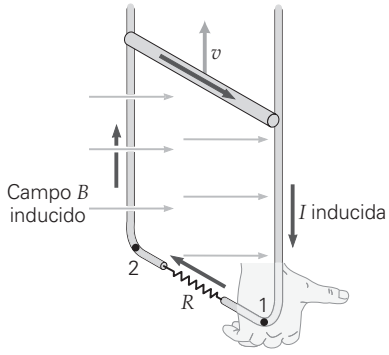
(continúa en la siguiente página)



▲ **FIGURA 20.10 ¿Riesgo para los instrumentos?** La bobina de un sistema de altoparlante en una computadora se coloca cerca de un electroimán con corriente alterna. El flujo variable en la bobina produce una fem inducida y, en consecuencia, una corriente inducida que depende de la resistencia de la bobina. Véase el ejemplo 20.3.



a)



b)

▲ **FIGURA 20.11 Fem de movimiento** ***a)*** Cuando se tira de la varilla metálica en el marco metálico, el área del circuito rectangular varía en el tiempo. Se induce en el circuito una corriente como resultado del flujo que cambia. ***b)*** Para contrarrestar el aumento de flujo hacia la izquierda, una corriente inducida debe crear un campo magnético hacia la derecha. Véase el Ejemplo integrado 20.4.

Solución. Se listan los datos y se hace la conversión a unidades SI,

Dado

$B_i = +1.00\ \text{mT} = +1.00 \times 10^{-3}\ \text{T}$ + en una dirección

$B_f = -1.00\ \text{mT} = -1.00 \times 10^{-3}\ \text{T}$ (en dirección contraria)

$\Delta t = 1/120\ \text{s} = 8.33 \times 10^{-3}\ \text{s}$

$N = 100$ vueltas

$R = 1.00\ \Omega$

$r = 3.00\ \text{cm} = 3.00 \times 10^{-2}\ \text{m}$

$I_{\text{máx}} = 25.0\ \text{mA} = 2.50 \times 10^{-2}\ \text{A}$

Encuentre: *a)* $\mathscr{E}$ (magnitud de la fem promedio inducida)

b) I (magnitud de la corrientepromedio inducida)

a) El área de la espira circular es $A = \pi r^2 = \pi(3.00 \times 10^{-2}\ \text{m})^2 = 2.83 \times 10^{-3}\ \text{m}^2$. Entonces, el flujo inicial que atraviesa *una* espira es (véase la ecuación 20.1):

$$\Phi_i = B_i A \cos\theta = (1.00 \times 10^{-3}\ \text{T})(2.83 \times 10^{-3}\ \text{m}^2/\text{vuelta})(\cos 0°) = 2.83 \times 10^{-6}\ \text{T}\cdot\text{m}^2/\text{vuelta}$$

Como el flujo final es el negativo de esto, el cambio de flujo a través de una espira es

$$\Delta\Phi = \Phi_f - \Phi_i = -\Phi_i - \Phi_i = -2\Phi_i = -5.66 \times 10^{-6}\ \text{T}\cdot\text{m}^2/\text{vuelta}$$

Por consiguiente, la fem promedio inducida es (según la ecuación 20.2)

$$\mathscr{E} = N\frac{|\Delta\Phi|}{\Delta t} = (100\ \text{vueltas})\left(\frac{5.66 \times 10^{-6}\ \text{T}\cdot\text{m}^2/\text{vuelta}}{8.33 \times 10^{-3}\ \text{s}}\right) = 6.79 \times 10^{-2}\ \text{V}$$

b) Este voltaje es pequeño, en relación con los que se presentan en la vida cotidiana, pero tome en cuenta que también la resistencia de la bobina es pequeña. Para determinar la corriente inducida en la bobina, se utiliza la relación entre voltaje, resistencia y corriente:

$$I = \frac{\mathscr{E}}{R} = \frac{6.79 \times 10^{-2}\ \text{V}}{1.00\ \Omega} = 6.79 \times 10^{-2}\ \text{A} = 67.9\ \text{mA}$$

Este valor excede la corriente permitida de 25.0 mA para la bocina, por lo que es probable que la bobina resulte dañada.

Ejercicio de refuerzo. En este ejemplo, si se alejaran la bobina del altoparlante y el imán, podría llegarse a un punto en el que la corriente promedio estuviera por debajo del nivel "peligroso" de 25.0 mA. Calcule la intensidad del campo magnético $B_{\text{máx}}$ en este punto.

Como un caso especial, es posible inducir fem y corrientes en conductores conforme éstos se mueven a través de un campo magnético. En esta situación, la fem inducida se llama *fem de movimiento*. Para ver cómo funciona esto, considere la situación en la ◂figura 20.11a. Conforme la barra se mueve hacia arriba, el área del circuito aumenta por $\Delta A = L\Delta x$ (figura 20.11a.) A rapidez constante, la distancia recorrida por la barra en un tiempo Δt es $\Delta x = v\Delta t$. Por consiguiente, $\Delta A = Lv\Delta t$. El ángulo (θ) entre el campo magnético y la normal al área siempre es 0°. Pero el área cambia, de manera que el flujo varía. Sin embargo, se sabe que $\Phi = BA\cos 0° = BA$; por eso, podemos escribir $\Delta\Phi = B\Delta A$ o $\Delta\Phi = BLv\Delta t$. Por consiguiente, a partir de la ley de Faraday, la magnitud de esta fem "de movimiento" (inducida), $\mathscr{E}$, es $|\mathscr{E}| = |\Delta\Phi|/\Delta t = BLv\Delta t/\Delta t = BLv$. Ésta es la idea fundamental detrás de la generación de energía eléctrica: mover un conductor en un campo magnético y convertir el trabajo realizado en energía eléctrica. Para conocer más detalles al respecto, considere el siguiente Ejemplo integrado.

Ejemplo integrado 20.4 ■ La esencia de la generación de energía eléctrica: conversión de trabajo mecánico en corriente eléctrica

Considere la situación de la figura 20.11a. Una fuerza externa efectúa trabajo cuando la barra móvil se mueve hacia arriba, y este trabajo se convierte en energía eléctrica. Como el "circuito" (conductores, resistor y barra) está dentro de un campo magnético, el flujo que lo atraviesa cambia con el tiempo induciendo una corriente. *a)* ¿Cuál es la dirección de la corriente inducida en el resistor? 1) de 1 a 2 o 2) de 2 a 1. *b)* Si la barra mide 20 cm de longitud y se mueve con una rapidez constante de 10 cm/s, ¿cuál será la corriente inducida si el valor de la resistencia es de 5.0 Ω y el circuito se encuentra en un campo magnético uniforme de 0.25 T?

a) Razonamiento conceptual. Como se observa en la figura 20.11a, el flujo magnético se dirige hacia la izquierda y se incrementa. Según la ley de Lenz, el campo que se origina por la corriente inducida debe dirigirse hacia la derecha. Al aplicar la regla de la mano derecha para la corriente inducida se ve que ésta va de 1 a 2 (figura 20.11b), así que la respuesta correcta es la 1.

b) Razonamiento cuantitativo y solución. El cambio de flujo se debe a un cambio de área conforme la barra se mueve hacia arriba. El análisis para fem de movimiento se expuso en la página anterior. Por último, una vez que se encuentra la fem de movimiento, es posible calcular la corriente utilizando la ley de Ohm.

Se listan los datos y se hace la conversión a unidades SI:

Dado: $B = 0.25\ \text{T}$
$L = 20\ \text{cm} = 0.20\ \text{m}$
$v = 10\ \text{cm/s} = 0.10\ \text{m/s}$
$R = 5.0\ \Omega$

Encuentre: la corriente inducida en el resistor

En la página anterior, se demostró que la magnitud de la fem inducida $\mathscr{E}$ se determina mediante BLv, de forma que numéricamente se tiene:

$$|\mathscr{E}| = BLv = (0.25\ \text{T})(0.20\ \text{m})(0.10\ \text{m/s}) = 5.0 \times 10^{-3}\ \text{V}$$

Por lo tanto, la corriente inducida es

$$I = \frac{\mathscr{E}}{R} = \frac{5.0 \times 10^{-3}\ \text{V}}{5.0\ \Omega} = 1.0 \times 10^{-3}\ \text{A}$$

Es evidente que este arreglo no es una forma práctica de generar grandes cantidades de energía eléctrica. Aquí, la potencia disipada en el resistor es apenas 5.0×10^{-6} W. (Verifique esto.)

Ejercicio de refuerzo. En este ejemplo, si se aumentara tres veces el campo magnético y el ancho de la barra fuera de 45 cm, ¿cuál debería ser la rapidez de esta última para generar una corriente inducida de 0.1 A?

20.2 Generadores eléctricos y contra fem

OBJETIVOS: a) Comprender el funcionamiento de los generadores eléctricos y calcular la fem producida por un generador de ca y b) explicar el origen de la contra fem y su efecto sobre el comportamiento de los motores.

Un método para inducir una fem en una espira es cambiando la orientación de esta última en su campo magnético (figura 20.4). Éste es el principio operativo detrás de los generadores eléctricos.

Generadores eléctricos

Un *generador eléctrico* es un aparato que convierte la energía mecánica en energía eléctrica. En esencia, la función de un generador es contraria a la de un motor.

Una batería suministra corriente directa (cd). Esto es, la polaridad del voltaje (y la dirección de la corriente) no cambia. Sin embargo, la mayoría de los generadores producen *corriente alterna* (ca), que se llama así porque la polaridad del voltaje (y la dirección de la corriente) cambia de forma periódica. Así, la energía eléctrica que se usa en los hogares y en la industria se entrega en forma de voltaje y corriente alternos.

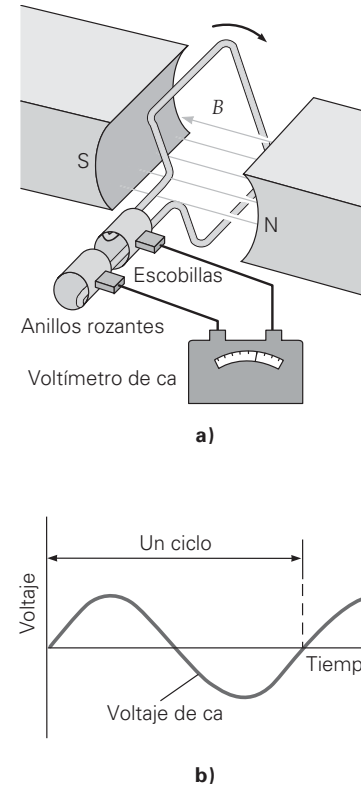
Un **generador de ca** se conoce también como *alternador*. En la ▸figura 20.12 se ilustran los elementos de un generador sencillo de ca. Una espira de alambre, llamada *armadura*, se hace girar mecánicamente dentro de un campo magnético, con propulsión externa, por ejemplo, mediante vapor o una corriente de agua que pasa por los álabes de una turbina. Por su parte, la rotación de los álabes provoca la rotación de la espira. Esto hace que cambie el flujo magnético que atraviesa la espira, y en esta última se induce una fem. Los extremos de la espira se conectan a un circuito externo mediante anillos rozantes y escobillas. En este caso, las corrientes inducidas se incorporarán a ese circuito. En la práctica, los generadores tienen muchas espiras, o devanados, en sus armaduras.

Cuando la espira se hace girar con una rapidez angular (w) constante, el ángulo (θ) que forman los vectores del campo magnético y del área de la espira cambia con el tiempo: $\theta = wt$ (suponiendo que $\theta = 0°$ cuando $t = 0$). Resulta entonces que la cantidad de líneas de campo que pasan por la espira cambia con el tiempo, causando una fem inducida. De acuerdo con la ecuación 20.1, el flujo (para una espira) varía como sigue:

$$\Phi = BA\cos\theta = BA\cos\omega t$$

A partir de esto, se observan que la fem inducida también varía en función del tiempo. Para una bobina giratoria de n espiras, la ley de Faraday es

$$\mathscr{E} = -N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -NBA\left(\frac{\Delta(\cos\omega t)}{\Delta t}\right)$$



▲ **FIGURA 20.12 Un generador sencillo de ca** ***a)*** La rotación de una espira de alambre en un campo magnético produce ***b)*** una salida de voltaje cuya polaridad se invierte cada medio ciclo. Este voltaje alterno se recoge mediante anillos rozantes y escobillas, como se ilustra.

A FONDO 20.1 LA INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA EN EL TRABAJO: LINTERNAS Y ANTITERRORISMO

En nuestra vida diaria, utilizamos la inducción electromagnética de muchas formas, sin ser conscientes de ello en la mayor parte de los casos. Un invento reciente es la linterna que funciona sin baterías (figura 1a). Al agitar la linterna, un fuerte imán permanente en su interior oscila a través de las bobinas, induciendo una fem y una corriente oscilatorias. Para cargar el condensador, la corriente alterna debe *rectificarse* en una corriente directa y no cambiar de dirección. Un esquema de este tipo de linternas se presenta en la figura 1b. Aquí, un circuito rectificador de estado sólido (símbolo triangular) actúa como una "válvula de corriente en un sentido". En este diagrama, sólo la corriente directa que tiene el sentido de las manecillas del reloj llega al condensador para cargarlo. Después de aproximadamente un minuto, el condensador se carga por completo. Cuando el interruptor S se enciende, el condensador se descarga a través de un eficiente *diodo emisor de luz* (LED, por sus siglas en inglés). El haz de luz resultante dura varios minutos antes de que la linterna deba volverse a agitar. Este dispositivo podría, por lo menos, desempeñar un papel importante como respaldo de las linternas tradicionales que necesitan baterías.

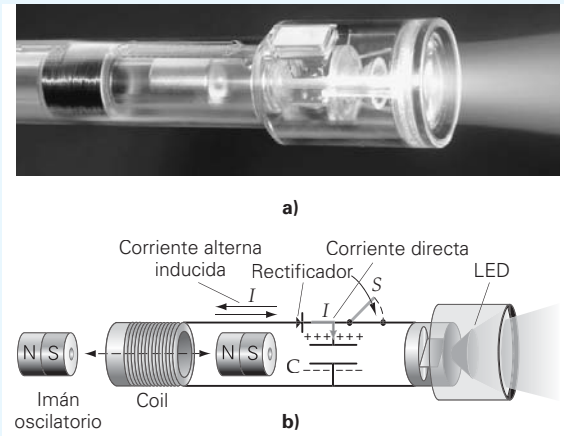


FIGURA 1 Una linterna sin baterías ***a)*** Una fotografía de un tipo relativamente nuevo de linterna, que emite luz utilizando la energía eléctrica que se genera al agitarla (inducción). ***b)*** Un esquema de la linterna mostrada en el inciso *a*). Cuando se agita la linterna, su imán permanente interno pasa a través de una bobina, induciendo una corriente. Esta última cambia su dirección (¿por qué?) y, por lo tanto, necesita convertirse (o "rectificarse") en cd antes de que pueda cargar un condensador. Una vez que el condensador está cargado por completo, es capaz de generar una corriente a través de un diodo emisor de luz (LED), que, a la vez, emite luz durante varios minutos.

En los sistemas de seguridad de los aeropuertos, la inducción se utiliza para evitar que alguien introduzca en las aeronaves objetos metálicos peligrosos (como cuchillos y armas). Cuando un pasajero camina por debajo del arco de un detector de metales en un aeropuerto (véase la figura 2), una serie de largas corrientes "punzantes" llega con cierta periodicidad a una bobina (solenoide) en uno de los lados no magnetizados. En el sistema más común, llamado IP (*inducción pulsada*), estas corrientes se registran cientos de veces por segundo. Cuando la corriente se eleva y decae, se crea un campo magnético variable en el pasajero. Si este último no lleva consigo objetos metálicos, no habrá corriente inducida significativa, ni tampoco campo magnético inducido. Sin embargo, si el pasajero porta algún objeto metálico, se inducirá una corriente en ese objeto, lo que, a la vez, producirá su propio campo magnético (inducido) que podrá ser registrado por la bobina de emisión, esto es, se producirá un "eco magnético". Dispositivos electrónicos complejos miden el eco de la fem inducida y activan una luz de advertencia para indicar que es necesaria una inspección más minuciosa del pasajero.

FIGURA 2 Inspección en los aeropuertos Cuando los pasajeros caminan por debajo del arco, se someten a una serie de pulsos de campo magnético. Si llevan consigo algún objeto metálico, las corrientes inducidas en ese objeto crean su propio "eco" de campo magnético que, al ser detectado, da aviso a los inspectores de que es necesaria una revisión más minuciosa del pasajero.

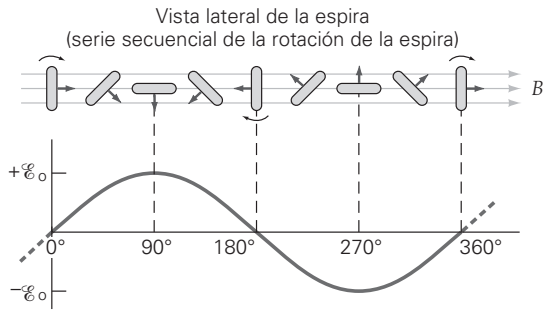
En esta ecuación se han separado B y A de la variación con el tiempo, porque son constantes. Aplicando métodos que están más allá de los objetivos de este libro, es posible demostrar que la fem inducida se expresa como sigue:

$$\mathscr{E} = (NBA\omega)\ \text{sen}\ \omega t$$

Observe que el producto de los términos $NBAw$ representa la magnitud de la fem máxima, que se presenta siempre que sen $wt = \pm 1$. Si se sustituye $NBAw$ por $\mathscr{E}_o$, el valor máximo de la fem, entonces la ecuación anterior se puede replantear de una forma más compacta

$$\mathscr{E} = \mathscr{E}_o\ \text{sen}\ \omega t \tag{20.4}$$

Como el valor de la función seno varía entre ±1, la polaridad de la fem cambia al paso del tiempo (▸figura 20.13). Observe que la fem tiene su valor máximo $\mathscr{E}_o$ cuando $\theta = 90°$ o cuando $\theta = 270°$. Esto es, en los instantes en que el plano de la espira es paralelo al campo y el flujo magnético es cero, la fem alcanzará su valor máximo (en mag-



◀ **FIGURA 20.13 La salida de un generador de ca** Gráfica de la salida senoidal de un generador, junto con una vista lateral de las orientaciones correspondientes de la espira durante un ciclo; se ve la variación del flujo en el tiempo. La fem es máxima cuando el flujo cambia con más rapidez, conforme pasa por cero y cambia de signo.

nitud). El *cambio* de flujo es máximo en esos ángulos, porque aunque el flujo sea cero momentáneamente, cambia con rapidez ante un cambio de *signo*. Cerca de los ángulos que producen el valor máximo del flujo ($\theta = 0°$ o $\theta = 180°$), ese flujo permanece aproximadamente constante y, por consiguiente, la fem inducida es cero en esos ángulos.

Ilustración 29.3 *Generador eléctrico*

La dirección de la corriente producida por esta fem alterna inducida también cambia de forma periódica. En las aplicaciones cotidianas es común referirse a la frecuencia (f) de la armadura [en hertz (Hz) o rotaciones por segundo] y no la frecuencia angular (w). Como se relacionan mediante la ecuación $w = 2\pi f$, la ecuación 20.4 se reformula como

$$\mathscr{E} = \mathscr{E}_o \operatorname{sen}(2\pi f t) \quad \textit{fem del alternador} \tag{20.5}$$

La frecuencia de la ca en Estados Unidos y en la mayor parte del hemisferio occidental es de 60 Hz. En Europa y en otros lugares lo común son 50 Hz.

Tome en cuenta que las ecuaciones 20.4 y 20.5 definen el valor instantáneo de la fem, y que $\mathscr{E}$ varía entre $+\mathscr{E}_o$ y $-\mathscr{E}_o$ durante la mitad de un periodo rotacional de la armadura (en Estados Unidos, 1/120 de segundo). En la práctica, para los circuitos eléctricos, son más importantes los valores promedio de voltaje y corriente de la ca, respecto al tiempo. Este concepto se desarrollará en el capítulo 21. Para ver cómo influyen los diversos factores sobre la salida de un generador, examinaremos con detalle el siguiente ejemplo. Además, véase la sección A fondo 20.2 de la p. 666, para conocer cómo es que la inducción electromagnética participa en un pasatiempo interesante y cómo contribuye a generar la energía eléctrica que necesitan los automóviles híbridos para brindar un sistema de transporte más eficiente desde el punto de vista del consumo de combustible.

Ejemplo 20.5 ■ Un generador de ca: energía eléctrica renovable

Un agricultor decide usar una caída de agua para construir una pequeña planta hidroeléctrica. Fabrica una bobina de alambre con 1500 vueltas, cada una de 20 cm de radio, que giran sobre la armadura del generador, a 60 Hz, dentro de un campo magnético. Para obtener un voltaje efectivo (rms) de 120 V, debe generar una fem máxima de 170 V (aprenderemos más acerca de los voltajes de ca en el capítulo 21). ¿Cuál es la magnitud del campo magnético en el generador que se necesita para que esto ocurra?

Razonamiento. Se puede calcular el campo magnético con la ecuación de $\mathscr{E}_o$.

Solución.

Dado: $\mathscr{E}_o = 170$ V
$N = 1500$ vueltas
$r = 20$ cm $= 0.20$ m
$f = 60$ Hz

Encuentre: la magnitud del campo magnético (B)

La fem máxima (o pico) del generador se determina con $\mathscr{E}_o = NBA\omega$. Como $w = 2\pi f$ y, para un círculo, $A = \pi r^2$, esta ecuación se transforma en

$$\mathscr{E}_o = NB(\pi r^2)(2\pi f) = 2\pi^2 NBr^2 f$$

De aquí se despeja B y se obtiene

$$B = \frac{\mathscr{E}_o}{2\pi^2 N r^2 f} = \frac{170\text{ V}}{2\pi^2(1500)(0.20\text{ m})^2(60\text{ Hz})} = 2.4 \times 10^{-3}\text{ T}$$

Ejercicio de refuerzo. En este ejemplo, suponga que el agricultor desea generar una fem con un valor rms de 240 V, para lo cual se requiere una fem máxima de 340 V. Si lo hiciera cambiando el tamaño de las espiras, ¿cuál tendría que ser el nuevo radio?

A FONDO

20.2 INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA EN ACCIÓN: PASATIEMPOS Y TRANSPORTACIÓN

FIGURA 1 Un detector de metales de dos bobinas En esta fotografía se distinguen las dos bobinas: la transmisora (exterior, de mayor tamaño) y la receptora (interna y más pequeña).

La inducción electromagnética desempeña un papel importante en nuestras actividades de ocio y en la transportación. Algunas personas emplean detectores de metales para encontrar "tesoros enterrados" de metal. Un diseño común consiste en dos bobinas de alambre en el extremo de un eje que se utiliza para hacer un barrido justo por encima del suelo (véase la figura 1). En el extremo por el que se sostiene el aparato, existen piezas electrónicas que permiten desplegar la información acerca de los artículos encontrados. La bobina externa, o *transmisora*, contiene una corriente oscilatoria de varios miles de hertz, que crea un campo magnético en constante cambio en el terreno que hay debajo. (Por lo general, es capaz de penetrar una distancia de un pie por debajo de la superficie, dependiendo del tipo de suelo y de sus condiciones.) Si no hay objetos metálicos dentro de su campo oscilatorio, no se inducirán corrientes significativas. Por consiguiente, la bobina interna, o *receptora*, no detectará el "eco" de un campo magnético inducido. Sin embargo, si se encuentra un objeto metálico, la corriente inducida en él generará un eco (campo) magnético que la bobina receptora detectará como una fem y una corriente inducidas. Por medio de un avanzado software de computadora para evaluar la intensidad de la señal inducida, podrá estimarse la profundidad y composición química del objeto.

Por otra parte, el precio a la alza de la gasolina ha hecho que muchos conductores opten por los automóviles híbridos, que funcionan con *gasolina* y *electricidad*, y cuyo motor es mucho más pequeño que el de los auto convencionales. Además, para ayudar al impulso, por lo menos parte del trabajo del motor híbrido consiste en suministrar energía eléctrica (a través de la inducción en un generador) a las baterías y a un motor eléctrico, el cual, por su parte, suministrará potencia a las ruedas. Así, es posible obtener más trabajo a partir de un galón de gasolina.

Un esquema de un automóvil híbrido típico se presenta en la figura 2a. En la actualidad, existen dos tipos de diseño de automóviles híbridos: en paralelo y en serie. En la configuración *híbrida en paralelo* (figura 2b), el motor de gasolina está conectado a las ruedas por medio de una transmisión estándar. Sin embargo, también se convierte en un generador que, a través de la inducción, crea y suministra energía eléctrica para cargar las baterías y/o para operar el motor eléctrico. El motor eléctrico está conectado a las ruedas a través de su propio sistema de transmisión, de ahí el nombre de *híbrido en paralelo*, pues el motor de gasolina y el eléctrico trabajan juntos, es decir, en paralelo. Los modelos *híbridos por completo* son capaces de mover el automóvil ya sea con uno de los dos motores por sí solo (para un ahorro máximo de combustible, por ejemplo, mientras se transita por una autopista con rapidez constante) o con ambos al mismo tiempo (cuando se requiere de mayor potencia, por ejemplo, al acelerar en una autopista).

De manera alternativa, los motores pueden conectarse en serie; se trata entonces de automóviles *híbridos en serie*. En este caso, el motor eléctrico es lo que en realidad da potencia a las ruedas (figura 2c). El trabajo del motor de gasolina consiste en suministrar energía eléctrica (a través de la inducción en su generador) a las baterías y al motor eléctrico. Si las baterías están cargadas por completo y el motor funciona adecuadamente, el motor de gasolina podrá reducir su actividad o incluso apagarse. Con aceleraciones frecuentes, cuando se requiere una salida de elevada potencia por parte del motor eléctrico, las baterías se agotarán rápidamente. En estas condiciones, el sistema electrónico de potencia hace que el motor de gasolina comience a generar energía eléctrica para recargar las baterías.

Los automóviles híbridos, a diferencia de los vehículos eléctricos por completo, nunca tienen que "enchufarse", pues obtienen toda su energía de la combustión de gasolina. Sin embargo, son mucho más eficientes y, por consiguiente, mucho menos contaminantes que los automóviles convencionales. Algunos modelos recientes emplean motores híbridos que son capaces de dar mayor potencia que sus contrapartes que funcionan sólo con gasolina. Por estas razones, es probable que los motores híbridos sean la elección de muchos conductores en el futuro cercano.

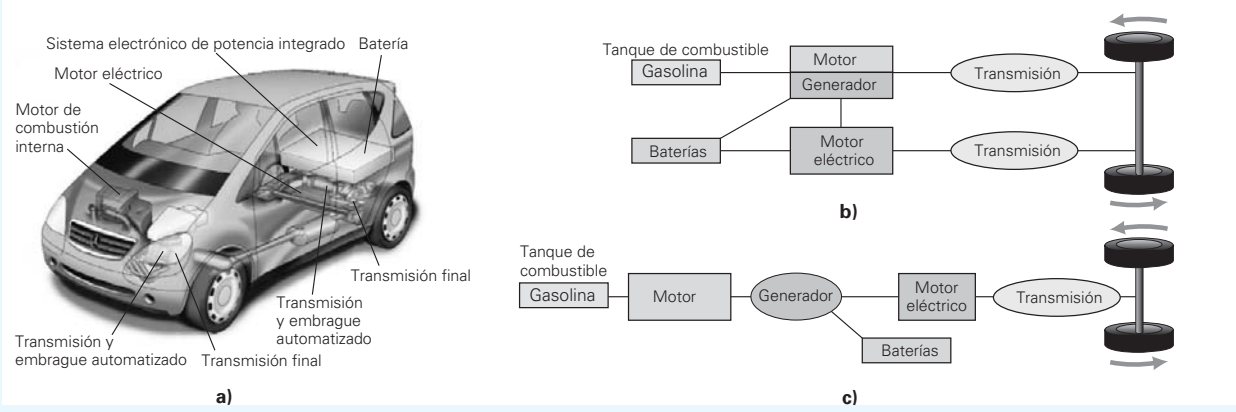
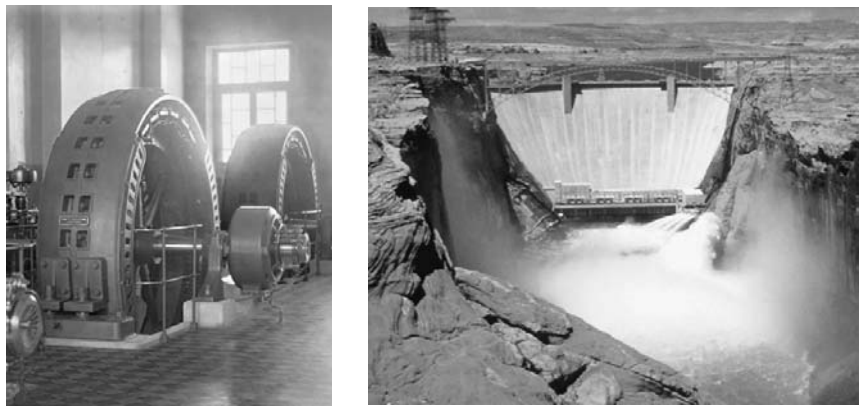


FIGURA 2 Automóviles híbridos ***a)*** Corte esquemático de un vehículo híbrido moderno. ***b)*** Diagrama de los sistemas principales de un híbrido en paralelo. ***c)*** Diagrama de los sistemas principales de un híbrido en serie.



a) b)

◀ **FIGURA 20.14 Generación eléctrica** ***a)*** Turbinas como las que se ven aquí generan energía eléctrica en cantidades mucho mayores que la planta hidroeléctrica de la fotografía inicial de este capítulo ***b)*** La energía potencial gravitacional del agua, almacenada detrás de la cortina de la presa Glen Canyon en el Río Colorado, en Arizona, se convierte en energía eléctrica.

En la mayor parte de los generadores de ca en gran escala (las plantas o centrales eléctricas), en realidad la armadura es estacionaria y los imanes giran en torno a ella. El campo magnético giratorio produce un flujo, variable en el tiempo, a través de las bobinas de la armadura, y por consiguiente producen ca. Una turbina suministra la energía mecánica necesaria para hacer girar los imanes en el generador (▲figura 20.14a). Por lo general, las turbinas se mueven con el vapor que se produce a partir de la combustión de combustibles fósiles, o con el calor generado en procesos de fisión nuclear; aunque existen otras que son impulsadas por caídas de agua (*hidroelectricidad*), como se ve en la figura 20.14b. Así, la diferencia básica entre los diversos tipos de centrales eléctricas es la fuente de la energía que hace girar a las turbinas.

Contra fem

Aunque su tarea principal es convertir la energía eléctrica en energía mecánica, los motores también generan fem de forma simultánea. Al igual que un generador, un motor tiene una armadura giratoria dentro de un campo magnético. En este caso, la fem inducida se llama **fuerza contraelectromotriz** (o *contra fem*) $\mathscr{E}_b$, porque su dirección es opuesta a la del voltaje en la línea, y tiende a reducir la corriente en las bobinas de la armadura.

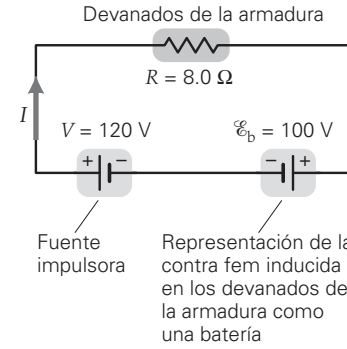
Si V es el voltaje en la línea, entonces el voltaje neto que impulsa al motor es menor que V (porque el voltaje en la línea y la fuerza contraelectromotriz tienen polaridad opuesta). El voltaje neto es entonces $V_{neto} = V - \mathscr{E}_b$. Si la armadura de un motor tiene una resistencia interna de R, la corriente que extrae el motor mientras está en operación es $I = V_{neto}/R = (V - \mathscr{E}_b)/R$ o, despejando para la contra fem,

$$\mathscr{E}_b = V - IR \quad \textit{(contra fem en un motor)} \tag{20.6}$$

donde V es el voltaje en la línea.

La contra fem en un motor depende de la rapidez de rotación de su armadura, y se incrementa desde cero hasta algún valor máximo conforme la armadura pasa del reposo hasta su rapidez normal de funcionamiento. En el arranque, la contra fem es cero (¿por qué?), de manera que la corriente de arranque es máxima (ecuación 20.6, donde $\mathscr{E}_b = 0$). Por lo regular, un motor hace mover algo; esto es, tiene una carga mecánica. Sin carga, la rapidez de la armadura aumenta hasta que la contra fem casi es igual al voltaje de la línea. El resultado es que pasa una corriente pequeña en las bobinas, justo la suficiente para vencer la fricción y las pérdidas por calentamiento de joule. En las condiciones normales con carga, la contra fem es menor que el voltaje en la línea. Cuanto mayor sea la carga, más despacio girará el motor y menor será la contra fem. Si un motor está sobrecargado y gira muy despacio, la contra fem se reduce tanto que la corriente se hace muy grande (porque V_{neto} aumenta conforme $\mathscr{E}_b$ disminuye) y puede quemar las bobinas. Así, la contra fem desempeña un papel vital en la regulación del funcionamiento del motor, limitando la corriente que pasa por él.

De forma esquemática, una contra fem en un circuito de motor de cd se representa como una "batería inducida" cuya polaridad es opuesta a la del voltaje impulsor (▸figura 20.15). Para ver cómo es que la contra fem determina la corriente que pasa por un motor, veamos el siguiente ejemplo.



▲ **FIGURA 20.15 Contra fem** La contra fem en la armadura de un motor de cd se puede representar como una batería de polaridad opuesta a la de la fuente impulsora.

Ejemplo 20.6 ■ Aceleración: contra fem en un motor de cd

Se fabrica un motor de cd con devanados de 8.00 Ω de resistencia y que funciona con 120 V de voltaje de línea. Con una carga normal se produce una contra fem de 100 V, cuando el motor alcanza toda su rapidez (véase la figura 20.15). Determine *a*) la corriente que extrae el motor en el arranque y *b*) la corriente que pasa por la armadura a la rapidez de funcionamiento con una carga normal.

Razonamiento. *a*) La única diferencia entre el arranque y la rapidez de funcionamiento es que en el primer caso no hay contra fem. El voltaje neto y la resistencia determinan la corriente que pasa, por lo que se aplica la ecuación 20.6. *b*) A la rapidez de funcionamiento, aumenta la contra fem y tiene polaridad opuesta a la del voltaje de la línea. De nuevo, se utiliza la ecuación 20.6 para calcular la corriente.

Solución. Como siempre, se listan los datos:

Dado: $R = 8.00\ \Omega$, $V = 120\ \text{V}$, $\mathscr{E}_b = 100\ \text{V}$

Encuentre: *a*) I_s (corriente en el arranque); *b*) I (corriente de funcionamiento)

a) De acuerdo con la ecuación 20.6, la corriente en los devanados es

$$I_s = \frac{V}{R} = \frac{120\ \text{V}}{8.00\ \Omega} = 15.0\ \text{A}$$

b) Cuando el motor gira a su rapidez de funcionamiento, la contra fem es de 100 V; por lo tanto, la corriente es menor.

$$I = \frac{V - \mathscr{E}_b}{R} = \frac{120\ \text{V} - 100\ \text{V}}{8.00\ \Omega} = 2.50\ \text{A}$$

Cuando hay escasa o ninguna contra fem, la corriente de *arranque* es relativamente grande. Cuando arranca un motor de grandes dimensiones, como el de una unidad central de acondicionamiento de aire en un edificio, las luces en éste disminuyen de forma momentánea, a causa de la gran corriente de arranque que extrae el motor. En algunos diseños, temporalmente se conectan resistores en serie con la bobina de un motor, para proteger los devanados y evitar que se quemen como resultado de las grandes corrientes de arranque.

Ejercicio de refuerzo. En este ejemplo, *a*) ¿cuánta energía se necesita para llevar al motor a su rapidez de funcionamiento, si para ello se tarda 10 s y la contra fem promedio es de 50 V durante ese tiempo? *b*) Compare esta cantidad con la cantidad de energía necesaria para mantener en movimiento al motor durante 10 s, una vez que llega a sus condiciones de funcionamiento.

Como los motores, son lo contrario de los generadores, y en los primeros se desarrolla una contra fem, quizá piense si en un generador también se desarrolla una contra fem. La respuesta es sí. Cuando un generador en funcionamiento no está conectado con un circuito externo, no existe corriente y no hay fuerza magnética sobre las bobinas de la armadura. Sin embargo, cuando el generador entrega energía a un circuito externo y *sí hay* corriente en las bobinas, la fuerza magnética en las bobinas de la armadura produce un *momento de torsión contrario*, que se opone a la rotación de la armadura. Conforme pasa más corriente, aumenta el momento de torsión contrario y se necesita más fuerza impulsora para hacer girar la armadura. Por consiguiente, cuanto mayor sea la corriente que sale del generador, mayor será la energía gastada para vencer el momento de torsión contrario.

20.3 Transformadores y transmisión de energía

OBJETIVOS: *a*) Explicar el funcionamiento de un transformador en términos de la ley de Faraday, b) calcular la salida de los transformadores de subida y de bajada y c) comprender la importancia de los transformadores en los sistemas de distribución eléctrica.

La energía eléctrica se transmite a grandes distancias por líneas de transmisión. Es preferible reducir al mínimo las pérdidas I^2R (calentamiento de joule) en ellas. Como la resistencia de una línea es fija, la reducción de las pérdidas I^2R equivale a reducir la corriente. Sin embargo, la potencia que sale de un transformador está determinada por las salidas de corriente y voltaje ($P = IV$), y cuando el voltaje es fijo, por ejemplo, de 120 V, una reducción en la corriente equivaldría a menor salida de potencia. Parecería que no hay forma de reducir la corriente y, al mismo tiempo, mantener el valor de la potencia. Con inducción electromagnética es posible reducir las pérdidas aumentando el voltaje y, al mismo tiempo, reduciendo la corriente que pasa por ellas, de tal forma que la *potencia* suministrada no cambie. Esto se logra con un dispositivo llamado **transformador**.

Un transformador sencillo consiste en dos bobinas de alambre aislado devanadas en el mismo núcleo de hierro (▸figura 20.16a). Cuando se aplica un voltaje de ca a la bobina de entrada, o *bobina primaria* (también llamada *devanado primario o* simplemente *primario*), la corriente alterna produce un flujo magnético alterno que se concentra en el núcleo de hierro, sin que haya fugas significativas. Así, en esas condiciones, el mismo flujo cambiante pasa también por la bobina de salida, o *bobina secundaria* (también llamada *devanado secundario* o simplemente *secundario*), induciendo en ésta un voltaje y una corriente alternos. (Note que en el diseño de transformadores se acostumbra llamar "voltajes" a las fem, como se hizo en el capítulo 18. También aquí usaremos este lenguaje.)

La razón entre el voltaje inducido en la bobina secundaria y el voltaje que en la bobina primaria depende de la relación entre las cantidades de vueltas en una y otra. Según la ley de Faraday, el voltaje inducido en la bobina secundaria es

$$V_s = -N_s \frac{\Delta\Phi}{\Delta t},$$

donde N_s es la cantidad de vueltas en la bobina secundaria. El flujo variable en la bobina primaria produce una contra fem de

$$V_p = -N_p \frac{\Delta\Phi}{\Delta t},$$

donde N_p es la cantidad de vueltas en la bobina primaria. Si no se tiene en cuenta la resistencia de esta última, la contra fem tiene una magnitud igual a la del voltaje externo aplicado a la bobina primaria (¿por qué?). Entonces, si se determina la razón entre el voltaje de salida (secundario) y el voltaje de entrada (primario) se obtiene

$$\frac{V_s}{V_p} = \frac{-N_s(\Delta\Phi/\Delta t)}{-N_p(\Delta\Phi/\Delta t)}$$

o

$$\frac{V_s}{V_p} = \frac{N_s}{N_p} \quad \textit{(razón de voltaje en un transformador)} \tag{20.7}$$

Si se supone que el transformador tiene un 100% de eficiencia, es decir, que no se pierde energía en él, entonces la potencia que entra es igual a la potencia que sale. Como $P = IV$, entonces

$$I_p V_p = I_s V_s \tag{20.8}$$

Aunque siempre se pierde algo de energía, esta ecuación es una buena aproximación, ya que un transformador bien diseñado puede tener una eficiencia mayor del 95%. (Más adelante describiremos las causas de las pérdidas de energía.) En este caso ideal y de acuerdo con la ecuación 20.8, las corrientes y los voltajes en el transformador son función de la relación de vueltas, lo que se expresa como

$$\frac{I_p}{I_s} = \frac{V_s}{V_p} = \frac{N_s}{N_p} \tag{20.9}$$

Para resumir la acción del transformador en función de las salidas de voltaje y de corriente, tenemos que

$$V_s = \left(\frac{N_s}{N_p}\right) V_p \tag{20.10a}$$

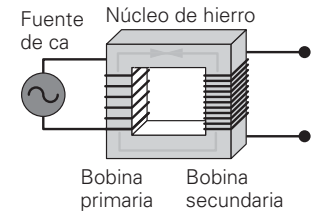
(*relación ideal entre voltajes y corrientes en un transformador*)

e

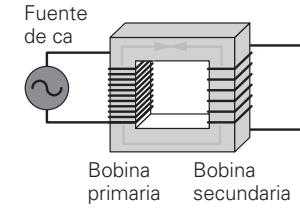
$$I_s = \left(\frac{N_p}{N_s}\right) I_p \tag{20.10b}$$

Si el devanado secundario tiene más vueltas que el primario (es decir, si $N_s/N_p > 1$), como en la figura 20.16a, el voltaje "sube", ya que $V_s > V_p$. Este diseño se llama *transformador de subida*. Advierta que a causa de esto, hay *menos* corriente en el devanado secundario que en el primario ($N_p/N_s < 1$ e $I_s < I_p$).

Si el devanado secundario tiene menos vueltas que el primario, se tiene un *transformador de bajada* (figura 20.16b). En el lenguaje de los transformadores, esto significa que el voltaje "baja" y, por consiguiente, la corriente aumenta. Dependiendo de los detalles del diseño, se puede usar un transformador de subida como transformador de bajada si se invierten las conexiones de entrada y de salida.



a) Transformador de subida: salida de alto voltaje (baja corriente)



b) Transformador de bajada: salida de bajo voltaje (alta corriente)

▲ **FIGURA 20.16** Transformadores ***a)*** Un transformador de subida tiene más vueltas en la bobina secundaria que en la primaria. ***b)*** Un transformador de bajada tiene más vueltas en la bobina primaria que en la secundaria.

Ejemplo 20.7 ■ Orientación de un transformador: ¿configuración de subida o de bajada?

Un transformador ideal de 600 W tiene 50 vueltas en su devanado primario y 100 vueltas en el secundario. *a*) ¿Este transformador es un arreglo 1) de subida o 2) de bajada? *b*) Si se conecta una fuente de 120 V al devanado primario, ¿cuáles son el voltaje y la corriente de salida de este transformador?

a) Razonamiento conceptual. Los términos de subida o de bajada se refieren a lo que le sucede al voltaje, no a la corriente. Como el voltaje es proporcional al número de vueltas, en este caso, el voltaje secundario es mayor que el voltaje primario. Por lo tanto, la respuesta correcta es la 1, un transformador de subida.

b) Razonamiento cuantitativo y solución. El voltaje de salida se determina con la ecuación 20.10a, una vez que se ha establecido la relación de vueltas. A partir de la potencia, es posible determinar la corriente.

Dado: $N_p = 50$, $N_s = 100$, $V_p = 120$ V

Encuentre: V_s e I_s (voltaje y corriente secundarios)

Para calcular el voltaje secundario, se emplea la ecuación 20.10a con la relación de vueltas igual a 2, ya que $N_s = 2N_p$:

$$V_s = \left(\frac{N_s}{N_p}\right)V_p = (2)(120\text{ V}) = 240\text{ V}$$

Si el transformador es ideal, entonces la potencia de entrada es igual a la potencia de salida. En el lado primario, la potencia de entrada es $P_p = I_pV_p = 600$ W, de manera que la corriente de entrada debe ser

$$I_p = \frac{600\text{ W}}{V_p} = \frac{600\text{ W}}{120\text{ V}} = 5.00\text{ A}$$

Como el voltaje aumenta por un factor de 2, la corriente de salida debería disminuir por un factor de 2. A partir de la ecuación 20.10b,

$$I_s = \left(\frac{N_p}{N_s}\right)I_p = \left(\frac{1}{2}\right)(5.00\text{ A}) = 2.50\text{ A}$$

Ejercicio de refuerzo. *a*) Cuando una turista europea visita Estados Unidos (los voltajes promedio de ca son de 240 V en Europa), ¿qué clase de transformador le permitiría usar su secadora de cabello adecuadamente? Explique su respuesta. *b*) Para un secadora de cabello de 1500 W (se supone que es óhmica), ¿cuál debería ser la corriente de entrada del transformador en Estados Unidos, suponiendo que sea ideal?

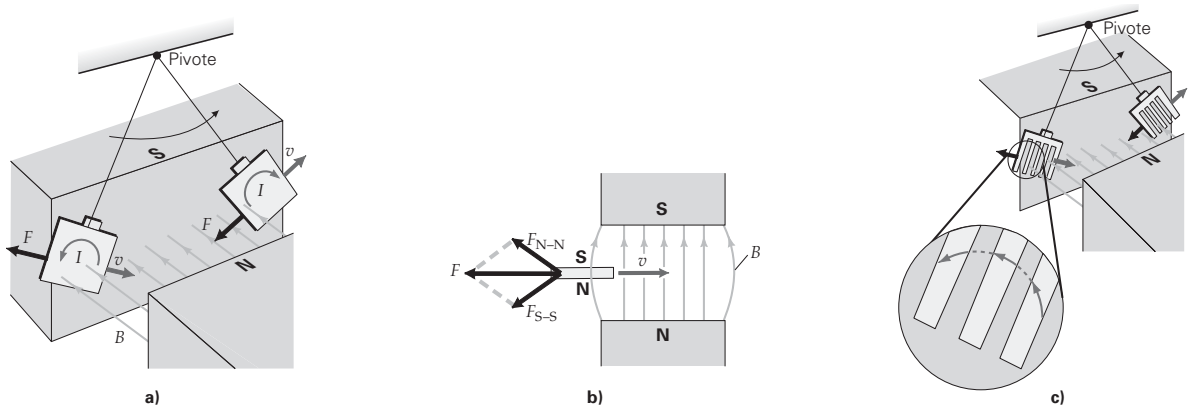
Las relaciones anteriores se aplican en forma estricta sólo a transformadores ideales (o "sin pérdidas"); en realidad los transformadores tienen pérdidas de energía. Aunque los transformadores bien diseñados suelen tener pérdidas internas de energía menores del 5%, no existe un transformador ideal. Hay muchos factores que determinan qué tanto se acerca el funcionamiento de un transformador real al de uno ideal.

Primero: hay pérdidas de flujo; esto es, no todo el flujo pasa a través de la bobina secundaria. En algunos diseños de transformador, una de las bobinas aisladas se devana directamente sobre la otra, en vez de tener dos bobinas separadas. Esa configuración contribuye a reducir al mínimo la pérdida de flujo reduce el tamaño del transformador.

Segundo: la corriente alterna en la bobina primaria significa que hay un flujo magnético variable que atraviesa las espiras. Esto origina una fem inducida en la bobina primaria. Según la ley de Lenz, la fem autoinducida se opone al cambio de la corriente y limita la corriente primaria (éste es un efecto similar al de una contra fem en un motor).

Tercero: los transformadores distan de ser ideales porque tienen calentamiento de joule (pérdidas I^2R) por la resistencia de los alambres. Esta pérdida es pequeña, pues los alambres tienen poca resistencia.

Por último, considere el efecto de la inducción en el material del núcleo. Para incrementar el flujo magnético, el núcleo se fabrica con un material altamente permeable (como el hierro), pero este tipo de materiales también se caracterizan por ser buenos conductores. El flujo magnético variable en el núcleo induce fuerzas electromotrices, que, a la vez, crean *corrientes parásitas* o *corrientes de Foucault* en el material del núcleo. Después, esas corrientes parásitas podrían causar pérdida de energía entre la bobina primaria y secundaria al calentar al núcleo (de nuevo, pérdidas I^2R).



▲ **FIGURA 20.17 Corrientes parásitas** ***a)*** Las corrientes parásitas se inducen en una placa conductora no magnética que se mueve en un campo magnético. Las corrientes inducidas se oponen al cambio de flujo, y se desarrolla una fuerza de retardo que se opone al movimiento, primero dentro del campo y luego fuera. Para constatar esto, note que las corrientes invierten su dirección conforme la placa sale del campo. ***b)*** Una vista superior cuando la placa se acerca oscilando al campo desde la izquierda. La fuerza de retardo $\vec{\mathbf{F}}$ (para frenar la entrada al campo) es el resultado de las dos fuerzas de repulsión ($\vec{\mathbf{F}}_{N-N}$ y $\vec{\mathbf{F}}_{S-S}$), que actúan como polos magnéticos. El lado de la placa más cercano al polo norte del imán permanente funciona como polo norte, y el otro lado como polo sur. ***c)*** Si la placa tiene ranuras, se reducen de forma drástica las corrientes parásitas y, por consiguiente, las fuerzas magnéticas, de manera que la placa oscilará con mayor libertad.

Para reducir la pérdida de energía a causa de las corrientes parásitas, los núcleos de los transformadores se fabrican con láminas delgadas de material (por lo general hierro), con un pegamento aislante entre ellas. Las capas aislantes entre las láminas interrumpen las corrientes parásitas, o las confinan a las láminas, lo que reduce considerablemente la pérdida de energía.

Se pueden demostrar los efectos de las corrientes parásitas dejando oscilar una placa de material conductor, pero no magnético, como el aluminio, dentro de un campo magnético (▲figura 20.17a). Conforme la placa entra o sale del campo, se desarrollan corrientes parásitas inducidas porque el flujo magnético a través de esta área cambia. De acuerdo con la ley de Lenz, las corrientes parásitas se inducen en una dirección tal que se opone al cambio de flujo.

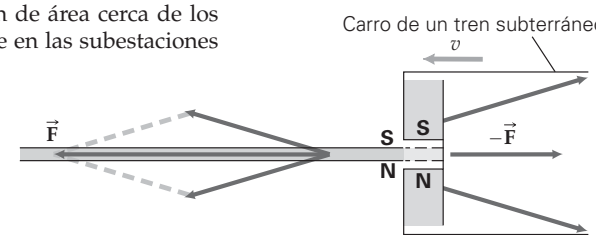
Cuando la placa entra al campo (la posición izquierda de la placa en la figura 20.17a), se induce una corriente en sentido contrario al de las manecillas del reloj. (Aplique la ley de Lenz para corroborar este efecto.) La corriente inducida produce su propio campo magnético, lo que significa que, en efecto, la placa tiene un polo norte magnético cerca del polo norte del imán permanente, y un polo sur magnético cerca del polo sur del imán permanente (figura 20.17b). El efecto de la fuerza neta es desacelerar la placa al entrar al campo. Las corrientes parásitas de la placa invierten su dirección conforme ésta sale del campo, produciendo fuerzas netas magnéticas de atracción, por lo que hay una tendencia a frenar la salida de la placa. En ambos casos, las fuerzas electromotrices inducidas tratan de desacelerar el movimiento de la placa.

La reducción de las corrientes parásitas (parecida a lo que sucede en los transformadores con placas laminadas) se puede demostrar con una placa con rendijas (figura 20.17c). Cuando esa placa oscila entre los polos del imán, lo hace con relativa libertad, porque las corrientes parásitas tienden a reducirse mucho a causa de los huecos (las rendijas). Así, también se reduce la fuerza magnética sobre la placa.

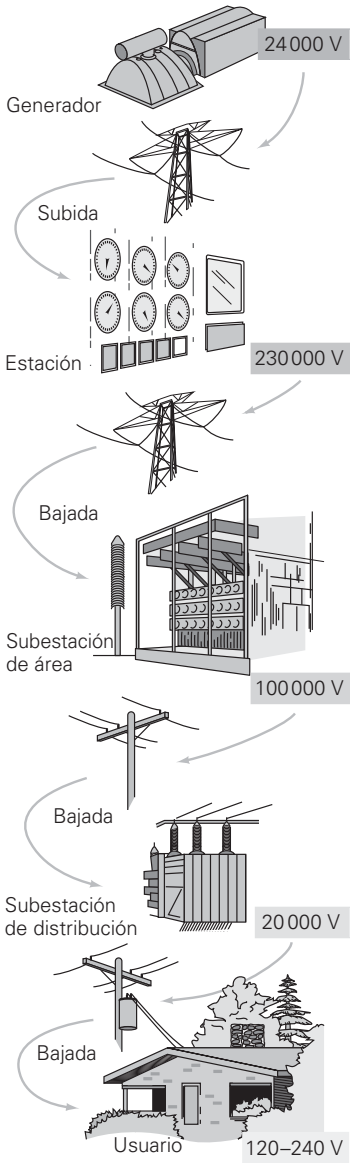
Se ha aplicado el efecto amortiguador de las corrientes parásitas en sistemas de frenado de tranvías rápidos. Cuando un electroimán (que está en el carro) se pone a funcionar, aplica un campo magnético a un riel. La fuerza de repulsión que producen las corrientes parásitas inducidas en el riel actúa como fuerza de frenado (▼figura 20.18). Conforme el carro frena, las corrientes parásitas en el riel disminuyen y permiten que la acción del frenado sea gradual.

Transmisión de electricidad y transformadores

Para transmitir electricidad a grandes distancias, los transformadores ofrecen un medio de aumentar el voltaje y disminuir la corriente de un generador eléctrico, para así reducir las pérdidas por calentamiento de joule (I^2R) en los cables que llevan la corriente. En la ▼figura 20.19 se ve un esquema de un sistema de distribución eléctrica. La energía se transmite a grandes distancias hasta una subestación de área cerca de los consumidores. Ahí se baja el voltaje. Hay más bajadas de voltaje en las subestaciones



◀ **FIGURA 20.18 Frenado electromagnético y transporte masivo** Para frenar, un tren energiza un electroimán que lleva a bordo. Este electroimán va montado sobre un riel metálico largo. Las corrientes inducidas en el riel producen una fuerza de repulsión mutua entre el riel y el tren, desacelerando así este último.



▲ **FIGURA 20.19 Transmisión de electricidad** Diagrama de un sistema típico de distribución eléctrica.

PHYSLET®
Ilustración 31.3 Transformadores

de distribución y los postes eléctricos antes de que la electricidad llegue a los hogares y las empresas con el voltaje y la corriente adecuados.

En el siguiente ejemplo se ilustran las ventajas de poder aumentar el voltaje (y disminuir la corriente) en la transmisión de energía eléctrica.

Ejemplo 20.8 ■ Disminución de las pérdidas: transmisión de energía eléctrica a alto voltaje

Una pequeña central hidroeléctrica produce energía en forma de una corriente de 10 A y un voltaje de 440 V. El voltaje se sube a 4400 V (con un transformador ideal) para llevar la energía en 40 km de línea eléctrica, cuya resistencia total es 20 Ω. *a*) ¿Qué porcentaje de la energía original se perdería si no se aumentara el voltaje? *b*) ¿Qué porcentaje de la energía original se pierde en realidad al aumentar el voltaje?

Razonamiento. *a*) La salida de potencia se calcula con $P = IV$, y se compara con la que se pierde en el conductor, $P = I^2R$. *b*) Las ecuaciones 20.10a y 20.10b deben usarse para determinar el voltaje aumentado y la corriente disminuida, respectivamente. A continuación se repite el cálculo y se comparan los resultados con los del inciso *a*.

Solución.

Dado: $I_p = 10$ A, $V_p = 440$ V, $V_s = 4400$ V, $R = 20\ \Omega$

Encuentre: *a*) Porcentaje de pérdida de energía sin aumentar el voltaje; *b*) Porcentaje de pérdida de energía aumentando el voltaje

a) La potencia producida por el generador es

$$P = I_pV_p = (10\text{ A})(440\text{ V}) = 4400\text{ W}$$

La rapidez de pérdida de energía (joules por segundo, o watts) al transmitir una corriente de 10 A es muy alta, porque

$$P_{\text{pérdida}} = I^2R = (10\text{ A})^2(20\ \Omega) = 2000\text{ W}$$

Así, el porcentaje de la energía producida que se pierde en forma de calentamiento de joule en los conductores es cercano al 50%, ya que

$$\%\text{ de pérdida} = \frac{P_{\text{pérdida}}}{P} \times 100\% = \frac{2000\text{ W}}{4400\text{ W}} \times 100\% = 45\%$$

b) Al aumentar el voltaje a 4400 V, esto permite transmitir una corriente que se reduce por un factor de 10 con respecto a su valor en el inciso *a*. Entonces, se tiene

$$I_s = \left(\frac{V_p}{V_s}\right)I_p = \left(\frac{440\text{ V}}{4400\text{ V}}\right)(10\text{ A}) = 1.0\text{ A}$$

La potencia se reduce, entonces, por un factor de 100, ya que varía en forma proporcional al cuadrado de la corriente:

$$P_{\text{pérdida}} = I^2R = (1.0\text{ A})^2(20\ \Omega) = 20\text{ W}$$

Por consiguiente, la potencia perdida también se reduce por un factor de 100, a un nivel mucho más aceptable:

$$\%\text{ de pérdida} = \frac{P_{\text{pérdida}}}{P} \times 100\% = \frac{20\text{ W}}{4400\text{ W}} \times 100\% = 0.45\%$$

Ejercicio de refuerzo. Algunos electrodomésticos de uso rudo, como las bombas de agua, se pueden conectar a 240 o a 120 V. Su potencia nominal es la misma, independientemente del voltaje con que trabajen. *a*) Explique la ventaja que se obtiene en eficiencia cuando esos electrodomésticos funcionan al voltaje mayor. *b*) Para una bomba de 1.00 hp (746 W), estime la razón entre la potencia perdida en los conductores a 240 V y la que se pierde a 120 V (suponiendo que todas las resistencias son óhmicas y que los cables de conexión son los mismos).

20.4 Ondas electromagnéticas

OBJETIVOS: *a*) Explicar la naturaleza física, el origen y la forma de propagación de las ondas electromagnéticas y b) describir algunas de las propiedades y usos de diversas clases de ondas electromagnéticas.

En la sección 11.4 se consideró que las **ondas electromagnéticas** (o la *radiación electromagnética*) constituyen un medio de transmisión de calor. Ahora ya se está en condiciones de comprender la producción y las características de la radiación electromagnética, pues esas ondas se pueden describir en términos de campos eléctricos y magnéticos.

El físico escocés James Clerk Maxwell (1831-1879) fue el primero en *unificar* los fenómenos eléctricos y magnéticos. Utilizando matemáticas complejas, tomó las ecuaciones que rigen cada uno de estos campos y predijo la existencia de ondas electromagnéticas. De hecho, fue aún más lejos y calculó su rapidez en el vacío, y sus predicciones concordaron con los experimentos. Como un reconocimiento a estas contribuciones, al conjunto de ecuaciones se le llama *ecuaciones de Maxwell*, aunque en su mayor parte esas ecuaciones las dedujeron otros científicos (por ejemplo, la ley de Faraday de la inducción).

En esencia, en las ecuaciones de Maxwell se combinan el campo eléctrico y el campo magnético para formar un solo campo electromagnético. Los campos que aparentemente están separados se relacionan de forma simétrica de tal manera que cualquiera de ellos puede crear al otro, en las condiciones adecuadas. Esta simetría es evidente en las ecuaciones (que no se muestra en este libro). Por ahora, basta con una descripción cualitativa:

> Un campo magnético variable en el tiempo produce un campo eléctrico variable en el tiempo.
> Un campo eléctrico variable en el tiempo produce un campo magnético variable en el tiempo.

PHYSLET®

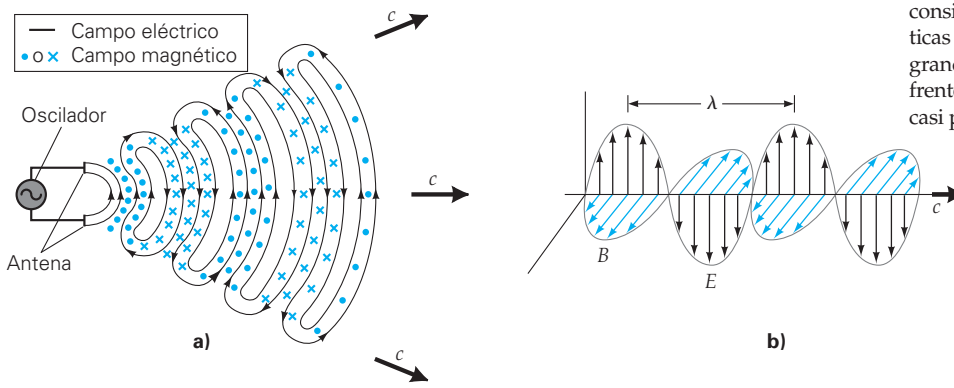
Ilustración 32.1 *Creación de ondas electromagnéticas*

El primer enunciado resume nuestras observaciones en la sección 20.1: un flujo magnético que cambia origina una fem inducida, que, a la vez, produce una corriente. La segunda afirmación (que no estudiaremos en detalle) es básica para comprender las características de autopropagación de las ondas electromagnéticas. Juntos, los dos fenómenos permiten que esas ondas se propaguen por el vacío, mientras que todas las demás ondas requieren un medio que las soporte.

Según la teoría de Maxwell, al *acelerar* las cargas eléctricas —como un electrón en oscilación—, se producen ondas electromagnéticas. El electrón en cuestión podría, por ejemplo, ser uno de los muchos electrones de la antena metálica de un radiotransmisor, impulsados por un oscilador (voltaje) eléctrico a una frecuencia de 10^6 Hz (1 MHz). Al oscilar cada electrón, se acelera y desacelera de forma continua, por lo que irradia una onda electromagnética (▼figura 20.20a). Las oscilaciones continuas de muchos electrones producen campos eléctricos y magnéticos variables en el tiempo, en la cercanía inmediata de la antena. El campo eléctrico que se ve en la figura 20.20a está en el plano de la página y cambia continuamente de dirección, al igual que el campo magnético (que se ve en gris claro, y que entra y sale de la página).

Los campos eléctrico y magnético transportan energía y se propagan alejándose con la rapidez de la luz. Esta rapidez se representa con la letra c y, con tres cifras significativas, es $c = 3.00 = 10^8$ m/s. Los resultados de Maxwell demuestran que a grandes distancias de la fuente, esas ondas se vuelven planas. (La figura 20.20b muestra una onda en un momento determinado en el tiempo.) En este caso, el campo eléctrico ($\vec{\mathbf{E}}$) es perpendicular al campo magnético ($\vec{\mathbf{B}}$), y ambos varían en forma senoidal con respecto al tiempo. Tanto $\vec{\mathbf{E}}$ como $\vec{\mathbf{B}}$ son perpendiculares a la dirección de propagación de la onda. Por consiguiente, las ondas electromagnéticas son ondas *transversales*, en las que los *campos* oscilan en dirección perpendicular a la dirección de propagación. De acuerdo con la teoría de Maxwell, cuando cambia un campo crea al otro. Este proceso se repite una y otra vez, y origina la onda electromagnética viajera a la que llamamos luz. Un resultado importante de todo esto es el siguiente:

> En el vacío, todas las ondas electromagnéticas, independientemente de su frecuencia o de su longitud de onda, viajan con la misma rapidez, $c = 3.00 \times 10^8$ m/s.



▼ **FIGURA 20.20 Origen de las ondas electromagnéticas** Las ondas electromagnéticas se producen, fundamentalmente, al acelerar cargas eléctricas. ***a)*** Aquí, las cargas (electrones) en una antena metálica se mueven mediante una fuente de voltaje oscilante. Conforme la polaridad de la antena y la dirección de la corriente cambian de forma periódica, los campos eléctrico y magnético alternos se propagan alejándose. Estos campos son perpendiculares a la dirección de la propagación de la onda. Por consiguiente, las ondas electromagnéticas son ondas transversales. ***b)*** A grandes distancias de la fuente, los frentes de onda curvos se vuelven casi planos.

Como las distancias en la vida diaria son muy cortas, normalmente se ignora el retraso del tiempo que se debe al recorrido de la luz. Sin embargo, en los viajes interplanetarios, este retraso ocasiona problemas. Veamos el siguiente ejemplo.

Ejemplo 20.9 ■ Control a larga distancia: la rapidez de las ondas electromagnéticas en el vacío

Las sondas espaciales *Viking* llegaron a Marte en 1976 y enviaron a la Tierra señales de radio y televisión (ambas ondas electromagnéticas). ¿Qué tanto más tardó una señal en llegar a su destino cuando Marte estaba más alejado de la Tierra, que cuando estaba más cerca? Las distancias promedio de Marte y la Tierra con respecto al Sol son de 229 millones de km (d_M) y 150 millones de km (d_E), respectivamente. Suponga que ambos planetas tienen órbitas circulares y considere las distancias promedio como radios de círculos.

Razonamiento. Este caso requiere un cálculo de distancia en función del tiempo. Los planetas están más alejados cuando están en los lados opuestos del Sol y, en consecuencia, están separados por una distancia $d_M + d_E$. (En este caso las señales deberían atravesar el Sol, lo cual naturalmente no es posible. Sin embargo, sirve para determinar el límite superior de los tiempos de transmisión.) Los planetas están más cerca cuando están alineados en el mismo lado del Sol; en este caso, su separación es igual a $d_M - d_E$. (Dibuje un diagrama que lo ayude a visualizar esta configuración.) Como se conoce la rapidez de las ondas electromagnéticas en el vacío, es posible calcular los tiempos con la fórmula $t = d/c$.

Solución. Se listan los datos y se hace la conversión de las distancias a metros,

Dado: $d_M = 229 \times 10^6$ km $= 2.29 \times 10^{11}$ m
$d_E = 150 \times 10^6$ km $= 1.50 \times 10^{11}$ m

Encuentre: Δt (la diferencia de tiempos que tarda la luz en recorrer las distancias más larga y más corta)

Las ondas de radio y televisión viajan con la rapidez c. Así, el tiempo de recorrido más largo t_L es

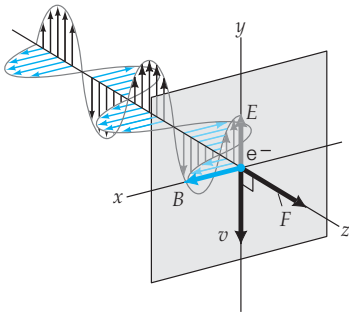
$$t_L = \frac{d_M + d_E}{c} = \frac{3.79 \times 10^{11}\ \text{m}}{3.00 \times 10^8\ \text{m/s}} = 1.26 \times 10^3\ \text{s} \quad (\text{o } 21.1\ \text{min})$$

Para la distancia más corta, el tiempo de recorrido t_s es

$$t_S = \frac{d_M - d_E}{c} = \frac{7.90 \times 10^{10}\ \text{m}}{3.00 \times 10^8\ \text{m/s}} = 2.63 \times 10^2\ \text{s} \quad (\text{o } 4.39\ \text{min})$$

Entonces, la diferencia de tiempos es $\Delta t = t_L - t_s = 1.00 \times 10^3$ s (o 16.7 min).

Ejercicio de refuerzo. Suponga que un vehículo explorador en Marte (véase el ejemplo 2.1, p. 34) se dirige hacia una roca a 2.0 m delante de él. Cuando está a esa distancia, envía una foto de la roca a los controladores en la Tierra. Si Marte está en su punto más cercano a la Tierra, ¿cuál es la rapidez máxima que puede tener el vehículo de exploración para evitar el choque contra la roca? Suponga que la señal de video del vehículo explorador llega a la Tierra, y que de inmediato se le manda una señal para que se detenga.



▲ **FIGURA 20.21 La presión de radiación** El campo eléctrico de una onda electromagnética que choca con una superficie actúa sobre un electrón y le comunica una velocidad. El campo magnético ejerce entonces una fuerza sobre la carga en movimiento, en la dirección de propagación de la luz incidente. (Verifique esta dirección usando la regla de la mano derecha para fuerzas magnéticas.)

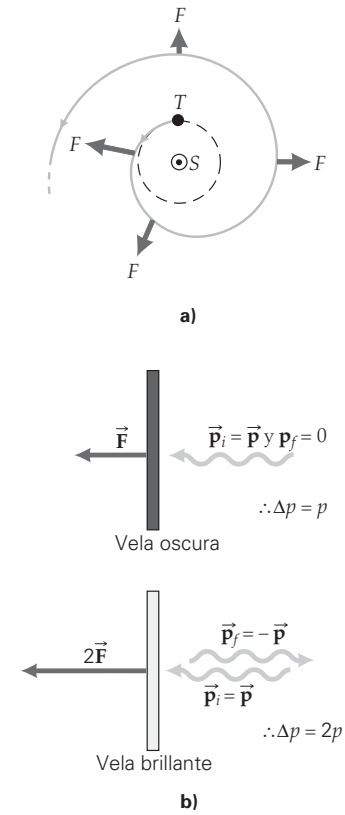
Presión de la radiación

Una onda electromagnética porta energía. En consecuencia, puede efectuar trabajo y ejercer una fuerza sobre algún material con el que choque. Imaginemos la luz que cae sobre un electrón en reposo sobre una superficie (◂figura 20.21). El campo eléctrico de la onda electromagnética ejerce una fuerza sobre el electrón, comunicándole una velocidad ($\vec{\mathbf{v}}$) hacia abajo, como se indica en la figura. Como una partícula cargada que se mueve en un campo magnético está sometida a una fuerza, sobre el electrón hay una fuerza magnética que se debe al componente del campo magnético de la onda luminosa. De acuerdo con la regla de la mano derecha, esta fuerza tiene la dirección de propagación de la onda (figura 20.21a). Como la onda electromagnética produce la misma fuerza sobre muchos electrones, ejerce una fuerza sobre la superficie como un todo, en la dirección en la que se propaga.

La fuerza de radiación que se ejerce sobre una superficie se llama **presión de radiación**. Esta presión es insignificante en la mayor parte de las situaciones cotidianas, pero es importante en los fenómenos atmosféricos y astronómicos, al igual que en la fí-

sica atómica y nuclear, donde las masas son pequeñas y no hay fricción. Por ejemplo, la presión de radiación desempeña un papel clave en la determinación de la dirección en la que apuntan las colas de los cometas. La luz solar entrega energía a la "cabeza" del cometa, formada por hielo y polvo. Parte de este material se evapora cuando el cometa se acerca al Sol, y la presión de radiación empuja los gases evaporados haciendo que se alejen del Sol. Así, la cola en general apunta alejándose del Sol, sin importar si el cometa se acerca o se aleja de este astro.

Otro uso potencial de la presión de la radiación solar es la propulsión de satélites "veleros" interplanetarios, que se alejan del Sol en una órbita en espiral que se amplía lentamente, hasta llegar a los planetas exteriores (▸figura 20.22a). Para generar la fuerza suficiente y usar la presión extremadamente baja de la luz solar, las velas deberían tener una superficie muy grande, y el satélite debería tener tan poca masa como fuera posible. La recompensa es que no se necesitaría combustible (a excepción de cantidades pequeñas para corregir el curso), una vez lanzado el satélite. Examine el siguiente Ejemplo conceptual, acerca de la presión de radiación y los viajes espaciales.



▲ **FIGURA 20.22 "Velero" en el sistema solar** ***a)*** Una sonda espacial lanzada desde la Tierra (T), equipada con una gran vela, actuaría de acuerdo con la presión de la radiación solar (el Sol se denota por S). Esta fuerza gratuita haría que el satélite se alejara describiendo una espiral. Con la planeación adecuada, la nave podría llegar a los planetas exteriores con poco o nada de combustible adicional. Note la reducción en la fuerza con la distancia.
b) ¿Es mejor que la vela sea oscura o brillante? Véase el Ejemplo conceptual 20.10 y la conservación de la cantidad de movimiento.

Ejemplo conceptual 20.10 ■ Velero en el espacio: la presión de radiación en acción

Considere el diseño de un vehículo espacial relativamente ligero, con una "vela" gigantesca, que serviría como sonda interplanetaria. Con poca o nada de energía propia, usaría la presión de la luz solar para impulsarse y llegar a los planetas exteriores. Para obtener la máxima fuerza de propulsión, ¿qué clase de superficie debería tener la vela? *a*) Brillante y reflectora, *b*) oscura y absorbente o *c*) no importarían las características de la superficie.

Razonamiento y respuesta. A primera vista, se podría pensar que la respuesta correcta es *c*. Sin embargo, como hemos visto, la radiación es *capaz* de ejercer fuerzas y transfiere cantidad de movimiento a todo aquel objeto con el que choca. Así, la interacción entre la radiación y la vela se describe en términos de la conservación de la cantidad de movimiento, como se ve en la figura 20.22b. (Véase la sección 6.3.) Si se absorbe la radiación, la situación es análoga a la de un choque totalmente inelástico (como cuando choca una bola de plastilina contra una puerta), y la vela adquiriría toda la cantidad de movimiento ($\vec{p}$) que poseía originalmente la radiación.

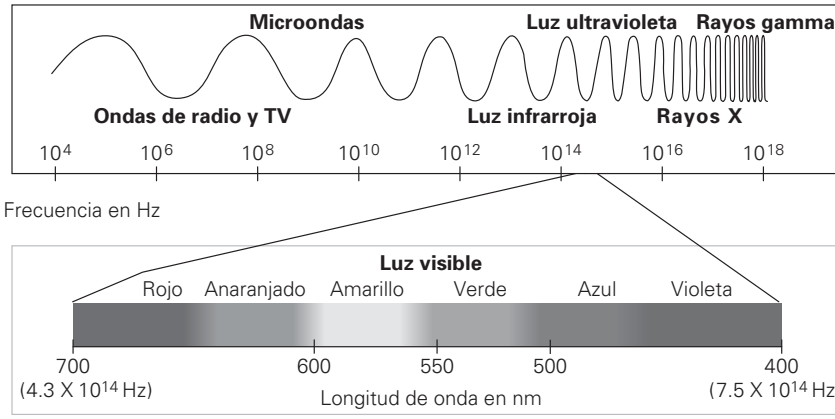
Sin embargo, si la radiación se *refleja*, el caso es análogo al de un choque totalmente elástico, como el de una bola que rebota en un muro (véase la sección 6.1). Como la cantidad de movimiento de la radiación después del choque sería igual en magnitud a su cantidad de movimiento inicial, pero con sentido contrario, esa cantidad de movimiento se invertiría (de $\vec{p}$ a $-\vec{p}$). Para conservar la cantidad de movimiento, la cantidad de movimiento transferida a la vela brillante sería el doble ($2\vec{p}$) que con la vela oscura. Como la fuerza es igual a la rapidez de cambio de la cantidad de movimiento, las velas reflectoras tendrían, en promedio, el doble de fuerza que las absorbentes. Así que la respuesta correcta es *a*.

Ejercicio de refuerzo. *a*) En este ejemplo, ¿la vela daría más o menos aceleración conforme la nave se aleja del Sol? *b*) Explique cómo un cambio en el área de la vela podría contrarrestar este cambio.

Clases de ondas electromagnéticas

Las ondas electromagnéticas se clasifican en regiones en un espectro de frecuencias o longitudes de onda. Recuerde que en el capítulo 13 se explicó que la frecuencia y la longitud de onda tienen una relación inversa mediante la relación $\lambda = c/f$, en la que la rapidez general de la onda v se sustituyó por la rapidez de la luz c. Cuanto mayor sea la frecuencia, menor será la longitud de onda, y viceversa. El espectro electromagnético es continuo, por lo que los límites de las diversas regiones son aproximados (▾figura 20.23). La tabla 20.1 (siguiente página) muestra estas regiones de frecuencia y longitud de onda para los tipos generales de ondas electromagnéticas.

Ondas de potencia Las ondas electromagnéticas de 60 Hz de frecuencia se producen por las corrientes alternas en los circuitos eléctricos. Estas ondas de potencia tienen una longitud de onda de $5.0 = 10^6$ m o 5000 km (más de 3000 mi). Las ondas de frecuencias tan bajas tienen pocos usos prácticos. A veces producen el llamado murmullo de 60 Hz en los equipos estereofónicos, o son los causantes de ruidos eléctricos no deseados en los instrumentos delicados. Preocupan más los posibles efectos de estas ondas sobre la salud. Algunos de los primeros estudios parecían indicar que los campos



▶ **FIGURA 20.23 El espectro electromagnético** El espectro de frecuencias o longitudes de onda se divide en regiones, o intervalos. Observe que la región de la luz visible es una parte muy pequeña del espectro electromagnético total. Para la luz visible, las longitudes de onda se expresan generalmente en nanómetros (1 nm = 10^{-9} m). (Los tamaños relativos de las longitudes de onda que aparecen en la parte superior de la figura no están a escala.) (Véase el pliego a color al final del libro.)

TABLA 20.1 Clasificación de las ondas electromagnéticas

Tipo de onda	*Intervalo aproximado de frecuencias (Hz)*	*Intervalo aproximado de longitudes de onda (m)*	*Algunas fuentes comunes*
Ondas de potencia	60	5.0×10^6	Corrientes eléctricas
Ondas de radio AM	(0.53×10^6)–(1.7×10^6)	570–186	Circuitos eléctricos/antenas
Ondas de radio FM	(88×10^6)–(108×10^6)	3.4–2.8	Circuitos eléctricos/antenas
TV	(54×10^6)–(890×10^6)	5.6–0.34	Circuitos eléctricos/antenas
Microondas	10^9–10^{11}	10^{-1}–10^{-3}	Tubos de vacío especiales
Radiación infrarroja	10^{11}–10^{14}	10^{-3}–10^{-7}	Cuerpos tibios y calientes, estrellas
Luz visible	(4.0×10^{14})–(7.0×10^{14})	10^{-7}	El Sol y otras estrellas; lámparas
Radiación ultravioleta	10^{14}–10^{17}	10^{-7}–10^{-10}	Cuerpos muy calientes, estrellas y lámparas especiales
Rayos X	10^{17}–10^{19}	10^{-10}–10^{-12}	Choques de electrones a alta rapidez y procesos atómicos
Rayos gamma	Por arriba de 10^{19}	Por debajo de 10^{-12}	Reacciones nucleares y procesos de decaimiento nuclear

con muy baja frecuencia tienen efectos biológicos potencialmente dañinos sobre células y tejidos. Sin embargo, investigaciones recientes indican que esto no es verdad.

Ondas de radio y televisión Estas ondas están, en general, en el intervalo comprendido entre 500 kHz y 1000 MHz. La banda de amplitud modulada (AM) va de 530 a 1710 kHz (1.71 MHz). Las frecuencias mayores, hasta 54 MHz, se utilizan en las bandas de "onda corta". Las bandas de TV van de 54 a 890 MHz. La banda de radio de frecuencia modulada (FM) va de 88 a 108 MHz, que está en un hueco entre los canales 6 y 7 de la región de las bandas de televisión. Los teléfonos celulares emplean ondas de radio para transmitir comunicación de voz en la banda de frecuencia ultra-alta (UHF), cuyas frecuencias se parecen a las que se usan en los canales 13 o mayores de la televisión.

Las primeras comunicaciones internacionales usaban bandas de "onda corta", igual que los operadores de radio aficionados de hoy. Pero, ¿cómo se transmiten las ondas de radio, que normalmente describen trayectorias rectas, rodeando la curvatura de la Tierra? Esta hazaña se logra con la reflexión en las capas iónicas de la atmósfera superior. Las partículas energéticas que proceden del Sol ionizan las moléculas de gas y originan varias capas de iones. Algunas de esas capas reflejan las ondas de radio. Así, al "hacer rebotar" las ondas de radio en esas capas, es posible transmitir señales más allá del horizonte, a cualquier lugar del mundo.

Esta reflexión de las ondas de radio requiere que las capas de iones tengan densidad uniforme. Cuando una perturbación solar produce un aguacero de partículas energéticas que perturba esta uniformidad, puede presentarse un "oscurecimiento" de las comunicaciones, cuando las ondas de radio se dispersan en muchas direcciones en lugar de reflejarse en líneas rectas. En el pasado, para evitar esas perturbaciones, las

comunicaciones internacionales tuvieron que basarse principalmente en cables transoceánicos. Ahora contamos con satélites de comunicaciones, que permiten transmitir señales por la línea de vista a cualquier punto del planeta.

Microondas Las microondas, con frecuencias del orden de los gigahertz (GHz), se generan en tubos especiales de vacío (llamados *klistrones* y *magnetrones*). Se usan con frecuencia en aplicaciones de comunicaciones y de radar. Además de sus funciones como guía en la navegación, el radar es la base de los medidores de rapidez que se usan para cronometrar eventos, como los lanzamientos en el béisbol, y para detectar a los conductores que infringen los límites de velocidad, todo esto gracias al efecto Doppler (véase la sección 14.5). Cuando las ondas de radar se reflejan en un objeto en movimiento, la magnitud y el signo del desplazamiento indican la velocidad del objeto.

Radiación infrarroja (IR) La región infrarroja del espectro electromagnético está al lado del extremo de baja frecuencia, o de larga longitud de onda, del espectro visible. Un cuerpo cálido emite radiación IR, que depende de su temperatura. Un cuerpo a la temperatura ambiente emite radiación en la región lejana del infrarrojo. (En este caso, el término "lejana" se utiliza en relación con la región visible.)

Recuerde que en la sección 11.4 se explicó que la radiación infrarroja se llama a veces "rayos de calor". Esto se debe a que las moléculas de agua, presentes en la mayor parte de los materiales, absorben con facilidad la radiación en la región de longitudes de onda infrarroja. Cuando lo hacen aumentan su movimiento térmico aleatorio; se "calientan" y también calientan su entorno. Las lámparas infrarrojas se usan en aplicaciones terapéuticas, como para aliviar el dolor de músculos tensos, y para mantener calientes los alimentos en los restaurantes. La radiación IR también se asocia con la conservación de la temperatura de la Tierra a través del *efecto invernadero*. En este efecto, la luz visible que llega (que pasa con relativa facilidad por la atmósfera) es absorbida por la superficie terrestre y se vuelve a irradiar en forma de radiación infrarroja, que queda atrapada por los gases de invernadero, como el dióxido de carbono y el vapor de agua, que son opacos a esta radiación. El nombre del efecto proviene de los invernaderos, en donde el vidrio (y no gases atmosféricos) atrapa la energía.

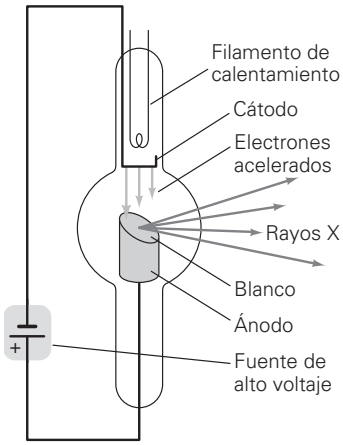
Luz visible La región de la luz visible ocupa sólo una pequeña parte del espectro electromagnético. Su frecuencia va desde aproximadamente 4×10^{14} Hz hasta casi 7×10^{14} Hz. En términos de longitudes de onda, esto equivale al intervalo comprendido entre 700 y 400 nm (figura 20.23). Recuerde que 1 nanómetro (nm) = 10^{-9}m. Sólo la radiación en esta región de frecuencias es la que activa los receptores del ojo humano. La luz visible emitida o reflejada de los objetos que nos rodean brinda información visual acerca de nuestro mundo. La luz visible y la óptica se estudiarán en los capítulos 22 al 25.

Es interesante notar que no todos los animales son sensibles al mismo intervalo de longitudes de onda. Por ejemplo, las serpientes pueden detectar la radiación infrarroja, y el espectro visible de muchos insectos se extiende hasta abarcar el intervalo ultravioleta. El intervalo de sensibilidad del ojo humano se apega bastante al espectro de longitudes de onda emitidas por el Sol. La máxima sensibilidad del ojo humano está en la misma región del amarillo-verde, donde las emisiones de energía del Sol son máximas (longitudes de onda de 550 nm).

Radiación ultravioleta (UV) Aunque el espectro del Sol está formado principalmente por luz visible, tiene un componente pequeño de luz ultravioleta (UV), cuyo intervalo de frecuencias está más allá del extremo violeta de la región visible. La radiación ultravioleta también se puede producir con lámparas especiales y con cuerpos muy calientes. Además de causar el bronceado de la piel, la radiación UV puede causar quemaduras y/o cáncer de la piel, si la exposición a ella es demasiado prolongada.

Al llegar a la Tierra, la mayor parte de la emisión ultravioleta solar se absorbe en la capa de ozono (O_3) de la atmósfera, a una altitud comprendida entre 30 y 50 km. Como la capa de ozono desempeña un papel esencial en la protección frente a los rayos ultravioleta, hay preocupación acerca de su agotamiento a causa de los gases de clorofluorocarbonos (como el freón, que alguna vez se usó en los refrigeradores), que se difunden hacia arriba y reaccionan con el ozono.

La mayor parte de la radiación ultravioleta es absorbida por el vidrio ordinario. En consecuencia, no se puede conseguir un buen bronceado a través de vidrieras. En las etiquetas de los anteojos para sol se indica con qué tipo de normas cumplen para proteger a los ojos de esta radiación potencialmente peligrosa. También hay ciertas clases de vidrio de alta tecnología (vidrio "fotogris") que se oscurece al exponerse a la radiación UV. Estos materiales son la base de los anteojos solares "de transición", que se oscurecen al exponerse a la luz solar. Naturalmente, esos anteojos no resultan muy útiles cuando alguien con-



▲ **FIGURA 20.24 El tubo de rayos X** Electrones acelerados por medio de un alto voltaje chocan con un electrodo, que sirve como blanco. Allí se desaceleran e interactúan con los electrones de los átomos del material con el que chocan. Durante el proceso de "frenado" (desaceleración) se emite energía en forma de rayos X.

duce un automóvil (¿por qué?). Los soldadores usan gafas o caretas con vidrio especial para protegerse los ojos de las grandes cantidades de radiación UV producidas en los arcos de soldadura. Asimismo, es importante proteger los ojos de las lámparas solares y de las superficies cubiertas de nieve. El componente ultravioleta de la luz solar reflejada en las superficies nevadas produce ceguera de nieve en los ojos no protegidos.

Rayos X Más allá de la región ultravioleta del espectro electromagnético se encuentra la importante región de rayos X. Estamos familiarizados con los rayos X, principalmente por sus aplicaciones médicas. Fue el físico alemán, Wilhelm Roentgen (1845-1923), quien los descubrió en forma accidental, en 1895, al notar la fosforescencia de un trozo de papel fluorescente, causada por alguna radiación misteriosa proveniente de un tubo de rayos catódicos. Por su naturaleza misteriosa, a esta radiación de se le llamó *radiación x*, o *rayos X*.

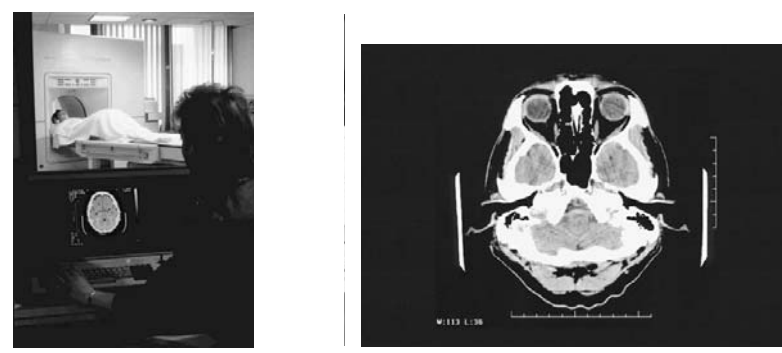
En la ◂figura 20.24 se ven los elementos básicos de un tubo de rayos X. Un voltaje acelerador, normalmente de algunos miles de volts, se aplica entre los electrodos en un tubo sellado y al vacío. Los electrones que emite el electrodo negativo caliente (cátodo) se aceleran hacia el electrodo positivo (ánodo). Cuando chocan con el ánodo, parte de su energía térmica perdida se convierte en rayos X.

Un proceso similar se efectúa en los cinescopios de televisión a color, que utilizan altos voltajes y haces de electrones. Cuando los electrones, que llevan una gran rapidez, chocan con la pantalla, pueden emitir rayos X al ambiente. Por fortuna, todos los televisores modernos tienen el blindaje necesario para proteger a los espectadores contra esta radiación. En los primeros años de la televisión a color no siempre sucedía así, de ahí la frecuente recomendación: "No se siente muy cerca de la pantalla".

Como se sabe, la energía que transporta la radiación electromagnética depende de su frecuencia. Los rayos X de alta frecuencia tienen energías muy altas, y pueden causar cáncer, quemaduras de piel y otros efectos dañinos. Sin embargo, a bajas intensidades se pueden usar con relativa seguridad para ver la estructura interna del cuerpo humano y la de otros objetos opacos.* Los rayos X son capaces de atravesar materiales que son opacos a otras clases de radiación. Cuanto más denso es el material, mayor es la absorción de rayos X, y menos intensa es la radiación transmitida. Por ejemplo, cuando los rayos X atraviesan el cuerpo humano, se absorben o se dispersan mucho más en los huesos que en los demás tejidos. Si la radiación transmitida llega a una placa o película fotográfica, las áreas expuestas muestran variaciones de intensidad, lo que da por resultado una imagen de las estructuras internas.

La combinación de las computadoras con las modernas máquinas de rayos X permite formar imágenes tridimensionales mediante una técnica llamada *tomografía computarizada* o TC (▾figura 20.25).

Rayos gamma Las ondas electromagnéticas de la zona de frecuencias superiores del espectro electromagnético conocido se llaman *rayos gamma* (rayos γ). Esta radiación de alta frecuencia se produce en las reacciones nucleares, en los aceleradores de partículas y también como resultado de algunos tipos de decaimiento o desintegración nuclear (radiactividad).



a) b)

▶ **FIGURA 20.25 Tomografía computarizada (TC)** En una imagen ordinaria de rayos X, todo el espesor del cuerpo se proyecta en una película. Sin embargo, con frecuencia, sus estructuras internas se traslapan y es difícil distinguir los detalles. En la tomografía (del griego *tomo*, que significa "rebanada" y *grafos*, que significa "imagen") computarizada, los haces de rayos X pueden obtener imágenes de una "rebanada" del organismo. ***a)*** La radiación transmitida se registra con una serie de detectores, y se procesa en una computadora. Con la información de varias rebanadas, la computadora forma una imagen tridimensional. También es posible mostrar una imagen única para hacer un estudio más minucioso, como se ve en el monitor. ***b)*** Una imagen de TC de un cerebro con un tumor benigno.

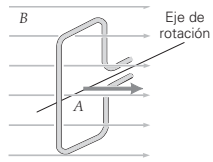
*La mayor parte de los científicos de la salud creen que no hay un "umbral" seguro para los rayos X u otras radiaciones de energía; esto es, no hay nivel de exposición que esté totalmente a salvo de riesgos. Por otra parte, creen que algunos de los efectos dañinos son acumulativos durante toda la vida. En consecuencia, las personas deben evitar radiografías innecesarias u otras exposiciones a la radiación "dura". Sin embargo, cuando se emplean adecuadamente, los rayos X constituyen una herramienta de diagnóstico extremadamente útil, capaz de salvar vidas.

Repaso del capítulo

- El **flujo magnético (Φ)** es una medida de la cantidad de líneas magnéticas que atraviesan una área. Para una sola espira de alambre de área A, se define como

$$\Phi = BA\cos\theta \tag{20.1}$$

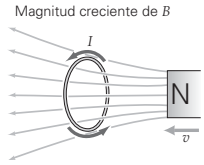
en donde B es la intensidad del campo magnético (se supone constante en el área), A es el área y θ es el ángulo que forma la dirección del campo magnético con la normal al plano del área.



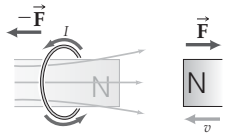
- La **ley de Faraday de la inducción** relaciona la fem inducida en una espira (o bobina compuesta de N espiras en serie) con la rapidez de cambio del flujo magnético a través de esa espira (o bobina).

$$\mathscr{E} = -N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \tag{20.2}$$

donde $\Delta\Phi$ el cambio de flujo a través de *una espira* o *vuelta*, en tanto que hay N vueltas.



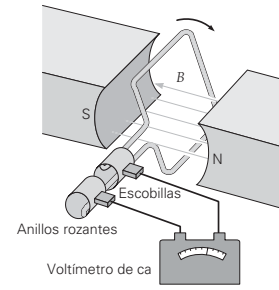
- La **ley de Lenz** establece que cuando un cambio en el flujo magnético induce una fem en una bobina, espira o circuito, la dirección de la corriente resultante, o inducida, es tal que crea su propio campo magnético, que se opone al cambio del flujo.



- Un **generador de ca** convierte la energía mecánica en energía eléctrica. La fem del generador en función del tiempo es

$$\mathscr{E} = \mathscr{E}_o \operatorname{sen} \omega t \tag{20.4}$$

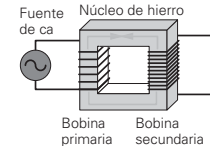
donde $\mathscr{E}_o$ es la fem máxima.



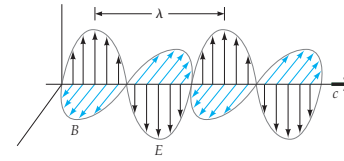
- Un **transformador** es un dispositivo que cambia el voltaje que le llega mediante la inducción. El voltaje aplicado al lado de la entrada o primario (p) del transformador cambia al voltaje de salida o secundario (s), según la ecuación

$$V_s = \left(\frac{N_s}{N_p}\right)V_p \tag{20.10a}$$

$$I_s = \left(\frac{N_p}{N_s}\right)I_p \tag{20.10b}$$



- Una **onda electromagnética** (luz) consiste en campos eléctricos y magnéticos variables en el tiempo, que se propagan con una rapidez constante en el vacío ($c = 3.00 \times 10^8$ m/s). Los diversos tipos de radiación (como los rayos UV, las ondas de radio y la luz visible) difieren en frecuencia y longitud de onda.



- La radiación electromagnética transporta energía y cantidad de movimiento, y puede ejercer una fuerza llamada **presión de radiación**.

Ejercicios

Los ejercicios designados **OM** *son preguntas de opción múltiple; los* **PC** *son preguntas conceptuales; y los* **EI** *son ejercicios integrados. A lo largo del texto, muchas secciones de ejercicios incluirán ejercicios "apareados". Estos pares de ejercicios, que se identifican con números subrayados, pretenden ayudar al lector a resolver problemas y aprender. El primer ejercicio de cada pareja (el de número par) se resuelve en la Guía de estudio, que puede consultarse si se necesita ayuda para resolverlo. El segundo ejercicio (de número impar) es similar, y su respuesta se da al final del libro.*

20.1 Fem inducida: ley de Faraday y ley de Lenz

1. **OM** Una unidad de flujo magnético es *a*) Wb, *b*) T • m^2, *c*) T • m/A o *d*) tanto *a* como *b*.

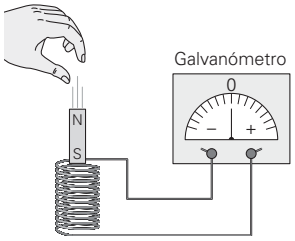
2. **OM** El flujo magnético que atraviesa una espira puede alterarse como resultado de un cambio de *a*) el área de la bobina, *b*) la intensidad del campo magnético, *c*) la orientación de la espira o *d*) todos los anteriores.

3. **OM** Para que aparezca una corriente inducida en una espira de alambre, *a*) debe haber un flujo magnético en ella, *b*) el plano de la espira debe ser paralelo al campo magnético, *c*) el plano de la espira debe ser perpendicular al campo magnético o *d*) el flujo magnético que pasa por ella debe variar en el tiempo.

4. **OM** Espiras individuales e idénticas A y B están orientadas de manera que inicialmente tienen la cantidad máxima de flujo en un campo magnético. Entonces, la espira A se hace girar rápidamente de forma que su normal sea perpendicular al campo magnético, y, al mismo tiempo, la espira B se hace girar de forma que su normal forme un ángulo de 45° con el campo. ¿Cómo se comparan sus fuerzas electromotrices inducidas? *a*) Son iguales, *b*) la de A es mayor que la de B, *c*) la de B es mayor que la de A o *d*) no es posible conocer las magnitudes relativas de las fuerzas electromotrices a partir de los datos.

5. **OM** Espiras individuales idénticas A y B están orientadas de manera que tienen la cantidad máxima de flujo cuando se colocan en un campo magnético. Ambas espiras mantienen su orientación relativa al campo, pero, en la misma cantidad de tiempo, A se mueve a una región donde el campo es más intenso, mientras que B se mueve a una región donde el campo es más débil. ¿Cómo se comparan sus fuerzas electromotrices inducidas? *a*) Son iguales, *b*) la de A es mayor que la de B, *c*) la de B es mayor que la de A o *d*) no es posible conocer las magnitudes relativas de las fuerzas electromotrices a partir de los datos.

6. **PC** Un imán recto se deja caer a través de una bobina de alambre como se ve en la ▼figura 20.26. *a*) Describa lo que se observa en el galvanómetro, trazando una gráfica de fem inducida en función de *t*. *b*) ¿El imán cae libremente? Explique por qué.



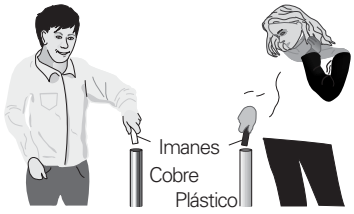
◀ **FIGURA 20.26 Campo magnético variable en el tiempo** ¿Qué medirá el galvanómetro? Véase el ejercicio 6.

7. **PC** En la figura 20.1b, ¿cuál sería la dirección de la corriente inducida en la espira si, en lugar del polo norte, se acercara el polo sur del imán?

8. **PC** En la figura 20.7a, ¿cómo movería usted la bobina para evitar la inducción de cualquier corriente en ella? Explique su respuesta.

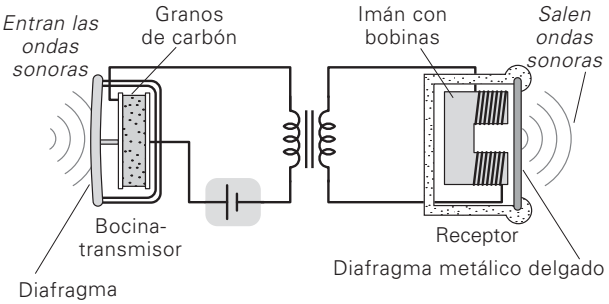
9. **PC** La fem inducida en una espira cerrada ¿depende del valor del campo magnético en la espira? Explique su respuesta.

10. **PC** Dos alumnos dejan caer dos poderosos imanes idénticos, al mismo tiempo, al interior de dos tubos verticales de iguales dimensiones (▼figura 20.27). Un tubo es de cobre y el otro es de plástico. ¿De cuál tubo saldrá primero uno de los imanes? ¿Por qué?



◀ **FIGURA 20.27 ¿Caída libre?** Véase el ejercicio 10.

11. **PC** Un teléfono básico consiste en una bocina transmisora y un receptor (▼figura 20.28). Hasta la llegada de los teléfonos digitales en la década de 1990, el transmisor tenía un diafragma acoplado a una cámara de carbón (llamada *botón*), con granos de carbón sueltos en su interior. Al vibrar el diafragma por las ondas sonoras que le llegaban, variaba la presión en los granos haciendo que se colocaran más o menos estrechamente. El resultado era que cambiaba la resistencia del botón. El receptor convertía estos impulsos eléctricos en sonido. Aplique los principios de electricidad y magnetismo que ha aprendido para explicar el funcionamiento básico de esta clase de teléfono.



▲ **FIGURA 20.28 Funcionamiento del teléfono** Véase el ejercicio 11.

12. ● Una espira circular con 0.015 m^2 de área está en un campo magnético uniforme de 0.30 T. ¿Cuál es el flujo a través del plano de la espira, si se encuentra *a*) paralela al campo, *b*) formando un ángulo de 37° con el campo y *c*) perpendicular al campo?

13. ● Una espira circular (de 20 cm de radio) se coloca dentro de un campo magnético uniforme de 0.15 T. ¿Qué ángulo (o ángulos) entre la normal al plano de la espira y el campo dará por resultado un flujo con magnitud de $1.4 \times 10^{-2}\ T \cdot m^2$?

14. ● El plano de una espira conductora de 0.020 m^2 de área es perpendicular a un campo magnético uniforme de 0.30 T. Si el campo baja a cero en 0.0045 s, ¿cuál es la magnitud de la fem promedio inducida en la espira?

15. ● Una espira en forma de triángulo rectángulo, con un cateto de 40.0 cm e hipotenusa de 50.0 cm, está en un plano perpendicular a un campo magnético uniforme de 550 mT. ¿Cuál es el flujo que la atraviesa?

16. ● Una bobina cuadrada de alambre con 10 vueltas está en un campo magnético de 0.25 T. El flujo total que pasa por ella es de $0.50\ T \cdot m^2$. Calcule el área de una vuelta si el campo *a*) es perpendicular al plano de la bobina y *b*) forma un ángulo de 60° con el plano de la bobina.

17. ●● Un solenoide ideal con una corriente de 1.5 A tiene 3.0 cm de radio, y su densidad de devanado es de 250 vueltas/m. ¿Cuál es el flujo magnético (que se debe a su propio campo) que pasa sólo por el centro de una de sus espiras?

18. ●● Un campo magnético forma ángulos rectos con el plano de una espira de alambre. Si el campo disminuye 0.20 T en 1.0×10^{-3} s, y la magnitud de la fem promedio inducida en la espira es de 80 V, ¿cuál es el área de la espira?

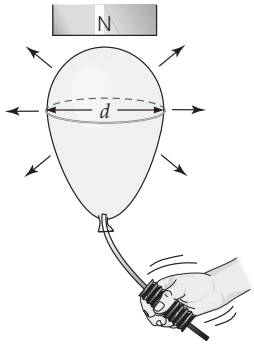
19. ●● Una espira cuadrada de alambre tiene lados de 40 cm, y está en un campo magnético uniforme perpendicular a su área. Si la intensidad inicial del campo es de 100 mT y baja a cero en 0.010 s, ¿cuál es la magnitud de la fem promedio inducida en la espira?

20. ●● El flujo magnético que atraviesa una espira de alambre se reduce de 0.35 a 0.15 Wb en 0.20 s. La corriente inducida promedio en la bobina es de 10 A. Calcule la resistencia del alambre.

21. ●● Cuando el flujo magnético que atraviesa una sola espira de alambre aumenta en 30 $T \cdot m^2$, se produce una corriente promedio de 40 A en el conductor. Suponiendo que la resistencia del alambre es de 2.5 Ω, ¿en cuánto tiempo aumentó el flujo?

22. ●● En 0.20 s, una bobina de alambre con 50 vueltas desarrolla una fem inducida promedio de 9.0 V, que se debe a un campo magnético variable perpendicular al plano de la bobina. El radio de la bobina mide 10 cm, y la intensidad inicial del campo magnético es de 1.5 T. Suponiendo que la intensidad del campo disminuye con el tiempo, ¿cuál es su intensidad final?

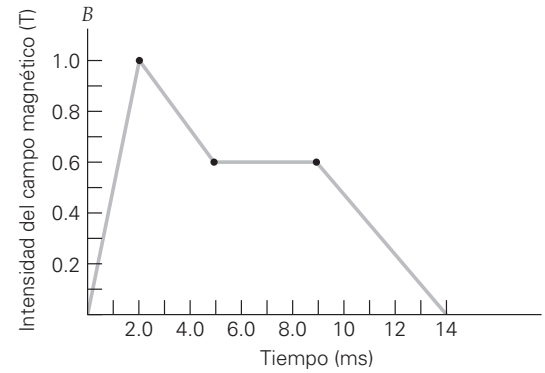
23. **El** ●● Un hilo de alambre de longitud ajustable se enreda alrededor de la circunferencia de un globo esférico. Hay un campo magnético uniforme perpendicular al plano de la espira (▾figura 20.29). *a*) Si el globo se infla, ¿qué dirección tiene la corriente inducida, viendo de arriba hacia abajo? 1) Sentido contrario a las manecillas del reloj, 2) el sentido de las manecillas del reloj o 3) no hay corriente inducida. *b*) Si la magnitud del campo magnético es de 0.15 T y el diámetro de la espira aumenta de 20 a 40 cm en 0.040 s, ¿cuál es la magnitud del valor promedio de la fem inducida en la espira?



◀ **FIGURA 20.29 Energía de bombeo** Véase el ejercicio 23.

24. ●● El campo magnético perpendicular al plano de una espira de alambre de 0.10 m^2 de área cambia al paso del tiempo en la forma que se ve en la ▸figura 20.30. ¿Cuál es la magnitud de la fem promedio inducida en la espira para cada segmento de la gráfica (por ejemplo, de 0 a 2.0 ms)?

25. **El** ●● Un niño va en línea recta hacia el norte con rapidez constante, cargando una varilla metálica. La varilla está orientada en dirección este-oeste, y es paralela al piso. *a*) No habrá fem inducida cuando la varilla está 1) en el ecuador terrestre, 2) cerca de los polos magnéticos de la Tierra o 3) entre el ecuador y los polos. ¿Por qué? *b*) Suponga que el campo magnético de la Tierra es 1.0×10^{-4} T cerca del Polo Norte y 1.0×10^{-5} T cerca del ecuador. Si el niño corre con una rapidez de 5.0 m/s en ese lugar, y la varilla mide 1.0 m de longitud, calcule la fem inducida en la varilla.



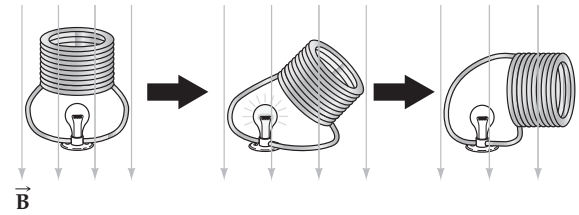
▲ **FIGURA 20.30 Campo magnético en función del tiempo** Véase el ejercicio 24.

26. ●● Un avión metálico de 30 m de envergadura vuela en dirección horizontal con una rapidez constante de 320 km/h, en una región donde el componente vertical del campo magnético terrestre es 5.0×10^{-5} T. ¿Cuál es la fem inducida por el movimiento, entre las puntas de las alas del avión?

27. ●● Suponga que la varilla metálica de la figura 20.11 mide 20 cm de longitud y que se mueve a 10 m/s en un campo magnético de 0.30 T, y que el marco metálico está cubierto por un material aislante. Calcule *a*) la magnitud de la fem inducida a través de la varilla y *b*) la corriente en la varilla.

28. ●●● El flujo que atraviesa una espira de alambre cambia de manera uniforme de +40 Wb a −20 Wb en 1.5 ms. *a*) ¿Cuál es el significado del flujo negativo? *b*) ¿Cuál es la fem promedio inducida en la espira? *c*) Si se quisiera duplicar la fem promedio inducida cambiando sólo el tiempo, ¿cuál sería el nuevo intervalo de tiempo? *d*) Si se quisiera duplicar la fem promedio inducida cambiando sólo el valor del flujo final, ¿cuál sería éste?

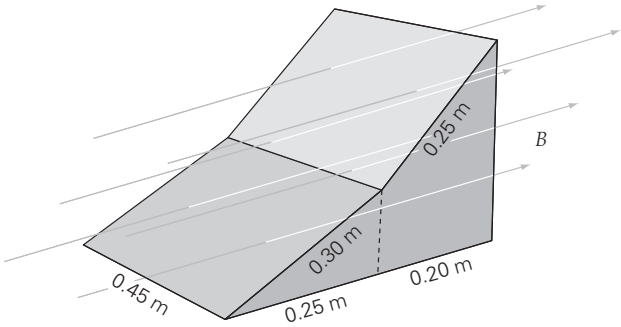
29. ●●● Una bobina de alambre de 10 vueltas y 0.055 m^2 de área se coloca en un campo magnético de 1.8 T, y se orienta de tal forma que su área es perpendicular al campo. A continuación, la bobina se gira 90° en 0.25 s, y termina con su área paralela al campo (▾figura 20.31). ¿Cuál es la magnitud de la fem promedio inducida en la bobina?



▲ **FIGURA 20.31 Inclinación de la bobina** Véanse los ejercicios 27 y 28.

30. **El** ●●● En la figura 20.31, la bobina se gira 180° en el mismo intervalo de tiempo que el del ejercicio 29. *a*) ¿Cómo se compara la magnitud de la fem promedio con la del ejercicio 29, donde la bobina se inclinó sólo 90°? 1) Es mayor, 2) es igual o 3) es menor. ¿Por qué? *b*) ¿Cuál es la magnitud de la fem promedio en este caso?

31. ●●● Un campo magnético uniforme de 0.50 T penetra en un bloque con doble pendiente, como el que se ilustra en la ▼figura 20.32. *a*) Determine el flujo magnético que atraviesa cada superficie inclinada del bloque. *b*) Determine el flujo a través de la superficie trasera vertical del bloque. *c*) Determine el flujo a través de la superficie plana horizontal del bloque. *d*) ¿Cuál es el flujo total a través de todas las superficies exteriores? Explique el significado de su respuesta.



▲ **FIGURA 20.32 Flujo magnético** Véase el ejercicio 31. (El dibujo no está a escala.)

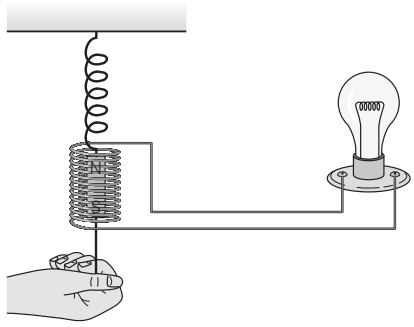
20.2 Generadores eléctricos y contra fem

32. OM Si no se hace nada más que aumentar el área de la bobina en un generador de ca, como resultado *a*) aumentará en la frecuencia de rotación, *b*) disminuirá la fem máxima inducida o *c*) aumentará la fem máxima inducida.

33. OM La contra fem de un motor depende de *a*) el voltaje de alimentación, *b*) la corriente de alimentación, *c*) la rapidez de giro de la armadura o *d*) ninguna de las opciones anteriores es verdadera.

34. PC ¿Cuál es la orientación de la espira de armadura en un generador simple de ca cuando el valor de *a*) la fem es máximo y *b*) el flujo magnético es máximo? Explique por qué la fem máxima no ocurre cuando el flujo es máximo.

35. PC Un alumno tiene una brillante idea para fabricar un generador. Para la configuración que se ve en la ▼figura 20.33, el imán se jala hacia abajo y se suelta. Con un resorte muy elástico, el alumno cree que debe haber una producción de electricidad relativamente continua. ¿Cuál es el error de esta idea?



▲ **FIGURA 20.33 ¿Genio inventor?** Véase el ejercicio 35.

36. PC En un motor de cd, si la armadura se traba, o si gira con mucha lentitud cuando la carga es muy grande, las bobinas se quemarán con mucha facilidad. ¿Por qué?

37. PC Si se desea fabricar un generador de ca más compacto reduciendo el área de las bobinas, ¿cómo tendrían que compensarse los demás factores para mantener la misma salida que antes?

38. ● Un generador de ca, que se utiliza en una sala de emergencia de un hospital, funciona a una frecuencia de giro de 60 Hz. Si el voltaje de salida es máximo (en magnitud) cuando $t = 0$, ¿cuándo estará en su siguiente *a*) valor máximo (en magnitud), *b*) valor cero y *c*) valor inicial?

39. ● Un alumno fabrica un generador sencillo con una sola espira cuadrada de 10 cm por lado. A continuación la hace girar a 60 Hz de frecuencia, en un campo magnético de 0.015 T. *a*) ¿Cuál es la fem máxima producida? *b*) ¿Cuál sería la fem máxima producida si utilizara 10 de esas espiras?

40. ●● Un generador sencillo de ca consiste en una bobina de 10 vueltas (cada vuelta tiene 50 cm^2 de área). La bobina gira en un campo magnético uniforme de 350 mT, con 60 Hz de frecuencia. *a*) Escriba una expresión, con la forma de la ecuación 20.5, para determinar la variación de la fem del generador en función del tiempo. *b*) Calcule la fem máxima.

41. **El** ●● Una fuente de ca de 60 Hz tiene 120 V de voltaje máximo. Un alumno quiere determinar el voltaje a 1/180 de segundo después de que su valor es cero. *a*) ¿Cuántos voltajes posibles son así? 1) Uno, 2) dos o 3) tres. ¿Por qué? *b*) Calcule todos los voltajes posibles.

42. ●● Se debe construir un generador de ca con fem máxima de 400 V con espiras de alambre de 0.15 m de radio. Funcionará a una frecuencia de 60 Hz, y usará un campo magnético de 200 mT. ¿Cuántas espiras se necesitan?

43. ●● Un generador de ca funciona a una frecuencia de giro de 60 Hz, y su fem máxima es de 100 V. Suponga que tiene cero fem al arranque. ¿Cuál es la fem instantánea *a*) 1/240 *s* después del arranque y *b*) 1/120 s después de pasar por cero, cuando comienza a invertir su polaridad?

44. ●● La armadura de un generador simple de ca tiene 20 espiras circulares de alambre, cada una de 10 cm de radio. Gira con 60 Hz de frecuencia, en un campo magnético uniforme de 800 mT. ¿Cuál es la fem máxima inducida en las espiras, y con qué frecuencia se llega a este valor?

45. ●● La armadura de un generador de ca tiene 100 vueltas, cada una de las cuales es una espira rectangular de 8.0 por 12 cm. El generador tiene una salida senoidal con 24 V de amplitud. Si el campo magnético del generador es de 250 mT, ¿con qué frecuencia gira la armadura?

46. **El** ●● *a*) Para aumentar la salida de un generador de ca, un alumno tiene la opción de duplicar el campo magnético del generador, *o bien*, su frecuencia. Para maximizar el aumento de la fem de salida, 1) debería duplicar el campo magnético, 2) debería duplicar la frecuencia o 3) no importa cuál de ellos se duplique. Explique por qué. *b*) Dos alumnos muestran sus generadores de ca en una feria científica. El generador que fabricó el alumno A tiene 100 cm^2 de área de espiras, y gira en un campo magnético de 20 mT a 60 Hz. El que fabricó el alumno B tiene 75 cm^2 de área de espira, y gira en un campo magnético de 200 mT a 120 Hz. ¿Cuál de los dos genera la mayor fem máxima? Justifique matemáticamente la respuesta.

47. **El** ●● Un motor tiene 2.50 Ω de resistencia y se conecta a una línea de 110 V. *a*) La corriente de funcionamiento del motor es 1) mayor que 44 A, 2) 44 A o 3) menor que 44 A. ¿Por qué? *b*) Si la contra fem del motor es de 100 V a su rapidez de operación, ¿cuál es su corriente de funcionamiento?

48. ●●● El motor de arranque de un automóvil tiene 0.40 Ω de resistencia en los devanados de la armadura. Trabaja con 12 V y tiene 10 V de contra fem, a su rapidez normal de funcionamiento. ¿Cuánta corriente extrae el motor *a*) cuando gira a su rapidez de funcionamiento, *b*) cuando gira a la mitad de su rapidez final de rotación y *c*) cuando arranca?

49. ●●● Un motor de cd de 240 V tiene una armadura con 1.50 Ω de resistencia. Al trabajar a su rapidez de funcionamiento toma 16.0 A de corriente. *a*) ¿Cuál es la contra fem del motor cuando funciona en condiciones normales? *b*) ¿Cuál es la corriente en el arranque? (Suponga que no hay resistencias adicionales en el circuito.) *c*) ¿Qué resistencia en serie se necesitaría para limitar a 25 A la corriente de arranque?

20.3 Transformadores y transmisión de energía

50. **OM** Un transformador en el sistema de distribución de energía eléctrica localizado justo antes de la casa de usted tiene *a*) más devanados en la bobina primaria, *b*) más devanados en la bobina secundaria o *c*) la misma cantidad de devanados en la bobina primaria que en la secundaria.

51. **OM** La potencia que entrega un transformador real de bajada es *a*) mayor que la potencia de entrada, *b*) menor que la potencia de entrada o *c*) igual que la potencia de entrada.

52. **PC** Explique por qué los sistemas de distribución de energía eléctrica operan a tan altos voltajes si éstos son peligrosos.

53. **PC** En su taller de reparaciones automotrices de emergencia, usted necesita un transformador de bajada, pero sólo hay transformadores de subida. ¿Es posible utilizar un transformador de subida como transformador de bajada? Si es así, explique cómo tendría que conectarse.

54. **El** ● La bobina secundaria de un transformador ideal tiene 450 vueltas, y la primaria tiene 75 vueltas. *a*) Este transformador es 1) de subida o 2) de bajada. ¿Por qué? *b*) ¿Cuál es la razón entre la corriente en la bobina primaria y la corriente en la bobina secundaria? *c*) ¿Cuál es la razón entre el voltaje a través de la bobina primaria y el voltaje en la bobina secundaria?

55. ● Un transformador ideal aumenta de 8.0 a 2000 V, y la bobina secundaria de 4000 vueltas conduce 2.0 A. *a*) Calcule el número de vueltas en la bobina primaria. *b*) Calcule la corriente en la bobina primaria.

56. ● La bobina primaria de un transformador ideal tiene 720 vueltas, mientras que la secundaria, 180 vueltas. Si la bobina primaria conduce 15 A a un voltaje de 120 V, ¿cuáles son *a*) el voltaje y *b*) la corriente de salida de la bobina secundaria?

57. ● El transformador de la fuente de poder para una unidad Zip de 250 MB de computadora cambia una entrada de 120 V a una salida de 5.0 V. Calcule la razón entre el número de vueltas en la bobina primaria y el número de vueltas en la bobina secundaria.

58. ● La bobina primaria de un transformador ideal se conecta con una fuente de 120 V y toma 10 A. La bobina secundaria tiene 800 vueltas, y por ella pasa una corriente de 4.0 A. *a*) ¿Cuál es el voltaje a través de la bobina secundaria? *b*) ¿Cuántas vueltas hay en la bobina primaria?

59. ● Un transformador ideal tiene 840 vueltas en el devanado primario y 120 vueltas en el secundario. Si el primario toma 2.50 A a 110 V, ¿cuáles son *a*) la corriente y *b*) el voltaje de salida de la bobina secundaria?

60. ●● La eficiencia e de un transformador se define como la relación de la potencia que sale entre la potencia que entra:

$$e = \frac{P_s}{P_p} = \frac{I_s V_s}{I_p V_p}.$$

a) Demuestre que, en función de las relaciones entre corrientes y voltajes de la ecuación 20.10 para un transformador ideal, se obtiene una eficiencia del 100%. *b*) Suponga que un transformador de subida aumenta el voltaje de línea de 120A a 240 V, mientras que la corriente de salida se reduce de 12.0A a 5.0 A. ¿Cuál es la eficiencia del transformador? ¿Éste es ideal?

61. **El** ●● Las especificaciones de un transformador en un electrodoméstico pequeño dicen lo siguiente: Alimentación 120 V, 6.0 W; Salida 9.0 V, 300 mA. *a*) Este transformador es 1) ideal o 2) no ideal. ¿Por qué? *b*) ¿Cuál es su eficiencia? (Véase el ejercicio 60.)

62. ●● Un componente de un circuito trabaja a 20 V y 0.50 A. Para convertir el voltaje doméstico normal de 120 V al voltaje adecuado, se utiliza un transformador con 300 vueltas en su devanado primario. *a*) ¿Cuántas vueltas debe tener en su devanado secundario? *b*) ¿Cuánta corriente pasa por el devanado primario?

63. ●● Un transformador del timbre de una puerta baja el voltaje de 120 a 6.0 V, y suministra una corriente de 0.5 A al mecanismo de la campanilla. *a*) ¿Cuál es la relación de vueltas de ese transformador? *b*) ¿Cuál es la corriente que entra al transformador?

64. ●● Un generador de ca suministra 20 A a 440 V, a una línea eléctrica de 10 000 V. Si el transformador de subida tiene 150 vueltas en su devanado primario, ¿cuántas vueltas tiene el secundario?

65. ●● La electricidad generada en el ejercicio 64 se transmite por una línea de 80.0 km de longitud, cuya resistencia es de 0.80 Ω/km. *a*) ¿Cuántos kilowatts-hora se ahorran en 5.00 h al elevar el voltaje? *b*) A \$0.10/kWh, ¿cuánto ahorra (con aproximación de \$10) el consumidor en un mes de 30 días, suponiendo que se le suministra la energía de forma continua?

66. ●● En una subestación de área, el voltaje baja de 100 000 a 20 000 V. Si el circuito de 20 000 V maneja 10 MW de potencia, ¿cuáles son las corrientes en el devanado primario y en el secundario del transformador?

67. ●● Un voltaje de 200 000 V en una línea de transmisión se reduce en una subestación de área a 100 000 V, después a 7200 V en una subestación de distribución y, por último, a 240 V en un poste de servicio doméstico. *a*) ¿Qué relación de vueltas N_s/N_p se requiere en cada paso de reducción? *b*) ¿Por qué factor aumenta la corriente en cada bajada de voltaje? *c*) ¿Cuál es el factor general de subida de la corriente, desde la línea de transmisión hasta el poste de servicio?

68. ●● Una central produce 50 A y 20 kV de energía eléctrica. Esta energía se transmite a 25 km de distancia por cables cuya resistencia es de 1.2 Ω/km. *a*) ¿Cuál es la pérdida de potencia en las líneas, si se transmitiera la energía a 20 kV? *b*) ¿Cuál debería ser el voltaje de salida del generador, para disminuir la pérdida de potencia por un factor de 15?

69. ●● Se transmite electricidad por una línea de transmisión de 175 km de longitud, con 1.2 Ω/km de resistencia. La salida del generador es de 50 A, y su voltaje de operación es de 440 V. Este voltaje tiene una sola subida y se transmite a 44 kV. *a*) ¿Cuánta potencia se pierde en forma de calor de joule en la transmisión? *b*) ¿Cuál debe ser la relación de vueltas de un transformador en el punto de entrega para que el voltaje de salida sea de 220 V? (Ignore la caída de voltaje en la línea.)

20.4 Ondas electromagnéticas

70. **OM** En relación con el extremo azul del espectro visible, las regiones del amarillo y del verde tienen *a*) mayores frecuencias, *b*) mayores longitudes de onda, *c*) menores longitudes de onda o *d*) tanto *a* como *c*.

71. **OM** ¿Cuál de las siguientes ondas electromagnéticas tiene menor la frecuencia? *a*) las UV, *b*) las IR, *c*) los rayos X o *d*) las microondas.

72. **OM** ¿Cuál de las siguientes ondas electromagnéticas viaja más rápido en el vacío? *a*) La luz verde, *b*) la luz infrarroja, *c*) los rayos gamma, *d*) las ondas de radio o *e*) todas viajan con la misma rapidez.

73. **OM** Si se duplica la frecuencia de una fuente de luz azul, ¿qué tipo de luz emitiría? *a*) Roja, *b*) azul, *c*) violeta, *d*) UV o *e*) rayos X.

74. **PC** Una antena se conecta a una batería de automóvil. ¿La antena emitirá ondas electromagnéticas? ¿Por qué? Explique su respuesta.

75. **PC** En un día nublado de verano, usted trabaja a la intemperie y siente frío. Sin embargo, por la noche se da cuenta de que tiene quemaduras de sol. Explique cómo es posible esto.

76. **PC** La radiación ejerce presión sobre las superficies (*presión de radiación*) en las que incide. ¿La presión será mayor sobre una superficie brillante que sobre una superficie oscura? ¿Será mayor si se utiliza una fuente brillante o una del mismo color pero con tono más pálido? Explique sus dos respuestas.

77. **PC** El radar funciona a longitudes de onda de algunos centímetros, mientras que el radio de FM funciona con longitudes de onda del orden de varios metros. ¿Cómo son las frecuencias del radar en comparación con las de la banda de FM de un radio? ¿Cómo se compara la rapidez de unas y otras en el vacío?

78. ● Calcule las frecuencias de las ondas electromagnéticas cuyas longitudes de onda son *a*) 3.0 cm, *b*) 650 nm y *c*) 1.2 fm. *d*) Clasifique el tipo de luz en cada caso.

79. ● En un pequeño poblado sólo hay dos estaciones AM de radio, una de 920 kHz y la otra de 1280 kHz. ¿Cuáles son las longitudes de onda de las ondas de radio que transmite cada estación?

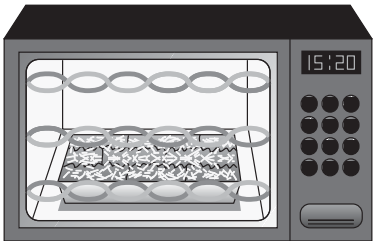
80. ● Un meteorólogo de una estación de TV usa el radar para determinar la distancia a una nube. Observa que transcurren 0.24 ms de tiempo entre el envío y el regreso de un impulso de radar. ¿A qué distancia está la nube?

81. ● ¿Cuánto tiempo tarda un rayo láser en ir de la Tierra a un espejo en la Luna, y regresar? Suponga que la distancia entre la Tierra y la Luna es de 2.4×10^5 millas. (Este experimento se realizó cuando, en las expediciones de las naves *Apollo* a principios de los 70, se dejaron reflectores de láser en la superficie lunar.)

82. ●● La luz anaranjada tiene 600 nm de longitud de onda, y la verde, 510 nm. *a*) ¿Cuál es la diferencia de frecuencias entre las dos clases de luz? *b*) Si se duplica la longitud de onda en ambos casos, ¿qué tipo de luz se tendría entonces?

83. ●● Cierta clase de antena de radio se llama *antena de cuarto de onda*, porque su longitud es igual a un cuarto de la onda que se va a recibir. Si usted fuera a fabricar esas antenas para las bandas de radio de AM y de FM, usando en cada banda sus frecuencias medias, ¿qué longitudes de cable utilizaría?

84. **EI** ●●● Los hornos de microondas tienen puntos fríos y calientes, a causa de las ondas electromagnéticas estacionarias, de forma similar a los nodos y antinodos que existen en las ondas estacionarias en las cuerdas (▼figura 20.34). *a*) Cuanto mayor sea la distancia entre los puntos fríos, 1) la frecuencia es mayor, 2) la frecuencia es menor o 3) la frecuencia es independiente de esa distancia. ¿Por qué? *b*) Su horno de microondas tiene puntos fríos (nodos) aproximadamente cada 5.0 cm, y el de su vecino los tiene cada 6.0 cm. ¿Cuál de los dos hornos opera a mayor frecuencia y por cuánto?

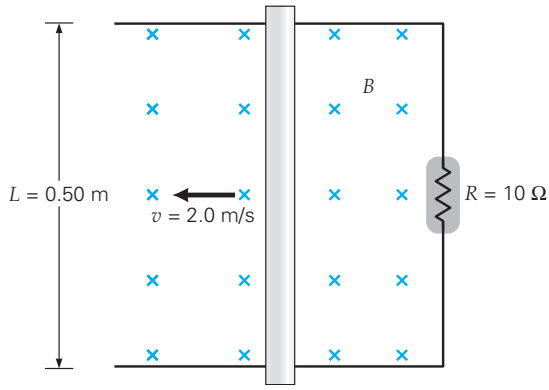


▲ **FIGURA 20.34 ¿Lugares fríos?** Véase el ejercicio 84.

Ejercicios adicionales

85. **EI** En la ▸figura 20.35, una barra metálica de longitud *L* se mueve en una región de campo magnético constante. Ese campo se dirige hacia la página. *a*) La dirección de la corriente inducida y que pasa por el resistor es 1) hacia arriba, 2) hacia abajo o 3) no hay corriente. ¿Por qué? *b*) Si la magnitud del campo magnético es de 250 mT, ¿cuál es la corriente?

86. Suponga que una moderna planta eléctrica tiene un salida de potencia de 1.00 GW a 500 V. El voltaje de transmisión se sube a 750 kV en una serie de cinco transformadores idénticos. *a*) ¿Cuál es la corriente de salida de la planta? *b*) ¿Cuál es la relación de vueltas en cada uno de los transformadores? *c*) ¿Cuál es la corriente en las líneas de distribución de alto voltaje?



▲ **FIGURA 20.35 Fem de movimiento** Véase el ejercicio 85.

87. Una turista europea utiliza un transformador durante su estancia en Estados Unidos, principalmente para hacer funcionar su secadora de cabello de 1200 watts que llevó consigo. Entonces, cuando la conecta al tomacorriente de su cuarto de hotel en Los Ángeles, nota que funciona *exactamente* como lo hace en su casa. El voltaje y la corriente de entrada son 120 V y 11.0 A, respectivamente. *a*) ¿Se trata de un transformador ideal? Explique cómo llegó a su conclusión. *b*) Si no es un transformador ideal, ¿cuál es su eficiencia?

88. Un solenoide de 20.0 cm de longitud tiene 5000 espiras circulares. Por él pasa una corriente de 10.0 A. Cerca de su centro se coloca una bobina plana y pequeña de 100 espiras circulares, cada una con un radio de 3.00 mm. Esta pequeña bobina está orientada de forma que su área recibe el flujo magnético máximo. Un interruptor se abre en el circuito del solenoide y su corriente cae a cero en 15.0 ms. *a*) ¿Cuál era el flujo magnético inicial a través de la bobina interior? *b*) Determine la fem promedio inducida en la pequeña bobina durante los 15.0 ms. *c*) Si usted observa a lo largo del eje de mayor longitud del solenoide de forma que la corriente inicial de 10.0 A tenga el sentido de las manecillas del reloj, determine la dirección de la corriente inducida en la pequeña bobina interior durante el tiempo en que la corriente disminuye a cero.

89. **EI** Una bobina plana de alambre de cobre consta de 100 espiras y tiene una resistencia total de 0.500 Ω. La bobina tiene un diámetro de 4.00 cm y se encuentra en un campo magnético uniforme que apunta alejándose de usted (es decir, hacia la página). Además, está orientada en el plano de la página. Luego se tira de ella hacia la derecha y se saca por completo del campo. *a*) ¿Cuál es la dirección de la corriente inducida en la bobina? 1) En el sentido de las manecillas del reloj, 2) en sentido contrario al de las manecillas del reloj o 3) no hay corriente inducida. *b*) Durante el tiempo en que la bobina abandona el campo, se mide una corriente promedio inducida de 10.0 mA. ¿Cuál es la fem promedio inducida en la bobina? *c*) Si la intensidad del campo es de 3.50 mT, ¿cuánto tiempo se requirió para sacar de éste la bobina?

90. El transformador de un poste de cables de servicio baja el voltaje de 20 000 a 220 V, y abastece a un departamento de ciencias de una universidad. Durante el día, el transformador entrega energía eléctrica a una tasa de 6.6 kW. *a*) Suponiendo que el transformador es ideal, durante ese tiempo, ¿cuáles son las corrientes primaria y secundaria en el transformador? *b*) Si el transformador tiene sólo un 95% de eficiencia (pero aún así entrega energía a una tasa de 6.60 kW a 220 V), ¿cómo se compara esta corriente de entrada con el caso ideal? *c*) ¿Cuál es la tasa de pérdida de calor en el transformador no ideal?

91. Supongamos que usted desea fabricar un generador eléctrico utilizando el campo magnético de la Tierra, que tiene una intensidad de 0.040 mT en su localidad. Su diseño de generador requiere de una bobina de 1000 devanados, que giran exactamente a 60 Hz. La bobina está orientada de forma que la normal al área se alinea con el campo de la Tierra al final de cada ciclo. ¿Cuál debe ser el diámetro de la bobina para generar un voltaje máximo de 170 V (que se requiere para obtener un promedio de 120 V)? ¿Es ésta una forma práctica de generar energía eléctrica?

92. Se envía una señal de radio a una sonda espacial que viaja en el plano del Sistema Solar. Después de 3.5 días, se recibe la respuesta en la Tierra. Suponiendo que las computadoras de la sonda tardaron 4.5 h en procesar las instrucciones de la señal y en enviar el mensaje de retorno, ¿la sonda está dentro del Sistema Solar? (Suponga que el radio del Sistema Solar es 40 veces la distancia entre la Tierra y el Sol.)

93. Una bobina de 100 espiras de alambre tiene un diámetro de 2.50 cm y está orientada en un campo magnético constante de 0.250 T, de manera que inicialmente no tiene flujo magnético. En 0.115 s, la bobina se voltea de forma que su normal forma un ángulo de 45° con la dirección del campo. Si en la bobina se induce una corriente promedio de 4.75 mA durante su rotación, ¿cuál es la resistencia de la bobina?

PHYSLET® Los siguientes problemas de física Physlet pueden utilizarse con estos capítulos.
29.1, 29.2, 29.5, 29.6, 29.7, 29.8

CAPÍTULO 21

CIRCUITOS DE CORRIENTE ALTERNA

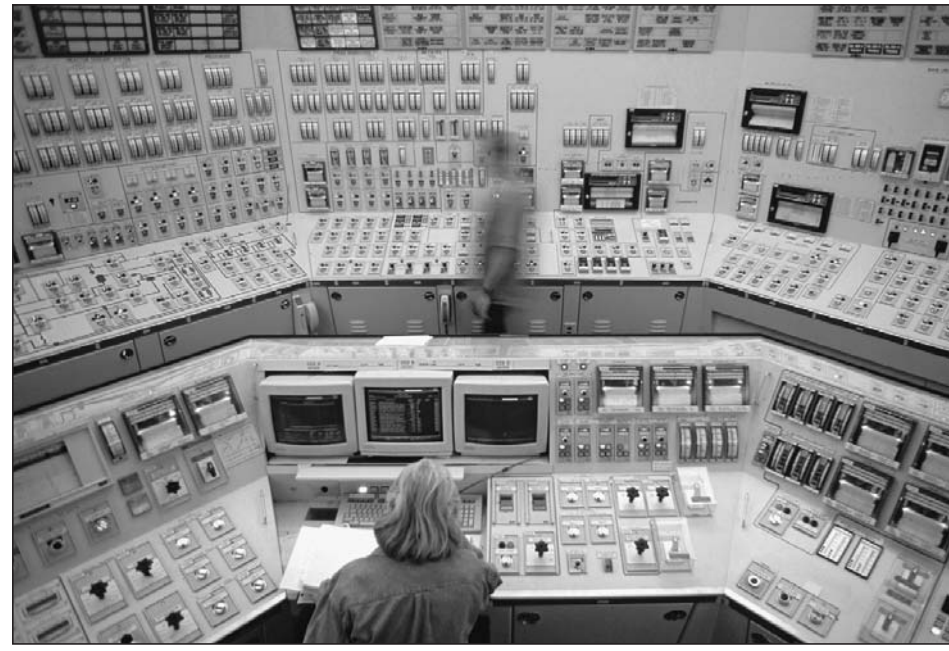
21.1 Resistencia en un circuito de ca 687

21.2 Reactancia capacitiva 689

21.3 Reactancia inductiva 691

21.4 Impedancia: circuitos RLC 693

21.5 Resonancia en circuitos 697



HECHOS DE FÍSICA

- En condiciones de ca (dirección de voltaje alterno), un condensador, incluso con la separación que existe entre las placas, permite que haya corriente en el circuito durante las etapas de carga y descarga. En condiciones de cd (voltaje constante a través de las placas), no hay corriente.
- Con voltajes cd, un inductor no ofrece impedancia al flujo de carga y, por lo tanto, conduce corriente con facilidad. Sin embargo, en condiciones de ca, un inductor impide el cambio en la corriente produciendo una fem inversa en concordancia con la ley de inducción de Faraday.
- Un condensador, un inductor y un resistor conectados en serie a una fuente de potencia de ca son análogos a un sistema de amortiguamiento resorte-masa. Llevado a su frecuencia natural, el circuito "resuena", esto es, exhibe una corriente máxima, justo como el sistema mecánico tiene su máxima amplitud en las mismas condiciones. El condensador almacena energía eléctrica potencial en analogía con la energía elástica potencial del resorte. El inductor almacena energía magnética (asociada con cargas en movimiento), en analogía con la masa en el resorte que tiene energía cinética (de movimiento). El resistor disipará la energía del sistema, como lo haría la resistencia del aire en el sistema mecánico.

Los circuitos de corriente directa tienen muchos usos, pero el tablero de control del reactor nuclear que se ve en la fotografía opera muchos dispositivos que usan la corriente alterna (ca). La energía eléctrica que recibimos en nuestros hogares y oficinas también es ca, y la mayor parte de los dispositivos y electrodomésticos que utilizamos en la vida diaria requieren corriente alterna.

Hay varias razones para esta gran dependencia de la corriente alterna. Por una parte, casi toda la energía eléctrica se produce en generadores que emplean la inducción electromagnética y, por consiguiente, su resultado es corriente alterna (capítulo 20). Además, la energía eléctrica producida como ca se puede transmitir en forma económica a grandes distancias, usando transformadores. Pero quizá la razón más importante por la que se utiliza la ca en forma tan universal es que la alternancia de la corriente produce efectos electromagnéticos que se aprovechan en una gran variedad de dispositivos. Por ejemplo, cada vez que usted sintoniza su estación de radio favorita, aprovecha una propiedad especial de *resonancia* de los circuitos de ca (que se estudiará en este capítulo).

Para determinar las corrientes en los circuitos de cd, es necesario prestar atención a los valores de resistencia. Naturalmente, también en los circuitos de ca hay resistencia, pero hay otros factores adicionales que afectan el flujo de carga. Por ejemplo, un condensador en un circuito de cd presenta una resistencia infinita (es un circuito abierto). Sin embargo, en un circuito de ca, el voltaje alterno carga y descarga de forma continua un condensador. Además, las bobinas de alambre se oponen a la corriente alterna, de acuerdo con los principios de la inducción electromagnética (ley de Lenz, sección 20.1).

En este capítulo se describirán los principios básicos de los circuitos de ca. Se desarrollarán formas más generalizadas de la ley de Ohm aplicables a los circuitos de ca. Por último, se explorará el fenómeno de la *resonancia en un circuito* de ca, así como algunas de sus aplicaciones.

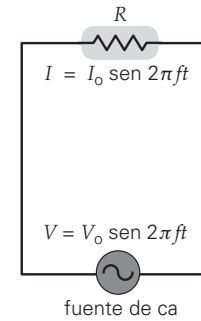
21.1 Resistencia en un circuito de ca

OBJETIVOS: a) Especificar cómo varían el voltaje, la corriente y la potencia en función del tiempo, en un circuito de ca, *b*) comprender los conceptos de valores rms y máximo y *c*) explicar cómo responden los resistores en condiciones de ca.

Un circuito de ca contiene una fuente de voltaje alterno (como un generador pequeño, o simplemente un tomacorriente doméstico) y uno o más elementos. En la ▸figura 21.1 se presenta un diagrama de un circuito de ca con un solo elemento resistivo. Si el voltaje de salida de la fuente varía en forma senoidal, como en el caso de un generador (véase la sección 20.2), el voltaje a través del resistor varía con el paso del tiempo de acuerdo con la ecuación

$$V = V_o \operatorname{sen} \omega t = V_o \operatorname{sen} 2\pi f t \tag{21.1}$$

donde ω es la frecuencia angular del voltaje (en rad/s) y se relaciona con la frecuencia f (en Hz), mediante la ecuación $\omega = 2\pi f$. El voltaje oscila entre $+V_o$ y $-V_o$, a medida que $2\pi f t$ oscila entre ± 1. El voltaje V_o se llama **voltaje pico** (o *máximo*) y representa la amplitud de las oscilaciones de voltaje.



▲ **FIGURA 21.1 Un circuito puramente resistivo** La fuente de ca entrega un voltaje senoidal a un circuito formado por un solo resistor. El voltaje a través del resistor, y la corriente que pasa por él, varían de forma senoidal con la frecuencia del voltaje alterno aplicado.

Corriente alterna y potencia

En condiciones de corriente alterna, la corriente que pasa por el resistor oscila en dirección y magnitud. De acuerdo con la ley de Ohm, la corriente en el resistor es, en función del tiempo:

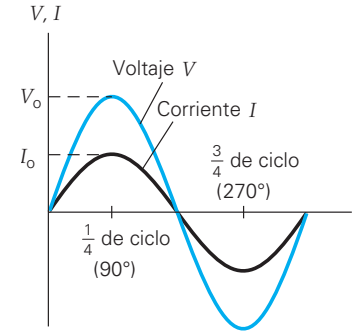
$$I = \frac{V}{R} = \left(\frac{V_o}{R}\right) \operatorname{sen} 2\pi f t$$

Como V_o representa el voltaje pico o máximo a través del resistor, la fracción entre paréntesis representa la corriente máxima en él. Así, esa ecuación se reformula como sigue:

$$I = I_o \operatorname{sen} 2\pi f t \tag{21.2}$$

en donde la amplitud de la corriente es $I_o = V_o/R$, y se llama **corriente pico** (o *máxima*).

La ▸figura 21.2 muestra el voltaje y la corriente en un resistor en función del tiempo. Observe que están al unísono, es decir, *en fase*. Esto significa que ambos llegan a sus valores cero, mínimos y máximos al mismo tiempo. La corriente oscila y tiene valores positivos y negativos, que indican cambios en su dirección durante cada ciclo. Como la corriente consume la misma cantidad de tiempo en ambas dirección, *la corriente promedio es cero*. En términos matemáticos, esto refleja que el valor de la función seno promediado durante el tiempo de uno o más ciclos *completos* (de 360°) es cero. Recurriendo a la notación con barras superiores para indicar un valor promediado en el tiempo, se tiene que $\overline{\operatorname{sen}\theta} = \overline{\operatorname{sen} 2\pi f t} = 0$. Asimismo, $\overline{\cos\theta} = 0$.



▲ **FIGURA 21.2 El voltaje y la corriente en fase** En un circuito de ca puramente resistivo, el voltaje y la frecuencia varían al unísono, es decir, están en fase.

Sin embargo, el hecho de que la corriente *promedio* sea cero, no quiere decir que no haya calentamiento de joule (pérdidas I^2R), ya que la disipación de la energía eléctrica en un resistor no depende de la dirección de la corriente. La potencia instantánea en función del tiempo se obtiene a partir de la corriente instantánea (ecuación 21.2). Así,

$$P = I^2 R = (I_o^2 R) \operatorname{sen}^2 2\pi f t \tag{21.3}$$

Aun cuando la corriente cambia de signo, el *cuadrado* de la corriente, I^2, siempre es positivo. Así, el valor promedio de I^2R no es cero. El valor promedio, o media, de I^2 es

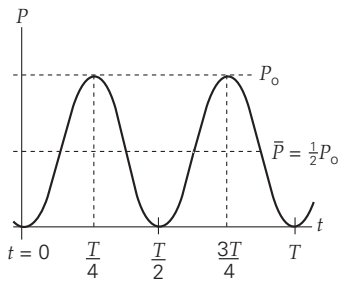
$$\overline{I^2} = \overline{I_o^2 \operatorname{sen}^2 2\pi f t} = I_o^2 \overline{\operatorname{sen}^2 2\pi f t}$$

Se usa la identidad trigonométrica $\operatorname{sen}^2\theta = \frac{1}{2}(1 - \cos 2\theta)$, para obtener $\overline{\operatorname{sen}^2\theta} = \frac{1}{2}(1 - \overline{\cos 2\theta})$. En vista de que $\overline{\cos 2\theta} = 0$ (igual que $\overline{\cos\theta} = 0$), se deduce que $\operatorname{sen}^2\theta = \frac{1}{2}$. Por todo esto, la ecuación anterior de $\overline{I^2}$ se replantea como sigue:

$$\overline{I^2} = I_o^2 \overline{\operatorname{sen}^2 2\pi f t} = \tfrac{1}{2} I_o^2 \tag{21.4}$$

Por lo que la potencia promedio es

$$\overline{P} = \overline{I^2} R = \tfrac{1}{2} I_o^2 R \tag{21.5}$$



▲ **FIGURA 21.3 Variación de la potencia en un resistor, con respecto al tiempo** Aunque tanto la dirección (signo) de la corriente como la del voltaje oscilan, su producto (la potencia) siempre es una cantidad oscilatoria positiva. La potencia promedio es la mitad de la potencia máxima o pico.

Cabe hacer notar que la potencia de ca tiene la misma forma que la de cd ($P = I^2R$) y es *válida siempre*. Sin embargo, por costumbre, se trabaja con la potencia promedio y con un tipo especial de corriente "promedio", que se define como:

$$I_{rms} = \sqrt{\overline{I^2}} = \sqrt{\tfrac{1}{2}I_o^2} = \frac{I_o}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{2}}{2}I_o = 0.707I_o \tag{21.6}$$

I_{rms} es la **corriente rms** o **corriente efectiva**. (*rms* proviene de "*r*oot-*m*ean-*s*quare", raíz cuadrática media, que indica que se trata de la *raíz* cuadrada del valor *promedio* del *cuadrado* de la corriente.) La corriente rms representa el valor de una corriente (cd) constante que se requiere para producir la misma potencia que su contraparte de corriente alterna; de ahí el nombre de corriente *efectiva*.

Si se usa $I_{rms}^2 = \left(I_o/\sqrt{2}\right)^2 = \frac{1}{2}I_o^2$, se puede escribir la potencia promedio (ecuación 21.5) como sigue:

$$\bar{P} = \tfrac{1}{2}I_o^2R = I_{rms}^2R \quad \textit{(potencia promediada en el tiempo)} \tag{21.7}$$

La potencia promedio equivale a una potencia (oscilatoria) variable en el tiempo y promediada también respecto al tiempo (◂figura 21.3).

Voltaje alterno (ca)

Los valores máximos de voltaje y corriente en un resistor se relacionan con la ecuación $V_o = I_oR$. Con una deducción parecida a la de la corriente rms, se define el **voltaje rms** o **voltaje efectivo** mediante

$$V_{rms} = \frac{V_o}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{2}}{2}V_o = 0.707V_o \tag{21.8}$$

Para resistores en condiciones de ca, por consiguiente, se pueden aplicar las relaciones de la cd, siempre y cuando se tenga en cuenta que las cantidades representan valores rms. Así, para los casos de ca donde sólo haya un resistor, la relación entre los valores rms de la corriente y el voltaje es:

$$V_{rms} = I_{rms}R \quad \textit{voltaje a través de un resistor} \tag{21.9}$$

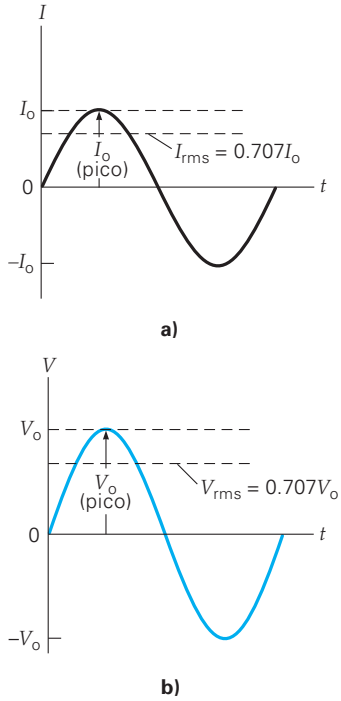
Al combinar las ecuaciones 21.9 y 21.7 se obtienen varias expresiones físicamente equivalentes para la potencia de ca:

$$\bar{P} = I_{rms}^2R = I_{rms}V_{rms} = \frac{V_{rms}^2}{R} \quad \textit{potencia de ca} \tag{21.10}$$

Se acostumbra medir y especificar valores rms cuando se trabaja con cantidades de ca. Por ejemplo, el voltaje de línea doméstica es 120 V y, como seguramente imaginará, en realidad es el valor rms del voltaje. En realidad, tiene un valor máximo, o pico, igual a

$$V_o = \sqrt{2}\,V_{rms} = 1.414(120\text{ V}) = 170\text{ V}$$

En la ◂figura 21.4 se ven las interpretaciones gráficas de los valores máximo y rms de la corriente y el voltaje.



▲ **FIGURA 21.4 Voltaje y corriente raíz cuadrática media (rms)** Los valores rms de ***a)*** la corriente y ***b)*** el voltaje son iguales a sus valores pico (máximos) multiplicados por 0.707 o $1/\sqrt{2}$.

Ejemplo 21.1 ■ Una bombilla de luz: comparación de sus valores rms y máximo

Una lámpara tiene una bombilla de 60 W, y se conecta a un contacto de 120 V. *a*) ¿Cuáles son las corrientes rms y pico que pasan por la lámpara? *b*) ¿Cuál es la resistencia de la bombilla en estas condiciones?

Razonamiento. *a*) Como se conocen la potencia promedio y el voltaje rms, se puede calcular la corriente efectiva con la ecuación 21.10. Conociendo la corriente efectiva, se utiliza la ecuación 21.6 para calcular la corriente máxima. *b*) La resistencia se determina con la ecuación 21.9.

Solución. Se tienen los datos de la potencia promedio y del voltaje rms de la fuente.

Dado: $\bar{P} = 60$ W, $V_{rms} = 120$ V

Encuentre: *a*) I_{rms} e I_o (corrientes efectiva y máxima) *b*) R (la resistencia de la bombilla)

a) La corriente rms es

$$I_{rms} = \frac{\overline{P}}{V_{rms}} = \frac{60\ \text{W}}{120\ \text{V}} = 0.50\ \text{A}$$

y la corriente máxima se calcula reordenando la ecuación 21.6:

$$I_o = \sqrt{2}I_{rms} = \sqrt{2}(0.50\ \text{A}) = 0.71\ \text{A}$$

b) La resistencia de la bombilla es

$$R = \frac{V_{rms}}{I_{rms}} = \frac{120\ \text{V}}{0.50\ \text{A}} = 240\ \Omega$$

Ejercicio de refuerzo. ¿Cuál sería *a*) la corriente efectiva y *b*) la corriente máxima en una bombilla de 60 W en Gran Bretaña, donde el voltaje rms es de 240 V a 50 Hz? *c*) ¿Cuál sería la resistencia de una bombilla de 60 W en Gran Bretaña, en comparación con la diseñada para funcionar a 120 V? ¿Por qué son distintas las dos resistencias? (*Las respuestas a todos los ejercicios de refuerzo aparecen al final del libro.*)

Ejemplo conceptual 21.2 ■ Un océano de por medio: el sistema eléctrico inglés comparado con el estadounidense

En muchos países el voltaje de línea es de 240 V. Si un turista británico visita Estados Unidos y conecta una secadora de cabello que compró en su país (donde el voltaje es de 240 V), cabe esperar que *a*) no funcione, *b*) que funcione con normalidad, *c*) que funcione con deficiencias o *d*) que se queme.

Razonamiento y respuesta. Los electrodomésticos funcionan con 240 V en Gran Bretaña. A menor voltaje (por ejemplo, 120 V), la corriente sería menor (porque $I = V/R$) y el calentamiento de joule sería menor (porque $P = IV$). Si la resistencia del electrodoméstico fuera constante, entonces a la mitad del voltaje sólo se produciría la cuarta parte de la potencia. Entonces, el elemento calefactor de la secadora podría entibiarse, pero no trabajaría como debe, de manera que la respuesta correcta es la *c*. Además, la menor corriente haría que el motor de la secadora girara más despacio de lo normal.

Por fortuna, la mayoría de las personas no cometen este error, porque las clavijas y los tomacorrientes varían de un país a otro. Si usted viaja al extranjero y lleva consigo electrodomésticos, es recomendable llevar también un juego de convertidor y adaptador (▸figura 21.5). Este juego contiene un surtido de clavijas para adaptarse a los contactos disponibles en el extranjero, así como un convertidor de voltaje. El convertidor es un dispositivo de estado sólido que convierte 240 a 120 V para los viajeros estadounidenses, y a la inversa para los turistas que visitan Estados Unidos y que en su país usan 240 V. (Se trata de dispositivos que pueden conectarse entre 120 y 240 V.)

Ejercicio de refuerzo. ¿Qué sucede si un turista estadounidense conecta, sin fijarse, un electrodoméstico de 120 V en un contacto de 240 V en Gran Bretaña, sin utilizar un convertidor? Explique por qué.

21.2 Reactancia capacitiva

OBJETIVOS: *a*) Explicar el comportamiento de los condensadores en los circuitos de ca y *b*) calcular el efecto de un condensador sobre la corriente alterna (reactancia capacitiva).

Cuando se conecta un condensador a una fuente de voltaje de cd, sólo pasa corriente durante el breve tiempo necesario para cargar el condensador. Conforme la carga se acumula en las placas del condensador, aumenta el voltaje a través de ellas y se opone al paso de la corriente. Cuando el condensador está totalmente cargado, la corriente baja a cero. La situación es distinta cuando se excita un condensador con una fuente de voltaje alterno (▸figura 21.6a). En esas condiciones, el condensador limita la corriente, pero no impide por completo el flujo de la carga. Esto se debe a que el condensador se carga y descarga alternativamente, conforme la corriente y el voltaje se invierten cada medio ciclo.

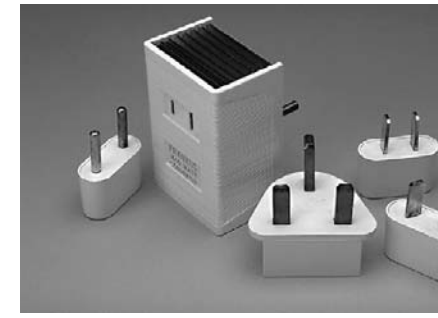
En la figura 21.6b se presentan gráficas de la corriente y el voltaje alternos en función del tiempo, para un circuito con un condensador. Examinemos las condiciones de carga del condensador en función del tiempo (▾figura 21.7).

- En la figura 21.7a, se define a $t = 0$, en forma arbitraria, como el momento del voltaje máximo ($V = V_o$).* Al principio, el condensador está totalmente cargado ($Q_o = CV_o$) con la polaridad indicada. Como las placas no tienen lugar para más carga, en el circuito no pasa corriente.

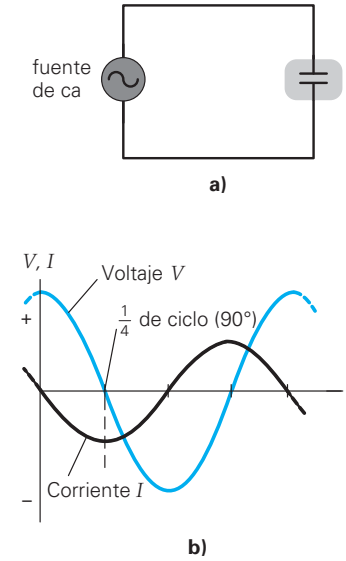
*Hemos elegido la polaridad inicial del condensador como positiva (figura 21.6b y figura 21.7a), en forma arbitraria.

PHYSLET®

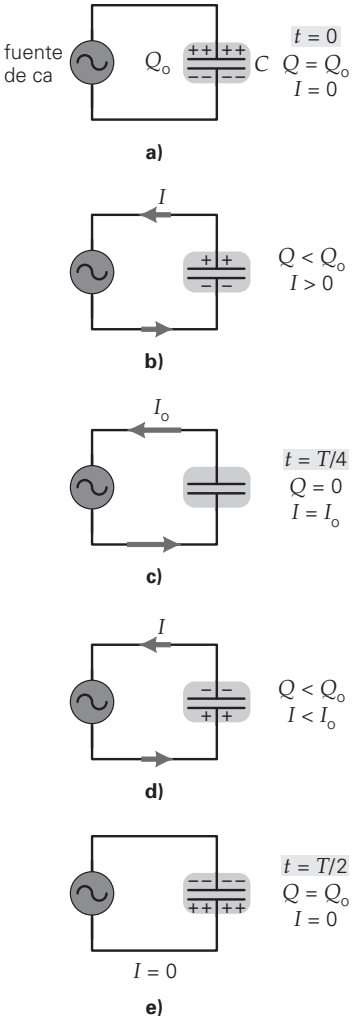
Ilustración 31.2 *Voltaje y corriente alternos*



▲ **FIGURA 21.5 Convertidor y adaptadores** En los países que tienen voltajes de línea de 240 V, los turistas estadounidenses necesitan convertirlos a 120 V, para que los electrodomésticos fabricados en Estados Unidos funcionen bien. Observe los distintos tipos de clavijas, para los diversos países. Las clavijas pequeñas entran en contactos del extranjero, y las patas del convertidor entran en la parte trasera de la clavija. En el convertidor entra una clavija normal para Estados Unidos, de dos patas, que tiene salida de 120 V. (Véase el Ejemplo conceptual 21.2.)



▲ **FIGURA 21.6 Un circuito puramente capacitivo** ***a)*** En un circuito que sólo tiene una capacitancia, ***b)*** la corriente se adelanta 90° al voltaje, esto es, un cuarto de ciclo. Se muestra la mitad de un ciclo de voltaje y corriente, que corresponde a la figura 21.7.



▲ **FIGURA 21.7 Un condensador en condiciones de ca** En esta secuencia se ve el voltaje, la carga y la corriente en un circuito que sólo tiene un condensador y una fuente de voltaje alterno. Los cinco diagramas de circuito, en conjunto, representan físicamente lo que se grafica en el primer medio ciclo (de $t = 0$ a $t = T/2$) en la figura 21.6b.

- Conforme disminuye el voltaje de tal forma que $0 < V < V_o$, el condensador comienza a descargarse y origina una corriente en sentido contrario al de las manecillas del reloj (negativa; compare las figuras 21.6b a 21.7b).
- La corriente llega a su valor máximo cuando el voltaje llega a cero, y las placas del condensador están totalmente descargadas (figura 21.7c). Esto sucede exactamente a la cuarta parte del recorrido del ciclo ($t = T/4$).
- Ahora, la fuente de voltaje de ca invierte su polaridad y comienza a aumentar de magnitud, de forma que $-V_o < V < 0$. El condensador comienza a cargarse, esta vez con la polaridad opuesta (figura 21.7d). Al estar descargadas las placas no hay oposición a la corriente, por lo que alcanza su valor máximo. Sin embargo, conforme las placas acumulan carga, comienzan a inhibir la corriente y ésta disminuye en magnitud.
- A la mitad del ciclo ($t = T/2$), el condensador está totalmente cargado, pero con polaridad opuesta a su estado inicial (figura 21.7e). La corriente es cero y el voltaje tiene magnitud máxima, pero su polaridad es contraria respecto a la polaridad inicial ($V = -V_o$).

Durante el siguiente medio ciclo (que no se ilustra en la figura 21.7), se invierte el proceso y el circuito regresa a sus condiciones iniciales.

Advierta que la corriente y el voltaje *no* están al unísono (es decir, *no* están en fase). La corriente llega a su máximo un cuarto de ciclo *antes* que el voltaje. La relación entre la corriente y el voltaje se establece en la siguiente forma:

> En un circuito puramente capacitivo de ca, la *corriente* se adelanta 90° al *voltaje*, es decir, se adelanta un cuarto $\left(\frac{1}{4}\right)$ de ciclo.

Así que en el caso de una situación de ca, un condensador se opone al proceso de carga, pero no lo limita por completo. (Recuerde que en condiciones de cd, se comporta como circuito abierto.) La medida cuantitativa de la "oposición capacitiva" al paso de la corriente se llama **reactancia capacitiva** del condensador **(X_C)**. En un circuito de ca, la reactancia capacitiva se determina con

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \quad \textit{reactancia capacitiva} \tag{21.11}$$

Unidad SI de reactancia capacitiva:
ohm (Ω), o segundos por farad (s/F)

donde $\omega = 2\pi f$, C es la capacitancia (en farads) y f es la frecuencia (en Hz). Al igual que la resistencia, la reactancia se mide en ohms (Ω). Mediante el análisis de las unidades, demuestre que el ohm equivale al segundo por farad.

La ecuación 21.11 indica que la reactancia es inversamente proporcional tanto a la capacitancia (C) como a la frecuencia del voltaje (f). Estas dos dependencias se comprenderán mejor de la siguiente manera.

Recuerde que la *capacitancia* equivale a "carga almacenada por volt" ($C = Q/V$). En consecuencia, para determinado voltaje, cuanto mayor sea la capacitancia, habrá más carga en el condensador. Para ello se requiere mayor flujo de carga, es decir, mayor corriente. Incrementar la capacitancia representa menor oposición al flujo de carga (esto es, una reactancia capacitiva reducida) a una frecuencia dada.

Para visualizar la dependencia de la frecuencia, considere el hecho de que cuanto mayor sea la frecuencia del voltaje, *menos* tiempo se requerirá para el proceso de carga en cada ciclo. Un tiempo de carga menor equivale a que menos carga se acumula en las placas y, en consecuencia, habrá menor oposición a la corriente. Incrementar la frecuencia da por resultado una disminución en la reactancia capacitiva. Por lo anterior, la reactancia capacitiva es inversamente proporcional *tanto* a la frecuencia *como* a la capacitancia.

Siempre es bueno verificar una relación general para ver si se obtiene el resultado que se considera como verdadero en un caso especial (o varios). Como caso especial, observe que si $f = 0$ (condiciones de cd, no oscilantes), la reactancia capacitiva es infinita. Como se esperaba, en tales condiciones no hay corriente.

La reactancia capacitiva se relaciona con el voltaje y la corriente a través del condensador, mediante una ecuación que tiene la misma forma que $V = IR$, para resistencias puras:

$$V_{rms} = I_{rms} X_C \quad \textit{voltaje a través de un condensador} \tag{21.12}$$

A continuación se presenta un ejemplo: un condensador conectado a una fuente de voltaje de ca.

Ejemplo 21.3 ■ Corriente en condiciones de ca: reactancia capacitiva

Un condensador de 15.0 μF se conecta a una fuente de 120 V y 60 Hz. ¿Cuáles son la *a*) reactancia capacitiva y *b*) la corriente (rms y máxima) en el circuito?

Razonamiento. *a*) La reactancia capacitiva se calcula con la capacitancia y la frecuencia, por medio de la ecuación 21.11. *b*) Entonces se podrá calcular la corriente rms, a partir de la reactancia y del voltaje efectivo, con la ecuación 21.12. Por último, con la ecuación 21.6 se obtiene la corriente máxima.

Solución. Suponiendo que sea exacta la frecuencia de 60 Hz, las respuestas tendrán tres cifras significativas. Se listan los datos:

Dado: $C = 15.0\ \mu\text{F} = 15.0 \times 10^{-6}\ \text{F}$, $V_{\text{rms}} = 120\ \text{V}$, $f = 60\ \text{Hz}$

Encuentre: *a*) X_C (reactancia capacitiva); *b*) I_o (corriente pico), I_{rms} (corriente efectiva)

a) La reactancia capacitiva es

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi(60\ \text{Hz})(15.0 \times 10^{-6}\ \text{F})} = 177\ \Omega$$

b) Entonces, la corriente rms es

$$I_{\text{rms}} = \frac{V_{\text{rms}}}{X_C} = \frac{120\ \text{V}}{177\ \Omega} = 0.678\ \text{A}$$

por lo que la corriente máxima es

$$I_o = \sqrt{2} I_{\text{rms}} = \sqrt{2}(0.678\ \text{A}) = 0.959\ \text{A}$$

La corriente oscila a 60 ciclos por segundo, con una magnitud de 0.959 A.

Ejercicio de refuerzo. En este ejemplo, *a*) ¿cuál es el voltaje máximo y *b*) qué frecuencia produciría la misma corriente si el valor de la capacitancia se redujera a la mitad?

21.3 Reactancia inductiva

OBJETIVOS: *a*) Explicar qué es un inductor, *b*) explicar el comportamiento de un inductor en los circuitos de ca y *c*) calcular el efecto de los inductores sobre la corriente alterna (reactancia inductiva).

La inductancia es una medida de la oposición que presenta un elemento de circuito al paso de una corriente variable en el tiempo (de acuerdo con la ley de Lenz). En principio, todos los elementos de circuito (incluidos los resistores) tienen cierta inductancia. Sin embargo, una bobina de alambre, cuya resistencia es insignificante, sólo tiene inductancia. Cuando se coloca en un circuito de corriente variable en el tiempo, esa bobina, que se llama **inductor**, desarrolla un voltaje inverso, o contra fem, que se opone a la corriente que cambia. La corriente variable y que pasa por la bobina produce un campo y un flujo magnético cambiantes. Como la contra fem se produce en el inductor como consecuencia de su propio campo magnético cambiante, a este fenómeno se le llama *autoinducción*.

Nota: la ley de Lenz se presenta en la sección 20.1.

La fem autoinducida (para una bobina consistente en N vueltas) se determina por la ley de Faraday (ecuación 20.2): $\mathscr{E} = -N\Delta\Phi/\Delta t$. La tasa de cambio del flujo, $N\Delta\Phi/\Delta t$, es proporcional a la tasa de cambio de la corriente en la bobina, $\Delta I/\Delta t$, porque la corriente produce el campo magnético responsable del flujo cambiante. Así, la contra fem es proporcional al cambio de la corriente, y su sentido es contrario al de la rapidez de cambio de la corriente. Esta relación se expresa en forma de ecuación, con una constante de proporcionalidad

$$\mathscr{E} = -L\left(\frac{\Delta I}{\Delta t}\right) \tag{21.13}$$

donde L es la *inductancia* de la bobina (con más propiedad, la *auto*inductancia). Utilizando el análisis de unidades, demuestre que las unidades de inductancia son volt-segundos por ampere (V · s/A). A esta combinación se le llama **henry** (1 H = 1 V · s/A), en honor de Joseph Henry (1797-1878), físico estadounidense y uno de los primeros investigadores de la inducción electromagnética. A menudo se emplean unidades más pequeñas, como el milihenry (mH), cuya equivalencia es 1 mH = 10^{-3} H.

La oposición que presenta un inductor a la corriente en condiciones de ca depende del valor de la inductancia y de la frecuencia del voltaje. Esta relación se expresa de forma cuantitativa mediante la **reactancia inductiva (X_L)**, que es

$$X_L = \omega L = 2\pi f L \quad \textit{reactancia inductiva} \tag{21.14}$$

Unidad si para reactancia inductiva:
ohm (Ω), o henry por segundo (H/s)

donde f es la frecuencia del voltaje impulsor, $\omega = 2\pi f$, y L es la inductancia. Al igual que la reactancia capacitiva, la reactancia inductiva se mide en ohms (Ω); usted seguramente podrá demostrar que éstos equivalen a henrys por segundo.

Observe que la reactancia inductiva es proporcional tanto a la inductancia (L) de la bobina, como a la frecuencia (f) de la fuente de voltaje. La inductancia de una bobina es una propiedad que depende de la cantidad de vueltas, del diámetro y la longitud de la misma, y del material de su núcleo (si acaso lo tiene). La frecuencia de la fuente de voltaje desempeña un papel importante, porque cuanto más rápidamente cambie la corriente en la bobina, mayor será la rapidez de cambio de su flujo magnético. Eso implica una fem (contra fem o fem inversa) autoinducida mayor, que se opone a los cambios en la corriente.

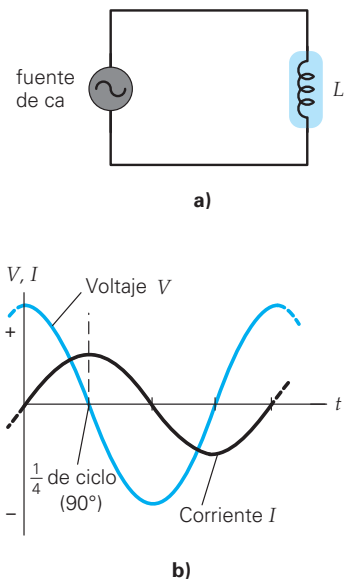
En términos de X_L, el voltaje a través de un inductor se relaciona con la corriente y con la reactancia inductiva mediante

$$V_{rms} = I_{rms} X_L \quad \textit{voltaje a través de un inductor} \tag{21.15}$$

En la figura 21.8 se muestran el símbolo de circuito para un inductor, y las gráficas del voltaje a través del mismo, y de la corriente en el circuito. Cuando se conecta un inductor a una fuente de voltaje de ca, el voltaje máximo corresponde a la corriente cero. Cuando el voltaje baja a cero, la corriente es máxima. Esto se debe a que cuando cambia de polaridad el voltaje (haciendo que el flujo magnético a través del inductor baje a cero), el inductor trata de evitar el cambio, de acuerdo con la ley de Lenz, por lo que la fem inducida crea una corriente. Por lo anterior, la corriente *se retrasa* un cuarto de ciclo respecto al voltaje, una relación que se expresa como sigue:

> En un circuito de ca puramente inductivo, el *voltaje* se adelanta 90°, o un cuarto $\left(\frac{1}{4}\right)$ de ciclo, a la *corriente*.

Puesto que las relaciones entre corriente y voltaje en circuitos puramente inductivos y puramente capacitivos son opuestas, hay una frase que le ayudará a recordar esto: *ELI* y el *ICE* berg. Aquí, *E* representa el voltaje (la *f*em) e *I* representa la corriente. *ELI* indica que con una inductancia (L), el voltaje se adelanta a la corriente (I) [lea el acrónimo de izquierda a derecha]. De forma similar, *ICE* indica que con una capacitancia (C), la corriente se adelanta al voltaje.



▲ **FIGURA 21.8 Un circuito puramente inductivo** ***a)*** En un circuito que sólo tiene una inductancia, ***b)*** el voltaje se adelanta 90°, o un cuarto de ciclo, a la corriente.

PHYSLET®
Ilustración 31.4 Cambio de fase

PHYSLET®
Exploración 31.2 Reactancia

Ejemplo 21.4 ■ Oposición a la corriente sin resistencia: la reactancia inductiva

Se conecta un inductor de 125 mH a una fuente de 120 V y 60 Hz. ¿Cuáles son *a*) la reactancia inductiva y *b*) la corriente efectiva en el circuito?

Razonamiento. Como se conocen la inductancia y la frecuencia, es posible calcular la reactancia inductiva con la ecuación 21.14 y la corriente con la ecuación 21.15.

Solución. Se listan los datos:

Dado: $L = 125\text{ mH} = 0.125\text{ H}$, $V_{rms} = 120\text{ V}$, $f = 60\text{ Hz}$

Encuentre: *a*) X_L (reactancia inductiva) *b*) I_{rms}

a) La reactancia inductiva es

$$X_L = 2\pi f L = 2\pi(60\text{ Hz})(0.125\text{ H}) = 47.1\ \Omega$$

b) Entonces, la corriente efectiva es

$$I_{rms} = \frac{V_{rms}}{X_L} = \frac{120\text{ V}}{47.1\ \Omega} = 2.55\text{ A}$$

Ejercicio de refuerzo. En este ejemplo, *a*) ¿cuál es la corriente máxima? *b*) ¿Qué frecuencia de voltaje produciría la misma corriente si la inductancia se redujera a un tercio de su valor en este ejemplo?

21.4 Impedancia: circuito RLC

OBJETIVOS: *a*) Calcular corrientes y voltajes cuando están presentes varios elementos reactivos y resistivos en circuitos de ca, *b*) usar diagramas de fase para calcular la impedancia general y las corrientes rms y *c*) comprender y usar el concepto del factor de potencia en los circuitos de ca.

En apartados anteriores se examinaron por separado los circuitos puramente capacitivos o puramente inductivos, sin que hubiera ninguna resistencia. Sin embargo, en el mundo real es imposible tener circuitos puramente reactivos, ya que siempre hay alguna resistencia, aunque sea mínima, por ejemplo, la de los cables de conexión. Por consiguiente, se *combinan* las resistencias, las reactancias capacitivas y las reactancias inductivas para impedir el paso de la corriente en los circuitos de ca. Estos efectos se ilustran con un análisis de algunas combinaciones en circuitos.

Circuito de RC en serie

Supongamos que un circuito de ca está formado por una fuente de voltaje, un resistor y un condensador conectados en serie (▸figura 21.9a). La relación de fases entre la corriente y el voltaje es distinta para cada elemento de circuito. En consecuencia, se necesita un método gráfico especial para determinar la oposición general a la corriente en el circuito. Este método emplea un *diagrama de fase*.

En un diagrama de fase como el de la figura 21.9b, de un circuito RC, a la resistencia y la reactancia se les atribuyen propiedades semejantes a las de los vectores, y sus magnitudes se representan mediante flechas llamadas *fasores*. En un conjunto de ejes coordenados *x*-*y*, la resistencia se grafica en el eje *x* positivo (esto es, a 0°), ya que la diferencia de fases entre voltaje y corriente para un resistor es cero. La reactancia capacitiva se grafica a lo largo del eje *y* negativo, y refleja una diferencia de $-90°$ (ϕ) en las fases, ya que, para un condensador, el voltaje se retrasa respecto a la corriente por un cuarto de ciclo.

La suma fasorial es la oposición efectiva, o neta, a la corriente; a eso se le llama **impedancia (*Z*)**. Los fasores se suman de la misma forma que los vectores, porque los efectos del resistor y el condensador no están en fase. Para el circuito RC en serie,

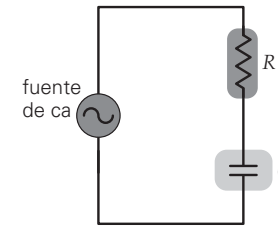
$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} \quad \textit{impedancia de un circuito RC en serie} \qquad (21.16)$$

La unidad de impedancia es el ohm.

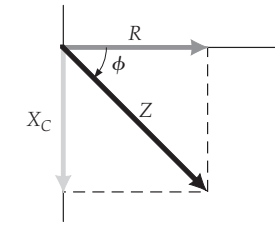
La generalización de la ley de Ohm a los circuitos con condensadores, inductores y resistores es

$$V_{rms} = I_{rms}Z \quad \textit{ley de Ohm para circuitos de ca} \qquad (21.17)$$

Para ver cómo se usan los fasores en el análisis de un circuito RC, se presenta el siguiente ejemplo. Preste atención especial al inciso *b*, en el que hay una violación *aparente* al teorema de la malla de Kirchhoff, que se explica por las diferencias de fase entre los voltajes a través de los dos elementos del circuito.



a) Diagrama del circuito RC



$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$

b) Diagrama de fase

▲ **FIGURA 21.9** Un circuito RC en serie ***a)*** En un circuito RC en serie, ***b)*** la impedancia *Z* es la suma fasorial de la resistencia *R* y de la reactancia capacitiva X_C.

Nota: la palabra *impedancia* (representada por *Z*) indica la oposición general del circuito al paso de la corriente. Las palabras *reactancia* y *resistencia* se reservarán para la oposición en los elementos individuales.

Nota: $V_{rms} = I_{rms}Z$ se puede aplicar a cualquier circuito, siempre y cuando la impedancia *Z* se calcule en forma correcta, usando fasores.

Ejemplo 21.5 ■ Impedancia RC y el teorema de la malla de Kirchhoff

Un circuito RC en serie tiene una resistencia de 100 Ω y una capacitancia de 15.0 μF. *a*) ¿Cuál es la corriente (rms) en el circuito cuando se conecta con una fuente de 120 V y 60 Hz? *b*) Calcule el voltaje (rms) a través de cada elemento de circuito y de los dos elementos combinados. Compárelo con el de la fuente de voltaje. ¿Se satisface el teorema de la malla de Kirchhoff? Comente y explique su razonamiento.

Razonamiento. *a*) Advierta que los valores del voltaje y del condensador son los mismos que aquellos en el ejemplo 21.3, y que se ha agregado un resistor en serie. Esto ayudará a simplificar los cálculos. Entonces, la reactancia capacitiva y la resistencia se combinan, usando fasores, para determinar la impedancia general (ecuación 21.16). De acuerdo con la ecuación 21.17, se pueden usar la impedancia y el voltaje para calcular la corriente. *b*) Como la corriente es igual en cualquier momento dado en un circuito en serie, el resultado del inciso *a* servirá para calcular los voltajes. El voltaje efectivo a través de los dos elementos juntos se calcula recordando que los voltajes individuales están desfasados 90°. Eso significa, en términos físicos, que *no* llegan a sus valores máximos al mismo tiempo, sino más bien separados por un cuarto de periodo. Por consiguiente, *no es posible* tan sólo sumar los voltajes.

(continúa en la siguiente página)

Solución.

Dado: $R = 100\ \Omega$; $C = 15.0\ \mu F = 15.0 \times 10^{-6}$ F; $V_{rms} = 120$ V; $f = 60$ Hz

Encuentre: *a)* I (corriente efectiva); *b)* V_C (voltaje rms a través del condensador); V_R (voltaje efectivo a través del resistor); $V_{(R+C)}$ (voltaje rms comb.)

a) En el ejemplo 21.3 se determinó que la reactancia para el condensador a esta frecuencia f era $X_C = 177\ \Omega$. Ahora se aplicará la ecuación 21.16 para obtener la impedancia del circuito:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} = \sqrt{(100\ \Omega)^2 + (177\ \Omega)^2} = 203\ \Omega$$

Como $V_{rms} = I_{rms}Z$, la corriente rms es

$$I_{rms} = \frac{V_{rms}}{Z} = \frac{120\ \text{V}}{203\ \Omega} = 0.591\ \text{A}$$

b) Se usa primero la ecuación 21.17 para el voltaje efectivo a través del resistor solo ($Z = R$),

$$V_R = I_{rms}R = (0.591\ \text{A})(100\ \Omega) = 59.1\ \text{V}$$

Para el condensador solo ($Z = X_C$), y el voltaje efectivo a través de éste es

$$V_C = I_{rms}X_C = (0.591\ \text{A})(177\ \Omega) = 105\ \text{V}$$

La suma algebraica de estos dos voltajes efectivos es 164 V, que *no* es igual que el valor rms del voltaje de la fuente (120 V). Esto *no* significa que se haya violado el teorema de la malla de Kirchhoff. De hecho, el voltaje de la fuente sí es igual a los voltajes combinados a través del condensador y del resistor, *si se tienen en cuenta las diferencias de fase*. Hay que calcular el voltaje combinado de forma adecuada, teniendo en cuenta la diferencia de 90° entre las fases de los dos voltajes. Al aplicar el teorema de Pitágoras para obtener el vol-taje total, se tiene que

$$V_{(R+C)} = \sqrt{V_R^2 + V_C^2} = \sqrt{(59.1\ \text{V})^2 + (105\ \text{V})^2} = 120\ \text{V}$$

Cuando se combinan adecuadamente las diferencias individuales de voltaje (teniendo en cuenta que los voltajes no alcanzan su punto máximo al mismo tiempo), se ve que la ley de Kirchhoff sigue siendo válida. Aquí se ha demostrado que el voltaje rms total a través de ambos elementos es igual al voltaje rms de la fuente. Hay que ser cuidadosos al sumar los voltajes de esta forma porque están fuera de fase en general. *Por lo tanto, las leyes de Kirchhoff son válidas en cualquier instante del tiempo, no sólo para los valores rms, pero hay que tener cuidado al tomar en cuenta las diferencias de fase.*

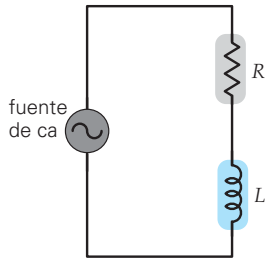
Ejercicio de refuerzo. *a)* ¿Cómo cambiaría el resultado del inciso *a* de este ejemplo si el circuito estuviera excitado por una fuente con el mismo voltaje efectivo, pero que oscilara a 120 Hz? *b)* La causa de este cambio ¿es el resistor o el condensador?

PHYSLET®

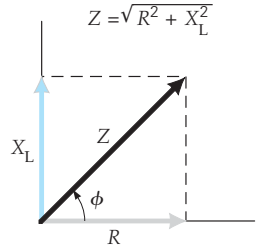
Ilustración 31.6 Fasores de voltaje y corriente

PHYSLET®

Ilustración 31.7 Circuitos RC y fasores



a) Diagrama del circuito RL



b) Diagrama de fase

▲ **FIGURA 21.10** Un circuito RL en serie ***a)*** En un circuito RL en serie, ***b)*** la impedancia Z es igual a la suma fasorial de la resistencia R y de la reactancia inductiva X_L.

Circuito RL en serie

El análisis de un circuito RL en serie (◂figura 21.10) es similar al de un circuito RC en serie. Sin embargo, la reactancia inductiva se grafica a lo largo del eje *y positivo*, en el diagrama de fases, para reflejar que la diferencia de fases con respecto a la resistencia es de +90°. Recuerde que un ángulo de fase positivo quiere decir que el voltaje *se adelanta* a la corriente, como es el caso de un inductor.

Por lo tanto, la impedancia en un circuito RL en serie es

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} \quad \textit{impedancia en un circuito RL en serie} \qquad (21.18)$$

Circuito RLC en serie

En el caso más general, un circuito de ca puede contener los tres componentes: un resistor, un inductor y un condensador en serie como se ve en la ▸figura 21.11. De nuevo, con una suma fasorial se determina la impedancia general del circuito. Si se combinan los componentes verticales (esto es, las reactancias inductiva y capacitiva) se obtiene la *reactancia total*, $X_L - X_C$. Se emplea la resta porque la diferencia de fases entre X_L y X_C es 180°. La impedancia general del circuito es la suma fasorial de la resistencia y la reactancia total. Una vez más, se utiliza el teorema de Pitágoras en el diagrama de fase, y se tiene

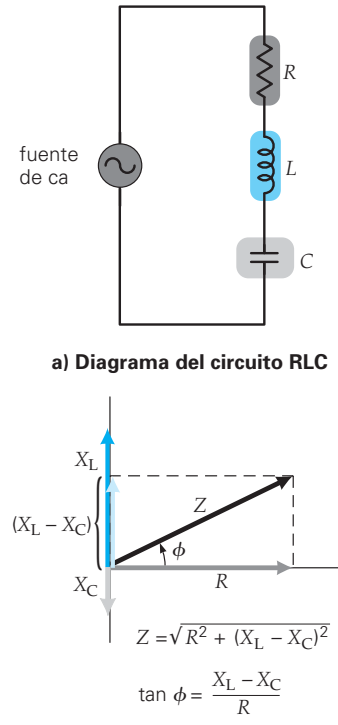
$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad \textit{impedancia de un circuito RLC en serie} \qquad (21.19)$$

El **ángulo de fase (ϕ)** entre el voltaje de la fuente y la corriente en el circuito es el que forman el fasor impedancia general (Z) y el eje $+x$ (figura 21.11b), o bien,

$$\tan\phi = \frac{X_L - X_C}{R} \quad \textit{ángulo de fase en un circuito RLC en serie} \qquad (21.20)$$

TABLA 21.1 Impedancias y ángulos de fase para circuitos en serie

Elemento(s) de circuito	*Impedancia Z (en W)*	*Ángulo de fase ϕ*
R	R	0°
C	X_C	−90°
L	X_L	+90°
RC	$\sqrt{R^2 + X_C^2}$	negativo (significa que ϕ está entre 0° y −90°)
RL	$\sqrt{R^2 + X_L^2}$	positivo (significa que ϕ está entre 0° y +90°)
RLC	$\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$	positivo si $X_L > X_C$ negativo si $X_C > X_L$



▲ **FIGURA 21.11** Un circuito RLC en serie ***a)*** En un circuito RLC en serie, ***b)*** la impedancia Z es igual a la suma fasorial de la resistencia R y la reactancia total (o neta) $(X_L - X_C)$. Note que el diagrama de fase está hecho para el caso de $X_L > X_C$.

Advierta que si X_L es mayor que X_C (como en la figura 21.11b), el ángulo de fase es positivo $(+\phi)$, y se dice que el circuito es *inductivo*, ya que la parte no resistiva de la impedancia (es decir, la reactancia) está dominada por el inductor. Si X_C es mayor que X_L, el ángulo de fase es negativo $(-\phi)$, y se dice que el circuito es *capacitivo*, porque la reactancia capacitiva domina sobre la reactancia inductiva.

En la tabla 21.1 se presenta un resumen de las impedancias y los ángulos de fase para los tres elementos de circuito, así como varias de sus combinaciones. En el ejemplo 21.6 se analiza un circuito RLC.

Ejemplo 21.6 ■ Ahora todo junto: impedancia en un circuito RLC

Un circuito RLC en serie tiene una resistencia de 25.0 Ω, una capacitancia de 50.0 μF, y una inductancia de 0.300 H. Si el circuito se activa con una fuente de voltaje de 120 V y 60 Hz, ¿cuáles son *a*) la impedancia total del circuito, *b*) la corriente efectiva en el circuito y *c*) el ángulo de fase entre la corriente y el voltaje?

Razonamiento. *a*) Para calcular la impedancia general con la ecuación 21.19, hay que determinar las reactancias individuales. *b*) La corriente calculada con la generalización de la ley de Ohm es $V_{rms} = I_{rms}Z$ (ecuación 21.17). *c*) El ángulo de fase se calcula con la ecuación 21.20.

Solución. Se listan los datos:

Dado:
$R = 25.0\ \Omega$
$C = 50.0\ \mu F = 5.00 \times 10^{-5}\ F$
$L = 0.300\ H$
$V_{rms} = 120\ V$
$f = 60\ Hz$

Encuentre:
a) Z (impedancia general del circuito)
b) I_{rms}
c) ϕ (ángulo de fase)

a) Las reactancias individuales son

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi(60\ Hz)(5.00 \times 10^{-5}\ F)} = 53.1\ \Omega$$

y

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi(60\ Hz)(0.300\ H) = 113\ \Omega$$

Entonces,

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{(25.0\ \Omega)^2 + (113\ \Omega - 53.1\ \Omega)^2} = 64.9\ \Omega$$

b) Como $V_{rms} = I_{rms}Z$, entonces

$$I_{rms} = \frac{V_{rms}}{Z} = \frac{120\ V}{64.9\ \Omega} = 1.85\ A$$

c) Se obtiene el ángulo de fase a partir de $\tan\phi = (X_L - X_C)/R$ y resulta

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{X_L - X_C}{R}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{113\ \Omega - 53.1\ \Omega}{25.0\ \Omega}\right) = +67.3°$$

Era de esperarse un ángulo de fase positivo, porque la reactancia inductiva es mayor que la capacitiva (véase el inciso *a*). Por consiguiente, este circuito es *inductivo* por naturaleza.

(continúa en la siguiente página)

Ejercicio de refuerzo. *a*) Considere el circuito RLC de este ejemplo, sólo que ahora se aumenta al doble la frecuencia de excitación. Realice un razonamiento conceptual e indique si el ángulo de fase ϕ debe ser mayor o menor que los $+67.3°$ después del incremento. *b*) Calcule el nuevo ángulo de fase para demostrar que su razonamiento fue correcto.

Ahora, usted seguramente apreciará la importancia de los diagramas fasoriales para calcular impedancias, voltajes y corrientes en los circuitos de ca. Sin embargo, quizá todavía se pregunte qué utilidad y significado tiene el ángulo de fase ϕ. Para ilustrar su importancia, se examinará la pérdida de potencia en un circuito RLC. Hay que hacer notar que el análisis de pérdidas de potencia también depende mucho del buen uso de los diagramas fasoriales.

Factor de potencia para un circuito RLC en serie

Al examinar un circuito RLC, es crucial estar conscientes de que cualquier pérdida de potencia en el circuito (calentamiento de joule) tiene lugar sólo en el resistor. *No hay pérdidas de potencia asociadas con condensadores ni con inductores*. Los condensadores y los inductores tan sólo almacenan la energía y la devuelven, sin pérdidas. En el caso ideal, ninguno de estos dos elementos presenta resistencia, por lo que su calentamiento de joule es cero.

Como ya se explicó, la potencia promedio (rms) disipada por un resistor es $P_{rms} = I^2_{rms}R$. Esta potencia rms también se expresa en función de la corriente y el voltaje rms, sólo que, en este caso, el voltaje *debe ser el que hay a través del resistor* (V_R), ya que es el único elemento disipador. La potencia disipada promedio en un circuito RLC en serie se expresa de forma alternativa como

$$\overline{P} = P_R = I_{rms}V_R$$

El voltaje a través del resistor se calcula con un triángulo de voltajes que corresponde al triángulo fasorial (◂figura 21.12). Los voltajes rms a través de los componentes individuales en un circuito RLC son $V_R = I_{rms}R$, $V_L = I_{rms}X_L$ y $V_c = I_{rms}X_C$. Al combinar los dos últimos voltajes se tiene $(V_L - V_C) = I_{rms}(X_L - X_C)$. Si se multiplica cada cateto del triángulo fasorial (figura 21.12a) por la corriente efectiva, resulta un triángulo equivalente de voltajes (figura 21.12b). Como se ve en esta figura, el voltaje a través del resistor es

$$V_R = V_{rms}\cos\phi \tag{21.21}$$

El término $\cos\phi$ se llama **factor de potencia**. Según la figura 21.11,

$$\cos\phi = \frac{R}{Z} \quad \textit{factor de potencia para RLC en serie} \tag{21.22}$$

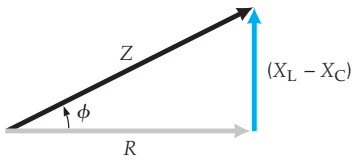
La potencia promedio, expresada en términos del factor de potencia, es

$$\overline{P} = I_{rms}V_{rms}\cos\phi \quad \textit{potencia para RLC en serie} \tag{21.23}$$

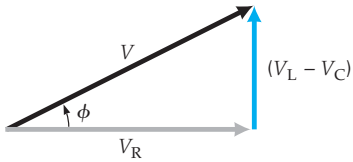
Como sólo se disipa potencia en la resistencia ($\overline{P} = I^2_{rms}R$), la ecuación 21.22 permite expresar la potencia promedio como

$$\overline{P} = I^2_{rms}Z\cos\phi \quad \textit{potencia para RLC en serie} \tag{21.24}$$

Cabe destacar que $\cos\phi$ varía desde un máximo de $+1$ (cuando $\phi = 0°$), hasta un mínimo de 0 (cuando $\phi = \pm 90°$). Cuando $\phi = 0°$, se dice que el circuito es *totalmente resistivo*, esto es, hay una disipación máxima de potencia (como si el circuito sólo tuviera un resistor). El factor de potencia disminuye conforme aumenta el ángulo de fase en cualquier dirección [porque $\cos(-\phi) = \cos\phi$], es decir, conforme el circuito se vuelve inductivo o capacitivo. Cuando $\phi = +90°$, se dice que el circuito es *completamente inductivo*; a $\phi = -90°$ es *completamente capacitivo*. En estos casos, el circuito sólo contiene un inductor o un condensador, respectivamente, por lo que no se disipa potencia. En la práctica, como siempre hay algo de resistencia, un circuito nunca es completamente inductivo o capacitivo. Sin embargo, sí es posible que un circuito RLC *parezca* ser completamente resistivo, aunque contenga tanto un condensador como un inductor, como se explicará en la sección 21.5. Regresaremos al ejemplo anterior con circuito RLC, poniendo especial atención en la potencia.



a) Triángulo de fasores



b) Triángulo equivalente de voltajes

▲ **FIGURA 21.12** Triángulos fasorial y de voltajes Los voltajes rms a través de los componentes de un circuito RLC en serie se expresan por $V_R = I_{rms}R$, $V_L = I_{rms}X_L$ y $V_C = I_{rms}X_C$. Como la corriente es igual a través de cada uno, ***a)*** el triángulo fasorial es susceptible de convertirse en ***b)*** un triángulo de voltajes. Note que $V_R = V\cos\phi$. Ambos diagramas fasoriales se dibujaron para el caso en que $X_L > X_C$.

PHYSLET®

Ilustración 31.5 Potencia y reactancia

PHYSLET®

Exploración 31.4 Ángulo de fase y potencia

Ejemplo 21.7 ■ De nuevo, el factor de potencia

¿Cuánta potencia promedio que se disipa en el circuito del ejemplo 21.6?

Razonamiento. Es posible calcular el factor de potencia, porque se conocen la resistencia (R) y la impedancia (Z). Una vez conocido ese factor, se calcula la potencia real.

Solución.

Dado: Véase el ejemplo 21.6 ***Encuentre:*** $\overline{P}$ (potencia promedio)

En el ejemplo 21.6 se determinó que el circuito tiene una impedancia $Z = 64.9\ \Omega$, y que su resistencia era $R = 25.0\ \Omega$. Por consiguiente, el factor de potencia es

$$\cos\phi = \frac{R}{Z} = \frac{25.0\ \Omega}{64.9\ \Omega} = 0.385$$

Se usan otros datos del ejemplo 21.6 y, con la ecuación 21.23, se obtiene

$$\overline{P} = I_{rms}V_{rms}\cos\phi = (1.85\ \text{A})(120\ \text{V})(0.385) = 85.5\ \text{W}$$

Esto es menor que la potencia que se disiparía si no existieran el condensador y el inductor. (¿Podría demostrar que esto es verdad? ¿Por qué es verdad?)

Ejercicio de refuerzo. Si la frecuencia se duplicara y el condensador se retirara de este ejemplo, ¿cuál sería la potencia efectiva?

21.5 Resonancia en circuitos

OBJETIVOS: *a*) Comprender el concepto de la resonancia en los circuitos de ca y *b*) calcular la frecuencia de resonancia de un circuito RLC.

A partir de la explicación anterior, se podrá ver que cuando el factor de potencia ($\cos\phi$) de un circuito RLC en serie es igual a la unidad, al circuito se transfiere la frecuencia máxima. En tal situación, la corriente en el circuito debe estar en su máximo, ya que la impedancia está en su mínimo. Esto sucede porque a esta única frecuencia, las reactancias inductiva y capacitiva *se anulan efectivamente*; esto es, son iguales en magnitud y están desfasadas 180°, o lo contrario. Esto sucede en cualquier circuito RLC, eligiendo la frecuencia adecuada de la fuente.

La clave para determinar la frecuencia correcta es darse cuenta de que las reactancias inductivas y capacitivas dependen de la frecuencia, al igual que la impedancia general. De acuerdo con la ecuación de la impedancia de un circuito RLC en serie, $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$, se observa que la impedancia es mínima cuando $X_L - X_C = 0$. Esto sucede a la frecuencia f_o, que se calcula igualando $X_L = X_C$. Utilizando las ecuaciones para las reactancias, esto significa que $2\pi f_o L = 1/2\pi f_o C$. Al despejar f_o se obtiene

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \qquad \textit{frecuencia de resonancia RLC} \qquad (21.25)$$

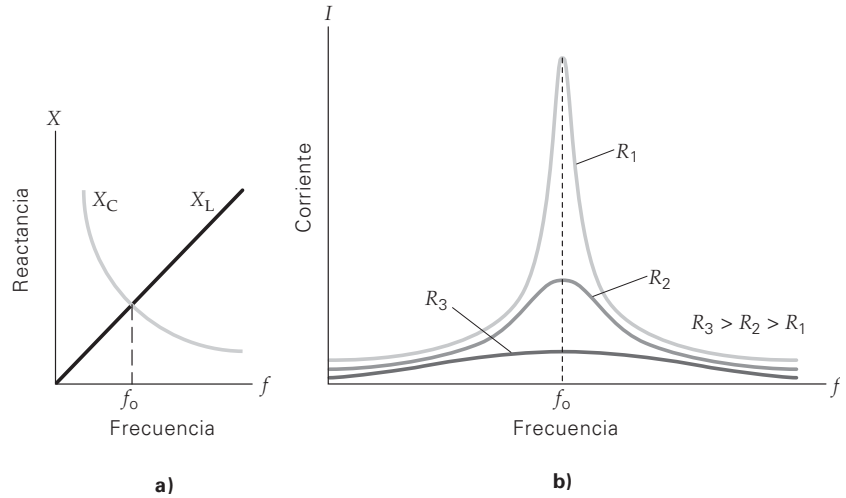
Esta frecuencia satisface la condición de impedancia mínima y, por consiguiente, maximiza la corriente en el circuito. En analogía con el hecho de impulsar un columpio exactamente a la frecuencia correcta o con el de tener una cuerda de violín en uno de sus modos normales, f_o se llama la **frecuencia de resonancia** del circuito. En la ▼figura 21.13a se presenta una gráfica de las reactancias capacitiva e inductiva en función de la frecuencia. Las curvas de X_C y X_L se intersecan en f_o, donde sus valores son iguales.

PHYSLET®
Ilustración 31.8 Impedancia y resonancia, circuito RLC

PHYSLET®
Exploración 31.7 Circuito RLC

Explicación física de la resonancia

Vale la pena investigar la explicación física de la resonancia en un circuito RLC en serie. Ya se explicó que los voltajes del condensador y del inductor *siempre* están 180° fuera de fase, o tienen polaridad opuesta. En otras palabras, tienden a anularse, pero, generalmente, no por completo porque sus valores no son iguales. Si éste es el caso, entonces, el voltaje a través del resistor es menor que el voltaje de la fuente porque hay un voltaje neto a través de la combinación del condensador y el inductor. Esto significa que la



▲ **FIGURA 21.13 Frecuencia de resonancia de un circuito RLC en serie** ***a)*** A la frecuencia de resonancia (f_o), las reactancias capacitiva e inductiva son iguales ($X_L = X_C$). En una gráfica de X en función de f, ésta es la frecuencia a la cual se intersecan las curvas de X_C y X_L. ***b)*** En una gráfica de I en función de f, la corriente es máxima en f_o. La curva se vuelve más aguda conforme disminuye la resistencia en el circuito.

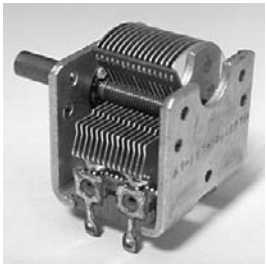
potencia disipada en el resistor es menor que su valor máximo. Sin embargo, en el caso especial que se presenta cuando los voltajes capacitivo e inductivo se anulan, todo el voltaje de la fuente aparece a través del resistor, el factor de potencia se vuelve 1, y el resistor disipa la potencia máxima posible. Esto es lo que se entiende al decir que el circuito está "en resonancia".

Aplicaciones de la resonancia

Como hemos visto, cuando un circuito RLC en serie se excita a su frecuencia de resonancia, tanto la corriente en el circuito como la transferencia de potencia a este último están en su valor máximo. En la figura 21.13b se presenta una gráfica de la corriente rms en función de la frecuencia de excitación, para diversos valores de la resistencia. Como se esperaba, la corriente máxima ocurre a la frecuencia de resonancia f_o. Observe que la curva se vuelve más aguda y angosta conforme disminuye la resistencia.

Los circuitos resonantes tienen una gran variedad de aplicaciones. Una de las más comunes es la del mecanismo de sintonización de un aparato receptor de radio. Cada estación de radio tiene asignada una frecuencia de emisión, a la cual transmite ondas de radio (véase la sección A fondo 21.1 sobre la radiodifusión y la radiación electromagnética). Cuando las ondas se reciben en la antena, sus campos magnético y eléctrico oscilatorios ponen a los electrones de la antena receptora en movimiento de vaivén regular. En otras palabras, producen una corriente alterna en el circuito receptor, como lo haría una fuente de voltaje ac.

En determinada área, cada estación de radio tiene asignada su propia frecuencia de transmisión. Por lo general, diferentes señales de radio llegan juntas a la antena, pero el circuito receptor escoge, de forma selectiva, sólo aquella con el valor exacto o cercano de la frecuencia de resonancia. La mayoría de los aparatos de radio permiten variar esa frecuencia de resonancia para "sintonizar" diferentes estaciones. En los primeros días de la radio se usaban condensadores variables de aire para este fin (▸figura 21.14). En la actualidad, existen condensadores variables más compactos en los radios más pequeños, que tienen un dieléctrico de polímero entre placas delgadas. Las láminas de polímero ayudan a mantener la distancia entre las placas y aumentan la capacitancia, permitiendo a los fabricantes usar una superficie más pequeña. (Recuerde que, en el capítulo 16 $C = \kappa\varepsilon_o A/d$.) En la mayoría de los radios más modernos hay dispositivos de estado sólido que reemplazan a los condensadores variables.



▲ **FIGURA 21.14 Condensador variable de aire** Al girar las placas móviles entre las placas fijas, se modifica el área de traslape y, por consiguiente, la capacitancia. Esos condensadores eran comunes en los circuitos de sintonización de los radios antiguos.

A FONDO 21.1 CIRCUITOS OSCILADORES: EMISORES DE RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

Para generar las ondas electromagnéticas de alta frecuencia que se usan en las comunicaciones de radio y televisión (figura 1), se deben hacer oscilar corrientes eléctricas a altas frecuencias en circuitos electrónicos. Esto se logra con circuitos RLC, que se llaman *circuitos osciladores*, porque en ellos la corriente oscila a una frecuencia determinada por sus elementos inductivo y capacitivo.

Cuando la resistencia en un circuito RLC es muy pequeña, ese circuito es, en esencia, un LC. En él, la energía oscila a una frecuencia f, que es la frecuencia "natural" del circuito, y que también es su frecuencia de resonancia (ecuación 21.25). Cualquier leve resistencia en el circuito disiparía energía. Sin embargo, en un circuito LC ideal (como el que aquí consideramos), sin resistencia, la oscilación continuaría de forma indefinida

Para comprender mejor esta situación, consideremos las oscilaciones de energía en un circuito ideal LC en paralelo, como el de la figura 2a. Supongamos que, inicialmente, el condensador está cargado, y que a continuación se cierra el interruptor ($t = 0$). Entonces, se presentará la siguiente sucesión de eventos:

1. El condensador se descargaría de forma instantánea (ya que $RC = 0$), si no fuera porque la corriente debe pasar por la bobina. Cuando $t = 0$, la corriente que pasa por la bobina es cero (figura 2a). Al aumentar la corriente, también aumenta el campo magnético en la bobina. De acuerdo con la ley de Lenz, el campo magnético en aumento y el cambio de flujo en la bobina inducen una contra fem que se opone al aumento de la corriente. A causa de esta oposición, el condensador tarda cierto tiempo en descargarse.
2. Cuando el condensador está totalmente descargado (figura 2b), toda su energía (en su campo eléctrico) ha pasado al inductor, en forma de un campo magnético. (Como, en este circuito, se supone que $R = 0$, no se pierde energía por el calentamiento de joule.) En este momento (un cuarto de ciclo o periodo; $T/4$), el campo magnético y la corriente en la bobina tienen su valor máximo, y entonces toda la energía está almacenada en el inductor. (Consulte los "histogramas" de energía que acompañan los diagramas de circuito en las figuras 2a, 2b y 2c para visualizar las transferencias de energía conforme se desarrolla el ciclo.)
3. Al bajar el campo magnético respecto de su valor máximo, en la bobina se induce una fem que se opone a esa bajada. Esta fem actúa en la dirección que tiende a continuar la corriente en la bobina, aunque ésta baje (de nuevo, por la ley de Lenz). Ahora la polaridad de la fem es contraria a la que había en el paso 1. De esta forma, la corriente continúa pasando carga al condensador, pero el resultado es una polaridad inversa a la de su estado inicial.
4. Cuando el condensador está cargado por completo (pero con la polaridad inversa), tiene la misma energía que tenía al principio (véase la figura 2c). Esto ocurre a la mitad del ciclo, o a la mitad de un periodo a partir del inicio ($T/2$). El campo magnético en la bobina es cero, al igual que la corriente en el circuito.
5. A continuación el condensador se comienza a descargar, y se repiten los cuatro pasos anteriores una y otra vez. De esta manera, tenemos una oscilación de corriente y energía en el circuito. En un caso ideal de un circuito que no opone resistencia, las oscilaciones continuarían de forma indefinida.

FIGURA 1 Una antena de transmisión

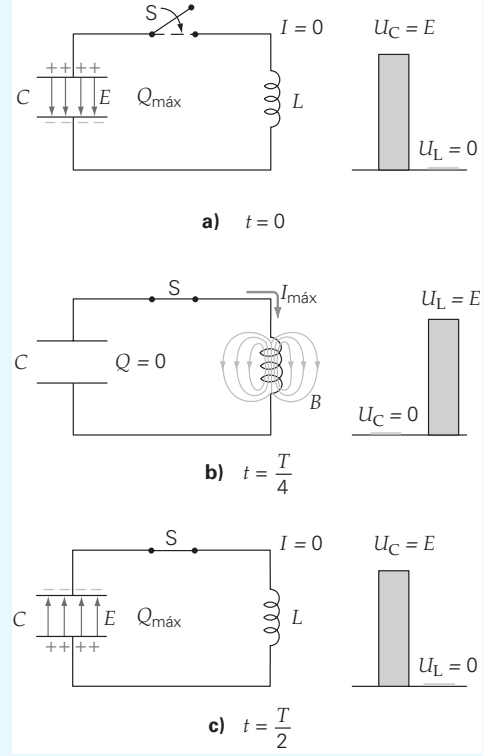


FIGURA 2 **Un circuito oscilador LC** Si la resistencia es insignificante, este circuito oscilará indefinidamente. Se muestra medio ciclo entre $t = 0$ y $t = T/2$. La energía se convierte de magnética a eléctrica y viceversa (como se observa en los histogramas de energía a la derecha). Los electrones que oscilan en el conductor emiten radiación electromagnética a la frecuencia de oscilación del circuito.

Ejemplo integrado 21.8 ■ Comparación de AM y FM: la resonancia en la recepción de radio

a) Cuando usted cambia de una estación de AM (en la "banda de AM"; el término *banda* se refiere a un intervalo específico de frecuencias) a una de FM, de hecho cambia la capacitancia del circuito receptor, suponiendo que la inductancia es constante. ¿La capacitancia 1) aumenta o 2) disminuye al hacer este cambio? *b*) Suponga que estaba escuchando las noticias en una estación de AM a 920 kHz y que cambió a una estación de música en la banda de FM, en los 99.7 MHz. ¿Por qué factor cambió la capacitancia del circuito receptor en el radio, suponiendo que la inductancia es constante?

a) Razonamiento conceptual. Como las estaciones de FM emiten a frecuencias mucho mayores que las de AM (véase la tabla 20.1, p. 676), la frecuencia de resonancia del receptor debe aumentarse para recibir señales en la banda de FM. Un aumento de la frecuencia de resonancia requiere disminuir la capacitancia, porque la inductancia es fija. Así, la respuesta correcta es la 2.

b) Razonamiento cuantitativo y solución. La frecuencia de resonancia (ecuación 21.25) depende de la inductancia y de la capacitancia. Como la pregunta pide un "factor", es claro que solicita una razón o relación entre la capacitancia nueva y la original. Las frecuencias se deben expresar en las mismas unidades, por lo que se hará la conversión de MHz a kHz, y se utilizarán literales con apóstrofe para FM y literales sin apóstrofe para AM.

Dado: $f_o = 920$ kHz; $f'_o = 99.7$ MHz $= 99.7 \times 10^3$ kHz

Encuentre: C'/C (la razón entre la capacitancia nueva y la original)

De la ecuación 21.25, las dos frecuencias de resonancia se definen por

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad \text{y} \quad f'_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC'}}$$

Dividiendo la primera ecuación entre la segunda, se obtiene

$$\frac{f_o}{f'_o} = \frac{2\pi\sqrt{LC'}}{2\pi\sqrt{LC}} = \sqrt{\frac{C'}{C}}$$

Se eleva al cuadrado para despejar la razón de capacitancias, y se sustituyen los números, lo que nos da

$$\frac{C'}{C} = \left(\frac{f_o}{f'_o}\right)^2 = \left(\frac{920\text{ kHz}}{99.7 \times 10^3\text{ kHz}}\right)^2 = 8.51 \times 10^{-5}$$

Por consiguiente, $C' = 8.51 \times 10^{-5}\,C$, y se ve que la capacitancia disminuyó por un factor de casi un diezmilésimo ($8.51 \times 10^{-5} \approx 10^{-4}$).

Ejercicio de refuerzo. *a*) Con base en las curvas de resonancia de la figura 21.13b, ¿podría explicar cómo es posible captar dos estaciones de radio de *forma simultánea* en su aparato receptor? (Se habrá encontrado con este fenómeno, en especial entre dos ciudades lejanas entre sí. En ocasiones, hay dos estaciones con licencia para transmitir a frecuencias muy próximas, bajo el supuesto de que no se recibirán ambas en el mismo aparato. Sin embargo, en ciertas condiciones atmosféricas, esto no es válido.) *b*) En el inciso *b* de este ejemplo, si a continuación se aumentara la capacitancia por un factor de dos (partiendo del noticiario en 920 kHz) para escuchar un juego de hockey, ¿a qué frecuencia de la banda de AM se estaría sintonizando?

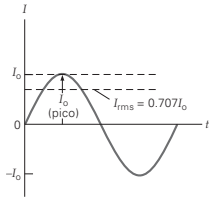
Repaso del capítulo

- Un **voltaje** alterno (ca) se describe con la ecuación

$$V = V_o \operatorname{sen} \omega t = V_o \operatorname{sen} 2\pi f t \qquad (21.1)$$

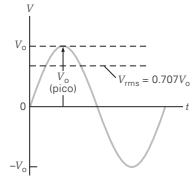
- Para una corriente con variación senoidal, llamada **corriente ca**, la **corriente pico I_o** y la **corriente rms** (raíz cuadrática media o efectiva) I_{rms} se relacionan mediante

$$I_{rms} = \frac{I_o}{\sqrt{2}} = 0.707 I_o \qquad (21.6)$$



- Para un voltaje de ca, el **voltaje pico V_o** se relaciona con su voltaje rms (raíz cuadrática medio o efectivo) mediante

$$V_{rms} = \frac{V_o}{\sqrt{2}} = 0.707 V_o \qquad (21.8)$$



- La corriente en un resistor está en fase con el voltaje a través de él. Para un condensador, la corriente se adelanta 90° (un cuarto de ciclo) al voltaje. Para un inductor, la corriente se retrasa 90° con respecto al voltaje.

- En los circuitos de ca, el calentamiento de joule se debe por completo a los elementos resistivos, y la **disipación de potencia**, promediada en el tiempo, es

$$\overline{P} = I_{rms}^2 R \tag{21.10}$$

- En un circuito de ca, los condensadores y los inductores permiten el paso de la corriente y crean oposición a ella. Esta oposición se caracteriza por la **reactancia capacitiva (X_C)** y la **reactancia inductiva (X_L)**, respectivamente. La reactancia capacitiva se determina mediante la ecuación

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \tag{21.11}$$

La reactancia inductiva se determina con

$$X_L = \omega L = 2\pi f L \tag{21.14}$$

- La ley de Ohm, aplicada a cada tipo de elemento de circuito, es una generalización de su versión en los circuitos de cd. La relación entre la corriente y el voltaje efectivos para un resistor es

$$V_{rms} = I_{rms} R \tag{21.9}$$

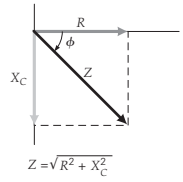
La relación entre la corriente y el voltaje rms para un condensador es

$$V_{rms} = I_{rms} X_C \tag{21.12}$$

La relación entre la corriente y el voltaje rms para un inductor es

$$V_{rms} = I_{rms} X_L \tag{21.15}$$

- Los **fasores** son cantidades parecidas a los vectores que tienen en cuenta las resistencias y reactancias para representarlas de forma gráfica

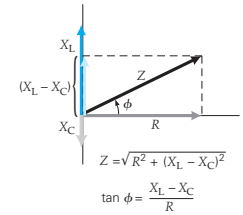


- La **impedancia (Z)** es la oposición total (o efectiva) a la corriente, que tiene en cuenta tanto resistencias como reactancias. La impedancia se relaciona con la corriente y el voltaje del circuito mediante una generalización de la ley de Ohm:

$$V_{rms} = I_{rms} Z \tag{21.17}$$

- La **impedancia para un circuito RLC en serie es**

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \tag{21.19}$$



- El **ángulo de fase (ϕ)** entre el voltaje y la corriente efectivos en un circuito RLC en serie es

$$\tan\phi = \frac{X_L - X_C}{R} \tag{21.20}$$

- El **factor de potencia (cos ϕ)** para un circuito RLC en serie es una medida de qué tan cercano está un circuito a la disipación máxima de potencia. El factor de potencia es

$$\cos\phi = \frac{R}{Z} \tag{21.22}$$

La potencia promedio disipada (calentamiento de joule en el resistor) es

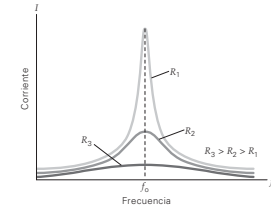
$$\overline{P} = I_{rms} V_{rms} \cos\phi \tag{21.23}$$

o bien,

$$\overline{P} = I_{rms}^2 Z \cos\phi \tag{21.24}$$

- La **frecuencia de resonancia (f_o)** de un circuito RLC es la frecuencia a la cual disipa la potencia máxima. Esta frecuencia es

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{21.25}$$



Ejercicios

Los ejercicios designados **OM** *son preguntas de opción múltiple; los* **PC** *son preguntas conceptuales; y los* **EI** *son ejercicios integrados. A lo largo del texto, muchas secciones de ejercicios incluirán ejercicios "apareados". Estos pares de ejercicios, que se identifican con* números subrayados, *pretenden ayudar al lector a resolver problemas y aprender. El primer ejercicio de cada pareja (el de número par) se resuelve en la Guía de estudio, que puede consultarse si se necesita ayuda para resolverlo. El segundo ejercicio (de número impar) es similar, y su respuesta se da al final del libro.*

21.1 Resistencia en un circuito de ca

1. **OM** ¿Cuál de los siguientes voltajes es mayor para un voltaje alterno de variación senoidal? *a*) V_o, *b*) V_{rms} o *c*) ambos tienen el mismo valor.

2. **OM** Durante el curso de un ciclo de voltaje alterno (en Estados Unidos), ¿durante cuánto tiempo la dirección de la corriente permanece constante en un resistor? *a*) 1/60 s, *b*) 1/120 s o *c*) 1/30 s.

3. **OM** Durante siete ciclos completos de voltaje alterno (en Estados Unidos), ¿cuál es el voltaje promedio? *a*) 0 V, *b*) 60 V, *c*) 120 V o *d*) 170 V.

4. **PC** Si la corriente promedio en un circuito de ca es cero, explique por qué la potencia promedio entregada a un resistor no es cero.

5. **PC** El voltaje y la corriente asociados con un resistor de un circuito de ca están *en fase*. ¿Qué significa esto?

6. **PC** Una bombilla de luz de 60 W, diseñada para trabajar a 240 V en Gran Bretaña, se conecta a una fuente de 120 V. Describa los cambios en la corriente y la potencia efectivas en la bombilla cuando está en 120 V, en comparación con 240 V. Suponga que la bombilla es óhmica.

7. **PC** Si el voltaje y la corriente alternos en un elemento de circuito se definen respectivamente por $V = 120\ \text{sen}(120\pi t)$ e $I = 30\ \text{sen}\ (120\pi t + \pi/2)$, ¿ese elemento de circuito podría ser un resistor? Explique por qué.

8. ● ¿Cuáles son los voltajes máximos de una línea de ca de 120 V y de una de 240 V?

9. ● La corriente rms de un circuito de ca es de 5.0 A. ¿Cuál es la corriente máxima?

10. ● El voltaje máximo a través de un resistor en un circuito de ca es de 156 V. Calcule el voltaje rms correspondiente.

11. ● ¿Cuánta corriente alterna rms debe pasar por un resistor de 10 Ω para producir una potencia promedio de 15 Ω?

12. ● Un circuito de ca contiene un resistor con 5.0 Ω de resistencia. Por él pasa una corriente rms de 0.75 A. *a*) Calcule el voltaje rms y el voltaje máximo. *b*) Calcule la potencia promedio entregada al resistor.

13. ● Una secadora de cabello tiene una potencia de 1200 W cuando se conecta a un tomacorriente de 120 V. Calcule *a*) su corriente efectiva, *b*) su corriente máxima y *c*) su resistencia.

14. **EI** ●● El voltaje a través de un resistor de 10 W varía de acuerdo con $V = (170\text{ V})\,\text{sen}(120\pi t)$. *a*) La corriente a través del resistor estará 1) en fase con el voltaje, 2) adelantada 90° al voltaje o 3) retrasada 90° con respecto al voltaje. *b*) Escriba la ecuación de la corriente en el resistor en función del tiempo y determine la frecuencia del voltaje.

15. ●● Se aplica un voltaje alterno a un resistor de 25 Ω que disipa 500 W de potencia. Calcule *a*) las corrientes efectiva y máxima, y *b*) los voltajes efectivo y máximo para el resistor.

16. **EI** ●● Una fuente de voltaje alterno tiene un voltaje máximo de 85 V y una frecuencia de 60 Hz. En el momento $t = 0$, el voltaje es cero. *a*) Un alumno desea calcular el voltaje cuando $t = 1/240$ s. ¿Cuántas respuestas posibles hay? 1) Una, 2) dos o 3) tres. ¿Por qué? *b*) Determine todas las respuestas posibles.

17. ●● Una fuente de voltaje alterno tiene un voltaje rms de 120 V. El voltaje pasa de cero a su valor máximo en 4.20 ms. Escriba una ecuación para el voltaje en función del tiempo.

18. ●● ¿Cuáles son la resistencia y la corriente rms de un monitor de computadora de 100 W y 120 V?

19. ●● Calcule las corrientes rms y máxima que pasan por una bombilla de luz de 40 W y 120 V.

20. ●● Un calentador de 50 kW está diseñado para funcionar con ca de 240 V. Calcule *a*) su corriente máxima y *b*) su voltaje máximo.

21. ●● La corriente en un circuito está determinada por $I = (8.0\text{ A})\,\text{sen}(40\pi t)$ con un voltaje aplicado $V = (60\text{ V})\,\text{sen}(40\pi t)$. *a*) ¿Cuáles son la frecuencia y el periodo de la fuente de voltaje? *b*) ¿Cuál es la potencia promedio entregada al resistor?

22. ●● Las salidas de corriente y voltaje de un generador de ca tienen valores máximos de 2.5 A y 16 V, respectivamente. *a*) ¿Cuál es la salida promedio de potencia del generador? *b*) ¿Cuál es la resistencia efectiva del circuito?

23. ●●● En un resistor de 60 Ω, la corriente que pasa por él se determina como $I = (2.0\text{ A})\,\text{sen}(380t)$. *a*) ¿Cuál es la frecuencia de la corriente? *b*) ¿Cuál es la corriente rms? *c*) ¿Cuánta potencia media se entrega al resistor? *d*) Escriba una ecuación para el voltaje a través del resistor en función del tiempo. *e*) Escriba una ecuación para la potencia entregada al resistor en función del tiempo. *f*) Demuestre que la potencia efectiva obtenida en el inciso *e* es igual a la respuesta en *c*.

21.2 Reactancia capacitiva y 21.3 Reactancia inductiva

24. **OM** En un circuito de ca puramente capacitivo, *a*) la corriente y el voltaje están en fase, *b*) la corriente se adelanta al voltaje, *c*) la corriente se retrasa con respecto al voltaje o *d*) ninguna de las opciones anteriores es verdadera.

25. **OM** Un solo condensador está conectado a una fuente de voltaje alterno. Cuando el voltaje a través del condensador está en su valor máximo, entonces la carga en él *a*) es cero, *b*) es máxima o *c*) ninguna de las respuestas anteriores, sino una opción intermedia.

26. **OM** Un solo inductor está conectado a una fuente de voltaje alterno. Cuando el voltaje a través del inductor está en su valor máximo, entonces la corriente en él no cambia. *a*) Verdadero, *b*) falso o *c*) no es posible determinarlo a partir de la información.

27. **PC** Explique por qué, a bajas frecuencias de ca, un condensador funciona casi como un circuito abierto mientras que un inductor funciona casi como un circuito cerrado.

28. **PC** ¿Es posible que un inductor se oponga a la corriente directa? ¿Y un condensador? Explique cada caso y por qué son diferentes.

29. **PC** Si la corriente que pasa por un condensador de 10 μF se describe con la ecuación $I = (120\text{ A})\,\text{sen}(120\pi t + \pi/2)$, explique por qué el voltaje instantáneo a través de él cuando $t = 0$ es cero mientras que la corriente no lo es en ese momento.

30. ● Calcule la frecuencia a la cual un condensador de 25 μF tiene una reactancia de 25 Ω.

31. ● Un solo condensador de 2.0 μF se conecta con las terminales de una fuente de voltaje de 60 Hz y, con un amperímetro de ca, se mide una corriente de 2.0 mA. ¿Cuál es la reactancia capacitiva del condensador?

32. ● ¿Qué capacitancia tendría 100 Ω de reactancia en un circuito de ca de 60 Hz?

33. ● Con un solo inductor de 50 mH se forma un circuito completo conectándolo a una fuente de voltaje alterno de 120 V y 60 Hz. *a*) ¿Cuál es la reactancia inductiva del circuito? *b*) ¿Cuánta corriente pasa por el circuito? *c*) ¿Cuál es el ángulo de fase entre la corriente y el voltaje aplicado? (Suponga que la resistencia es insignificante.)

34. ● ¿Cuánta corriente pasa por un circuito que sólo contiene un condensador de 50 μF conectado con un generador de ca, con salida de 120 V y 60 Hz?

35. ●● Un condensador variable está en un circuito con una fuente de 120 V y 60 Hz, y al principio tiene 0.25 μF de capacitancia. A continuación se aumenta la capacitancia a 0.40 μF. ¿Cuál es el cambio porcentual en la corriente que pasa por el circuito?

36. ●● Un inductor tiene 90 Ω de reactancia en un circuito de ca de 60 Hz. ¿Cuál es su inductancia?

37. ●● Calcule la frecuencia a la cual un inductor de 250 mH tiene 400 Ω de reactancia.

38. **EI** ●● Se conecta un condensador con una fuente de voltaje alterno, de frecuencia variable. *a*) Si aumenta la frecuencia por un factor de 3, la reactancia capacitiva será 1) 3, 2) $\frac{1}{3}$, 3) 9 o 4) $\frac{1}{9}$ veces la reactancia original. ¿Por qué? *b*) Si la reactancia capacitiva de un condensador a 120 Hz es de 100 W, ¿cuál es su reactancia si cambia la frecuencia a 60 Hz?

39. ●● Se tiene un solo inductor de 150 mH en un circuito con una fuente de voltaje de 60 Hz. Con un amperímetro para ca se mide una corriente de 1.6 A. *a*) ¿Cuál es el voltaje rms de la fuente? *b*) ¿Cuál es el ángulo de fase entre la corriente y ese voltaje?

40. ●● ¿Qué inductancia tiene la misma reactancia que una capacitancia de 10 μF en un circuito de 120 V y 60 Hz?

41. ●● Se conecta un circuito con un solo condensador a una fuente de 120 V y 60 Hz. ¿Cuál es su capacitancia si por el circuito pasa una corriente de 0.20 A?

42. **EI** ●● Se conecta un inductor con una fuente de voltaje alterno de frecuencia variable. *a*) Si la frecuencia disminuye por un factor de 2, la corriente rms será 1) 2, 2) 1/2, 3) 4 o 4) 1/4 veces la corriente efectiva original. ¿Por qué? *b*) Si la corriente efectiva en un inductor, a 40 Hz, es de 9.0 A, ¿qué valor tendrá si la frecuencia cambia a 120 Hz?

21.4 Impedancia: circuitos RLC y 21.5 Resonancia en circuitos

43. **OM** La impedancia de un circuito RLC depende de *a*) la frecuencia, *b*) la inductancia, *c*) la capacitancia o *d*) todo lo anterior.

44. **OM** Si disminuye la capacitancia en un circuito RLC en serie, *a*) aumenta la reactancia capacitiva, *b*) aumenta la reactancia inductiva, *c*) la corriente permanece constante o *d*) el factor de potencia permanece constante.

45. **OM** Cuando un circuito RLC en serie se activa a su frecuencia de resonancia, *a*) sólo se disipa energía en el elemento resistivo, *b*) el factor de potencia tiene un valor de uno, *c*) la potencia que se entrega al circuito es máxima o *d*) todas las opciones anteriores son válidas.

46. **PC** ¿Cuál es la impedancia de un circuito RLC en resonancia, y por qué?

47. **PC** ¿Se entrega potencia a los condensadores o a los inductores de un circuito de ca? ¿Por qué?

48. **PC** ¿Cuáles son los factores que determinan la frecuencia de resonancia de un circuito RLC? ¿La resistencia es un factor? Explique por qué.

49. ● La resistencia de una bobina en un circuito de 60 Hz es de 100 Ω, y su inductancia es de 0.45 H. Calcule *a*) la reactancia de la bobina y *b*) la impedancia del circuito.

50. ● Un circuito RC en serie tiene una resistencia de 200 Ω y una capacitancia de 25 μF, y se conecta a una fuente de 120 V y 60 Hz. *a*) Calcule la reactancia capacitiva y la impedancia del circuito. *b*) ¿Cuánta corriente suministra la fuente?

51. ● Un circuito RL en serie tiene una resistencia de 100 Ω y una inductancia de 100 mH, y se conecta con una fuente de 120 V y 60 Hz. *a*) Calcule la reactancia inductiva y la impedancia del circuito. *b*) ¿Cuánta corriente suministra la fuente?

52. ● Un circuito RC tiene una resistencia de 250 Ω y una capacitancia de 6.0 μF. Si el circuito está activado por una fuente de 60 Hz, calcule *a*) la reactancia capacitiva y *b*) la impedancia del circuito.

53. **EI** ● Un circuito RC tiene una resistencia de 100 Ω y una reactancia capacitiva de 50 Ω. *a*) El ángulo de fase será 1) positivo, 2) cero o 3) negativo. *b*) ¿Cuál es el ángulo de fase de este circuito?

54. ●● Un circuito RLC en serie tiene una resistencia de 25 Ω, una inductancia de 0.30 H y una capacitancia de 8.0 μF. *a*) ¿A qué frecuencia debería funcionar el circuito para transferir la máxima potencia desde la fuente? *b*) ¿Cuál es la impedancia a esa frecuencia?

55. **EI** ●● En un circuito RLC en serie, $R = X_C = X_L = 40\ \Omega$ para determinada frecuencia de la fuente. *a*) Este circuito 1) es inductivo, 2) es capacitivo o 3) está en resonancia. ¿Por qué? *b*) Si se duplica la frecuencia de funcionamiento, ¿cuál será la impedancia del circuito?

56. **EI** ●● *a*) Un circuito RLC en serie está en resonancia. ¿Cuál de los siguientes elementos se puede cambiar sin alterar la resonancia? 1) La resistencia, 2) la capacitancia, 3) la inductancia o 4) la frecuencia. ¿Por qué? *b*) Un resistor, un inductor y un condensador tienen valores de 500 Ω, 500 mH y 3.5 μF, respectivamente. Se conectan a una fuente de potencia de 240 V y 60 Hz. ¿Qué valores de resistencia e inductancia se necesitan para que este circuito esté en resonancia (sin cambiar el condensador)?

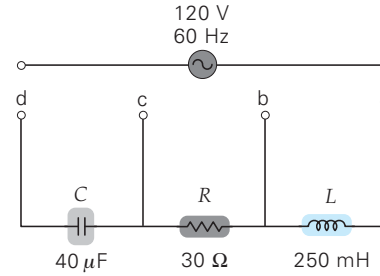
57. ●● ¿Cuánta potencia se disipa en el circuito descrito en el ejercicio 56b utilizando los valores iniciales de resistencia, inductancia y capacitancia?

58. ●● ¿Cuál es la frecuencia de resonancia de un circuito RLC con una resistencia de 100 Ω, una inductancia de 100 mH y una capacitancia de 5.00 μF?

59. ●● El circuito de sintonización de un antiguo receptor de radio tiene una inductancia fija de 0.50 mH y un condensador variable. Si el circuito se sintoniza a una estación de radio que transmite a 980 kHz, en la banda de AM, ¿cuál es la capacitancia del condensador?

60. ●● ¿Cuál debe ser el intervalo del condensador variable del ejercicio 59 para sintonizar toda la banda de AM? [*Sugerencia:* véase la tabla 20.1.]

61. ●● Calcule las corrientes que suministra la fuente de ca para todas las conexiones posibles en la ▼figura 21.15.



◀ **FIGURA 21.15 Un circuito RLC en serie** Véase el ejercicio 61.

62. **El** ●● Una bobina con una resistencia de 30 Ω y una inductancia de 0.15 H se conecta con una fuente de 120 V y 60 Hz. *a*) El ángulo de fase de este circuito es 1) positivo, 2) cero o 3) negativo. ¿Por qué? *b*) ¿Cuál es el ángulo de fase del circuito? *c*) ¿Cuánta corriente rms pasa por el circuito? ¿Cuál es la potencia promedio entregada al circuito?

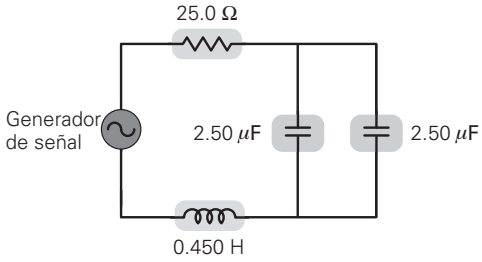
63. ●● Una soldadora pequeña usa una fuente de voltaje de 120 V a 60 Hz. Cuando está en operación, requiere 1200 W de potencia, y el factor de potencia es de 0.75. *a*) Calcule la corriente rms en la soldadora.

64. ●● Se conecta un circuito en serie con una fuente de poder de 220 V y 60 Hz. El circuito tiene los siguientes componentes: un resistor de 10 Ω, una bobina de 120 Ω de reactancia inductiva y un condensador con 120 Ω de reactancia. Calcule el voltaje efectivo a través del *a*) resistor, *b*) inductor y *c*) condensador.

65. ●● Un circuito RLC en serie tiene una resistencia de 25 Ω, una capacitancia de 0.80 μF y una inductancia de 250 mH. El circuito se conecta con una fuente de frecuencia variable, con un voltaje efectivo de salida fijo de 12 V. Si la frecuencia suministrada se ajusta a la frecuencia de resonancia del circuito, ¿cuál es el voltaje efectivo a través de cada uno de los elementos del circuito?

66. ●● *a*) En los ejercicios 64 y 65, determine la suma numérica (escalar) de los voltajes rms a través de los tres elementos del circuito y explique por qué es mucho mayor que la fuente del voltaje. *b*) Determine la suma de estos voltajes utilizando las técnicas fasoriales adecuadas y demuestre que su resultado es igual al voltaje de la fuente.

67. **El** ●● *a*) Si el circuito de la ▼figura 21.16 está en resonancia, su impedancia es 1) mayor de 25 Ω, 2) igual a 25 Ω o 3) menor que 25 Ω. ¿Por qué? *b*) Si la frecuencia de la fuente es de 60 Hz, ¿cuál es la impedancia del circuito?



▲ **FIGURA 21.16 Sintonización de la resonancia**
Véase el ejercicio 67.

68. ●●● Un circuito RLC en serie, con una resistencia de 400 Ω, tiene reactancias capacitiva e inductiva de 300 y 500 Ω, respectivamente. *a*) ¿Cuál es el factor de potencia del circuito? *b*) Si el circuito trabaja a 60 Hz, ¿qué capacitancia adicional se debe conectar a la capacitancia original para obtener un factor de potencia igual a la unidad, y cómo deben conectarse los condensadores?

69. ●●● Un circuito RLC en serie tiene sus componentes con $R = 50\ \Omega$, $L = 0.15$ H y $C = 20\ \mu$F. El circuito está conectado a una fuente de 120 V y 60 Hz. ¿Cuál es la potencia entregada al circuito, expresada como porcentaje de la potencia entregada cuando el circuito está en resonancia?

Ejercicios adicionales

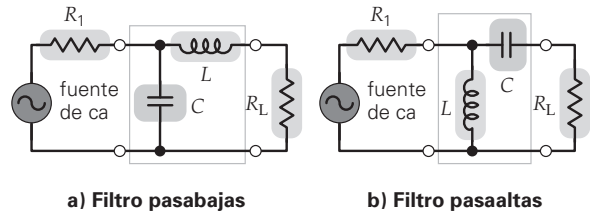
70. El circuito de un receptor de radio tiene una inductancia de 1.50 μH, y se sintoniza a una estación de FM, de 98.9 MHz, ajustando un condensador variable. Cuando el circuito está sintonizado con esa estación, *a*) ¿cuál es su reactancia inductiva? *b*) ¿Cuál es su reactancia capacitiva? *c*) ¿Cuál es su capacitancia?

71. Un circuito conectado a una fuente de 110 V y 60 Hz contiene un resistor de 50 Ω, y una bobina de 100 mH de inductancia. Calcule *a*) la reactancia de la bobina, *b*) la impedancia del circuito, *c*) la corriente que pasa por el circuito y *d*) la potencia que disipa la bobina. *e*) Calcule el ángulo de fase entre la corriente y el voltaje aplicado.

72. Se conecta un condensador de 1.0 μF con una fuente de 120 V y 60 Hz. *a*) ¿Cuál es la reactancia capacitiva del circuito? *b*) ¿Cuánta corriente pasa por el circuito? *c*) ¿Cuál es el ángulo de fase entre la corriente y el voltaje aplicado?

73. **El** *a*) Si un circuito RLC está en resonancia, su ángulo de fase es 1) positivo, 2) cero o 3) negativo. ¿Por qué? *b*) Un circuito tiene una reactancia inductiva de 280 Ω a 60 Hz. ¿Qué valor de capacitancia llevaría a ese circuito a la resonancia?

74. El circuito de la ▼figura 21.17a se llama *filtro pasabajas*, o filtro de paso bajo, porque una gran corriente y un gran voltaje (y, por lo tanto, mucha potencia) se entregan al resistor de carga (R_L) sólo cuando la frecuencia de la fuente es baja. El circuito de la figura 21.17b se llama *filtro pasaaltas* o filtro de paso alto, porque una gran corriente y un gran voltaje (y, por lo tanto, mucha potencia) se entregan a la carga sólo cuando la frecuencia de la fuente es alta. Describa conceptualmente por qué estos circuitos tienen tales características.



▲ **FIGURA 21.17 Filtros pasabajas y pasaaltas**
Véase el ejercicio 74.

PHYSLET®
Los siguientes problemas de física Physlet se pueden usar con este capítulo.
31.1, 31.3, 31.4, 31.5, 31.8, 31.9, 31.11, 31.12, 31.14

CAPÍTULO 22

REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN DE LA LUZ

22.1 Frentes de onda y rayos 706

22.2 Reflexión 707

22.3 Refracción 708

22.4 Reflexión interna total y fibras ópticas 717

22.5 Dispersión 721

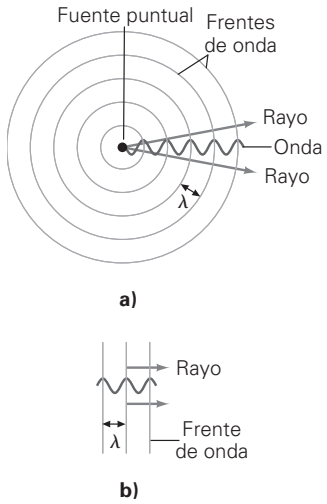
HECHOS DE FÍSICA

- A causa de la reflexión total interna, las fibras ópticas permiten que las señales viajen por largas distancias sin necesidad de repetidores (amplificadores), para compensar las reducciones en la intensidad de la señal. Los repetidores de fibras ópticas, por lo general, están separados unos 100 km (62 mi), en comparación con una distancia de 1.5 km (aproximadamente 1 mi) que separa a los repetidores en los sistemas eléctricos (basados en cables).
- Cada día se instalan nuevos cables de fibras ópticas para redes de computadoras que equivalen a darle tres vueltas a la Tierra. Las fibras ópticas tienen diámetros mucho menores que los cables de cobre. Las fibras son tan pequeñas que miden 10 micrones de diámetro. En comparación, el cabello humano, en promedio, mide 25 micrones de diámetro.
- La mayoría de las lentes de cámara están cubiertas con una fina película para reducir la pérdida de luz a causa de la reflexión. Para una lente común de cámara constituida por siete elementos, alrededor del 50% de la luz se perdería por la reflexión si las lentes no estuvieran cubiertas con estas finas películas.
- En 1998, científicos del MIT fabricaron un espejo perfecto, es decir, con 100% de reflexión. Un tubo alineado con este tipo de espejo transmitiría luz a grandes distancias mejor que las fibras ópticas.

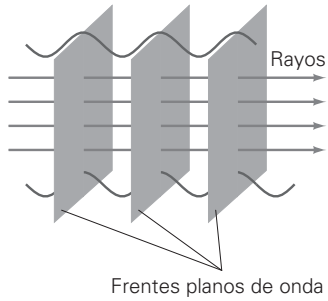
Vivimos en un mundo visual, rodeados por atractivas imágenes, como la que se ve en la foto. La manera como se forman esas imágenes es algo que consideramos obvio, hasta que vemos algo que no resulta fácil de explicar. La *óptica* es el estudio de la luz y la visión. La visión humana requiere de la *luz visible*, cuya longitud de onda va de 400 a 700 nm (véase la figura 20.23). Todas las ondas electromagnéticas comparten propiedades ópticas, como la reflexión y la refracción. La luz se comporta como una onda en su propagación (capítulo 24) y como una partícula (fotón) cuando interactúa con la materia.

En este capítulo investigaremos los fenómenos ópticos básicos de reflexión, refracción, reflexión total interna y dispersión. Los principios que rigen la reflexión explican el comportamiento de los espejos, mientras que los que rigen la refracción explican las propiedades de las lentes. Estos y otros principios nos permiten comprender muchos fenómenos ópticos de la vida diaria: por qué un prisma de vidrio descompone la luz en un espectro de colores, qué provoca los espejismos, cómo se forman los arco iris y por qué parecen acortarse las piernas de una persona que está de pie dentro de un lago o una piscina. También explicaremos algunos asuntos menos familiares, como el campo fascinante de las fibras ópticas.

Para investigar muchos aspectos de las propiedades de la luz, en especial la forma en que se propaga, se puede utilizar un método geométrico sencillo a base de líneas rectas y ángulos. Para estos fines no es necesario ocuparse de la naturaleza física (ondulatoria) de las ondas electromagnéticas, que se describió en el capítulo 20. Los principios de la óptica geométrica se presentarán aquí y se aplicarán con más detalle en el capítulo 23, al estudiar los espejos y las lentes.



▲ **FIGURA 22.1 Frentes de onda y rayos** Un frente de onda se define por los puntos adyacentes de una onda que están en fase, como las crestas o los valles. Una línea perpendicular al frente de onda en la dirección de la propagación de esta última se llama rayo. ***a)*** Cerca de una fuente puntual, los frentes de onda son circulares en dos dimensiones y esféricos en tres dimensiones. ***b)*** Muy lejos de una fuente puntual, los frentes de onda son aproximadamente lineales o planos, mientras que los rayos son casi paralelos.



▲ **FIGURA 22.2 Rayos de luz** Una onda plana viaja en una dirección perpendicular a sus frentes de onda. Un haz luminoso se puede representar con un grupo de rayos paralelos (o con un solo rayo).

22.1 Frentes de onda y rayos

OBJETIVO: Definir y explicar los conceptos de frente de onda y rayo.

Las ondas, ya sean electromagnéticas o de otro tipo, se describen en términos de los frentes de onda. Un **frente de onda** es la línea o superficie definida por las partes adyacentes de una onda que están en fase. Si se traza un arco que pase por una de las crestas de una onda circular en el agua, que se aleja de una fuente puntual, todas las partículas del arco estarán en fase (◂figura 22.1a). Lo mismo sucedería con un arco a lo largo de una onda. Para una onda esférica tridimensional, como una de sonido o de luz, emitida de una fuente puntual, el frente de onda es una superficie esférica, no un círculo.

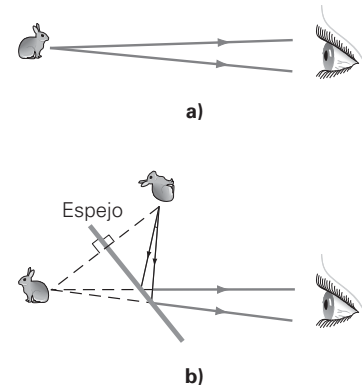
Muy lejos de la fuente, la curvatura de un segmento corto de una onda circular o esférica es extremadamente pequeña. Se puede considerar que ese segmento es un *frente de onda lineal* (en dos dimensiones) o un **frente de onda plano** (en tres dimensiones), de la misma forma que se supone que en un lugar determinado la superficie de la Tierra es plana (figura 22.1b). También es posible generar un frente de onda plano de forma directa, mediante una superficie luminosa plana. En un medio uniforme, los frentes de onda se propagan alejándose de la fuente, con una rapidez que es característica del medio. Esto se vio con las ondas sonoras, en el capítulo 14, y lo mismo sucede con la luz, aunque su rapidez es mucho mayor. La rapidez de la luz es máxima en el vacío: $c = 3.00 \times 10^8$ m/s. Para fines prácticos, se considera que la rapidez de la luz en el aire es igual que en el vacío.

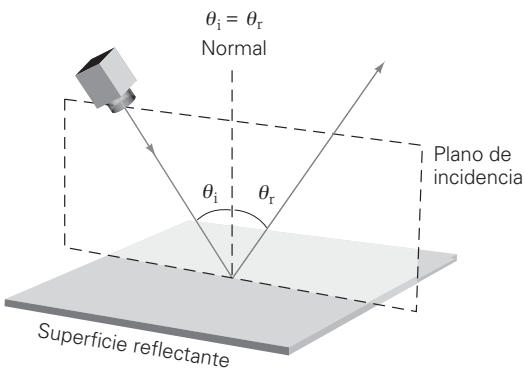
La descripción geométrica de una onda en términos de frentes de onda tiende a ignorar el hecho de que en realidad la onda está oscilando, al igual que las que se estudiaron en el capítulo 13. Esta simplificación va todavía más allá con el concepto de un rayo. Como se observa en la figura 22.1, una línea perpendicular a una serie de frentes de onda, y que apunta en la dirección de propagación, se llama **rayo**. Note que el rayo apunta en dirección del flujo de energía de la onda. Se supone que una onda plana viaja en línea recta en un medio, en la dirección de sus rayos, y perpendicular a sus frentes de onda. Un haz de luz se puede representar con un grupo de rayos, o con un solo rayo (◂figura 22.2). La representación de la luz mediante rayos es adecuada para describir muchos fenómenos ópticos.

¿Cómo es que vemos los objetos que están a nuestro alrededor? Los vemos porque los rayos de esos objetos, o los rayos que parecen provenir de ellos, entran en nuestros ojos (▾figura 22.3). Ahí, los rayos forman las imágenes correspondientes en la retina. En ocasiones, los rayos provienen directamente de los objetos —como en el caso de las fuentes de luz—, o bien, se reflejan o se refractan en ellos o en otros sistemas ópticos. En este proceso, nuestros ojos y cerebro trabajan juntos; sin embargo, no pueden decirnos si los rayos en realidad provienen de los objetos o sólo *aparentan* provenir de éstos. Por eso es que los magos consiguen engañar nuestra vista con ilusiones aparentemente imposibles.

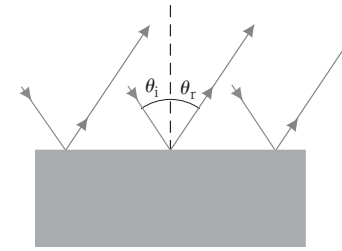
El empleo de representaciones geométricas de frentes de onda y rayos para explicar fenómenos como la reflexión y la refracción de la luz se llama **óptica geométrica**. Sin embargo, hay algunos otros fenómenos, como la interferencia de la luz, que no se pueden analizar de esta forma, pues sólo se explican en términos de las características ondulatorias reales. Estos fenómenos se describirán en el capítulo 24.

▶ **FIGURA 22.3 ¿Cómo es que vemos los objetos?** Los vemos porque ***a)*** los rayos provenientes de ellos o ***b)*** los rayos que aparentan provenir de ellos entran en nuestros ojos.





◀ **FIGURA 22.4 La ley de la reflexión** Según la ley de la reflexión, el ángulo de incidencia (θ_i) es igual al ángulo de reflexión (θ_r). Note que los ángulos se miden a partir de una normal (una línea perpendicular a la superficie reflectante). La normal y los rayos incidente y reflejado siempre están en el mismo plano.



a) Diagrama de la reflexión regular o especular

b) Fotografía de la reflexión regular o especular

▲ **FIGURA 22.5 Reflexión especular (regular)** ***a)*** Cuando un haz de luz se refleja en una superficie lisa y los rayos reflejados son paralelos, se dice que la reflexión es regular o especular. ***b)*** Reflexión regular o especular en una superficie de agua tranquila produce una imagen de espejo, casi perfecta, de las montañas de sal en esta salina australiana. (Véase el pliego a color al final del libro.)

22.2 Reflexión

OBJETIVOS: *a*) Explicar la ley de la reflexión y *b*) diferenciar entre reflexión regular (especular) e irregular (difusa).

La reflexión de la luz es un fenómeno óptico de enorme importancia: si la luz no se reflejara en los objetos que nos rodean hacia nuestros ojos, simplemente no los veríamos. La **reflexión** implica la absorción y la reemisión de la luz por medio de vibraciones electromagnéticas complejas en los átomos del medio reflectante. Sin embargo, este fenómeno se explica con facilidad mediante los rayos.

Un rayo de luz que incide sobre una superficie se describe con el **ángulo de incidencia (θ_I)**. Se mide a partir de una *normal*: una línea perpendicular a la superficie reflectante o reflectora (▲figura 22.4). Asimismo, el rayo reflejado se describe por su **ángulo de reflexión (θ_r)**, que también se mide con respecto a la normal. La relación entre estos ángulos se expresa con la **ley de la reflexión**: el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión, es decir

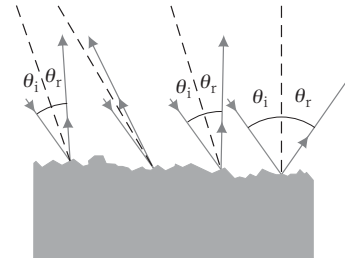
$$\theta_i = \theta_r \qquad \textit{ley de la reflexión} \tag{22.1}$$

Otros dos atributos de la reflexión son: 1) el rayo incidente, el rayo reflejado y la normal están en un mismo plano, que a veces se llama plano de incidencia, y 2) los rayos incidente y reflejado están en lados opuestos de la normal.

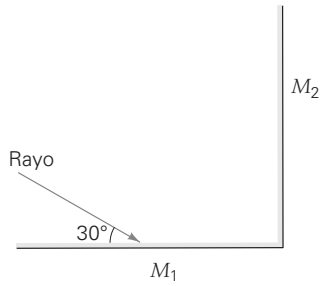
Cuando la superficie reflectante es lisa, los rayos reflejados originados por rayos incidentes paralelos, también son paralelos (▶figura 22.5a). Esta clase de reflexión se llama **reflexión regular** o **especular**. La reflexión en un espejo plano y bien pulido es especular o regular (figura 22.5b). Sin embargo, si la superficie reflectante es áspera, los rayos reflejados no son paralelos, por la naturaleza irregular de la superficie (▶figura 22.6). A esta clase de reflexión se le llama **reflexión irregular** o **difusa**. La reflexión de la luz en esta página es un ejemplo de reflexión difusa porque el papel es áspero en el nivel microscópico. Las sección A fondo 22.1, en la p. 709, referente a una noche oscura y lluviosa, describe con mayor precisión la diferencia entre la reflexión especular y la difusa en un caso de la vida real.

Note que en las figuras 22.5a y 22.6 la ley de la reflexión se sigue aplicando de forma local, en las reflexiones especular y difusa. Sin embargo, la clase de reflexión de que se trate determina si se ven imágenes en una superficie reflectante. En la reflexión especular, los rayos reflejados, que son paralelos, producen una imagen al examinarlos con un sistema óptico, como el ojo o una cámara. La reflexión difusa no produce una imagen, porque la luz se refleja en varias direcciones.

Tanto la experiencia con la fricción como las investigaciones directas demuestran que todas las superficies son ásperas a escala microscópica. Entonces, ¿qué determina si la reflexión es especular o difusa? En general, si las dimensiones de las irregularidades superficiales son mayores que la longitud de onda de la luz, la reflexión es difusa. Así, para fabricar un buen espejo, se debe pulir vidrio (con un recubrimiento metálico) o algún metal cuando menos hasta que las irregularidades superficiales tengan más o menos el mismo tamaño que la longitud de onda de la luz. Recuerde que, en el capítu-



▲ **FIGURA 22.6 Reflexión difusa (irregular)** Los rayos reflejados en una superficie relativamente áspera, como esta página, no son paralelos; se dice que la reflexión es irregular o difusa. (Note que se sigue aplicando la ley de la reflexión localmente en cada rayo individual.)

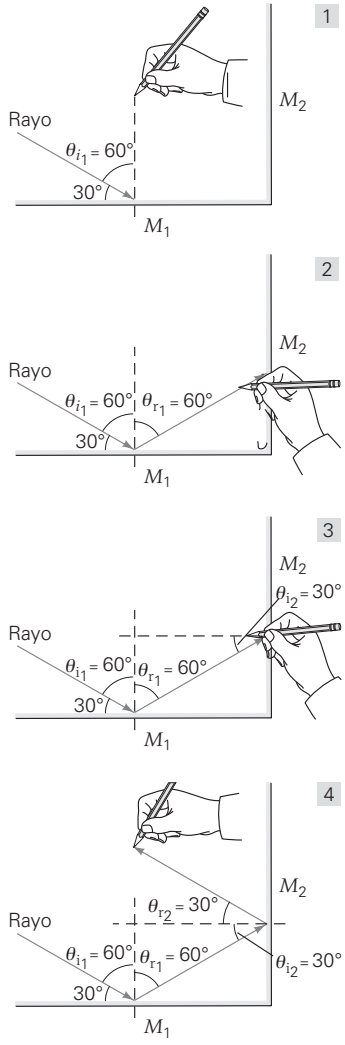


▲ **FIGURA 22.7** Trazo de un rayo Véase el ejemplo 22.1.

Nota: es extremadamente importante trazar diagramas como éstos en el estudio de la óptica geométrica.

APRENDER DIBUJANDO

Trazado de los rayos reflejados



lo 20, se dijo que la longitud de onda de la luz visible es del orden de 10^{-7} m. (Aprenderemos más acerca de la reflexión en un espejo en el ejemplo 22.1.)

La reflexión difusa nos permite ver objetos iluminados, como la Luna. Si la superficie esférica de la Luna fuera lisa, a los ojos de un observador en la Tierra sólo llegaría la luz solar procedente de una pequeña región, y sólo se vería esa pequeña área iluminada. También es posible ver el haz luminoso de *un flash* fotográfico o de una bombilla de luz gracias a la reflexión difusa en el polvo y las partículas en el aire.

Ejemplo 22.1 ■ Trazado de los rayos reflejados

Hay dos espejos, M_1 y M_2, perpendiculares entre sí, y un rayo luminoso incide en uno de ellos, como se ve en la ◂figura 22.7. *a*) Trace un diagrama de la trayectoria del rayo de luz. *b*) Determine la dirección del rayo después de reflejarse en M_2.

Razonamiento. La ley de la reflexión nos permitirá determinar la dirección del rayo después de llegar a los dos espejos.

Solución.

Dado: $\theta = 30°$ (ángulo en relación con M_1)

Encuentre: *a*) Un diagrama con el rayo de luz
b) θ_{r_2} (ángulo de reflexión de M_2)

Se siguen los pasos 1 a 4 de la sección Aprender dibujando:

a) 1. Como los rayos incidentes y reflejados se miden desde la normal (una línea perpendicular a la superficie reflectante), se traza la normal al espejo M_1 en el punto donde el rayo incidente llega a él. Por la geometría, se observa que el ángulo de incidencia en M_1 es $\theta_{i_1} = 60°$.

2. De acuerdo con la ley de reflexión, el ángulo de reflexión de M_1 también es $\theta_{r_1} = 60°$. A continuación se traza este rayo reflejado, con 60° de ángulo de reflexión, y se prolonga hasta llegar a M_2.

3. Se traza otra normal a M_2, en el punto donde el rayo llega a él. Según la geometría (examine el triángulo del diagrama), el ángulo de incidencia en M_2 es $\theta_{i_2} = 30°$. (¿Por qué?)

b) 4. El ángulo de reflexión de M_2 es $\theta_{r_2} = \theta_{i_2} = 30°$. Éste es el rayo final reflejado después de llegar a los dos espejos.

¿Y si se invierten las direcciones de los rayos? En otras palabras, si primero incide un rayo en M_2, en dirección contraria a la que se trazó en *b*, ¿se invertirán las direcciones de todos los rayos? Dibuje otro diagrama para demostrar que, en efecto, ése es el caso. Los rayos de luz son reversibles.

Ejercicio de refuerzo. En la parte trasera de algunos camiones de 18 ruedas se lee un letrero que dice: "Si no puede ver mi espejo, no lo puedo ver a usted". ¿Qué significa esto? (*Las respuestas de todos los ejercicios de refuerzo aparecen al final del libro.*)

22.3 Refracción

OBJETIVOS: *a*) Explicar la refracción en términos de la ley de Snell y del índice de refracción y b) presentar ejemplos de los fenómenos de refracción.

Refracción es el cambio de dirección de una onda en la interfase donde pasa de un medio transparente a otro. En general, cuando una onda incide en la frontera interfase entre dos medios, parte de la energía de la onda se refleja y otra parte se transmite. Por ejemplo, cuando la luz que viaja por el aire incide sobre un material transparente, como el vidrio, se refleja parcialmente y se transmite también de forma parcial (▸figura 22.8). Pero la dirección de la luz transmitida es distinta de la de la luz incidente. Se dice entonces que la luz se ha refractado; en otras palabras, ha cambiado de dirección.

Este cambio de dirección se debe al hecho de que la luz viaja con distinta rapidez en medios diferentes. De forma intuitiva, cabe esperar que el paso de la luz sea más lento a través de un medio con más átomos por unidad de volumen y, de hecho, la rapidez de la

A FONDO 22.1 UNA NOCHE OSCURA Y LLUVIOSA

Cuando uno conduce en una noche sin lluvia, el asfalto y los letreros en las calles se distinguen con claridad. Sin embargo, en una noche oscura y lluviosa, aun cuando se lleven encendidos los faros, apenas se puede ver el camino por delante. Cuando se acerca un automóvil, la situación empeora. Se ven las luces reflejadas de los faros del coche que se acerca, en la superficie del asfalto, y parecen más brillantes de lo normal. Es común que uno quede deslumbrado, sin poder ver nada, excepto el reflejo de los faros que se acercan.

¿Cuál es la causa de estas condiciones? Cuando la superficie del asfalto está seca, la reflexión de la luz en la carretera es irregular o difusa, porque la superficie es áspera. La luz de los faros que llega al asfalto se refleja en todas direcciones, y parte de ella se regresa hacia el conductor, lo que le permite ver con claridad el asfalto (de la misma forma en que la página de este libro se puede leer porque el papel es áspero a nivel microscópico). Sin embargo, cuando la superficie del asfalto está mojada, el agua llena las grietas y convierte al camino en una superficie reflectante relativamente lisa (figura 1a). La luz de los faros se refleja entonces hacia delante. La reflexión que normalmente es difusa ha desaparecido y, en su lugar, se genera una reflexión especular. Entonces se forman imágenes de los edificios iluminados y de las luces de las calles, volviendo borrosa la superficie del camino ante los ojos de los conductores; la reflexión especular de los faros de un vehículo que se acerca dificultará aún más que pueda distinguirse el asfalto (figura 1b).

Además de las superficies mojadas y resbalosas, la reflexión especular es una de las causas principales de accidentes en las noches con lluvia; así, en estas condiciones se aconseja tener más precaución.

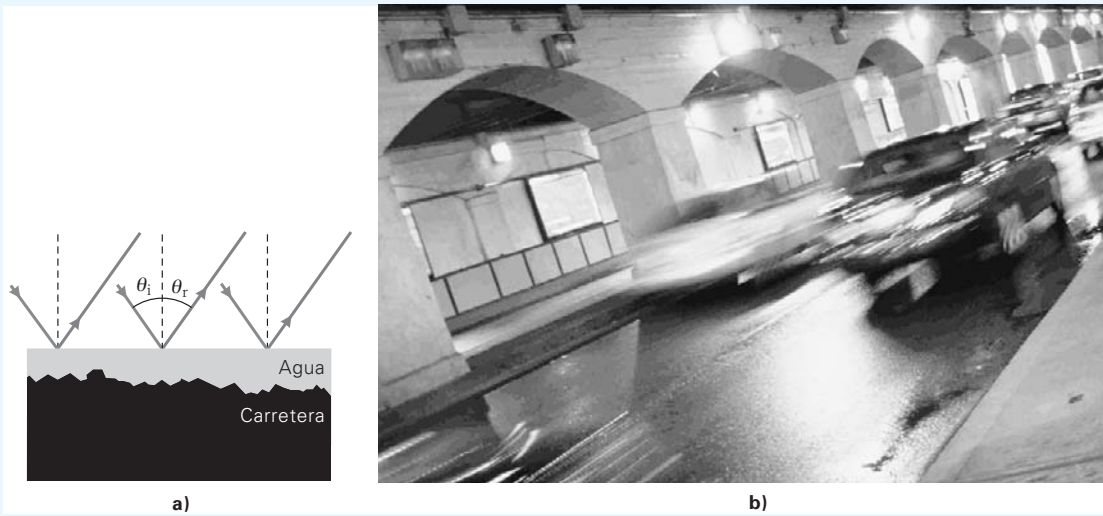


FIGURA 1 De difusa a especular ***a)*** El agua sobre la superficie del camino convierte la reflexión difusa, que había antes de la lluvia, en reflexión especular. ***b)*** Así, en lugar de ver el camino, el conductor sólo percibe las imágenes reflejadas de luces y edificios. (Véase el pliego a color al final del libro.)

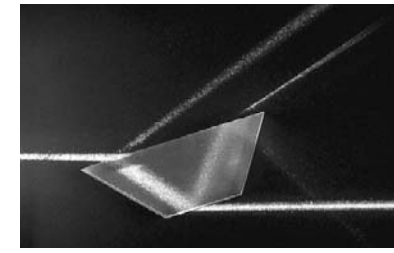
luz por lo general es menor en los medios más densos. Por ejemplo, la rapidez de la luz en el agua es aproximadamente el 75% de la que tiene en el aire o en el vacío. La figura 22.9a muestra la refracción de la luz en una interfase aire-agua.

El cambio en la dirección de la propagación de la onda se describe con el **ángulo de refracción**. En la figura 22.9b, θ_1 es el ángulo de incidencia, y θ_2 es el ángulo de refracción. Utilizamos las notaciones de θ_1 y θ_2 para los ángulos de incidencia y refracción para evitar confusiones con θ_i y θ_r, que corresponden a los ángulos de incidencia y reflexión. El físico holandés Willebrord Snell (1580-1626) descubrió una relación entre los ángulos (θ) y la rapidez (v) de la luz en dos medios (figura 22.9b):

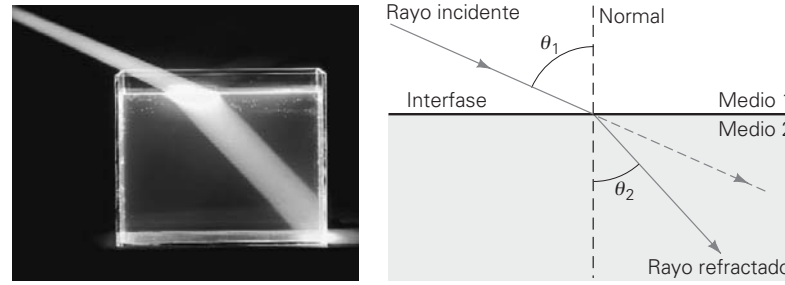
$$\frac{\operatorname{sen}\theta_1}{\operatorname{sen}\theta_2} = \frac{v_1}{v_2} \qquad \textit{ley de Snell} \qquad (22.2)$$

Esta ecuación se llama **ley de Snell**. Note que θ_1 y θ_2 siempre se miden con respecto a la normal.

Así, la luz se refracta cuando pasa de un medio a otro, porque su rapidez es distinta en los dos medios. La rapidez de la luz es máxima en el vacío; por eso, es convenien-



▲ **FIGURA 22.8 Reflexión y refracción** Un rayo de luz incide en un prisma trapezoidal desde la izquierda. Una parte del haz se refleja y otra se refracta. El rayo refractado se refleja y se refracta parcialmente en la superficie inferior entre vidrio y aire. (Véase el pliego a color al final del libro.)



a) b)

▶ **FIGURA 22.9 La refracción** ***a)*** La luz cambia de dirección al entrar en un medio diferente. (Véase el pliego a color al final del libro.) ***b)*** El rayo reflejado se describe con el ángulo de refracción, θ_2, medido a partir de la normal.

PHYSLET®

Ilustración 34.1 Principio de Huygens y refracción.

Nota: cuando la luz se refracta:

- su rapidez y su longitud de onda cambian;
- su frecuencia permanece constante.

te comparar su rapidez en otros medios con este valor constante (c). Eso se hace definiendo un cociente llamado **índice de refracción (n)**:

$$n = \frac{c}{v}\left(\frac{\text{rapidez de la luz en el vacío}}{\text{rapidez de la luz en el medio}}\right) \tag{22.3}$$

Como se trata de una razón entre valores de rapidez, el índice de refracción es una cantidad adimensional. En la tabla 22.1 se presentan los índices de refracción de varias sustancias. Hay que subrayar que esos valores son válidos para una longitud de onda específica de la luz. Se especifica la longitud de onda porque v y, en consecuencia n, difieren ligeramente para distintas longitudes de onda. (Ésta es la causa de la dispersión, que describiremos más adelante en este capítulo.) Los valores de n que presenta la tabla se usarán en ejemplos y ejercicios de este capítulo para todas las longitudes de onda de la luz en la región visible, a menos que se indique otra cosa. Observe que n siempre es mayor que 1, porque la rapidez de la luz en el vacío es mayor que la que tiene en cualquier material ($c > v$).

La frecuencia (f) de la luz no cambia cuando entra en otro medio, pero su longitud de onda en un material (λ_m) difiere de la que presenta en el vacío, como se demuestra con facilidad:

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\lambda f}{\lambda_m f}$$

o

$$n = \frac{\lambda}{\lambda_m} \tag{22.4}$$

Entonces, la longitud de onda de la luz en el medio es $\lambda_m = \lambda/n$. Como $n > 1$, entonces $\lambda_m < \lambda$.

TABLA 22.1

Índices de refracción (a λ = 590 nm)*

Sustancia	*n*
Aire	1.00029
Agua	1.33
Hielo	1.31
Alcohol etílico	1.36
Cuarzo fundido	1.46
Ojo humano	1.336–1.406
Poliestireno	1.49
Aceite (valor típico)	1.50
Vidrio (según el tipo)†	1.45–1.70
Crown	1.52
Flint	1.66
Circón	1.92
Diamante	2.42

*Un nanómetro (nm) equivale a 10^{-9} m.
†El vidrio crown es un vidrio de silicato de sosa y cal; el vidrio flint es de silicato de plomo y álcali. El vidrio flint es más dispersor que el vidrio crown (sección 22.5).

Ejemplo 22.2 ■ La rapidez de la luz en el agua: índice de refracción

La luz de un láser, con longitud de onda de 632.8 nm, pasa del aire al agua. ¿Cuáles son la rapidez y la longitud de onda de esta luz de láser en el agua?

Razonamiento. Si se conoce el índice de refracción (n) de un medio, la rapidez y la longitud de onda de la luz en ese medio se calculan con las ecuaciones 22.3 y 22.4.

Solución.

Dado: $n = 1.33$ (de la tabla 22.1)
$\lambda = 632.8$ nm
$c = 3.00 \times 10^8$ m/s (rapidez de la luz en el aire)

Encuentre: v y λ_m (la rapidez y la longitud de onda de la luz en el agua)

Como $n = c/v$,

$$v = \frac{c}{n} = \frac{3.00 \times 10^8 \text{ m/s}}{1.33} = 2.26 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Note que $1/n = v/c = 1/1.33 = 0.75$. Por consiguiente, v es el 75% de la rapidez de la luz en el vacío. Además, $n = \lambda/\lambda_m$, de manera que

$$\lambda_m = \frac{\lambda}{n} = \frac{632.8 \text{ nm}}{1.33} = 475.8 \text{ nm}$$

Ejercicio de refuerzo. La rapidez de la luz con longitud de onda de 500 nm (en el aire) en un líquido determinado es 2.40×10^8 m/s. ¿Cuál es el índice de refracción de ese líquido y la longitud de onda de la luz en él?

El índice de refracción, n, es una medida de la rapidez de la luz en un material transparente; técnicamente es una medida de la *densidad óptica* del material. Por ejemplo, la rapidez de la luz en el agua es menor que en el aire, por lo que se dice que el agua es ópticamente más densa que el aire. (En general, la densidad óptica se correlaciona con la densidad de masa. Sin embargo, en algunos casos, un material con mayor densidad óptica que otro tiene una menor densidad de masa.) Así, cuanto mayor es el índice de refracción de un material, mayor es su densidad óptica y menor es la rapidez de la luz en él.

Para fines prácticos, el índice de refracción se mide con respecto al aire, y no con respecto al vacío, ya que la rapidez de la luz en el aire es muy cercana a c, y

$$n_{\text{aire}} = \frac{c}{v_{\text{aire}}} \approx \frac{c}{c} = 1$$

(De acuerdo con la tabla 22.1, $n_{\text{aire}} = 1.00029$, por lo que supondremos que $n_{\text{aire}} = 1$.)

Una forma más práctica de la ley de Snell es la siguiente:

$$\frac{\operatorname{sen}\theta_1}{\operatorname{sen}\theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{c/n_1}{c/n_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

o sea

$$n_1 \operatorname{sen}\theta_1 = n_2 \operatorname{sen}\theta_2 \qquad \textit{ley de Snell (otra forma)} \qquad (22.5)$$

donde n_1 y n_2 son los índices de refracción del primero y el segundo medios, respectivamente.

Es posible utilizar la ecuación 22.5 para medir el índice de refracción. Si el primer medio es el aire, entonces $n_1 \approx 1$ y $n_2 \approx \operatorname{sen}\theta_1/\operatorname{sen}\theta_2$. Así, sólo se necesita medir los ángulos de incidencia y de refracción para determinar de forma experimental el índice de refracción de un material. Por otra parte, si se conoce el índice de refracción de un material, se aplica la ley de Snell para determinar el ángulo de refracción, para cualquier ángulo de incidencia.

También hay que hacer notar que el seno del ángulo de refracción es inversamente proporcional al índice de refracción: $\operatorname{sen}\theta_2 \approx \operatorname{sen}\theta_1/n_2$. Por consiguiente, para determinado ángulo de incidencia, cuanto mayor es el índice de refracción, menor es sen θ_2, y menor el ángulo de refracción θ_2.

De forma más general, son válidas las siguientes relaciones:

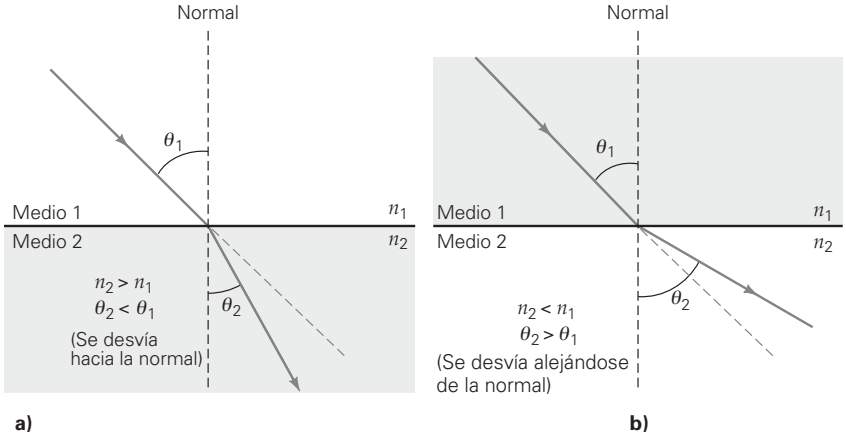
- Si el segundo medio es ópticamente más denso que el primero ($n_2 > n_1$), el rayo se refracta *hacia* la normal ($\theta_2 < \theta_1$), como se ve en la ▼figura 22.10a.
- Si el segundo medio es ópticamente menos denso que el primero ($n_2 < n_1$), el rayo se refracta *alejándose* de la normal ($\theta_2 > \theta_1$), como se observa en la figura 22.10b.

PHYSLET

Exploración 34.4 Principio de Fermat y ley de Snell

Nota: durante la refracción, el producto de n sen θ permanece constante de un medio a otro.

▼ **FIGURA 22.10 Índice de refracción y desviación de los rayos** ***a)*** Cuando el segundo medio es ópticamente más denso que el primero ($n_2 > n_1$), el rayo se refracta hacia la normal, como en el caso de la luz que pasa del aire al agua. ***b)*** Cuando el segundo medio es ópticamente menos denso que el primero ($n_2 < n_1$), el rayo se refracta alejándose de la normal. [Tal sería el caso del rayo del inciso *a* si se trazara en reversa, yendo del medio 2 al medio 1.]



Ejemplo integrado 22.3 ■ Ángulo de refracción: la ley de Snell

La luz en agua incide sobre una pieza de vidrio crown, a un ángulo de 37° (con respecto a la normal). *a*) El rayo resultante 1) se desviará hacia la normal, 2) se desviará alejándose de la normal o 3) no se desviará en lo absoluto. Elabore un diagrama para ilustrar la respuesta. *b*) ¿Cuál es el ángulo de refracción?

a) Razonamiento conceptual. Se dispone de la tabla 22.1 para consultar los índices de refracción del agua y del vidrio crown. Según la forma alternativa de la ley de Snell (ecuación 22.5), $n_1 \operatorname{sen} \theta_1 = n_2 \operatorname{sen} \theta_2$, de manera que la respuesta correcta es la 1. Como $n_2 > n_1$, el ángulo de refracción debe ser menor que el ángulo de incidencia ($\theta_2 < \theta_1$). Ya que tanto θ_1 como θ_2 se miden con respecto a la normal, el rayo refractado se desviará hacia la normal. En este caso el diagrama de rayos es idéntico al de la figura 22.10a.

b) Razonamiento cuantitativo y solución. De nuevo, lo más práctico en este caso es la forma alternativa de la ley de Snell (ecuación 22.5). (¿Por qué?) Se listan los datos:

Dado: $\theta_1 = 37°$
$n_1 = 1.33$ (agua, a partir de la tabla 22.1)
$n_2 = 1.52$ (vidrio crown, de la tabla 22.1)

Encuentre: *b*) θ_2 (ángulo de refracción)

Para calcular el ángulo de refracción se emplea la ecuación 22.5,

$$\operatorname{sen} \theta_2 = \frac{n_1 \operatorname{sen} \theta_1}{n_2} = \frac{(1.33)(\operatorname{sen} 37°)}{1.52} = 0.53$$

y

$$\theta_2 = \operatorname{sen}^{-1}(0.53) = 32°$$

Ejercicio de refuerzo. De forma experimental, se determinó que un rayo de luz que llega desde el aire y entra en un líquido con un ángulo de incidencia de 37° tiene un ángulo de refracción de 29°. ¿Cuál es la rapidez de la luz en ese líquido?

Ejemplo 22.4 ■ Una cubierta de vidrio para mesa: más acerca de la refracción

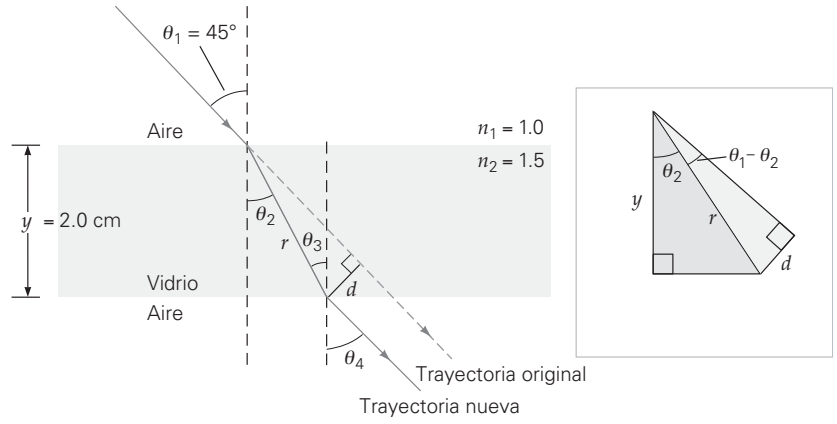
Un rayo de luz va por el aire y llega a la cubierta de vidrio de una mesa de café, formando un ángulo de incidencia de 45° (▼figura 22.11). El vidrio tiene un índice de refracción de 1.5. *a*) ¿Cuál es el ángulo de refracción de la luz que pasa al vidrio? *b*) Demuestre que el rayo que sale del vidrio es paralelo al rayo incidente, esto es, que $\theta_4 = \theta_1$. *c*) Si el vidrio tiene 2.0 cm de espesor, ¿cuál es el desplazamiento lateral entre el rayo que entra al vidrio y el que sale de él? (El desplazamiento lateral es la distancia perpendicular entre los dos rayos: *d* en la figura 22.10.)

Razonamiento. Como hay dos refracciones que intervienen en este ejemplo, se aplicará la ley de Snell en *a* y de nuevo en *b*; en *c* utilizaremos algo de geometría y trigonometría.

Solución. Se listan los datos:

Dado: $\theta_1 = 45°$
$n_1 = 1.0$ (aire)
$n_2 = 1.5$
$y = 2.0$ cm

Encuentre: *a*) θ_2 (el ángulo de refracción)
b) Demuestre que $\theta_4 = \theta_1$
c) *d* (desplazamiento lateral)



▶ **FIGURA 22.11** Dos refracciones
En el vidrio, el rayo refractado se desplaza lateralmente una distancia *d* con respecto al rayo incidente, y el rayo que emerge es paralelo al rayo original. (Véase el ejemplo 22.4.)

a) Se usa la forma práctica de la ley de Snell, ecuación 22.5, con $n_1 = 1.0$ para el aire, y se obtiene

$$\text{sen}\,\theta_2 = \frac{n_1\,\text{sen}\,\theta_1}{n_2} = \frac{(1.0)\,\text{sen}\,45°}{1.5} = \frac{0.707}{1.5} = 0.47$$

Por consiguiente,

$$\theta_2 = \text{sen}^{-1}(0.47) = 28°$$

Note que el rayo se refracta hacia la normal.

b) Si $\theta_1 = \theta_4$, el rayo emergente es paralelo al rayo incidente. Se aplica la ley de Snell al rayo en ambas superficies,

$$n_1\,\text{sen}\,\theta_1 = n_2\,\text{sen}\,\theta_2$$

y

$$n_2\,\text{sen}\,\theta_3 = n_1\,\text{sen}\,\theta_4$$

En la figura se observa que $\theta_2 = \theta_3$. Por consiguiente,

$$n_1\,\text{sen}\,\theta_1 = n_1\,\text{sen}\,\theta_4$$

o

$$\theta_1 = \theta_4$$

Así, el rayo emergente es paralelo al rayo incidente, pero está desplazado lateral o perpendicularmente a la dirección incidente una distancia d.

c) En la figura 22.11 se observa que, para determinar d, primero se necesita calcular r a partir de la información conocida en el triángulo rectángulo más oscuro. Entonces,

$$\frac{y}{r} = \cos\theta_2 \qquad \text{o} \qquad r = \frac{y}{\cos\theta_2}$$

En el triángulo rectángulo claro se ve que $d = r\,\text{sen}\,(\theta_1 - \theta_2)$. Sustituyendo la r obtenida en el paso anterior se obtiene

$$d = \frac{y\,\text{sen}(\theta_1 - \theta_2)}{\cos\theta_2} = \frac{(2.0\text{ cm})\,\text{sen}(45° - 28°)}{\cos 28°} = 0.66\text{ cm}$$

Ejercicio de refuerzo. Si el vidrio de este ejemplo hubiera tenido $n = 1.6$, ¿el desplazamiento lateral hubiera sido igual, mayor o menor? Explique su respuesta de forma conceptual y después calcule el valor real para verificar su razonamiento.

Ejemplo 22.5 ■ El ojo humano: refracción y longitud de onda

Una representación simplificada del cristalino en un ojo humano lo muestra con una corteza (una capa externa) de $n_{\text{corteza}} = 1.386$, y un núcleo de $n_{\text{núcleo}} = 1.406$. (Véase la figura 25.1b.) Note que ambos índices de refracción están dentro del intervalo mencionado para el ojo humano, en la tabla 22.1. Si un rayo de luz monocromática (de una sola frecuencia o longitud de onda) de 590 nm de longitud de onda va por el aire y entra al cristalino pasando por la parte anterior del ojo, realice una comparación cualitativa y elabore una lista de la frecuencia, la rapidez y la longitud de onda de la luz en el aire, en la corteza y en el núcleo. Primero haga la comparación sin números, y luego calcule los valores reales para comprobar su razonamiento.

Razonamiento y respuesta. Primero se necesitan las magnitudes relativas de los índices de refracción, siendo $n_{\text{aire}} < n_{\text{corteza}} < n_{\text{núcleo}}$.

Como se vio antes en este apartado, la frecuencia (f) de la luz es igual en los tres medios: aire, corteza y núcleo. Así, la frecuencia se puede calcular a partir de la rapidez y la longitud de onda de la luz en cualquiera de esos materiales, pero es más fácil en el aire. (¿Por qué?) De la ecuación de onda $c = \lambda f$ (ecuación 13.17),

$$f = f_{\text{aire}} = f_{\text{corteza}} = f_{\text{núcleo}} = \frac{c}{\lambda} = \frac{3.00 \times 10^8\text{ m/s}}{590 \times 10^{-9}\text{ m}} = 5.08 \times 10^{14}\text{ Hz}$$

La rapidez de la luz en un medio depende de su índice de refracción, porque $v = c/n$. Cuanto menor es el índice de refracción, mayor es la rapidez. En consecuencia, la rapidez de la luz es máxima en el aire ($n = 1.00$) y mínima en el núcleo ($n = 1.406$).

La rapidez de la luz en la corteza es

$$v_{\text{corteza}} = \frac{c}{n_{\text{corteza}}} = \frac{3.00 \times 10^8\text{ m/s}}{1.386} = 2.16 \times 10^8\text{ m/s}$$

(continúa en la siguiente página)

y la rapidez de la luz en el núcleo es

$$v_{\text{núcleo}} = \frac{3.00 \times 10^8 \text{ m/s}}{1.406} = 2.13 \times 10^8 \text{ m/s}$$

También se sabe que la longitud de onda de la luz en un medio depende del índice de refracción de éste ($\lambda_m = \lambda/n$). Cuanto menor es el índice de refracción, mayor es la longitud de onda. Por consiguiente, la longitud de onda de la luz es máxima en el aire ($n = 1.00$ y $\lambda = 590$ nm), y mínima en el núcleo ($n = 1.406$).

La longitud de onda en la corteza se calcula con la ecuación 22.4:

$$\lambda_{\text{corteza}} = \frac{\lambda}{n_{\text{corteza}}} = \frac{590 \text{ nm}}{1.386} = 426 \text{ nm}$$

y la longitud de onda en el núcleo es

$$\lambda_{\text{núcleo}} = \frac{590 \text{ nm}}{1.406} = 420 \text{ nm}$$

Por último, se puede formar una tabla para comparar con más facilidad los valores de frecuencia, rapidez y longitud de onda en los tres medios:

	Índice de refracción	*Frecuencia (Hz)*	*Rapidez (m/s)*	*Longitud de onda (nm)*
Aire	1.00	5.08×10^{14}	3.00×10^8	590
Corteza	1.386	5.08×10^{14}	2.16×10^8	426
Núcleo	1.406	5.08×10^{14}	2.13×10^8	420

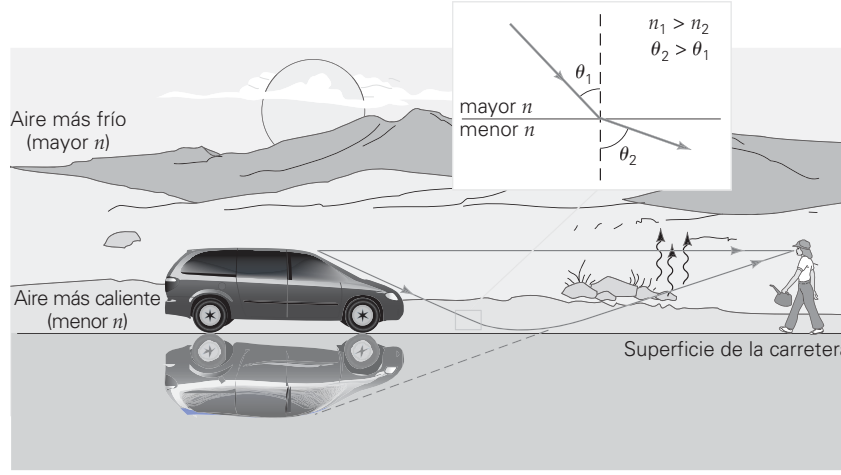
Ejercicio de refuerzo. Una fuente de luz de una sola frecuencia está sumergida en agua en una pecera especial. La luz viaja por el agua, atraviesa placas de vidrio doble al lado de la pecera (cada placa de vidrio tiene n distinta) y sale al aire. En general, ¿qué sucede con *a*) la frecuencia y *b*) la longitud de onda de la luz cuando sale al aire que hay en el exterior?

La refracción es común en la vida diaria y explica muchas de los fenómenos que se observan. Veamos la refracción en acción.

Espejismo: es común presenciar este fenómeno en la carretera, en días calurosos de verano. Las capas de aire que están a distintas temperaturas provocan la refracción de la luz (la capa más cercana a la carretera está a mayor temperatura, tiene menor densidad y su índice de refracción es menor). La variación en los índices de refracción origina el punto "mojado" y una imagen invertida de un objeto, que bien podría ser un automóvil (▼figura 22.12a). Comúnmente, el término *espejismo* trae a la imaginación a una per-

▼ **FIGURA 22.12** La refracción en acción ***a)*** Imagen invertida de un automóvil sobre una carretera "mojada"; es un espejismo. (Véase el pliego a color al final del libro.) ***b)*** El espejismo se forma cuando la luz que procede del objeto se refracta en las capas de aire a distintas temperaturas, cerca de la superficie de la carretera.

a)



b)

A FONDO

22.2 LAS LENTES "PERFECTAS" Y EL ÍNDICE NEGATIVO DE REFRACCIÓN

En 1968, los físicos predijeron la existencia de un material con un índice negativo de refracción. Esperaban que, en presencia de tales materiales con índice negativo, casi todos los fenómenos ópticos y de propagación de ondas se alteraran de forma sustancial. Para entonces, no se sabía de la existencia de alguno de estos materiales con índice negativo.

A principios del siglo XXI, se creó una nueva clase de materiales estructurados artificialmente, que presentaban índices negativos de refracción. Además, un material ferroelástico natural, que contenía itrio, vanadio y oxígeno, también demostró ser un metamaterial al presentar un índice negativo de refracción (figura 1).

La figura 2 ilustra la diferencia entre materiales con índices positivos y negativos. En la figura 2a, la luz que incide sobre un material con índice positivo se refracta al otro lado de la normal de la interfase. Sin embargo, si el material tiene un índice negativo de refracción, la misma luz incidente se refracta al mismo lado de la normal de la interfase (figura 2b). A causa de esta refracción "anormal", placas de materiales con índice negativo y superficies planas pueden incluso enfocar la luz como se muestra en la figura 2c, para dar por resultado una nueva clase de lentes (éstas se estudiarán en el capítulo 23). Si se coloca una fuente de luz en un lado de la placa con un índice de refracción $n = -1$, los rayos de luz se refractan de tal forma que producen un punto focal dentro del material y luego otro justo fuera de él. La "longitud focal" de una lente así dependerá tanto de la distancia al objeto como del grosor de la placa.

Las características indeseables de las lentes hechas de materiales con un índice positivo de refracción son la pérdida de energía que se debe a la reflexión, las aberraciones y la baja resolución provocada por el límite de difracción (se verá más acerca de esto en el capítulo 24). Los experimentos más recientes ofrecen fuerte evidencia de que los materiales con índice negativo tienen un futuro promisorio en el campo de la óptica, ya que las lentes de índice negativo ofrecen un nuevo grado de flexibilidad que podría llevar a fabricar lentes más compactas con menor aberración. El límite de difracción —que es la principal limitante para la resolución de imagen— podría sortearse con los materiales de índice negativo. Más aún, se ha observado la refracción negativa total —esto es, la ausencia de reflexión— en materiales con un índice negativo de refracción. Lentes así podrían ser verdaderamente las "lentes perfectas".

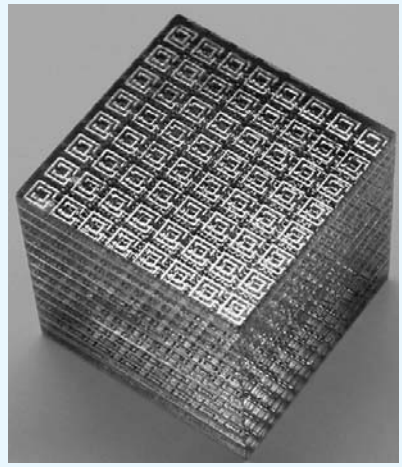


FIGURA 1 Material con un índice negativo de refracción Este material artificial hecho a base de un enrejado de anillos y alambres tiene un índice negativo de refracción.

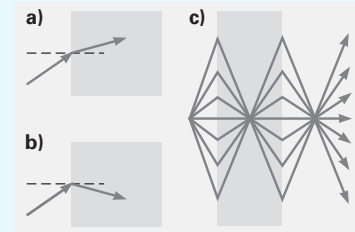
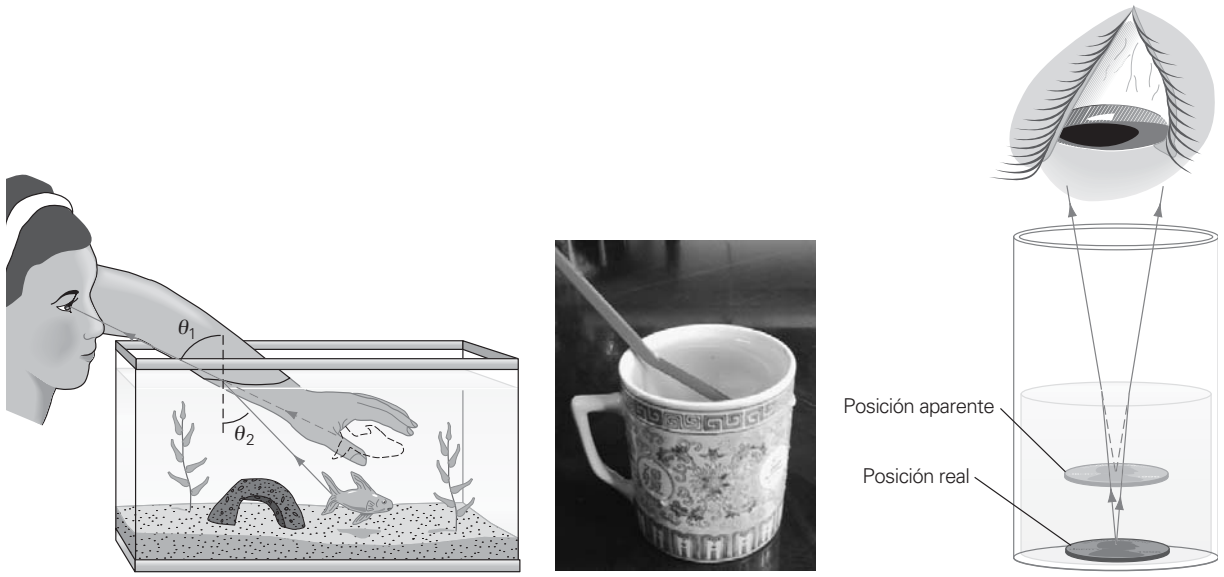


FIGURA 2 Reflexión en materiales con índice positivo en comparación con la que producen materiales con índice negativo ***a)*** La luz incidente en la interfase entre el aire y un material con índice positivo se inclina hacia el otro lado de la normal, ***b)*** mientras que en un material con índice negativo, la luz se inclina hacia el mismo lado de la normal. ***c)*** Si la fuente de luz se coloca en un lado de una placa con un índice de refracción de $n = -1$, las ondas se refractan de tal forma que producen un foco dentro del material y luego otro justo fuera de éste.

sona sedienta en el desierto, que "ve" un estanque de agua que en realidad no existe. Esta ilusión óptica juega con la mente, porque la imagen se ve como si el objeto estuviera en un charco de agua y, de forma inconsciente, nuestra experiencia pasada nos induce a concluir que hay agua en la carretera.

En la figura 22.12b hay dos formas de ver el automóvil. En la primera, los rayos horizontales provienen directamente del vehículo y llegan a los ojos, de manera que vemos el automóvil sobre el piso. También, los rayos que salen del carro viajan hacia la superficie de la carretera y se refractan gradualmente en las capas de aire. Después de llegar a la superficie se refractan de nuevo y viajan hacia nuestros ojos. El aire más frío tiene mayor densidad y, por consiguiente, mayor índice de refracción. Un rayo que va hacia la superficie de la carretera se refracta de forma gradual, con mayor ángulo de refracción, hasta que llega a la superficie. Entonces se refractará de nuevo con menor ángulo de refracción y va hacia los ojos. La consecuencia es que también se ve una imagen invertida del automóvil debajo de la superficie de la carretera. En otras palabras, esta superficie actúa casi como un espejo. El "estanque de agua" en realidad es la luz del cielo que se refracta, es decir, se trata de una imagen del cielo. Esta serie de capas de aire a



a) b) c)

▲ **FIGURA 22.13 Efectos de la refracción** ***a)*** La luz se refracta, y como tendemos a imaginar que la luz viaja en línea recta, el pez en realidad está más abajo de lo que creemos. ***b)*** La pajilla parece doblada en la frontera entre el aire y el agua. Si la taza fuera transparente se vería otro tipo de refracción. (Véase el ejercicio 21.) ***c)*** A causa de la refracción, la moneda parece estar más cerca que lo que en realidad está.

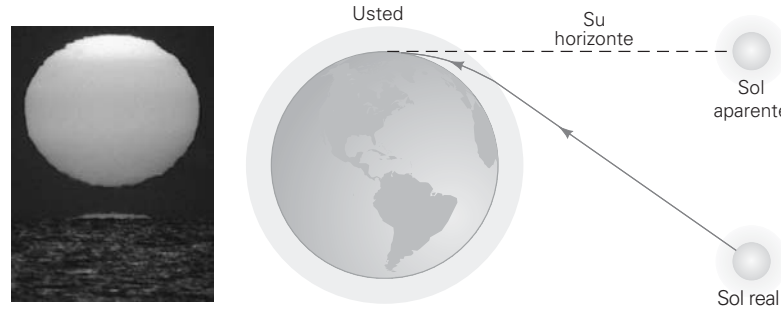
diferentes temperaturas, y con distintos índices de refracción, hace que "veamos" el aire caliente que se eleva, como resultado de la refracción que cambia continuamente.

El fenómeno contrario a esto es el espejismo en el mar. El aire que se encuentra por encima del mar está más caliente que el que hay abajo. Esto provoca que la luz se refracte de manera contraria que en la figura 22.12b, haciendo que los objetos se vean en el aire por encima de la superficie marina.

No está donde debería: seguramente usted habrá experimentado un efecto de refracción al tratar de alcanzar un objeto bajo el agua, como el pez de la ▲figura 22.13a. Estamos acostumbrados a que la luz se propague en línea recta, de los objetos hacia los ojos, pero la que llega a nosotros procedente de un objeto experimenta un cambio de dirección en la interfase aire-agua. (Observe en la figura que el rayo se refracta alejándose de la normal.) En consecuencia, el objeto parece estar más cerca de la superficie de lo que en realidad está, y por eso se falla al tratar de alcanzarlo. Por la misma razón, una pajilla dentro de una taza parece doblada (figura 22.13b), una moneda en un vaso de agua parecerá más cercana de lo que está en realidad (figura 22.13c), y las piernas de una persona que está de pie en el agua parecen más cortas que su longitud real. Es factible calcular la relación entre la profundidad real y la aparente. (Véase el ejercicio 37.)

Efectos atmosféricos: a veces, el Sol sobre el horizonte parece aplanado, con su dimensión horizontal mayor que su dimensión vertical (▼figura 22.14a). Este efecto es el resultado de las variaciones de temperatura y densidad en el aire; este último se vuelve más denso a lo largo del horizonte. Estas variaciones se presentan sobre todo en la dirección vertical, por lo que la luz de la parte superior y la de la parte inferior del Sol se refractan de forma distinta, conforme los dos grupos de rayos pasan a través de densidades atmosféricas diferentes, con distintos índices de refracción.

La refracción atmosférica alarga el día, por así decirlo, al permitirnos ver el Sol (o la Luna en el caso de la noche) justo antes de que en realidad suba sobre el horizonte y



a) b)

▶ **FIGURA 22.14 Efectos atmosféricos** ***a)*** El Sol aparece con una forma un tanto aplanada cerca del horizonte, a causa de la refracción atmosférica. ***b)*** Antes de salir y después de ocultarse, es posible ver el Sol por breve tiempo, gracias una vez más a la refracción atmosférica.

justo después de que en realidad se oculte bajo el horizonte (hasta con 20 minutos de diferencia en ambos casos). El aire más denso cerca de la Tierra refracta la luz que está sobre el horizonte hacia nosotros (figura 22.14b).

El centelleo de las estrellas se debe a la turbulencia atmosférica, que distorsiona la luz proveniente de ellas. Las turbulencias refractan la luz en direcciones aleatorias y hacen que las estrellas aparenten "centellear". Las estrellas en el horizonte parecen titilar más que las que están directamente sobre nuestra cabeza, porque la luz tiene que pasar a través de un mayor espacio atmosférico de la Tierra. Sin embargo, los planetas no "centellean" tanto. Esto es porque las estrellas están mucho más lejos que los planetas, de manera que aparecen como fuentes puntuales. Fuera de la atmósfera terrestre, las estrellas no titilan.

22.4 Reflexión interna total y fibras ópticas

OBJETIVOS: *a*) Describir la refracción interna total y *b*) comprender las aplicaciones de las fibras ópticas.

Un fenómeno interesante se presenta cuando la luz pasa de un medio ópticamente más denso a otro menos denso, como cuando la luz pasa *desde* el agua *hacia* el aire. Como sabemos, en ese caso un rayo se refractará alejándose de la normal. (El ángulo de refracción es mayor que el ángulo de incidencia.) Además, la ley de Snell establece que cuanto mayor sea el ángulo de incidencia, mayor será el ángulo de refracción. Esto es, conforme aumenta el ángulo de incidencia, el rayo refractado se aparta cada vez más de la normal.

PHYSLET

Exploración 34.2 Ley de Snell y reflexión interna total

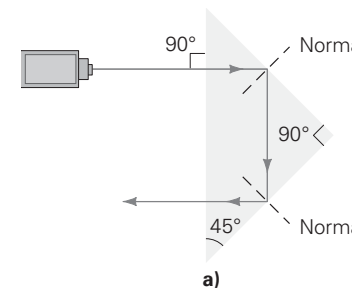
Sin embargo, existe un límite. Para cierto ángulo de incidencia, llamado **ángulo crítico** (θ_c), el ángulo de refracción es 90° y el rayo refractado se dirige a lo largo de la interfase entre los medios. Pero, ¿qué pasa si el ángulo de incidencia es todavía mayor? Si el ángulo de incidencia es mayor que el ángulo crítico ($\theta_1 > \theta_c$), la luz ya no se refracta, sino se refleja internamente (▼figura 22.15). A esta condición se le llama **reflexión interna total**. Este proceso de reflexión tiene una eficiencia muy cercana al 100%. (Sigue habiendo cierta absorción de la luz *en* los materiales.) Gracias a la reflexión interna total, es posible usar prismas como espejos (▶figura 22.16). En resumen, donde $n_1 > n_2$, la reflexión y la refracción suceden en todos los ángulos en que $\theta_1 \leq \theta_c$, pero el rayo refractado o transmitido desaparece cuando $\theta_1 > \theta_c$.

A partir de la ley de Snell se puede deducir una ecuación para el ángulo crítico. Si $\theta_1 = \theta_c$ en el medio ópticamente más denso, $\theta_2 = 90°$, y, en consecuencia,

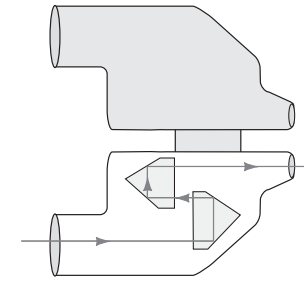
$$n_1 \operatorname{sen} \theta_1 = n_2 \operatorname{sen} \theta_2 \qquad \text{o} \qquad n_1 \operatorname{sen} \theta_c = n_2 \operatorname{sen} 90°$$

Como sen 90° = 1,

$$\operatorname{sen} \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \qquad \textit{donde } n_1 > n_2 \tag{22.6}$$



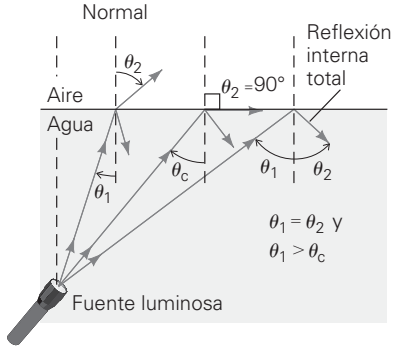
a)



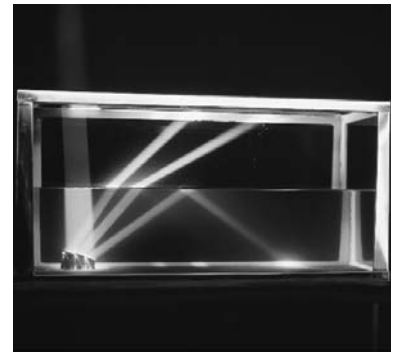
b)

▲ **FIGURA 22.16 Reflexión interna en un prisma** ***a)*** Como el ángulo crítico del vidrio es menor de 45°, es factible utilizar prismas con ángulos de 45° y 90° para reflejar la luz 180°. ***b)*** La reflexión interna de la luz en los prismas de los binoculares hace que este instrumento sea mucho más corto que un telescopio porque los prismas se encargan de "doblar" los rayos.

▼ **FIGURA 22.15 Reflexión interna** ***a)*** Cuando la luz entra a un medio ópticamente menos denso, se refracta alejándose de la normal. En cierto ángulo crítico (θ_c), la luz se refracta siguiendo la interfase (la frontera común) de los dos medios. En un ángulo mayor que el crítico ($\theta_1 > \theta_c$), se presenta la refracción interna total. ***b)*** ¿Podría estimar el ángulo crítico en la fotografía?



a)



b)

Si el segundo medio es aire, $n_2 \approx 1$, y el ángulo crítico en la frontera entre un medio y el aire se calcula con $\text{sen}\,\theta_c = 1/n$, donde n es el índice de refracción del medio. Éste es otro método que se tiene disponible para medir el índice de refracción en los laboratorios.

Ejemplo 22.6 ■ Una vista desde la alberca: el ángulo crítico

a) ¿Cuál es el ángulo crítico cuando la luz que va por el agua incide en la frontera interfase agua-aire? *b*) Si un clavadista sumergido en una alberca viera hacia arriba a la superficie del agua en un ángulo $\theta < \theta_c$, ¿qué vería? (Ignore los efectos térmicos o de movimiento.)

Razonamiento. *a*) El ángulo crítico se obtiene con la ecuación 22.6. *b*) Como se observa en la figura 22.15a, θ_c forma un cono de visión, cuando se ve desde abajo del agua.

Solución.

Dado: $n_1 = 1.33$ (para el agua, tabla 22.1)
$n_2 \approx 1$ (¿por qué?)

Encuentre: *a*) θ_c (el ángulo crítico)
b) vista para $\theta < \theta_c$

a) El ángulo crítico es

$$\theta_c = \text{sen}^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right) = \text{sen}^{-1}\left(\frac{1}{1.33}\right) = 48.8°$$

b) A partir de la figura 22.15a se trazan los rayos al revés, con la luz que llega de todos los ángulos fuera de la alberca. La luz que proviene del paisaje de 180° sobre el agua sólo se puede ver por un cono con medio ángulo de vértice de 48.8°. Como resultado, los objetos sobre la superficie también aparecen distorsionados. Una panorámica desde abajo del agua se ve en la ◂figura 22.17. Ahora, ¿podría explicar por qué las aves zancudas, como las garzas, mantienen su cuerpo agachado cuando tratan de atrapar un pez?

Ejercicio de refuerzo. ¿Qué vería el clavadista hacia arriba, hacia la superficie del agua, a un ángulo $\theta > \theta_c$?

▲ **FIGURA 22.17 Vista panorámica distorsionada** Vista subacuática de la superficie de una alberca en Hawai. (Véase el ejemplo 22.6 y el pliego a color al final del libro.)

Las reflexiones internas aumentan la brillantez de los diamantes tallados. (La brillantez o brillo es una medida de la cantidad de luz que regresa al observador. La brillantez se reduce si la luz sale por la parte trasera de un diamante, es decir, si la reflexión *no* es total.) El ángulo crítico para una superficie de diamante-aire es

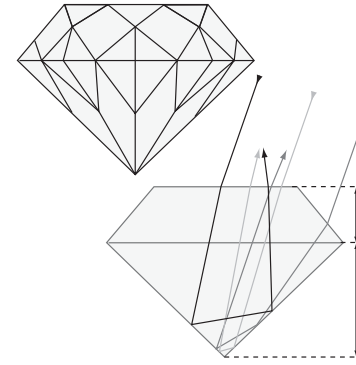
$$\theta_c = \text{sen}^{-1}\left(\frac{1}{n}\right) = \text{sen}^{-1}\left(\frac{1}{2.42}\right) = 24.4°$$

El llamado diamante de corte brillante (o simplemente brillante) tiene muchas facetas o caras (58 en total: 33 en la cara superior y 25 en la inferior). La luz que llega a las facetas inferiores desde las superiores, formando un ángulo mayor que el crítico, se refleja internamente en el diamante. A continuación la luz sale por las facetas superiores, dando lugar al brillo del diamante (▾figura 22.18).

Fibras ópticas

Cuando se ilumina una fuente desde abajo, la luz se transmite a lo largo de sus corrientes curvas. El científico inglés John Tyndall (1820-1893) demostró este fenómeno por

a)



b)

▶ **FIGURA 22.18 Brillantez del diamante** ***a)*** La reflexión interna causa el brillo de un diamante. (Véase el pliego a color al final del libro.) ***b)*** El "corte" (o las proporciones de altura de las facetas) es esencial. Si una piedra es demasiado plana o demasiado aguda, se perderá la luz, es decir, esta última se refractará y saldrá por las facetas inferiores.

primera vez en 1870, y demostró que la luz era "conducida" a lo largo de la trayectoria curva de una corriente de agua que sale de un agujero en un lado de un recipiente. Este fenómeno se observa porque la luz experimenta reflexión interna total a lo largo del chorro.

La reflexión total interna es la base de las **fibras ópticas**, una moderna tecnología fascinante que se centra en el uso de fibras transparentes para la transmisión de la luz. Las múltiples reflexiones internas totales hacen posible "entubar" la luz por una varilla transparente (igual que corrientes de agua) aun cuando la varilla sea curva (▸figura 22.19). Observe en la figura que cuanto menor es el diámetro del tubo de luz, más reflexiones internas tiene. En una fibra pequeña puede haber hasta varios cientos de reflexiones internas totales por centímetro.

La reflexión interna total es un proceso excepcionalmente eficiente. Las fibras ópticas sirven para transmitir luz a distancias muy grandes, con pérdidas aproximadas de sólo 25% por kilómetro. Esas pérdidas se deben principalmente a impurezas en la fibra, que dispersan la luz. Los materiales transparentes tienen diversos grados de transmisión. Las fibras se fabrican con plásticos y vidrios especiales para alcanzar la eficiencia máxima de transmisión. Esta última se obtiene con radiación infrarroja, porque causa menos dispersión, como se explicará en la sección 24.5.

La mayor eficiencia de las reflexiones internas múltiples en comparación con las reflexiones múltiples en espejos se demuestra con un buen espejo plano, cuya reflectividad alcanza el 95%, en el mejor de los casos. Después de cada reflexión, la intensidad del haz es el 95% de la del rayo incidente que procede de la reflexión anterior ($I_1 = 0.95I_o$; $I_2 = 0.95\ I_1 = 0.95^2\ I_o$; ...). Por consiguiente, la intensidad I del rayo reflejado después de n reflexiones es

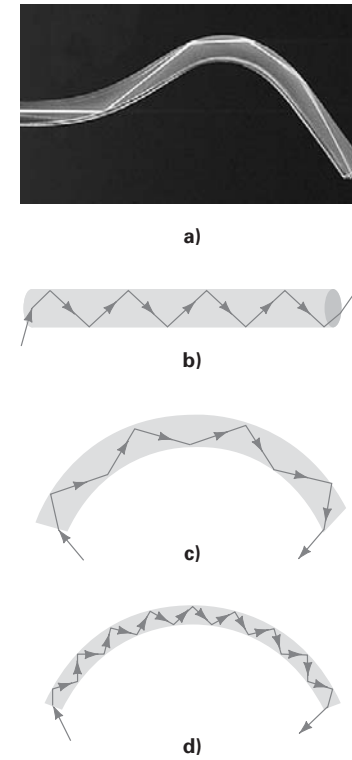
$$I = 0.95^n\ I_o$$

donde I_o es la intensidad inicial del haz antes de la primera reflexión. Así, después de 14 reflexiones,

$$I = 0.95^{14}\ I_o = 0.49\ I_o$$

En otras palabras, después de 14 reflexiones, la intensidad se reduce al 49%, esto es, poco menos de la mitad. Para 100 reflexiones, $I = 0.006\ I_o$, ¡y la intensidad sólo es el 0.6% de la intensidad inicial! Comparemos esto con un 75% de la intensidad inicial, en fibras ópticas, en un kilómetro de longitud, con *miles* de reflexiones, para apreciar la ventaja de la reflexión interna total.

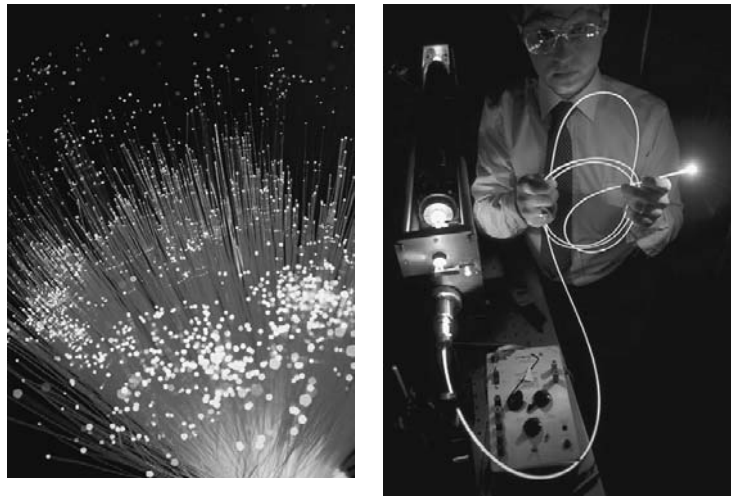
Las fibras cuyos diámetros aproximados son de unos 10 μm (10^{-5} m) se agrupan en haces flexibles de 4 a 10 mm de diámetro, y de varios metros de longitud, dependiendo de la aplicación (▾figura 22.20). Un haz de fibras con 1 cm^2 de área transversal pue-



▲ **FIGURA 22.19** Tubos de luz ***a)*** Reflexión interna total en una fibra óptica. (Véase el pliego a color al final del libro.) ***b)*** Cuando incide la luz en el extremo de un cilindro de material transparente de tal forma que el ángulo interno de incidencia es mayor que el ángulo crítico del material, la luz experimenta la reflexión interna total a todo lo largo del tubo de luz. ***c)*** La luz también se transmite a lo largo de tubos de luz curvos, por reflexión interna total. ***d)*** Al disminuir el diámetro de la varilla o fibra, aumenta la cantidad de reflexiones por unidad de longitud.

PHYSLET®

Ilustración 34.2 Fibras ópticas



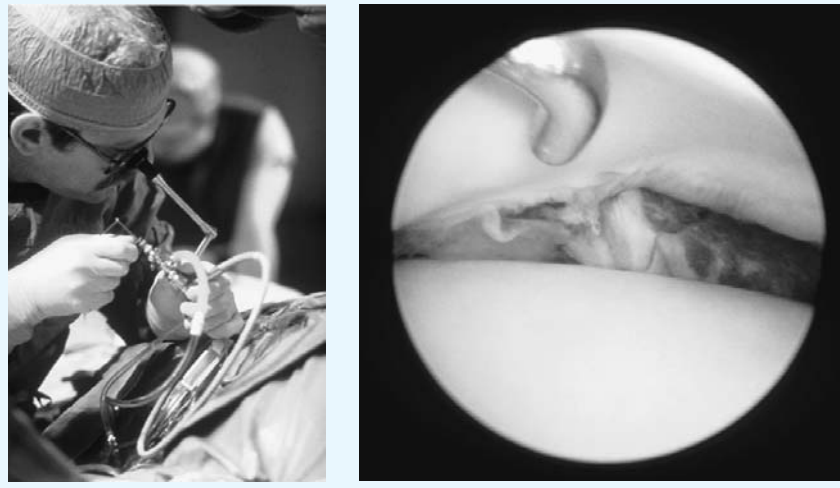
◀ **FIGURA 22.20** Haz de fibras ópticas ***a)*** Cientos o hasta miles de fibras extremadamente delgadas se agrupan ***b)*** para formar un cable de fibra óptica, que aquí se ve con el color azul de un láser. (Véase el pliego a color al final del libro.)

A FONDO 22.3 APLICACIONES MÉDICAS DE LAS FIBRAS ÓPTICAS

Antes de que existieran las fibras ópticas, se utilizaban los *endoscopios* para ver el interior del cuerpo humano. Esos instrumentos estaban formados por sistemas de lentes acomodadas en tubos largos y estrechos. Algunos contenían una docena o más de lentes, y formaban imágenes relativamente deficientes. Además, como las lentes debían alinearse de ciertas formas, los tubos debían tener tramos rígidos, lo cual limitaba la maniobrabilidad del endoscopio. Uno de esos endoscopios podía insertarse por la garganta del paciente hasta el estómago, para observar el interior de este órgano. Sin embargo, quedaban puntos ciegos, a causa de la curvatura del estómago y de la inflexibilidad del instrumento.

Con los haces de fibras ópticas se han eliminado esos problemas. Para enfocar la luz, se colocan lentes en el extremo del haz de fibras, y para cambiar la dirección de la luz y hacer que regrese, se utiliza un prisma. La luz incidente se transmite por una capa externa del haz y la imagen regresa por el núcleo central de fibras. Con uniones mecánicas se permite la maniobrabilidad. El extremo de algunos endoscopios de fibra óptica tiene dispositivos para obtener muestras de los tejidos examinados y así hacer una biopsia (examen para diagnóstico), o incluso para realizar procedimientos quirúrgicos. Por ejemplo, la cirugía artroscópica se practica en articulaciones lesionadas (figura 1). El *artroscopio* que se usa actualmente de forma rutinaria para inspeccionar *y* también para reparar articulaciones dañadas no es más que un endoscopio de fibra óptica equipado con los instrumentos quirúrgicos adecuados.

Un *cardioscopio* de fibra óptica, que se utiliza para la observación directa de las válvulas del corazón, es un haz de fibras de unos 4 mm de diámetro y 30 cm de longitud. El cardioscopio pasa con facilidad hasta el corazón, por la vena yugular del cuello, cuyo diámetro es de 15 mm. Con el fin de desplazar la sangre y de tener un campo de visión claro para observar y fotografiar, se infla un globo transparente en la punta del cardioscopio con solución salina (es decir, sal diluida en agua).

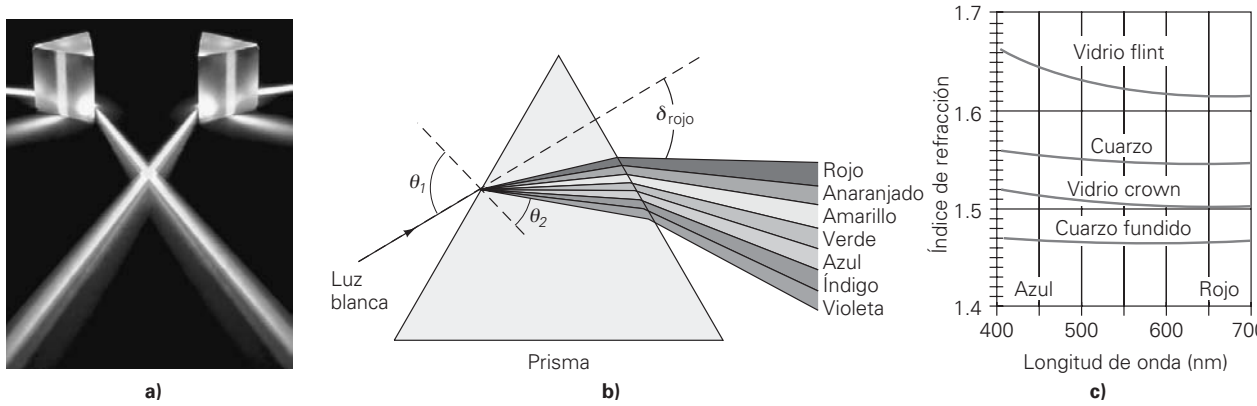


a) b)

FIGURA 1 Artroscopia ***a)*** Los cirujanos utilizan un artroscopio de fibra óptica para practicar una cirugía. ***b)*** Vista artroscópica de los meniscos de una rodilla.

de contener hasta 50 000 fibras individuales. (Se necesita un recubrimiento en cada fibra para evitar que se toquen).

Hay muchas aplicaciones importantes e interesantes de las fibras ópticas, que van desde las comunicaciones y conexiones de computadoras en red hasta la medicina. (Véase la sección A fondo, en esta página, sobre las aplicaciones médicas de las fibras ópticas.) Las señales luminosas, que proceden de señales eléctricas, se transmiten a través de líneas telefónicas ópticas y redes de computadora. En el otro extremo se vuelven a convertir en señales eléctricas. Las fibras ópticas tienen menos pérdidas de energía que los conductores eléctricos, en especial a frecuencias altas, y conducen mucho mayor cantidad de datos. Además, las fibras ópticas son más ligeras que los conductores metálicos, tienen mayor flexibilidad y no son afectadas por perturbaciones electromagnéticas (campos eléctricos y magnéticos), ya que están hechas de materiales aislantes eléctricos.



▲ **FIGURA 22.21 La dispersión** ***a)*** La luz blanca se dispersa en los prismas de vidrio y forma un espectro de colores. ***b)*** En un medio dispersor, el índice de refracción varía un poco en función de la longitud de onda. La luz roja, cuya longitud de onda es la mayor, tiene el menor índice de refracción, y por eso se refracta menos. El ángulo entre el haz incidente y el haz emergente es el ángulo de desviación (δ) del rayo. (Aquí se exageran los ángulos, para obtener mayor claridad.) ***c)*** Variación del índice de refracción con la longitud de onda, para algunos de los medios transparentes más comunes. (Véase el pliego a color al final del libro.)

22.5 Dispersión

PHYSLET®
Ilustración 34.3 Prismas y dispersión

OBJETIVO: Explicar la dispersión y algunos de sus efectos.

La luz de una sola frecuencia y, por consiguiente, de una sola longitud de onda, se llama *luz monocromática* (del griego *mono*, "uno" y *chroma*, "color"). La luz visible que contiene todas las frecuencias que la componen, o colores, más o menos con las mismas intensidades (por ejemplo, la luz solar) se llama *luz blanca*. Cuando un rayo de luz blanca atraviesa un prisma de vidrio, como se ve en la ▲figura 22.21a, se extiende, o dispersa, y forma un espectro de colores. Este fenómeno condujo a Newton a creer que la luz solar es una mezcla de colores. Cuando el haz entra al prisma, los colores que la forman —correspondientes a distintas longitudes de onda— se refractan en ángulos ligeramente diferentes y se reparten formando un espectro (figura 22.21b).

La salida de un espectro indica que el índice de refracción del vidrio es ligeramente diferente para las diversas longitudes de onda, y eso es válido para muchos medios transparentes (figura 22.21c). La razón tiene que ver con el hecho de que, en un medio dispersivo, la rapidez de la luz es ligeramente diferente para las distintas longitudes de onda. Como el índice de refracción n de un medio es una función de la rapidez de la luz en él ($n = c/v$), su valor será diferente para diversas longitudes de onda. De acuerdo con la ley de Snell, la luz de diferentes longitudes de onda se refracta en ángulos distintos.

Nota: una forma fácil de recordar el orden de los colores del espectro visible (de mayor a menor longitud de onda) es con la palabra RAAVAIV, acrónimo de rojo, anaranjado, amarillo, verde, azul, índigo y violeta.

Podemos resumir la explicación anterior diciendo que, en un material transparente con distintos índices de refracción para diversas longitudes de onda de la luz, la refracción causa una separación del haz lumínico de acuerdo con las longitudes de onda, y se dice que el material es *dispersor* o que presenta **dispersión**. La dispersión varía en los medios distintos (figura 22.21c). Además, como la diferencia en los índices de refracción para diversas longitudes de onda es mínima, es conveniente utilizar un valor representativo a cierta longitud de onda específica para fines generales (véase la tabla 22.1).

Un buen ejemplo de un material dispersor es el diamante, que tiene una capacidad de dispersión aproximadamente cinco veces mayor que la del vidrio. Además de producir brillo como resultado de las reflexiones internas en muchas facetas, un diamante cortado hace un despliegue de colores, o "fuego", que no es más que la dispersión de la luz refractada.

La dispersión es una causa de la aberración cromática de las lentes, que se describirá en detalle en el capítulo 23. Los sistemas ópticos de las cámaras están formados, con frecuencia, por varias lentes para reducir este problema al mínimo (véase la sección 23.4).

Otro ejemplo representativo de la dispersión es la formación del arco iris, que se describe en la sección A fondo de la p. 722.

A FONDO 22.4 EL ARCO IRIS

Todos alguna vez nos hemos sentido fascinados con el bello conjunto de colores del arco iris. Con los principios de la óptica que hemos aprendido en este capítulo, estamos en condiciones de comprender la formación de esta espectacular demostración de la naturaleza.

Un arco iris se forma por refracción, dispersión y reflexión interna de la luz en el interior de gotas de agua. Cuando la luz solar llega a millones de gotitas de agua que están en el aire durante y después de una lluvia, se ve un arco multicolor, cuyos colores van del violeta, en la región inferior del espectro (en orden de longitudes de onda) hasta el rojo, en la superior. A veces se ve más de un arco iris: el principal o primario va acompañado de uno más débil y más alto, que se llama secundario (figura 1), o hasta por un tercero. Estos arco iris de orden superior se deben a más de una reflexión interna total en las gotas de agua.

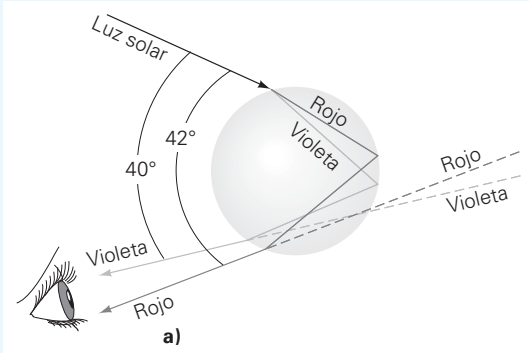
FIGURA 1 Arco iris Los colores del arco iris primario van verticalmente del rojo (exterior) al azul (interior). (Véase el pliego a color al final del libro.)

La luz que forma el arco iris primario se refracta primero y se dispersa en cada gota de agua; después se refleja por completo una vez en la superficie posterior de ésta. Por último, se refracta y se dispersa de nuevo al salir de la gota. El resultado es que la luz se dispersa en diferentes direcciones formando un espectro de colores (figura 2a). Sin embargo, por las condiciones de refracción y de reflexión interna total en el agua, los ángulos que forman los rayos que entran y salen —desde la luz violeta hasta la roja— quedan dentro de un intervalo estrecho de 40 a 42°. Esto quiere decir que sólo es posible ver un arco iris cuando el Sol se encuentra detrás del observador, de tal forma que la luz dispersada llegue a él formando esos ángulos.

El rojo aparece en la parte exterior del arco iris porque la luz de longitud de onda más corta que procede de esas gotas pasa sobre nuestros ojos (figura 2b). De forma similar, el violeta está en el interior del arco iris, porque la luz de mayor longitud de onda pasa por debajo de nuestros ojos.

El arco iris secundario invierte el orden de los colores porque realiza una reflexión adicional.

En general, los arco iris sólo se ven precisamente como arcos porque su formación se interrumpe cuando las gotas de agua llegan al suelo. Si uno estuviera en la cima de una montaña o en un avión, podría ver un arco iris circular completo (figura 2b). Además, cuanto más alto está el Sol en el horizonte, menor será la parte del arco iris que se ve desde el suelo. De hecho, es imposible ver un arco iris primario si el ángulo del Sol sobre el horizonte es mayor de 42°. Sin embargo, sí se puede ver desde una montaña. Conforme aumenta la elevación de un observador, mayor es la parte del arco iris que ve. También se puede ver un arco iris circular al esparcir agua para regar el jardín con la ayuda de un atomizador.



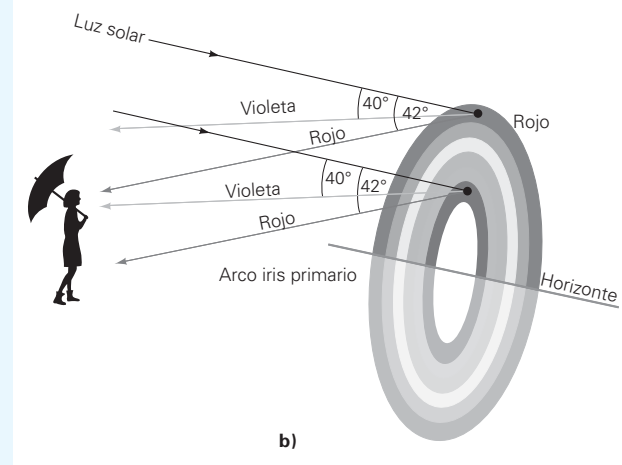


FIGURA 2 El arco iris Los arco iris se forman por refracción, dispersión y reflexión interna de la luz solar en las gotas de agua. ***a)*** La luz de distintos colores sale de la gota de agua en distintas direcciones. ***b)*** Un observador ve la luz roja en el exterior del arco y la violeta en el interior. (Véase el pliego a color al final del libro.)

Ejemplo 22.7 ■ Formación de un espectro: dispersión

El índice de refracción de determinado material transparente es 1.4503 para el extremo rojo ($\lambda_r = 700$ nm) del espectro visible, y 1.4698 para el extremo azul ($\lambda_b = 400$ nm). Sobre un prisma de este material incide luz blanca, como en la figura 22.21b, a un ángulo θ_i de 45°. *a*) Dentro del prisma, el ángulo de refracción de la luz roja es 1) mayor que, 2) menor que o 3) igual que el ángulo de refracción de la luz azul. Explique por qué. *b*) ¿Cuál es la separación angular del espectro visible dentro del prisma?

a) Razonamiento conceptual. El ángulo de refracción se obtiene con la ley de Snell, n_1 sen $\theta_1 = n_2$ sen θ_2. Como la luz roja tiene un menor índice de refracción que la luz azul, el ángulo de refracción de la luz roja es mayor que el de la azul para el mismo ángulo de incidencia. En ocasiones, también se dice que la luz roja "se refracta menos" que la azul porque el mayor ángulo de refracción de la primera significa que se aproxima más a la dirección del haz incidente original. Así que la respuesta correcta es la *a*.

b) Razonamiento cuantitativo y solución. Una vez más se utiliza la ley de Snell para calcular el ángulo de refracción para los extremos rojo y azul del espectro visible. La separación angular de los dos colores dentro del prisma es la diferencia entre esos ángulos de refracción.

Dado: (rojo) $n_r = 1.4503$, para $\lambda_r = 700$ nm
(azul) $n_b = 1.4698$, para $\lambda_b = 400$ nm
$\theta_1 = 45°$

Encuentre: $\Delta\theta_2$ (separación angular)

Al aplicar la ecuación 22.5 con $n_1 = 1.00$ (aire), se obtiene

$$\text{sen}\,\theta_{2_r} = \frac{\text{sen}\,\theta_1}{n_{2_r}} = \frac{\text{sen}\,45°}{1.4503} = 0.48756 \quad \text{y} \quad \theta_{2_r} = 29.180°$$

Asimismo,

$$\text{sen}\,\theta_{2_b} = \frac{\text{sen}\,\theta_1}{n_{2_b}} = \frac{\text{sen}\,45°}{1.4698} = 0.48109 \quad \text{y} \quad \theta_{2_b} = 28.757°$$

Entonces,

$$\Delta\theta_2 = \theta_{2_r} - \theta_{2_b} = 29.180° - 28.757° = 0.423°$$

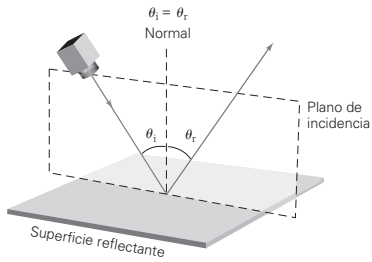
No es mucha la desviación, pero conforme la luz sigue su trayecto hacia el otro lado del prisma, se refracta y se dispersa de nuevo por la segunda frontera, por lo que los colores se dispersan aún más. Cuando la luz sale del prisma, la dispersión es evidente (figura 22.21a).

Ejercicio de refuerzo. Si en el prisma de este ejemplo, la luz verde tiene una separación angular de 0.156° con respecto a la luz roja, ¿cuál es el índice de refracción de la luz verde en el material? ¿La luz verde se refractará más o menos que la roja? Explique por qué.

Repaso del capítulo

- **Ley de la reflexión:** el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión (medidos desde la normal a la superficie reflectante):

$$\theta_i = \theta_r \tag{22.1}$$



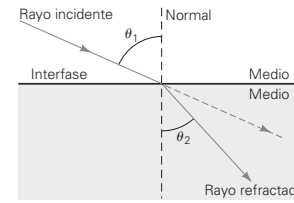
- El **índice de refracción (*n*)** de cualquier medio es la razón entre la rapidez de la luz en el vacío y su rapidez en ese medio:

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\lambda}{\lambda_m} \tag{22.3, 22.4}$$

- La refracción, para un rayo que pasa de un medio a otro, se define con la **ley de Snell**. Si el segundo medio es ópticamente más denso, el rayo se refracta acercándose a la normal; si el medio de refracción es menos denso, el rayo se refracta alejándose de la normal. La ley de Snell es

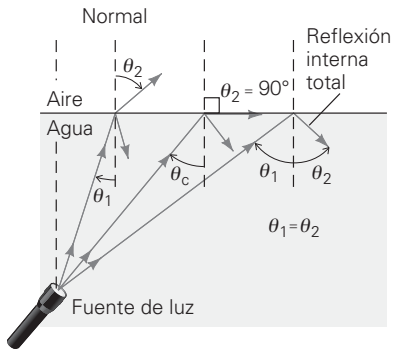
$$\frac{\text{sen}\,\theta_1}{\text{sen}\,\theta_2} = \frac{v_1}{v_2} \tag{22.2}$$

$$n_1\,\text{sen}\,\theta_1 = n_2\,\text{sen}\,\theta_2 \tag{22.5}$$

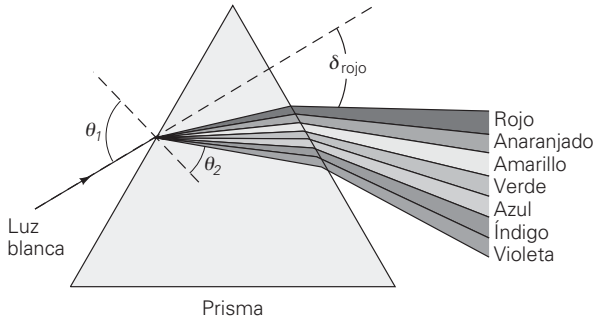


- La **reflexión total interna** sucede cuando el segundo medio es menos denso que el primero, y el ángulo de incidencia es mayor que el ángulo crítico:

$$\text{sen}\,\theta_c = \frac{n_2}{n_1} \qquad (n_1 > n_2) \tag{22.6}$$



- La **dispersión** de la luz se presenta en algunos medios porque las diversas longitudes de onda tienen índices de refracción ligeramente distintos y, por consiguiente, diferente rapidez.



Ejercicios*

Los ejercicios designados **OM** *son preguntas de opción múltiple; los* **PC** *son preguntas conceptuales; y los* **EI** *son ejercicios integrados. A lo largo del texto, muchas secciones de ejercicios incluirán ejercicios "apareados". Estos pares de ejercicios, que se identifican con* números subrayados, *pretenden ayudar al lector a resolver problemas y aprender. El primer ejercicio de cada pareja (el de número par) se resuelve en la Guía de estudio, que puede consultarse si se necesita ayuda para resolverlo. El segundo ejercicio (de número impar) es similar, y su respuesta se da al final del libro.*

22.1 Frentes de onda y rayos y 22.2 Reflexión

1. **OM** Un rayo *a*) es perpendicular a la dirección del flujo de energía, *b*) siempre es paralelo a otros rayos, *c*) es perpendicular a una serie de frentes de onda o *d*) ilustra la naturaleza ondulatoria de la luz.

2. **OM** El ángulo de incidencia es el ángulo entre *a*) el rayo incidente y la superficie reflectante, *b*) el rayo incidente y la normal a la superficie, *c*) el rayo incidente y el rayo reflejado, *d*) el rayo reflejado y la normal a la superficie.

3. **OM** Tanto para la reflexión especular (regular) como para la difusa (irregular), *a*) el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión, *b*) los rayos incidente y reflejado están uno a cada lado de la normal, *c*) el rayo incidente, el rayo reflejado y la normal local están en el mismo plano o *d*) todo lo anterior.

4. **PC** ¿En qué circunstancias el ángulo de reflexión será menor que el ángulo de incidencia?

5. **PC** El libro que usted está leyendo no tiene fuente luminosa, por lo que debe estar reflejando la luz de otras fuentes. ¿Qué tipo de reflexión es ésta?

*Suponga que los ángulos son exactos.

6. **PC** Al ver al Sol sobre un lago o sobre el océano, con frecuencia se observa una larga banda luminosa (▼figura 22.22). ¿Qué provoca este efecto, que a veces se llama "camino radiante"?

◀ **FIGURA 22.22**
Una senda luminosa
Véase el ejercicio 6.

7. ● El ángulo de incidencia de un rayo de luz en una superficie de espejo es de 35°. ¿Cuál es el ángulo que forman los rayos incidente y reflejado?

8. ● Un haz luminoso incide en un espejo plano, formando un ángulo de 32° con respecto a la normal. ¿Cuál es el ángulo entre los rayos reflejados y la superficie del espejo?

9. **EI** ● Un haz de luz incide en un espejo plano, formando un ángulo α con la superficie del espejo. *a*) El ángulo que forman el rayo reflejado y la normal será 1) α, 2) $90° - \alpha$ o 3) $2a$. *b*) Si $\alpha = 43°$, ¿cuál es el ángulo entre el rayo reflejado y la normal?

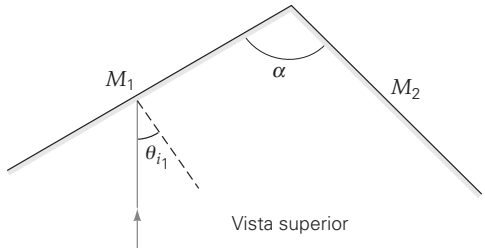
10. **EI** ●● Dos espejos planos verticales se tocan a lo largo de una orilla, donde sus planos forman un ángulo a. Se dirige un haz de luz a uno de ellos, con un ángulo de incidencia $\beta < \alpha$, y se refleja en el segundo espejo. *a*) El ángulo de reflexión del haz que sale del segundo espejo será 1) α, 2) β, 3) $\alpha + \beta$ o 4) $\alpha - \beta$? *b*) Si $\alpha = 60°$ y $\beta? = 40°$, ¿cuál será el ángulo de reflexión del haz que sale del segundo espejo?

11. **EI** ●● Dos espejos planos idénticos, de ancho w, se colocan a una distancia de separación d, con sus superficies especulares paralelas y viéndose entre sí. *a*) Un rayo de luz incide en un extremo del espejo, de tal forma que la luz choca justo con el extremo alejado del segundo espejo, después de reflejarse. El ángulo de incidencia será 1) $\text{sen}^{-1}(w/d)$, 2) $\cos^{-1}(w/d)$ o 3) $\tan^{-1}(w/d)$? *b*) Si $d = 50$ cm y $w = 25$ cm, ¿cuál es el ángulo de incidencia?

12. ●● Dos personas están de pie a 3 m de un espejo plano grande, y separadas entre sí por una distancia de 5.0 m, en un cuarto oscuro. ¿A qué ángulo de incidencia debe encender uno de ellos una linterna, dirigiéndola al espejo, para que el haz reflejado llegue directamente a la otra persona?

13. ●● Un rayo de luz incide sobre un espejo plano a un ángulo de 35°. Si el espejo se hace girar en un pequeño ángulo θ, ¿a través de qué ángulo girará el rayo reflejado?

14. ●●● Dos espejos planos, M_1 y M_2, se colocan juntos, como se ve en la ▼figura 22.23. *a*) Si el ángulo a que forman los espejos es de 70°, y el ángulo de incidencia θ_{i_1}, de un rayo de luz incidente en M_1 es de 35°, ¿cuál es el ángulo de reflexión θ_{r_2}, para M_2? *b*) Si $a = 115°$ y $\theta_{i_1} = 60°$, ¿cuál es θ_{r_2}?



▲ **FIGURA 22.23 Juego de espejos planos** Véanse los ejercicios 14 y 15.

15. ●●● Para los espejos planos de la figura 22.23, ¿qué ángulos α y θ_{i_1} permitirían al rayo reflejarse en la dirección de donde provino, es decir, en dirección paralela al rayo incidente?

22.3 Refracción y 22.4 Reflexión interna total y fibras ópticas

16. **OM** La luz refractada en la interfase entre dos medios distintos *a*) se desvía hacia la normal cuando $n_1 > n_2$, *b*) se desvía alejándose de la normal cuando $n_1 > n_2$, *c*) se desvía alejándose de la normal cuando $n_1 < n_2$ o *d*) tiene el mismo ángulo de refracción que su ángulo de incidencia.

17. **OM** El índice de refracción *a*) siempre es mayor o igual que 1, *b*) es inversamente proporcional a la rapidez de la luz en un medio, *c*) es inversamente proporcional a la longitud de onda de la luz en el medio o *d*) todas las opciones anteriores son verdaderas.

18. **OM** ¿Cuál de las siguientes condiciones debe satisfacerse para que ocurra una reflexión interna total? *a*) $n_1 > n_2$, *b*) $n_2 > n_1$, *c*) $\theta_1 > \theta_c$ o *d*) $\theta_1 < \theta_c$.

19. **PC** Explique cuál es la causa física fundamental de la refracción.

20. **PC** Cuando la luz pasa de un medio a otro, ¿cambia su longitud de onda? ¿Su frecuencia? ¿Su rapidez?

21. **PC** Explique por qué el popote de la ▼figura 22.24 casi parece que estuviera roto. Compare esta figura con la 22.13b y explique la diferencia.

◀ **FIGURA 22.24 Efecto de refracción** Véase el ejercicio 21.

22. **PC** Las fotos de la ▼figura 22.25 se tomaron con una cámara montada en un tripié, con ángulo fijo. En el interior del recipiente hay una moneda, pero al principio sólo se le ve una punta. Sin embargo, al agregar agua se ve una mayor porción de la moneda. ¿Por qué? Explique lo anterior con un diagrama.

▲ **FIGURA 22.25 Primero, apenas si se ve, pero después se ve bien** Véanse los ejercicios 22 y 52.

23. **PC** Dos cazadores, uno con arco y flecha y el otro con una escopeta láser, ven un pez bajo el agua. Ambos apuntan directamente hacia donde lo ven. ¿Cuál de ellos, el de la flecha o el del rayo láser, tiene mejor oportunidad de dar en el blanco? Explique por qué.

24. ● La rapidez de la luz en el núcleo del cristalino en un ojo humano es 2.13×10^8 m/s. ¿Cuál es el índice de refracción del núcleo?

25. **EI** ● Los índices de refracción para el diamante y el circón se encuentran en la tabla 22.1. *a*) La rapidez de la luz en el circón es 1) mayor, 2) menor o 3) igual que la rapidez de la luz en el diamante. Explique por qué. *b*) Calcule la relación de la rapidez de la luz en el circón entre la del diamante.

26. **EI** ● Un haz de luz entra al agua procedente del aire. *a*) El ángulo de refracción será 1) mayor, 2) igual o 3) menor que el ángulo de incidencia. Explique por qué. *b*) Si el haz entra al agua formando un ángulo de 60° en relación con la normal a la superficie, determine el ángulo de refracción.

27. **EI** ● La luz pasa de un recipiente de vidrio crown al agua. *a*) El ángulo de refracción será 1) mayor, 2) igual o 3) menor que el ángulo de incidencia. Explique por qué. *b*) Si el ángulo de refracción es de 20°, ¿cuál es el ángulo de incidencia?

28. ● Un haz de luz que viaja por el aire incide sobre un material plástico transparente a un ángulo de 50°. El ángulo de refracción es de 35°. ¿Cuál es el índice de refracción del plástico?

29. **EI** ● *a*) Para que haya reflexión interna total, la luz debe ir 1) del aire a un diamante o 2) de un diamante al aire. Explique por qué. *b*) ¿Cuál es el ángulo crítico del diamante en el aire?

30. ● El ángulo crítico de cierto tipo de vidrio en el aire es de 41.8°. ¿Cuál es el índice de refracción de ese vidrio?

31. ●● Un haz de luz en el aire incide sobre la superficie de una placa de cuarzo fundido. Parte del haz entra al cuarzo, con un ángulo de refracción de 30° con la normal a la superficie, y otra parte se refleja. ¿Cuál es el ángulo de reflexión?

32. ●● Un haz de luz incide sobre una pieza plana de poliestireno, en un ángulo de 55° con la normal a la superficie. ¿Qué ángulo forma el rayo refractado con el plano de la superficie?

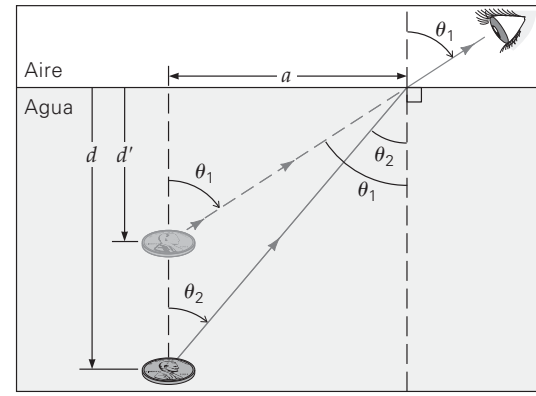
33. ●● Una luz monocromática azul, con frecuencia de 6.5×10^{14} Hz, entra a una pieza de vidrio flint. ¿Cuáles son la frecuencia y la longitud de onda de la luz dentro del vidrio?

34. **EI** ●● Una luz pasa del material A, cuyo índice de refracción es $\frac{4}{3}$, al material B, cuyo índice de refracción es $\frac{5}{4}$. *a*) La rapidez de la luz en el material A es 1) mayor, 2) igual, 3) menor que la rapidez de la luz en el material B. Explique por qué. *b*) Calcule la relación de la rapidez de la luz en el material A entre la rapidez de la luz en el material B.

35. **EI** ●● En el ejercicio 34, *a*) la longitud de onda de la luz en el material A es 1) mayor, 2) igual o 3) menor que la longitud de onda de la luz en el material B. Explique por qué. *b*) ¿Cuál es la relación de la longitud de onda de la luz en el material A respecto al material B?

36. ●● El láser que se usa en la cirugía para tratar algunas enfermedades de la córnea es de excímero y emite luz ultravioleta con 193 nm de longitud de onda en el aire. El índice de refracción de la córnea es 1.376. ¿Cuáles son la longitud de onda y la frecuencia de la luz en la córnea?

37. ●● *a*) Un objeto sumergido en el agua parece más cercano a la superficie de lo que en realidad está. ¿Cuál es la causa de esta ilusión? *b*) Con base en la ▼figura 22.26, demuestre que la profundidad aparente, para ángulos de refracción pequeños, es d/n, donde n es el índice de refracción del agua. [*Sugerencia:* recuerde que para ángulos pequeños, $\tan\theta \approx \operatorname{sen}\theta$.]



▲ **FIGURA 22.26 ¿Profundidad aparente?** Véase el ejercicio 37. (Sólo para ángulos pequeños; aquí los ángulos están amplificados para tener mayor claridad.)

38. ●● Una persona yace a la orilla de una alberca, y desde allí ve directamente abajo la tapa de una botella; la profundidad en ese lugar es de 3.2 m. ¿A qué distancia bajo el agua parece estar esa tapa de botella? (Véase el ejercicio 37b.)

39. ●● ¿Qué porcentaje de la profundidad real es la profundidad aparente de un objeto sumergido en el agua, si el observador lo ve casi directamente abajo? (Véase el ejercicio 37b.)

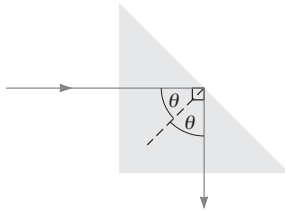
40. ●● Un rayo de luz en el aire llega a una placa de vidrio de 10.0 cm de espesor, con un ángulo de incidencia de 40°. El índice de refracción del vidrio es 1.65. El rayo que sale por la otra cara de la placa es paralelo al rayo incidente, pero tiene un desplazamiento lateral. ¿Cuál es la distancia perpendicular entre la dirección del rayo original y la del rayo emergente? [*Sugerencia:* véase el ejemplo 22.4.]

41. **EI** ●● Para una persona que está sumergida y que ve hacia arriba a través del agua, la altura del Sol (que es el ángulo entre el Sol y el horizonte) parece de 45°. *a*) La altura real del Sol es 1) mayor, 2) igual o 3) menor que 45°. Explique por qué. *b*) ¿Cuál es en realidad la altura del Sol?

42. ●● ¿A qué ángulo respecto a la superficie debe ver un buzo dentro de un lago hacia arriba para observar la puesta del Sol

43. ●● Un buzo sumergido dirige una luz hacia la superficie de un cuerpo de agua, con ángulos de incidencia de 40 y 50°. En ambos casos, ¿una persona en la orilla podrá ver el rayo de luz que sale? Justifique su respuesta desde el punto de vista matemático.

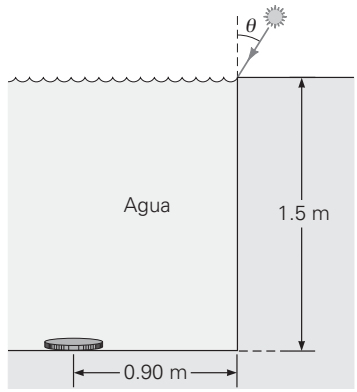
44. **EI** ●● *a*) Un rayo de luz va a experimentar una reflexión interna total al pasar por un prisma cuyos ángulos son de 45°, −90° y −45° (▸figura 22.27). Este arreglo dependerá 1) del índice de refracción del prisma, 2) del índice de refracción del medio que rodea al prisma o 3) de ambos índices de refracción? Explique por qué. *b*) Calcule el índice mínimo de refracción del prisma, si el medio que lo rodea es aire. Realice el cálculo también para el agua.



◀ **FIGURA 22.27 Reflexión interna total en un prisma** Véanse los ejercicios 44 y 45.

45. ●● Un prisma de 45°−90°−45° (figura 22.27) está fabricado con un material cuyo índice de refracción es 1.85. ¿Ese prisma se podría usar para desviar 90° un rayo de luz *a*) en aire o *b*) en agua?

46. ●● Una moneda está en el fondo de una alberca, bajo 1.5 m de agua y a 0.90 m de la pared (▼figura 22.28). Si incide un rayo de luz sobre la superficie del agua en la pared, ¿qué ángulo θ debe formar el rayo con el muro para iluminar la moneda?



▲ **FIGURA 22.28 Localice la moneda** Véase el ejercicio 46. La figura no está a escala.

47. ●● ¿Podría determinar el índice de refracción del fluido en aire de la figura 22.9a? Si es así, ¿cuál es su valor?

48. ●● Una placa de vidrio crown de 2.5 cm de espesor se coloca sobre un periódico. Si uno ve el periódico casi verticalmente desde arriba, ¿a qué distancia de la superficie del vidrio parecen estar las letras? (Véase el ejercicio 37b.)

49. ●● Un rayo de luz va por el agua y llega a una superficie de un material transparente, con ángulo de incidencia de 45°. Si el ángulo de refracción en el material es de 35°, ¿cuál es su índice de refracción?

50. ●● Luz amarillo verdosa, con una longitud de onda de 550 nm, incide en la superficie de una pieza plana de vidrio crown, con un ángulo de 40°. ¿Cuáles son *a*) el ángulo de refracción de la luz, *b*) la rapidez de la luz en el vidrio y *c*) la longitud de onda de la luz en el vidrio?

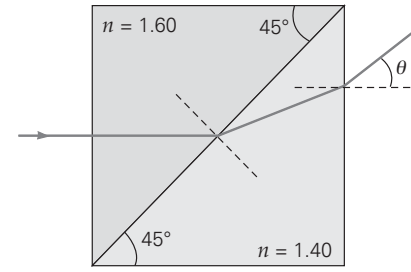
51. **EI** ●●● Un haz de luz dirigido hacia arriba, dentro de un material plástico con índice de refracción de 1.60, incide en una interfase superior horizontal. *a*) A ciertos ángulos de incidencia, la luz no se transmite al aire. La causa de esto es 1) la reflexión, 2) la refracción o 3) la reflexión interna total. Explique su respuesta. *b*) Si el ángulo de incidencia es de 45°, ¿parte del haz se transmitiría al aire? *c*) Suponga que la superficie superior del material plástico se cubre con una capa de líquido, con índice de refracción igual a 1.20. ¿Qué sucede en este caso?

52. ●●● Un depósito opaco, que estaría completamente vacío si no fuera porque en el fondo hay una moneda, tiene 15 cm de profundidad. Al ver al contenedor desde un ángulo de 50° con respecto a su lado vertical, no se ve nada en el fondo. Cuando se llena con agua, se ve la moneda (desde el mismo ángulo) en el fondo y justo saliendo del lado del depósito. (Véase la figura 22.25.) ¿A qué distancia del lado del depósito está la moneda?

53. ●●● Una pecera circular, que se encuentra a la intemperie, tiene 4.00 m de diámetro y una profundidad uniforme de 1.50 m. Un pez localizado a media profundidad y a 0.50 m de la orilla más cercana justo alcanza a ver por completo a una persona de 1.80 m de alto. ¿A qué distancia de la orilla de la pecera se encuentra la persona?

54. ●●● Un cubo de vidrio flint descansa sobre un periódico en una mesa. La mitad inferior de los lados verticales del cubo está pintada, de manera que es opaca, pero la mitad superior es transparente. Al mirar por uno de los lados *verticales* del cubo ¿es posible ver la parte del periódico cubierta por la parte central del vidrio? Pruebe su respuesta. [*Sugerencia:* dibuje la luz al abandonar el punto de interés.]

55. ●●● Se colocan juntos dos prismas de vidrio (▼figura 22.29). *a*) Si un haz de luz llega a la cara de uno de ellos en dirección normal, ¿a qué ángulo θ sale el haz por el otro prisma? *b*) ¿A qué ángulo de incidencia se refractaría el haz a lo largo de la interfase entre los prismas?



▲ **FIGURA 22.29 Prismas unidos** Véase el ejercicio 55.

22.5 Dispersión

56. **OM** La dispersión sólo se presenta si la luz es *a*) monocromática, *b*) policromática, *c*) blanca o *d*) tanto *b* como *c*.

57. **OM** La dispersión sólo se presenta durante *a*) la reflexión, *b*) la refracción, *c*) la reflexión interna total o *d*) todos los casos anteriores.

58. **OM** La dispersión se produce por *a*) la diferencia en la rapidez de la luz en distintos medios, *b*) la diferencia en la rapidez de la luz para distintas longitudes de onda de la luz en un medio determinado, *c*) la diferencia en el ángulo de incidencia para distintas longitudes de onda de luz en un medio determinado o *d*) la diferencia en los índices de refracción de la luz en distintos medios.

59. **PC** ¿Por qué la dispersión es más notable en un prisma de forma triangular que en un bloque cuadrado?

60. **PC** Un prisma de vidrio dispersa la luz blanca y forma un espectro. ¿Podría usarse un segundo prisma de vidrio para recombinar los componentes del espectro? Explique su respuesta.

61. **PC** Es imposible caminar bajo un arco iris. Explique por qué.

62. **PC** Un rayo de luz está formado por dos colores, A y B, y pasa por un prisma. El color A se refracta más que el color B. ¿Cuál color tiene la mayor longitud de onda? Explique su respuesta.

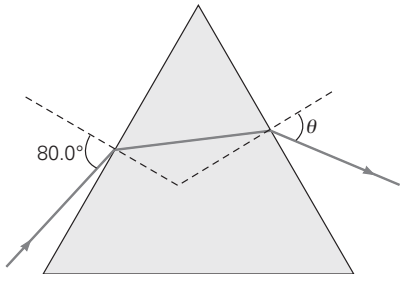
63. **PC** *a*) Si el vidrio es dispersor, ¿por qué no se ven los colores del arco iris cuando la luz del Sol pasa por el vidrio de una ventana? *b*) Hay dispersión cuando una luz policromática incide en un medio dispersor con un ángulo de 0°? Explique su respuesta. (¿Todos los colores de la luz tienen la misma rapidez en ese medio?)

64. **EI** ●● El índice de refracción del vidrio crown es 1.515, para la luz roja, y 1.523 para la luz azul. *a*) Si la luz incide en el vidrio crown, llegando desde el aire, ¿cuál de los dos colores, rojo o azul, se refractará más? ¿Por qué? *b*) Calcule el ángulo que separa a los rayos de los dos colores, en una pieza de vidrio crown, si su ángulo de incidencia es de 37°.

65. ●● Un haz de luz, con componentes rojo y azul, de longitudes de onda de 670 y 425 nm, respectivamente, llega a una placa de cuarzo fundido, con un ángulo de incidencia de 30°. Al refractarse, los componentes se separan y forman un ángulo de 0.00131 rad. Si el índice de refracción para la luz roja es 1.4925, ¿cuál es el índice de refracción para la luz azul?

66. ●● Una luz blanca pasa por un prisma de vidrio crown y llega a una interfase con aire en un ángulo de 41.15°. Suponga que los índices de refracción son los mismos del ejercicio 64. ¿Qué color (o colores) de luz se refractará hacia fuera, en el aire?

67. ●●● Un haz de luz roja incide en un prisma equilátero, como se ve en la ▼figura 22.30. *a*) Si el índice de refracción del prisma es 1.400 para la luz roja, ¿a qué ángulo θ sale el rayo por la otra cara del prisma? *b*) Supongamos que el haz incidente fuera de luz blanca. ¿Cuál sería la separación angular de los componentes rojo y azul en el rayo que sale, si el índice de refracción de la luz azul fuera 1.403? *c*) ¿Y si el índice de refracción para la luz azul fuera 1.405?



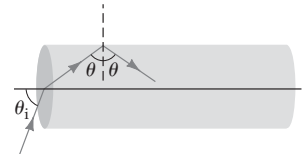
▲ **FIGURA 22.30 De nuevo el prisma** Véase el ejercicio 67.

Ejercicios adicionales

68. En la figura 22.21b, si el índice de refracción del prisma de vidrio es 1.5, y el experimento se hace en el agua y no en el aire, ¿qué sucedería con el espectro que sale del prisma? ¿Y si se hace en un líquido que también tenga un índice de refracción de 1.5? Explique su respuesta.

69. Una luz pasa del medio A al medio B con un ángulo de incidencia de 30°. El índice de refracción de A es 1.5 veces el de B. *a*) ¿Cuál es el ángulo de refracción? *b*) ¿Cuál es la relación de la rapidez de la luz en B entre la rapidez de la luz en A? *c*) ¿Cuál es la relación de la frecuencia de la luz en B entre la frecuencia de la luz en A? *d*) ¿A qué ángulo de incidencia se reflejaría internamente la luz?

70. Para que la reflexión interna total ocurra dentro de una fibra óptica como la que se observa en la ▼figura 22.31, el ángulo θ debe ser mayor que el ángulo crítico para la interfase fibra-aire. En el extremo de la fibra, la luz incidente experimenta una refracción para entrar en ella. Si la reflexión interna total debe ocurrir para *cualquier* ángulo de incidencia, θ_i, fuera del extremo de la fibra, ¿cuál es el índice mínimo de refracción de la fibra?



◀ **FIGURA 22.31 Fibra óptica** Véase el ejercicio 70.

71. **EI** El ángulo crítico para la interfase vidrio-aire es de 41.11° para la luz roja y de 41.04° para la luz azul. *a*) Durante el tiempo que la luz azul recorre 1.000 m, la luz roja recorrerá 1) una mayor distancia, 2) una menor distancia o 3) exactamente 1.000 m. Explique por qué. *b*) Calcule la diferencia en la distancia recorrida por los dos colores.

72. En el ejercicio 67, si el ángulo de incidencia es demasiado pequeño, la luz no saldrá por la otra cara del prisma. ¿Cómo podría suceder esto? Calcule el ángulo mínimo de incidencia para la luz roja de manera que no salga por la otra cara del prisma.

73. Una luz que viaja por el aire incide sobre un material transparente. Se sabe que el ángulo de reflexión es el doble del ángulo de refracción. ¿Cuál es el *intervalo* del índice de refracción del material?

PHYSLET® Los siguientes problemas de física Physlet pueden utilizarse con estos capítulos.
34.1, 34.2, 34.3, 34.5, 34.6, 34.7, 34.8, 34.10

CAPÍTULO 23

ESPEJOS Y LENTES

23.1 Espejos planos 730
23.2 Espejos esféricos 732
23.3 Lentes 740
23.4 La ecuación del fabricante de lentes 750
*23.5 Aberraciones de las lentes 752

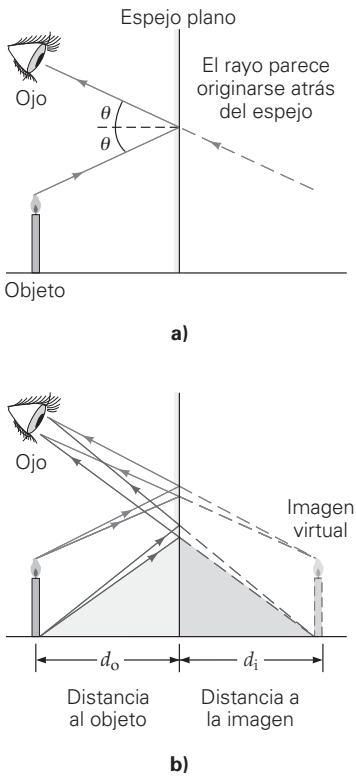
HECHOS DE FÍSICA

- La lente óptica de refracción más grande del mundo mide 1.827 m (5.99 ft) de diámetro. La construyó un equipo del Optics Shop of the Optical Sciences Center de la Universidad de Arizona, en Tucson, Arizona, y se terminó en enero de 2000.
- El espejo más grande en proceso de desarrollo para el Observatorio Espacial Herschel de la Agencia Espacial Europea mide 3.5 m (11.5 ft) de diámetro. Está hecho de carburo de silicio, que reduce su masa por un factor de 5 en comparación con los materiales tradicionales.
- El sistema óptico de una cámara fotográfica en realidad tiene más de un elemento (es decir, más de una lente). Muchas lentes de cámaras tienen siete o más elementos compensatorios que permiten reducir o eliminar diversos tipos de aberraciones de las lentes. Una sola lente produciría imágenes distorsionadas.

¿Cómo sería la vida si no hubiera espejos en los baños ni en los automóviles, o si no existieran los anteojos? Imagine un mundo sin imágenes ópticas de cualquier clase: sin fotografías, sin cine, sin televisión. Imagine lo poco que sabríamos del universo si no hubiera telescopios para observar planetas y estrellas lejanos, o lo poco que sabríamos de biología y medicina si no hubiera microscopios para observar las bacterias y las células. A veces olvidamos la gran dependencia que tenemos de los espejos y de las lentes.

Quizás el primer espejo fue la superficie de un charco de agua. Después, se descubrió que los metales pulidos y el vidrio tenían propiedades reflectoras. Nuestros antepasados también deben haberse dado cuenta de que al mirar los objetos a través del vidrio, éstos parecían distintos en comparación a cuando los veían de manera directa, dependiendo de la forma del vidrio. En algunos casos, los objetos parecían aumentados o invertidos, como en la foto de esta página. (Véase el pliego a color al final del libro.) Con el tiempo, las personas aprendieron a tallar el vidrio para fabricar lentes, preparando el camino hacia los numerosos dispositivos ópticos que en la actualidad son tan comunes.

Las propiedades ópticas de los espejos y de las lentes se basan en los principios de reflexión y refracción de la luz, que estudiamos en el capítulo 22. Ahora aprenderemos la forma en que funcionan los espejos y las lentes. Entre otras cosas, descubriremos por qué la imagen en la foto de esta página está de cabeza y reducida, mientras que las imágenes en un espejo plano ordinario están derechas, ¡aunque tal parece que su imagen no se peina con la misma mano que usted utiliza!



▲ **FIGURA 23.1 Imagen formada por un espejo plano** ***a)*** Un rayo procedente de un punto en el objeto se refleja en el espejo siguiendo la ley de la reflexión. ***b)*** Los rayos de varios puntos del objeto producen una imagen. Como los dos triángulos sombreados son idénticos, la distancia a la imagen d_i (la distancia de la imagen al espejo) es igual a la distancia al objeto d_o. Esto es, la distancia que parece haber entre la imagen y el espejo es la misma que hay entre el objeto y el espejo. Los rayos parecen emanar de la posición de la imagen. En este caso se dice que la imagen es virtual.

PHYSLET®

Ilustración 33.2 Espejos planos

23.1 Espejos planos

OBJETIVOS: *a*) Comprender cómo se forman las imágenes y *b*) describir las características de las imágenes formadas por los espejos planos.

Los espejos son superficies reflectoras o reflectantes lisas, hechos de metal pulido o de vidrio con un recubrimiento metálico. Como ya sabemos, hasta una pieza de vidrio sin recubrimiento, como el vidrio de una ventana, puede funcionar como un espejo. Sin embargo, cuando se recubre una cara del vidrio con un compuesto de estaño, mercurio, aluminio o plata, aumenta la reflectividad del vidrio, porque la luz no atraviesa el recubrimiento. Un espejo puede tener recubrimiento frontal o trasero, pero la mayoría tiene un recubrimiento por detrás.

Al ver un espejo de forma directa, lo que se ve son las imágenes reflejadas de uno y de los objetos que le rodean (que parecen estar al otro lado de la superficie del espejo). La geometría de la superficie del espejo influye sobre el tamaño, la orientación y el tipo de imagen. En general, una *imagen* es la contraparte visual de un objeto, producida por la reflexión (en los espejos) o la refracción (en el caso de las lentes).

Un espejo con superficie plana se llama **espejo plano**. El diagrama de rayos de la ◂figura 23.1 muestra el modo en que se forman las imágenes en un espejo plano. Parece que una imagen está atrás o "dentro" del espejo. Esto se debe a que cuando el espejo refleja un rayo de luz del objeto hacia el ojo (figura 23.1a), parece que el rayo se origina detrás del espejo. Los rayos reflejados de las partes superior e inferior de un objeto se ilustran en la figura 23.1b. En realidad, los rayos de luz que provienen de todos los puntos de la parte del objeto que da hacia el espejo se reflejan, y entonces se observa una imagen del objeto completo.

La imagen formada así *parece* que está detrás del espejo. Se le llama **imagen virtual**. Los rayos luminosos parecen proceder de las imágenes virtuales y apartarse unos de otros, aunque eso no es cierto. En realidad, ninguna energía lumínica procede de la imagen o pasa a través de ella. Sin embargo, los espejos esféricos (que se describen en la sección 23.2) pueden proyectar imágenes frente a ellos, donde la luz efectivamente pasa a través de la imagen. Esta clase de imágenes se llaman **imágenes reales**. Un ejemplo de imagen real es la que produce un proyector de filminas en un salón de clase.

Observe las posiciones y distancias del objeto y la imagen producida por el espejo en la figura 23.1b. Es obvio que la distancia de un objeto a un espejo se llama *distancia del objeto* (d_o), y la distancia que parece haber entre su imagen y la parte posterior del espejo se llama *distancia de la imagen* (d_i). Se puede ver, por consideraciones geométricas de triángulos idénticos y la ley de la reflexión ($\theta_i = \theta_r$) que $d_o = d_i$, lo que significa que *la imagen formada por un espejo plano parece estar detrás del espejo a una distancia igual a la que hay entre el objeto y el espejo.* (Véase el ejercicio 17.)

Son interesantes diversas características de las imágenes. Dos de ellas son su tamaño y orientación con respecto a las del objeto. Ambas se expresan en términos del **factor de amplificación lateral (*M*)**, que se define como la relación entre la altura de la imagen (h_i) y la del objeto (h_o):

$$M = \frac{\text{altura de la imagen}}{\text{altura del objeto}} = \frac{h_i}{h_o} \tag{23.1}$$

Usaremos una vela encendida como objeto, para describir otra característica importante de la imagen: la orientación, es decir, si la imagen está derecha o invertida con respecto a la orientación del objeto. (Al trazar diagramas de rayos, una flecha representa adecuadamente al objeto para estos fines.) Para un espejo plano, la imagen siempre está derecha (o erguida). Eso significa que la imagen está orientada en la misma dirección que el objeto. Se dice entonces que h_i y h_o tienen *el mismo signo* (ambos signos son positivos o ambos negativos), así que M es de signo positivo. Note que M es una cantidad adimensional, por ser una relación de alturas

En la ▸figura 23.2 también se observa que la imagen y el objeto tienen el mismo tamaño (altura), por lo que $h_i = h_o$. Por consiguiente, $M = +1$ para un espejo plano, pues la imagen está derecha y no hay aumento. Esto es, en un espejo plano una persona y su imagen tienen el mismo tamaño.

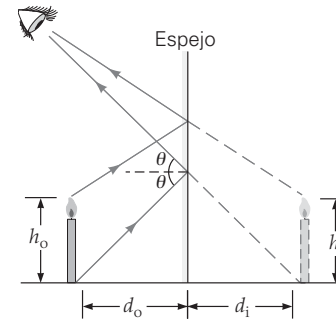
Con otro tipo de espejos, como los esféricos (que estudiaremos dentro de poco), es posible tener imágenes invertidas donde M es negativo. En resumen, el signo de M nos indica la orientación de la imagen con respecto al objeto, mientras que su valor absoluto nos permite conocer el aumento.

TABLA 23.1 Características de las imágenes formadas por los espejos planos

$d_i = d_o$	La distancia a la imagen es igual a la distancia al objeto. Esto es, la distancia que parece haber entre la imagen y la parte posterior del espejo es igual a la que hay entre el espejo y el objeto.
$M = +1$	La imagen es virtual, derecha y sin aumento.

Otra característica de las imágenes reflejadas es la llamada *inversión derecha-izquierda*. Cuando se mira uno al espejo y levanta la mano derecha, parece que la imagen está levantando su mano izquierda. Sin embargo, esta inversión derecha-izquierda es aparente, causada en realidad por la inversión frente-atrás. Por ejemplo, si su cara está de frente al sur, entonces su espalda está hacia el norte. Por otra parte, su imagen estará de cara hacia el norte y dará la espalda al sur, es decir, se trata de una inversión de la parte anterior y la posterior. Usted podrá demostrar esta inversión pidiendo a uno de sus amigos que se ponga de pie dando la cara hacia usted (sin un espejo). Si su amigo sube su mano derecha, usted podrá ver que esa mano en realidad está al lado izquierdo de usted.

Las características principales de la imagen formada por un espejo plano se resumen en la tabla 23.1. Véase también la sección A fondo 23.1, en la p. 733, que describe todo lo que es posible hacer con los espejos.



▲ **FIGURA 23.2 Aumento** El factor de amplificación lateral, o de altura, se define como $M = h_i/h_o$. Para un espejo plano, $M = +1$, lo que significa que $h_i = h_o$, es decir, la imagen tiene la misma altura que el objeto, además de que está derecha.

Ejemplo 23.1 ■ De cuerpo completo: longitud mínima del espejo

¿Cuál es la longitud vertical mínima que debe tener un espejo plano para que una persona pueda ver su imagen completa (de la cabeza hasta la punta de los pies)? (Véase la ▼figura 23.3.)

Razonamiento. Al aplicar la ley de la reflexión, vemos en la figura que los rayos necesarios para que la imagen sea completa forman dos triángulos. Esos triángulos relacionan la altura de la persona con la longitud mínima del espejo.

Solución. Para calcular esta longitud se examina el caso ilustrado en la figura 23.3. Con un espejo de longitud mínima, un rayo procedente de la parte superior de la persona se refleja en la parte superior del espejo, y un rayo que proviene de los pies de la persona se refleja en la parte inferior del espejo. La longitud L del espejo es, entonces, la distancia entre las líneas horizontales punteadas perpendiculares al espejo, en sus lados superior e inferior.

Sin embargo, esas líneas también son las normales en las reflexiones de los rayos. De acuerdo con la ley de la reflexión, las normales bisecan a los ángulos que forman los rayos incidentes y reflejados; esto es, $\theta_i = \theta_r$. Entonces, como los triángulos respectivos a cada lado de la normal punteada son semejantes, la longitud del espejo, desde su lado inferior hasta un punto al nivel de los ojos de la persona es $h_1/2$, donde h_1 es la altura de la persona desde sus pies hasta sus ojos. De igual forma, la pequeña longitud superior del espejo es $h_2/2$ (la distancia vertical entre los ojos de la persona y la orilla superior del espejo). Entonces,

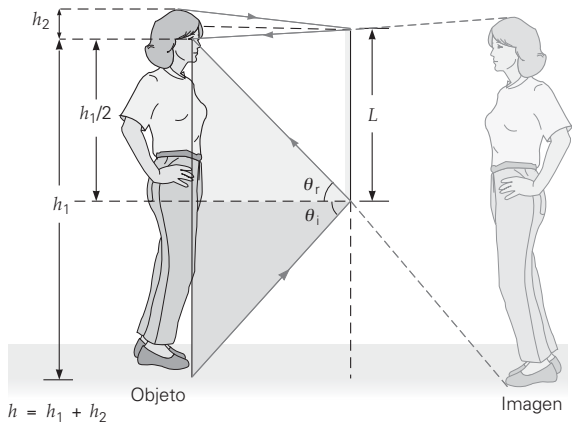
$$L = \frac{h_1}{2} + \frac{h_2}{2} = \frac{h_1 + h_2}{2} = \frac{h}{2}$$

donde h es la altura total de la persona.

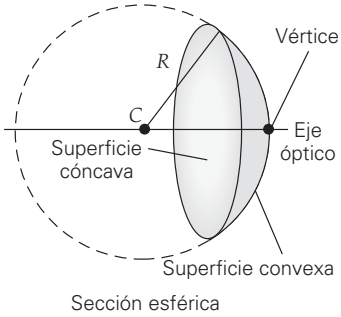
PHYSLET®

Exploración 33.1 Imagen en un espejo plano

(continúa en la siguiente página)



◀ **FIGURA 23.3 De cuerpo entero** La altura mínima, o longitud vertical, de un espejo plano, necesaria para que una persona vea su imagen completa (de la cabeza a los pies) es la mitad de la altura de la persona. Véase el ejemplo 23.1.



▲ **FIGURA 23.4** Espejos esféricos Un espejo esférico es un casquete de una esfera. La superficie reflectora puede ser la exterior (convexa) o la interior (cóncava) del casquete esférico.

Por lo anterior, para que una persona vea su imagen completa en un espejo plano, la altura mínima, o longitud vertical, del espejo debe ser igual a la mitad de la altura de la persona.

El lector puede hacer un experimento sencillo para demostrar esta conclusión. Consiga algo de papel periódico y una cinta adhesiva, así como un espejo de cuerpo entero. Cubra gradualmente partes del espejo con el periódico hasta que no pueda ver su imagen completa. Verá que sólo necesitará un espejo que tenga la mitad de su altura.

Ejercicio de refuerzo. ¿Qué efecto tiene la distancia de una persona al espejo sobre la longitud mínima necesaria para producir su imagen completa? *(Las respuestas a todos los ejercicios de refuerzo aparecen al final del libro.)*

23.2 Espejos esféricos

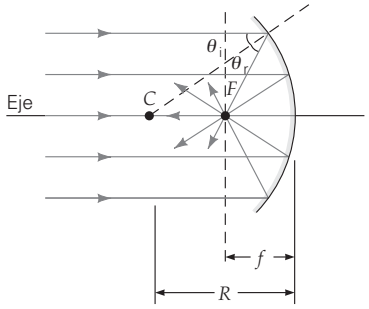
OBJETIVOS: *a*) Diferenciar entre espejos esféricos convergentes y divergentes, *b*) describir sus imágenes y características y *c*) determinar las características de la imagen con diagramas de rayos y con la ecuación del espejo esférico.

Como su nombre lo indica, un **espejo** esférico es una superficie reflectora con geometría esférica. La ◂figura 23.4 muestra que si se rebana una parte de una esfera hueca de radio R a lo largo de un plano, la parte cortada tiene la forma de un espejo esférico. Tanto el interior como el exterior de ese casquete pueden ser reflectores. Si la reflexión se efectúa en la superficie interna, la sección se comporta como un **espejo cóncavo**. Si la reflexión se realiza en la superficie externa, entonces la sección se comporta como un **espejo convexo**.

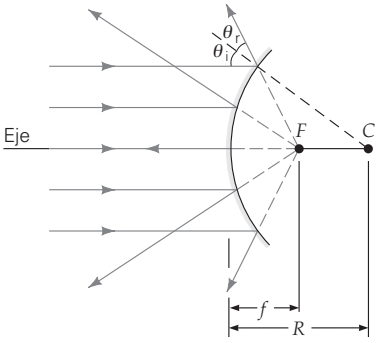
La línea radial que pasa por el centro del espejo esférico se llama *eje óptico* e interseca a la superficie del espejo en el *vértice* de la parte esférica (figura 23.4). El punto del eje óptico que corresponde al centro de la esfera de donde se cortó la sección se llama **centro de curvatura (*C*)**. La distancia entre el vértice y el centro de curvatura es igual al radio de la esfera, y se llama **radio de curvatura (*R*)**.

Cuando unos rayos paralelos y cercanos al eje óptico inciden sobre un espejo cóncavo y se reflejan, convergen en un punto común llamado **foco (*F*)**. En consecuencia, un espejo cóncavo se llama **espejo convergente** (◂figura 23.5a). Advierta que cada rayo satisface la ley de la reflexión, $\theta_i = \theta_r$.

De igual forma, los rayos paralelos y cercanos al eje óptico de un espejo convexo divergen al reflejarse, como si provinieran de un foco atrás de la superficie del espejo (figura 23.5b). Por lo anterior, se dice que un espejo convexo es un **espejo divergente** (▾figura 23.6). Cuando uno ve rayos divergentes, el cerebro interpreta, o supone, que hay un objeto desde donde los rayos *parecen* divergir, aunque en realidad no exista tal objeto.



a) Espejo cóncavo o convergente



b) Espejo convexo o divergente

▲ **FIGURA 23.5** Punto focal ***a)*** Los rayos paralelos y cercanos al eje óptico de un espejo esférico cóncavo convergen en el punto focal o foco F. ***b)*** Los rayos paralelos y cercanos al eje óptico de un espejo esférico convexo se reflejan en trayectorias que parecen provenir de un foco detrás del espejo. Observe que cada rayo en el diagrama satisface la ley de la reflexión, $\theta_i = \theta_r$.

◂ **FIGURA 23.6** Espejo divergente Si trazamos los rayos al revés en la figura 23.5b, veremos que un espejo esférico divergente (convexo) produce un mayor campo de visión; esto se aprecia con este espejo en una tienda. (Véase el pliego a color al final del libro.)

A FONDO 23.1 TODO SE HACE CON ESPEJOS

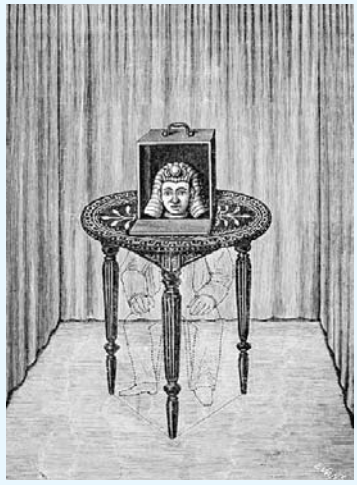


FIGURA 1 La Esfinge, una ilustración del sensacional acto de ilusionismo de Tobin El cuerpo se ocultaba con dos espejos planos.

FIGURA 2 Houdini y Jennie, el elefante que desaparece El elefante desaparecía ante la vista de los espectadores cuando Houdini disparaba una pistola.

La mayoría de nosotros nos hemos sentido fascinados por los sensacionales trucos de los magos, que hacen aparecer y desaparecer objetos y animales súbitamente en el escenario. Por supuesto, éstos no aparecen ni desaparecen de verdad. El mago requiere de habilidades especiales para realizar el truco rápidamente y con suavidad para "engañar" al auditorio. Todo se hace con espejos, afirman.

En 1876, Thomas William Tobin inventó el primer truco de ilusionismo a base de espejos, "La Esfinge", para los magos. Su invención se basaba en el uso de espejos para ocultar personas u objetos, como se observa en la figura 1; esta imagen su utilizó como portada del libro *Modern Magic* en 1876. El truco consiste en colocar dos espejos planos entre las tres patas de una mesa, para así esconder el cuerpo de una persona.

Harry Houdini, el mundialmente famoso maestro del ilusionismo, pensaba que era muy fácil sacar una paloma de un sombrero o hacer desaparecer un conejo en el aire. En 1918, Houdini hizo "desaparecer" un elefante de 4500 kg, llamado Jennie, en medio del escenario en el Teatro Hipódromo de Nueva York (figura 2). El acto se llamaba "El elefante que se desvanece".

Cuando llegaba el momento de hacer desaparecer al elefante, dos enormes espejos planos en ángulo recto uno con el otro se deslizaban rápidamente hacia el lugar preciso. Al alinearlos de la manera correcta, los espejos reflejaban la luz de las paredes interiores del escenario para formar imágenes virtuales que igualaban el telón de fondo del escenario. Así que el auditorio sólo veía el escenario sin el elefante (figura 3). Una luz estroboscópica se utilizaba para disimular el breve desplazamiento de los espejos. El elefante parecía desaparecer rápidamente del escenario.

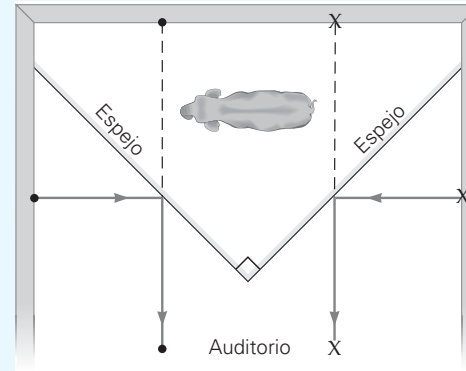


FIGURA 3 El elefante que desparece Dos enormes espejos en ángulo recto uno con el otro se utilizaban para ocultar al elefante.

La distancia del vértice al foco de los rayos paralelos cercanos al eje de un espejo esférico se llama **distancia focal** f. (Véase la figura 23.5.) La distancia focal se relaciona con el radio de curvatura mediante esta sencilla ecuación:

$$f = \frac{R}{2} \qquad \textit{distancia focal, espejo esférico} \qquad (23.2)$$

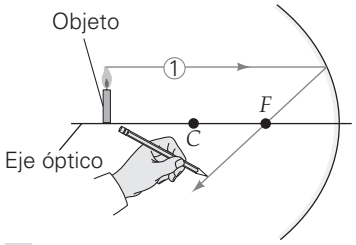
Nota:
espejo cóncavo = espejo convergente

espejo convexo = espejo divergente

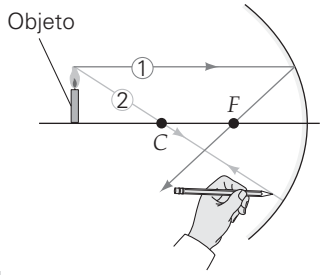
El resultado anterior es válido sólo cuando los rayos están cerca del eje óptico, esto es, para una aproximación de un ángulo pequeño. Los rayos alejados del eje óptico se enfocarán en diferentes focos, lo que dará por resultado cierta distorsión de la imagen. En óptica, esta distorsión es un ejemplo de *aberración*. Algunos espejos telescópicos son de forma parabólica y no esférica, de manera que *todos* los rayos paralelos al eje óptico se enfocan en el punto focal, eliminando así la *aberración esférica*.

APRENDER DIBUJANDO
Diagramas de rayos para un espejo (véase el ejemplo 23.2)

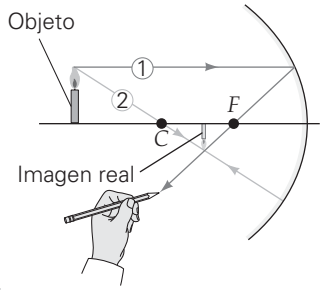
Espejo convergente (cóncavo)



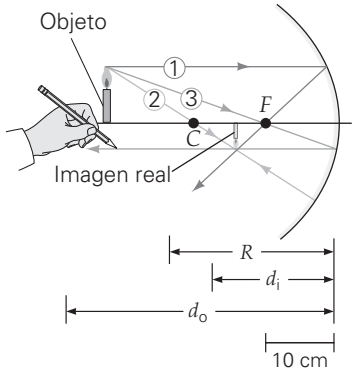
1 **Rayo paralelo**



2 **Rayo principal (radial)**



3 **Ubicación de la imagen**



4 **También se puede usar el rayo focal**

Diagramas de rayos

Las características de las imágenes formadas por espejos esféricos se determinan con la ayuda de la óptica geométrica (que se presentó en el capítulo 22). Este método consiste en trazar rayos que emanan de uno o más puntos de un objeto. Se aplica la ley de la reflexión ($\theta_i = \theta_r$), y se definen tres rayos con respecto a la geometría del espejo:

1. Un **rayo paralelo**, que incide a lo largo de una trayectoria paralela al eje óptico, y que se refleja y pasa (o parece pasar) por el foco (al igual que todos los rayos paralelos y cercanos al eje).
2. Un **rayo radial**, que incide pasando por el centro de curvatura (*C*) del espejo esférico. Como incide en dirección normal a la superficie del espejo, se refleja a lo largo de su trayectoria de llegada y pasan por el punto C.
3. Un **rayo focal**, que pasa (o parece pasar) por el foco y se refleja en dirección paralela al eje óptico. Es, por así decirlo, un rayo paralelo que viaja en sentido contrario.

Si utilizamos dos rayos cualesquiera de los tres anteriores podremos ubicar la imagen (distancia a la imagen) y determinar su tamaño (aumentado o reducido), su orientación (derecha o invertida) y su tipo (real o virtual). Se acostumbra usar la punta del objeto asimétrico (por ejemplo, la punta de una flecha o la llama de una vela) como el punto de partida de los rayos. El punto correspondiente de la imagen estará en el punto de intersección de los rayos. Con este método se facilita ver si la imagen está derecha o invertida.

Sin embargo, hay que tener presente que *es factible utilizar rayos bien trazados de cualquier punto del objeto para localizar la imagen.* Todo punto de un objeto visible funciona como emisor de luz. Por ejemplo, en una vela, la llama emite su propia luz, pero cualquier punto de la vela refleja la luz.

Ejemplo 23.2 ■ Aprenda dibujando: diagrama de rayos para un espejo

Se coloca un objeto a 39.0 cm frente a un espejo esférico cóncavo de 24.0 cm de radio. *a*) Con un diagrama de rayos ubique la imagen formada por este espejo. *b*) Describa las características de la imagen.

Razonamiento. Un diagrama de rayos, trazado con precisión, dará por sí solo información "cuantitativa" acerca de la ubicación y las características de la imagen, que también podrían determinarse matemáticamente.

Solución.

Dado: $R = 24.0$ cm
$d_o = 39.0$ cm

Encuentre: *a*) La ubicación de la imagen
b) Las características de la imagen

a) Como se pide elaborar un diagrama de rayos para ubicar la imagen, lo primero que se debe hacer es elegir la escala del dibujo. Si se usa una escala en la que 1 cm en el dibujo representa 10 cm en la realidad, habría que trazar el objeto a 3.90 cm frente al espejo.

Primero se traza el eje óptico, el espejo, el objeto (una vela encendida) y el centro de curvatura (*C*). De acuerdo con la ecuación 23.2, $f = 24.0\ \text{cm}/2 = 12.0$ cm. Entonces se ubica el foco (*F*) a la mitad de la distancia del vértice al centro de curvatura.

Para ubicar la imagen, se siguen los pasos 1 a 4 de la figura de Aprender dibujando:

1. El primer rayo que se trazó en este caso es el rayo paralelo (el ① en la figura). Desde la punta de la llama se traza un rayo paralelo al eje óptico. Al reflejarse, ese rayo pasa por el foco, *F*.

2. A continuación se traza el rayo radial (② en la figura). Desde la punta de la llama se traza un rayo que pase por el centro de curvatura, *C*. Ese rayo se reflejará por su trayectoria original (¿por qué?).

3. Se puede ver con claridad que los dos rayos se intersecan. El punto de intersección es la punta de la *imagen* de la vela. A partir de este punto se traza la imagen extendiendo la punta de la flama hacia el eje óptico. La distancia de imagen $d_i = 17$ cm, como se mide en el diagrama.

4. Sólo se necesitan dos rayos para ubicar la imagen. Sin embargo, si para verificar se traza el tercero, que en este caso es el rayo focal (③ en la figura), éste deberá pasar por el mismo punto de la imagen donde se intersecan los otros dos rayos (si se traza el diagrama con cuidado). El rayo focal de la punta de la llama que pasa por el foco, *F*, al reflejarse, será paralelo al eje óptico.

b) En el diagrama de rayos que se dibujó en el inciso *a* se observa con claridad que la imagen es real, porque los rayos se intersecan *frente* al espejo. Los rayos reflejados convergen y pasan por la imagen. Resulta entonces una imagen real, que se podría ver en una pantalla (por ejemplo, un trozo de papel blanco) colocada a la distancia d_i del espejo cóncavo. Además, la imagen está invertida (porque la llama apunta hacia abajo) y es más pequeña que el objeto.

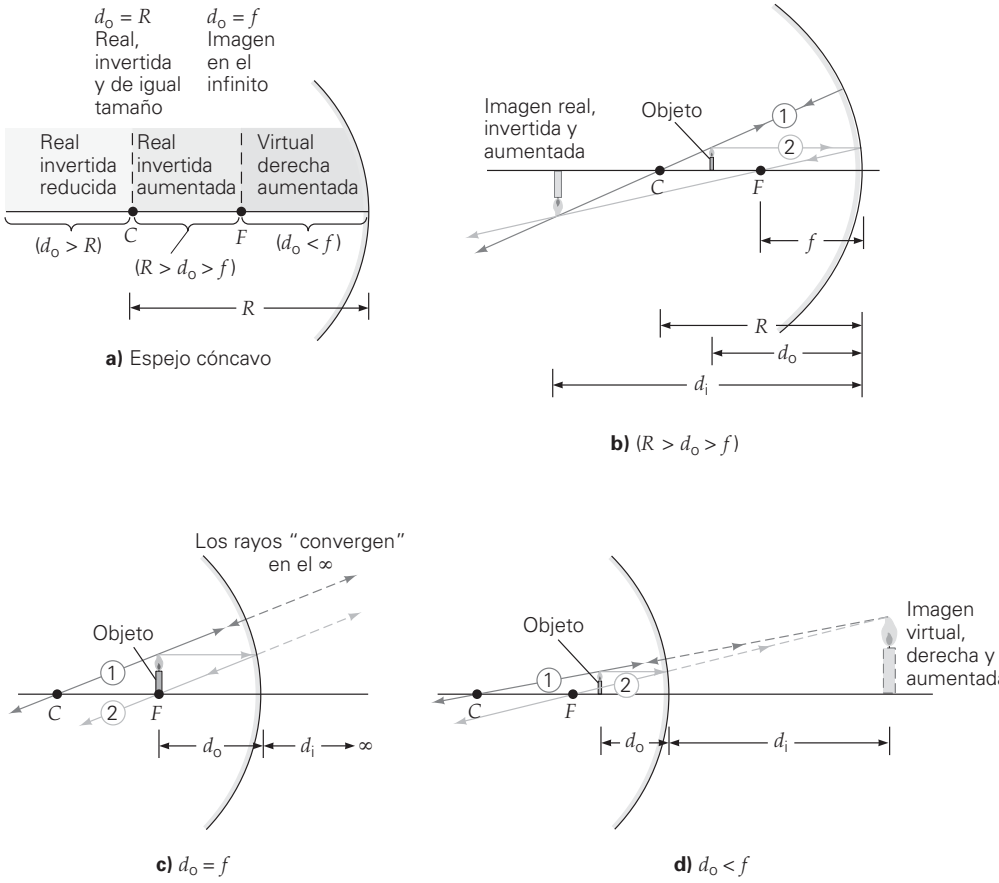
Ejercicio de refuerzo. En este ejemplo, ¿cuáles serían las características de la imagen si el objeto estuviera a 15.0 cm del espejo? Ubique la imagen y describa sus características.

PHYSLET®
Exploración 33.3 Diagramas de rayos

En el Ejemplo integrado 23.4 se presentará un diagrama de rayos en el que se usan los tres mismos rayos con un espejo convexo (divergente).

Un espejo convergente *no* siempre forma una imagen real. Para un espejo esférico convergente, las características de la imagen cambian con la distancia del objeto al espejo. Hay dos puntos donde esos cambios son drásticos: C, el centro de curvatura, y F, el foco. Estos puntos dividen al eje óptico en tres regiones (▼figura 23.7a): $d_o > R$, $R > d_o > f$ y $d_o < f$.

▼ **FIGURA 23.7 Espejos cóncavos** ***a)*** Para un espejo cóncavo o convergente, el objeto se puede ubicar dentro de una de las tres regiones definidas por el centro de curvatura (C) y el foco (F), o en uno de esos dos puntos. Para $d_o > R$, la imagen es real, invertida y más pequeña que el objeto, como se ve en los diagramas de rayos del ejemplo 23.2. ***b)*** Cuando $R > d_o > f$, la imagen también es real e invertida, pero agrandada. ***c)*** Cuando el objeto está en el foco F, es decir, que $d_o = f$, se dice que la imagen se forma en el infinito. ***d)*** Cuando $d_o < f$, la imagen es virtual, derecha y aumentada.



Se comenzará la descripción con el objeto en la región más alejada del espejo ($d_o > R$), viendo lo que sucede al acercarse a él:

- El caso en que $d_o > R$ ya se describió en el ejemplo 23.2.
- Cuando $d_o = R = 2f$, la imagen es real, invertida y del mismo tamaño que el objeto.
- Cuando $R > d_o > f$, se forma una imagen aumentada, invertida y real (figura 23.7b). La imagen es aumentada cuando el objeto está más cerca que el centro de curvatura, C.
- Cuando $d_o = f$, el objeto está en el foco (figura 23.7c). Los rayos reflejados son paralelos, y se dice que la imagen "se forma en el infinito". El foco F es un punto especial de "paso" de los rayos, porque divide al espacio frente al espejo en dos regiones.
- Cuando $d_o < f$, el objeto está entre el foco y la superficie del espejo. Se forma entonces una imagen virtual, aumentada y derecha (figura 23.7d).

Exploración 33.2 Mirando en los espejos curvos

Cuando $d_o > f$, la imagen es real; cuando $d_o < f$, la imagen es virtual. Cuando $d_o = f$, la imagen está "en el infinito" (figura 23.7c). Esto es, el objeto está tan alejado que los rayos que emanan de él y llegan al espejo son paralelos en esencia, y su imagen se forma en el plano focal. Este hecho es la base de un método sencillo para determinar la distancia focal de un espejo cóncavo.

Como hemos visto, la posición, la orientación y el tamaño de la imagen se pueden determinar en forma gráfica, con diagramas de rayos trazados a escala. Sin embargo, estas características se determinan con más rapidez y precisión con métodos analíticos. Es posible demostrar, por medio de la geometría, que la distancia al objeto (d_o), la distancia a la imagen (d_i) y la distancia focal (f) están relacionadas. Esta relación se conoce como **ecuación del espejo esférico**:

$$\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f} = \frac{2}{R} \qquad \textit{ecuación del espejo esférico} \qquad (23.3)$$

Note que esta ecuación se puede escribir en función del radio de curvatura, R, o de la distancia focal, f, ya que de acuerdo con la ecuación 23.2, $f = R/2$. Tanto R como f pueden ser positivos o negativos, como explicaremos dentro de poco.

Si d_i es la cantidad que se busca para un espejo esférico, sería conveniente emplear una forma alternativa de la ecuación del espejo esférico:

$$d_i = \frac{d_o f}{d_o - f} \qquad (23.3a)$$

Pero siempre es posible utilizar la forma recíproca de la ecuación 23.3.

Los signos de las diversas cantidades son muy importantes en la aplicación de las ecuaciones 23.3. Utilizaremos las convenciones de signos resumidas en la tabla 23.2.

Exploración 33.4 Foco y punto de la imagen

TABLA 23.2 Convenciones de signos para los espejos esféricos

Distancia focal (f)	
Espejo cóncavo (convergente)	f (o R) es positiva
Espejo convexo (divergente)	f (o R) es negativa
Distancia al objeto (d_o)	
El objeto está frente al espejo (objeto real)	d_o es positiva
El objeto está atrás del espejo (objeto virtual)*	d_o es negativa
Distancia a la imagen (d_i) y *tipo de imagen*	
La imagen se forma frente al espejo (imagen real)	d_i es positiva
La imagen se forma atrás del espejo (imagen virtual)	d_i es negativa
Orientación de la imagen (M)	
La imagen está derecha en relación con el objeto	M es positiva
La imagen está invertida en relación con el objeto	M es negativa

*En una combinación de dos (o más) espejos, la imagen que forma el primero es el objeto del segundo (y así sucesivamente). Si esta imagen-objeto está atrás del segundo espejo, se llama objeto *virtual*, y la distancia al objeto se considera negativa. Este concepto es más importante para las combinaciones de lentes, como se verá en la sección 23.3, y sólo se menciona aquí para completar el tema.

Por ejemplo, para un objeto real, una d_i positiva indica una imagen real, mientras que una d_i negativa corresponde a una imagen virtual.

El **factor de amplificación lateral** M, definido en la ecuación 23.1, también se puede calcular de forma analítica para un espejo esférico. De nuevo, por consideraciones geométricas, se expresa en función de las distancias a la imagen y al objeto:

$$M = -\frac{d_i}{d_o} \quad \textit{factor de aumento} \tag{23.4}$$

Nota: un recurso que le ayudará a recordar que el aumento es d_i sobre d_o es que la relación guarda orden alfabético ("i" antes que la "o").

Se agrega el signo menos por convención, para indicar la orientación de la imagen: un valor positivo de M indica que se trata de una imagen derecha, mientras que una M negativa implica una imagen invertida. Además, si $|M| > 1$, la imagen es aumentada, o mayor que el objeto. Si $|M| < 1$, la imagen es reducida, o menor que el objeto. Note que para los espejos, la amplificación lateral M, llamada también *factor de aumento* o simplemente *aumento*, se expresa convenientemente en función de la distancia a la imagen d_i y la distancia al objeto d_o, y no en función de las alturas de la imagen y del objeto que se usaron en la ecuación 23.1. (Más adelante se presenta una descripción del origen de las ecuaciones 23.3 y 23.4, como tema opcional.)

En el ejemplo 23.3 y en el Ejemplo integrado 23.4 se indica cómo se usan esas ecuaciones y convenciones de signos con los espejos esféricos. En general, este método consiste en determinar la imagen de un objeto; se le preguntará dónde se forma la imagen (d_i) y cuáles son las características de la imagen (M). Esas características indican si la imagen es real o virtual, derecha o invertida, y mayor o menor (aumentada o reducida) que el objeto.

Nota: $|M|$ es el valor absoluto de M: es su magnitud sin tener en cuenta su signo. Por ejemplo, $|+2| = |-2| = 2$.

***Deducción de la ecuación del espejo esférico (opcional)** Seguramente usted se preguntará de dónde vienen las ecuaciones 23.3 y 23.4. La ecuación del espejo esférico se deduce con un poco de geometría. Véase el diagrama de rayos de la ▼figura 23.8. Se indican las distancias al objeto y a la imagen (d_o y d_i) y las alturas del objeto y la imagen (h_o y h_i). Note que estas longitudes constituyen las bases y las alturas de triángulos formados por el rayo reflejado en el vértice (V). Esos triángulos ($O'VO$ e $I'VI$) son semejantes, porque según la ley de la reflexión, sus ángulos en V son iguales. Por consiguiente, se escribe

$$\frac{h_i}{h_o} = -\frac{d_i}{d_o} \tag{1}$$

Esta ecuación es la ecuación 23.4, de la definición de la ecuación 23.1. El signo negativo que se agregó aquí indica que la imagen es invertida, por lo que h_i es negativa.

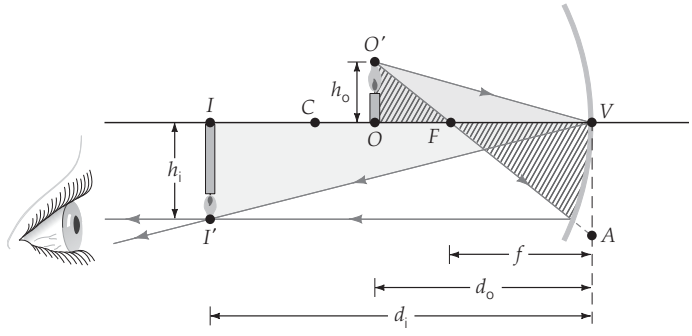
El rayo focal que pasa por F también forma triángulos semejantes, el $O'FO$ y el VFA, suponiendo, aproximadamente, que el espejo es pequeño en comparación con su radio. (¿Por qué son semejantes esos triángulos?) Las bases de esos triángulos son $VF = f$ y $OF = d_o - f$. Entonces, si $VA = h_i$,

$$\frac{h_i}{h_o} = -\frac{VF}{OF} = -\frac{f}{d_o - f} \tag{2}$$

De nuevo, el signo negativo agregado aquí indica que la imagen es invertida, por lo que h_i es negativa.

Igualando las ecuaciones 1 y 2 se obtiene

$$\frac{d_i}{d_o} = \frac{f}{d_o - f} \tag{3}$$



◀ **FIGURA 23.8 Ecuación del espejo esférico** Los rayos definen la geometría de triángulos semejantes, para la deducción de la ecuación del espejo esférico.

La manipulación algebraica da

$$\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f}$$

que es la ecuación del espejo esférico (ecuación 23.3).

Ejemplo 23.3 ■ ¿Qué clase de imagen? Características de un espejo cóncavo

Un espejo cóncavo tiene 30 cm de radio de curvatura. Si un objeto se coloca a *a*) 45 cm, *b*) 20 cm y *c*) 10 cm del espejo, ¿dónde se forma la imagen y cuáles son sus características? (Especifique si la imagen es real o virtual, derecha o invertida y aumentada o reducida.)

Razonamiento. En este caso el dato es R, de donde se puede calcular $f = R/2$. También se dan tres distancias distintas al objeto, que se pueden sustituir en las ecuaciones 23.3 y 23.4 para calcular la ubicación y determinar las características de la imagen.

Solución.

Dado: $R = 30$ cm, entonces $f = R/2 = 15$ cm

a) $d_o = 45$ cm

b) $d_o = 20$ cm

c) $d_o = 10$ cm

Encuentre: d_i, M y determine las características de la imagen para las distancias dadas al objeto

Observe que los datos de distancia al objeto corresponden a las regiones que se ven en la figura 23.7a. No hay necesidad de convertirlas a metros, siempre y cuando todas las distancias se manejen con la misma unidad (centímetros, en este caso). Es recomendable trazar los diagramas de rayos respectivos de cada uno de esos casos para determinar las características de cada imagen.

a) En este caso, la distancia al objeto es mayor que el radio de curvatura ($d_o > R$) y

$$\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f} \quad \text{o} \quad \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f} - \frac{1}{d_o} = \frac{1}{15\text{ cm}} - \frac{1}{45\text{ cm}} = \frac{2}{45\text{ cm}}$$

Entonces

$$d_i = \frac{45\text{ cm}}{2} = +22.5\text{ cm} \quad \text{y} \quad M = -\frac{d_i}{d_o} = -\frac{22.5\text{ cm}}{45\text{ cm}} = -\frac{1}{2}$$

Por lo anterior, la imagen es real (d_i es positiva), invertida (M es negativo) y tiene la mitad del tamaño que el objeto $\left(|M| = \frac{1}{2}\right)$.

b) Aquí, $R > d_o > f$ y el objeto está entre el foco y el centro de curvatura:

$$\frac{1}{d_i} = \frac{1}{15\text{ cm}} - \frac{1}{20\text{ cm}} = \frac{1}{60\text{ cm}}$$

Entonces

$$d_i = +60\text{ cm} \quad \text{y} \quad M = -\frac{60\text{ cm}}{20\text{ cm}} = -3.0$$

En este caso, la imagen es real (d_i es positiva), invertida (M es negativo) y tiene un tamaño triple en relación con el del objeto ($|M| = 3$).

c) Para este caso, $d_o < f$ y el objeto está más cerca del espejo que el foco.
Se usa la forma alternativa de la ecuación 23.3:

$$d_i = \frac{d_o f}{d_o - f} = \frac{(10\text{ cm})(15\text{ cm})}{10\text{ cm} - 15\text{ cm}} = -30\text{ cm}$$

Entonces

$$M = -\frac{d_i}{d_o} = -\frac{(-30\text{ cm})}{10\text{ cm}} = +3.0$$

En este caso, la imagen es virtual (d_i es negativa), derecha (M es positivo) y tiene un tamaño triple en relación con el del objeto ($|M| = 3$).

Se puede ver, en el denominador de la ecuación de d_i, que d_i siempre será negativa cuando d_o sea menor que f. En consecuencia, siempre se forma imagen virtual de un objeto que está entre el foco y un espejo convergente.

Ejercicio de refuerzo. Para el espejo convergente de este ejemplo, ¿dónde se forma la imagen y cuáles son sus características si el objeto está a 30 cm del espejo, es decir, si $d_o = R$?

Sugerencia para resolver problemas

Al aplicar las ecuaciones del espejo esférico para determinar las características de la imagen, es útil hacer primero un esquema rápido (aproximado, no necesariamente a escala) del diagrama de rayos para el caso que se examina. Ese esquema indicará las características de la imagen y ayudará a evitar errores cuando se apliquen las convenciones de signos. *El diagrama de rayos y la solución matemática deben concordar.*

Ejemplo integrado 23.4 ■ Semejanzas y diferencias: comportamiento de un espejo convexo

Un objeto (en este caso una vela) está a 20 cm frente a un espejo divergente cuya distancia focal es de −15 cm (véase las convenciones de signos en la tabla 23.2). *a*) Con un diagrama de rayos, determine si la imagen que se forma es 1) real, derecha y aumentada, 2) virtual, derecha y aumentada, 3) real, derecha y reducida, 4) virtual, derecha y reducida, 5) real, invertida y aumentada o 6) virtual, invertida y reducida. ***b)*** Determine la ubicación y las características de la imagen aplicando las ecuaciones del espejo.

PHYSLET®

Exploración 35.5 Espejos convexos, foco y radio de curvatura

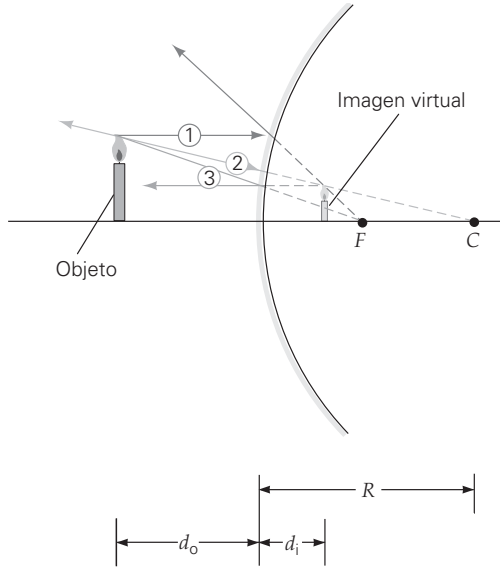
a) Razonamiento conceptual. Como se conocen la distancia al objeto y la distancia focal del espejo convexo, se traza un diagrama de rayos para determinar las características de la imagen. Lo primero que se necesita es elegir una escala para el diagrama de rayos. En este ejemplo se podría usar la escala de 1 cm (en el dibujo) para representar a 10 cm en la realidad. De esta forma, el objeto estaría a 2.0 cm frente al espejo en el dibujo. Se trazan el eje óptico, el espejo, el objeto (una vela encendida) y el foco (F). Como este espejo es convexo, el foco (F) y el centro de curvatura (C) están detrás del espejo. De acuerdo con la ecuación 23.2, $R = 2f = 2(-15\text{ cm}) = -30$ cm. Entonces, C se traza al doble de la distancia de F con respecto al vértice.

Sólo son necesarios dos de los tres rayos para ubicar la imagen (▾figura 23.9). El rayo paralelo 1 comienza en la punta de la llama, va paralelo al eje óptico y después diverge del espejo, después de la reflexión, como si viniera de F. El rayo radial 2 comienza en la punta de la llama, parece pasar por C y a continuación se refleja directo hacia atrás, pero parece provenir de C. Se ve con claridad que esos dos rayos, después de reflejarse, divergen entre sí, y no hay posibilidad de que se crucen. Sin embargo, ambos parecen salir de un punto común detrás del espejo: el punto de la imagen de la punta de la llama. También se traza el rayo focal 3, para comprobar que los tres parecen emanar del mismo punto de la imagen.

Así, la imagen es virtual, ya que los rayos reflejados en realidad no vienen de un punto tras el espejo; es derecha y es menor que el objeto. Por lo tanto, la respuesta correcta es la 4 (virtual, derecha y reducida). Si se mide en el diagrama (teniendo en cuenta la escala que se está usando), se encuentra que $d_i \approx -9.0$ cm, y que el aumento es

$$M = \frac{h_i}{h_o} \approx \frac{0.5\text{ cm}}{1.2\text{ cm}} = +0.4.$$

(continúa en la siguiente página)



◀ **FIGURA 23.9** Espejo divergente Diagrama de rayos de un espejo divergente. Véase el Ejemplo integrado 23.4.

b) Razonamiento cuantitativo y solución. Los datos son la distancia al objeto y la distancia focal. La posición y las características de la imagen se determinan con las ecuaciones del espejo.

Dado: $d_o = 20$ cm, $f = -15$ cm ***Encuentre:*** d_i, M y las características de la imagen

Note que la distancia focal es negativa en un espejo convexo (véase la tabla 23.2). Con la ecuación 23.3, se tiene

$$\frac{1}{20\text{ cm}} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{-15\text{ cm}}$$

de manera que

$$d_i = -\frac{60\text{ cm}}{7} = -8.6\text{ cm}$$

Entonces

$$M = -\frac{d_i}{d_o} = -\frac{(-8.6\text{ cm})}{20\text{ cm}} = +0.43$$

Así, la imagen es virtual (d_i es negativa), derecha (M es positivo) y su tamaño (altura) es 0.43 veces el del objeto. Como f es negativa, la imagen de un objeto real siempre es virtual si el espejo es divergente (o convexo). (¿Podría probar esto utilizando ya sea un diagrama de rayos o la ecuación del espejo?)

Ejercicio de refuerzo. Como se hizo notar, un espejo divergente siempre forma una imagen virtual de un objeto real. ¿Qué hay de las demás características de la imagen: su orientación y su aumento? ¿Es posible establecer conclusiones generales acerca de ellas?

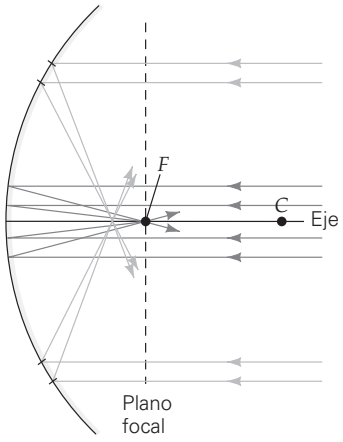
PHYSLET

Ilustración 33.1 Espejos y la aproximación del ángulo pequeño

Aberraciones en los espejos esféricos

Desde el punto de vista técnico, las descripciones que se han dado de las características de la imagen en los espejos esféricos sólo son ciertas para objetos que estén cerca del eje óptico, esto es, sólo para ángulos pequeños de incidencia y de reflexión. Si no se cumplen estas condiciones, las imágenes serán borrosas, es decir, estarán desenfocadas (o fuera de foco), o distorsionadas, porque no todos los rayos van a converger en el mismo plano. Como se observa en la ◂figura 23.10, los rayos paralelos incidentes lejos del eje óptico no convergen en el foco. Cuanto más lejano está el rayo incidente del eje, más lejos del foco estará el rayo reflejado. Este efecto se conoce como **aberración esférica**.

La aberración esférica no sucede en un espejo parabólico. (Como indica su nombre, el *espejo parabólico* tiene la forma de una parábola.) *Todos* los rayos incidentes paralelos al eje óptico de ese espejo tienen un foco común. Por esta razón se usan espejos parabólicos en la mayoría de los telescopios astronómicos, como se verá en el capítulo 24. Sin embargo, es más difícil fabricar esos espejos que los esféricos, por lo que son más costosos.

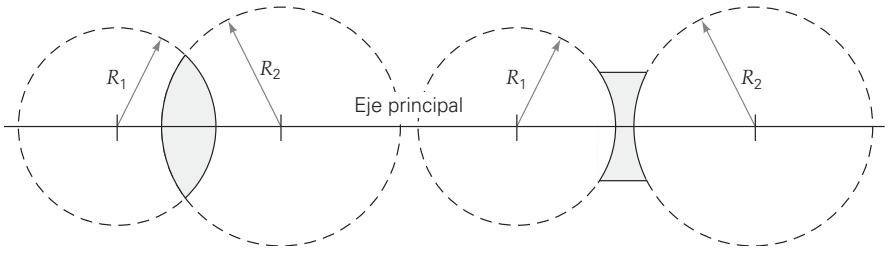


▲ **FIGURA 23.10 Aberración esférica de un espejo** De acuerdo con la aproximación para ángulos pequeños, los rayos paralelos al eje del espejo, y cercanos a él, convergen en el foco. Sin embargo, cuando los rayos paralelos no están cerca del eje, se reflejan y convergen frente al foco. Este efecto se llama *aberración esférica* y produce imágenes borrosas.

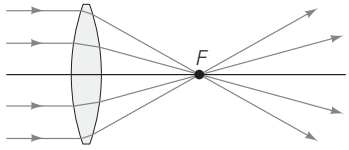
23.3 Lentes

OBJETIVOS: a) Diferenciar entre lentes convergentes y divergentes, *b*) describir las imágenes que producen y sus características y c) determinar las ubicaciones y las características de las imágenes mediante diagramas de rayos y ecuaciones para lentes delgadas.

La palabra *lente* proviene de la palabra latina *lentil*, que significa lenteja; la forma de esta leguminosa es similar a la de una lente común. Una lente óptica se fabrica con un material transparente (el más común es el vidrio, aunque a veces se utiliza plástico o cristal). Una o ambas superficies tienen contorno esférico. Las lentes esféricas *biconvexas* (con ambas superficies convexas) y las *bicóncavas* (ambas superficies cóncavas) se ven en la ▾figura 23.11. Las lentes forman imágenes al refractar la luz que pasa por ellas.



▶ **FIGURA 23.11 Lentes esféricas** Las lentes esféricas tienen sus superficies definidas por dos esferas; las superficies pueden ser convexas o cóncavas. Lentes ***a***) biconvexas y ***b***) bicóncavas. Si $R_1 = R_2$, una lente tiene simetría esférica.



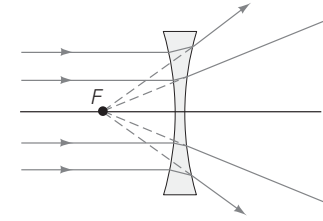
a) Lente biconvexa (convergente)

b)

◀ **FIGURA 23.12** Lentes convergentes *a*) En una lente biconvexa delgada, los rayos paralelos al eje convergen en el foco *F*. ***b***) Una lente de aumento (lente convergente) puede enfocar los rayos de Sol en un punto, y los resultados son incendiarios. ¡Nunca intente esto en el hogar!

PHYSLET®

Ilustración 35.1 Lentes y la aproximación de las lentes delgadas



Lente bicóncava (divergente)

▲ **FIGURA 23.13** Lente divergente Los rayos paralelos al eje de una lente bicóncava o divergente parecen emanar de un foco en el lado de incidencia de la lente.

Una lente biconvexa es una **lente convergente**: los rayos de luz incidentes paralelos al eje de la lente convergen en un foco (*F*) en el lado opuesto de la lente (▲figura 23.12a). Este hecho constituye una forma de determinar experimentalmente la distancia focal de una lente convergente. Quizá usted haya enfocado los rayos del Sol con una lupa (una lente biconvexa o convergente) y habrá atestiguado la concentración de la energía radiante que se obtiene (figura 23.12b).

Por otra parte, una lente bicóncava es una **lente divergente**: los rayos de luz incidentes y paralelos salen de ésta como si emanaran de un foco que estuviera en el lado de incidencia de la lente (▶figura 23.13).

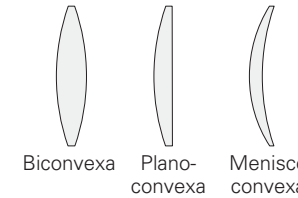
Hay varios tipos de lentes convergentes y divergentes (▶figura 23.14). Las lentes menisco son las que más se usan en los anteojos. En general, una lente convergente es más gruesa en su centro que en su periferia, y una divergente es más delgada en su centro que en su periferia. Esta explicación se limitará a las lentes biconvexas y bicóncavas, de simetría esférica, en las que ambas superficies tienen el mismo radio de curvatura.

Cuando la luz pasa por el interior de una lente, se refracta y se desplaza en sentido lateral (ejemplo 22.4, figura 22.11). Si una lente es gruesa, este desplazamiento podría ser bastante considerable, lo que complicaría el análisis de las características de la lente. Este problema no se presenta con lentes delgadas, para las que el desplazamiento refringente (es decir, causado por la refracción) de la luz transmitida es insignificante. Nuestra descripción se limitará a las lentes delgadas. Una lente delgada es aquella cuyo grosor se supone insignificante en comparación con la distancia focal.

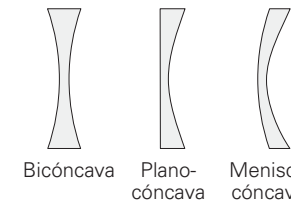
Al igual que un espejo esférico, una lente de caras esféricas tiene, *para cada superficie*, un centro de curvatura (*C*), un radio de curvatura (*R*), un foco (*F*) y una distancia focal (f). Los focos están a distancias iguales a ambos lados de una lente delgada. Sin embargo, para una lente esférica, la distancia focal *no* está relacionada simplemente con *R* mediante $f = R/2$, como sucede con los espejos esféricos. Como la distancia focal también depende del índice de refracción de la lente, por lo general sólo se especifica la distancia focal y no su radio de curvatura. Esto se analizará en el apartado 23.4.

Las reglas generales para trazar diagramas de rayos con lentes son similares a las que se utilizan para los espejos esféricos, pero se necesitan algunas modificaciones, porque la luz pasa a través de la lente. Las caras opuestas de una lente, en general, se distinguen con los nombres de *lado del objeto* y *lado de la imagen*. El lado del objeto es la cara frente a la cual está el objeto, y el lado de la imagen es el lado *contrario* de la lente (donde se formaría una imagen real). Los tres rayos de un punto de un objeto se trazan como sigue (véase la sección Aprender dibujando para el ejemplo 23.5 en la p. 743):

1. Un **rayo paralelo** es, como su nombre lo indica, paralelo al eje óptico de la lente en la incidencia y, después de la refracción, *a*) pasa por el foco del lado de la imagen en una lente convergente, *o bien*, *b*) parece emanar del foco en el lado del objeto de una lente divergente.



Lentes convergentes



Lentes divergentes

▲ **FIGURA 23.14** Formas de lentes Las formas de las lentes varían mucho, y normalmente se clasifican como convergentes y divergentes. En general, una lente convergente es más gruesa en su centro que en la periferia, mientras que una lente divergente es más delgada en el centro que en la periferia.

PHYSLET®
Exploración 35.2 Diagramas de rayos

2. Un **rayo central** o **principal** es el que pasa por el centro de la lente, y no se desvía porque ésta es "delgada".
3. Un **rayo focal** es el que *a*) pasa por el foco del lado del objeto en una lente convergente, *o bien*, *b*) parece pasar a través del foco en el lado de la imagen de una lente divergente y, después de la refracción, es paralelo al eje óptico de la lente.

Como en el caso de los espejos esféricos, sólo se necesitan dos rayos para determinar la imagen; aquí se usarán el paralelo y el central. (También, como en el caso de los espejos, se aconseja incluir el tercer rayo, el rayo focal, como comprobación en los diagramas.)

Ejemplo 23.5 ■ Aprender dibujando: diagrama de rayos para lentes

Un objeto se coloca a 30 cm frente a una lente biconvexa delgada de 20 cm de distancia focal. *a*) Utilice un diagrama de rayos para ubicar la imagen. *b*) Describa las características de la imagen.

Razonamiento. Recuerde los pasos que se siguieron en el diagrama de rayos anterior.

Solución.

Dado: $d_o = 30$ cm, $f = 20$ cm

Encuentre: *a*) la ubicación de la imagen (con un diagrama de rayos); *b*) las características de la imagen

a) Como se pide hacer un diagrama de rayos (véase la sección Aprender dibujando, que acompaña a este ejemplo) para ubicar la imagen, lo primero que hay que hacer es definir una escala para el dibujo. En este ejemplo se utiliza una escala de 1 cm en el dibujo para representar 10 cm en la realidad. De esa forma, el objeto estaría a 3.00 cm frente a la lente en nuestro dibujo.

Primero se trazarán el eje óptico, la lente, el objeto (una vela encendida) y los focos (F). Se traza una línea vertical punteada en el centro de la lente porque, para simplificar, la refracción de los rayos se ilustra como si sucediera en el centro de cada lente. En realidad, sucede en las superficies aire-vidrio y vidrio-aire de cada lente.

Se siguen los pasos 1 a 4 de la sección Aprender dibujando:

1. El primer rayo que se traza es el paralelo (① en la figura). Desde la punta de la llama se traza un rayo horizontal (paralelo al eje óptico). Después de pasar por la lente, pasa por el foco F en el lado de la imagen.

2. A continuación se traza el rayo central (② en la figura). Desde la punta de la llama se traza un rayo que pase por el centro de la lente. Ese rayo pasará sin desviarse por la lente delgada en el lado de la imagen.

3. Se observa con claridad que estos dos rayos se cruzan en el lado de la imagen. El punto de intersección es el punto de la imagen de la punta de la llama. A partir de ahí, se traza el resto de la imagen avanzando hacia el eje óptico.

4. Sólo se necesitan dos rayos para ubicar la imagen. Sin embargo, si se quiere trazar el tercer rayo, en este caso el rayo focal (③ en la figura), éste debe pasar por el mismo punto de la imagen en el que se intersecan los otros dos rayos (si el diagrama se traza con cuidado). El rayo de la punta de la llama, que pasa por el foco F en el lado del objeto, saldrá paralelo al eje óptico en el lado de la imagen.

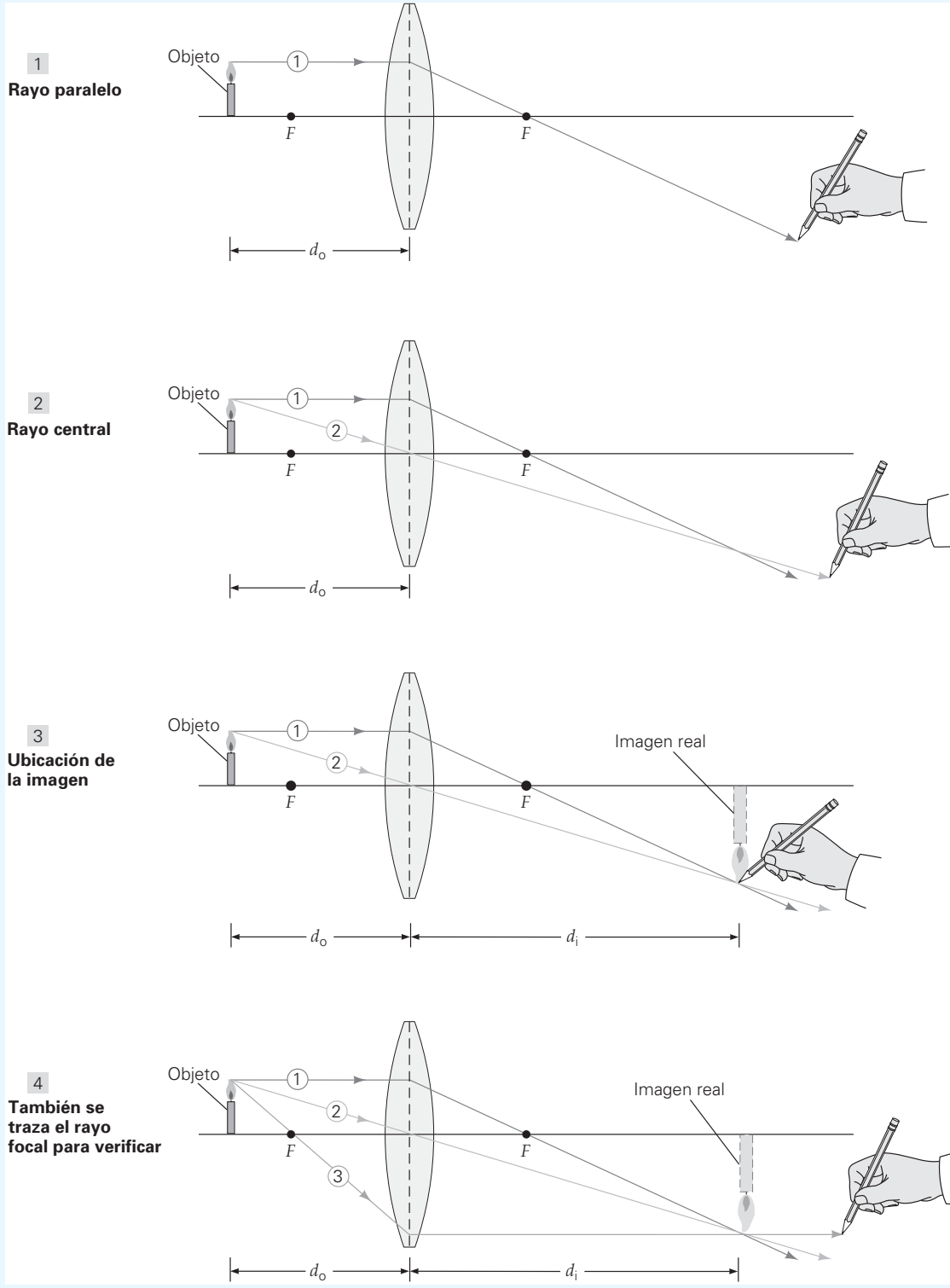
b) De acuerdo con el diagrama de rayos que se trazó en el inciso *a* se observa con claridad que la imagen es real (porque los rayos se cruzan en el lado de la imagen). En consecuencia, se podría captar la imagen real en una pantalla (por ejemplo, en un trozo de papel) colocada a la distancia d_i de la lente convergente. Además, la imagen es invertida (la imagen de la vela apunta hacia abajo) y es mayor que el objeto.

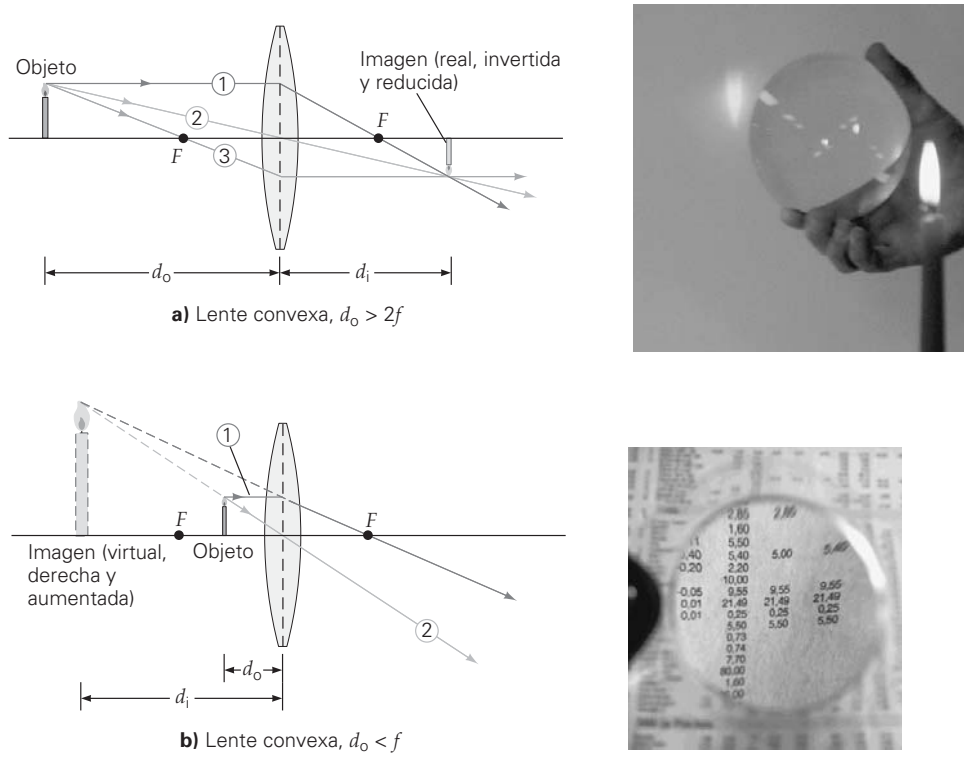
En este caso, $d_o = 30$ cm y $f = 20$ cm, por lo que $2f > d_o > f$. Si se usan los diagramas de rayos correspondientes, se podrá demostrar que para d_o entre estos límites, la imagen siempre es real, aumentada e invertida. Por cierto, el proyector de filminas del salón de clase usa este arreglo en particular.

Ejercicio de refuerzo. En este ejemplo, ¿cómo se vería la imagen si el objeto estuviera a 10 cm frente a la lente? Ubique la imagen de forma gráfica y describa sus características.

APRENDER DIBUJANDO

DIAGRAMA DE RAYOS PARA LENTES (VÉASE EL EJEMPLO 23.5)



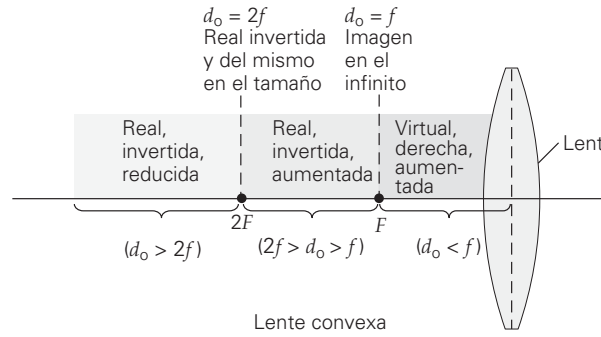


▲ **FIGURA 23.15 Diagramas de rayos para lentes** ***a)*** Una lente convergente biconvexa forma un objeto real cuando $d_o > 2f$. La imagen es real, invertida y reducida. ***b)*** Diagrama de rayos para una lente divergente con $d_o < f$. La imagen es virtual, derecha y aumentada. Se muestran los ejemplos prácticos de ambos casos. (Véase el pliego a color al final del libro.)

La ▲figura 23.15 muestra otros diagramas de rayos, con distintas distancias al objeto, para una lente convergente; también se ven sus aplicaciones en la vida real. La imagen de un objeto es real cuando se forma o se proyecta en el lado *opuesto* de la lente al que está el objeto (véase la figura 23.15a) y es virtual cuando se forma del mismo lado de la lente en el que está el objeto (véase la figura 23.15b).

Se podrían definir regiones de distancia del objeto para una lente convergente de forma semejante a como se hizo con un espejo convergente en la figura 23.7a. En este caso, una distancia al objeto $d_o = 2f$ para una lente convergente tiene importancia similar a la de $d_o = R = 2f$ para un espejo convergente (▼figura 23.16).

El diagrama de rayos para una lente divergente se describirá dentro de poco. Al igual que los espejos divergentes, las lentes divergentes sólo pueden formar imágenes virtuales.



▶ **FIGURA 23.16 Lente convergente** Para una lente convexa o convergente, el objeto se puede ubicar en una de las tres regiones definidas por el foco (F) y el doble de la distancia focal ($2f$), o en uno de esos dos puntos. Cuando $d_o > 2f$, la imagen es real, invertida y reducida (figura 23.15a). Cuando $2f > d_o > f$, la imagen también es real e invertida, pero aumentada, como se ve en los diagramas de rayos del ejemplo 23.5. Cuando $d_o < f$, la imagen es virtual, derecha y aumentada (figura 23.15b).

TABLA 23.3 Convención de signos para lentes delgadas

Distancia focal (f)	
Lentes convergentes (también llamadas lentes *positivas*)	f es positiva
Lentes divergentes (también llamadas lentes *negativas*)	f es negativa
Distancia al objeto (d_o)	
El objeto está frente a la lente (objeto real)	d_o es positiva
El objeto está atrás de la lente (objeto virtual)*	d_o es negativa
Distancia a la imagen (d_i) y *tipo de imagen*	
La imagen se forma en el lado de la imagen de la lente: el lado opuesto al del objeto (imagen real)	d_i es positiva
La imagen se forma en el lado del objeto de la lente el mismo lado donde está el objeto (imagen virtual)	d_i es negativa
Orientación de la imagen (M)	
La imagen está derecha con respecto al objeto	M es positivo
La imagen está invertida con respecto al objeto	M es negativo

*En una combinación de dos (o más) lentes, la imagen que forma la primera lente se considera como el objeto de la segunda lente (y así sucesivamente). Si esta imagen-objeto está atrás de la segunda lente, se llama objeto virtual, y se considera que la distancia al objeto es negativa (−).

Las distancias a la imagen y las características de una lente también se pueden determinar de forma analítica. Las ecuaciones para lentes delgadas son idénticas a las de los espejos esféricos. La **ecuación de lentes delgadas** es

$$\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f} \qquad \textit{ecuación de lentes delgadas} \qquad (23.5)$$

Al igual que en el caso de los espejos esféricos, existe una forma alternativa a la ecuación de lentes delgadas

$$d_i = \frac{d_o f}{d_o - f} \qquad (23.5a)$$

que es una forma fácil y rápida de encontrar d_i.

El **factor de amplificación**, al igual que en el caso de los espejos esféricos, se determina mediante

$$M = -\frac{d_i}{d_o} \qquad (23.6)$$

Las convenciones de signos para estas ecuaciones de lentes delgadas se presentan en la tabla 23.3.

Igual que cuando se trabaja con espejos, resulta útil trazar un diagrama de rayos antes de resolver un problema de lentes de forma analítica.

PHYSLET®

Exploración 35.3 Movimiento de una lente

Ejemplo 23.6 ■ Tres imágenes: comportamiento de una lente convergente

Una lente biconvexa tiene 12 cm de distancia focal. Para un objeto que esté a *a*) 60 cm, *b*) 15 cm y *c*) 8.0 cm de la lente, ¿dónde se forma la imagen y cuáles son sus características?

Razonamiento. Con la distancia focal (f) y las distancias al objeto (d_o) se aplica la ecuación 23.5 para determinar las distancias a la imagen (d_i), y la ecuación 23.6 para definir las características de esta última. Se trazan los rayos para todos esos casos, con el fin de tener una idea de las características de la imagen. Los diagramas deberían concordar con los cálculos.

Solución.

Dado: $f = 12$ cm
a) $d_o = 60$ cm
b) $d_o = 15$ cm
c) $d_o = 8.0$ cm

Encuentre: d_i y las características de la imagen para los tres casos

(continúa en la siguiente página)

a) La distancia al objeto es mayor que el doble de la distancia focal ($d_o > 2f$). Con la ecuación 23.5,

$$\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f}$$

o

$$\frac{1}{d_i} = \frac{1}{f} - \frac{1}{d_o} = \frac{1}{12\text{ cm}} - \frac{1}{60\text{ cm}} = \frac{5}{60\text{ cm}} - \frac{1}{60\text{ cm}} = \frac{4}{60\text{ cm}} = \frac{1}{15\text{ cm}}$$

Entonces

$$d_i = 15\text{ cm} \qquad \text{y} \qquad M = -\frac{d_i}{d_o} = -\frac{15\text{ cm}}{60\text{ cm}} = -0.25$$

La imagen es real (d_i es positiva), invertida (M es negativo) y de la cuarta parte del tamaño del objeto ($|M| = 0.25$). Este arreglo se usa en las cámaras, cuando la distancia al objeto es mayor que $2f$ ($d_o > 2f$).

b) Aquí, $2f > d_o > f$. Se aplica la ecuación 23.5,

$$\frac{1}{d_i} = \frac{1}{12\text{ cm}} - \frac{1}{15\text{ cm}} = \frac{5}{60\text{ cm}} - \frac{4}{60\text{ cm}} = \frac{1}{60\text{ cm}}$$

Entonces

$$d_i = 60\text{ cm} \qquad \text{y} \qquad M = -\frac{d_i}{d_o} = -\frac{60\text{ cm}}{15\text{ cm}} = -4.0$$

La imagen es real (d_i es positiva), invertida (M es negativo) y tiene cuatro veces el tamaño del objeto ($|M| = 4.0$). Éste es el caso del proyector de filminas y del proyector de diapositivas ($2f > d_o > f$).

c) Para este caso, $d_o < f$. Se usa la forma alternativa (ecuación 23.5a),

$$d_i = \frac{d_o f}{d_o - f} = \frac{(8.0\text{ cm})(12\text{ cm})}{8.0\text{ cm} - 12\text{ cm}} = -24\text{ cm}$$

Entonces

$$M = -\frac{d_i}{d_o} = -\frac{(-24\text{ cm})}{8.0\text{ cm}} = +3.0$$

La imagen es virtual (d_i es negativa), es derecha (M es positivo) y tiene tres veces el tamaño del objeto ($|M| = 3.0$). Es el caso de un microscopio simple y el de una lupa ($d_o < f$).

Como podrá darse cuenta, las lentes convergentes son versátiles. Dependiendo de la distancia al objeto (relativa a la longitud focal), la lente puede utilizarse como una cámara, un proyector o una lente de aumento.

Ejercicio de refuerzo. Si la distancia de una lente convexa a un objeto se hace variar, ¿a qué distancia deja la imagen real de reducirse para comenzar a aumentar?

Ejemplo conceptual 23.7 ■ ¿Media imagen?

PHYSLET®

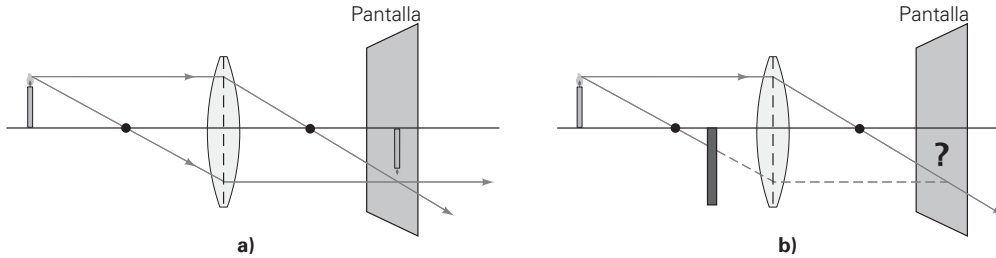
Exploración 35.1 Formación de imágenes

Una lente convergente forma una imagen en una pantalla, como se ilustra en la ▸figura 23.17a. Después, se cubre la mitad inferior de la lente, como se ve en la figura 23.17b. El resultado será que *a*) sólo la mitad superior de la imagen original se verá en la pantalla; *b*) sólo la mitad inferior de la imagen original se verá en la pantalla o *c*) se verá la imagen completa.

Razonamiento y respuesta. En principio, tal vez usted imagine que al cubrir la mitad de la lente se elimina la mitad de la imagen. Sin embargo, los rayos de *cada* punto del objeto pasan por *todas las partes* de la lente. Por consiguiente, la mitad superior de la lente puede formar una imagen total (al igual que la mitad inferior), de manera que la respuesta correcta es *c*.

Esta conclusión se confirma trazando un rayo central en la figura 23.17b. Usted también podría aplicar el método científico y realizar la prueba, sobre todo si usa anteojos. Cubra la mitad inferior de los anteojos, y verá que todavía puede leer a través de la parte superior (a menos que use bifocales).

Ejercicio de refuerzo. ¿Qué propiedad de la imagen *podría* afectarse al bloquear la mitad de una lente? Explique por qué.



▲ **FIGURA 23.17 ¿Media lente, media imagen?** *a*) Una lente convergente forma una imagen en una pantalla. *b*) Se cubre la mitad inferior de la lente. ¿Qué le pasa a la imagen? Véase el Ejemplo conceptual 23.7.

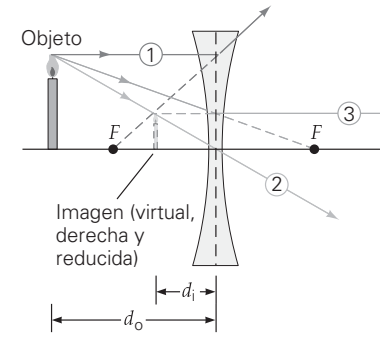
Ejemplo integrado 23.8 ■ Tiempo de cambio: comportamiento de una lente divergente

Un objeto está a 24 cm frente a una lente divergente cuya distancia focal es de −15 cm. *a*) Utilice un diagrama de rayos para determinar si la imagen es 1) real y aumentada, 2) virtual y reducida 3) real y derecha o 4) derecha y aumentada. *b*) Determine la ubicación y características de la imagen con las ecuaciones para lentes delgadas.

a) Razonamiento conceptual. (Véase las convenciones de signos en la tabla 23.3.) De nuevo se adoptará una escala en que 1 cm (en el dibujo de la ▸figura 23.18) represente 10 cm. De esta forma, el objeto estará a 2.4 cm frente a la lente en el dibujo. Se traza el eje óptico, la lente, el objeto (en este caso, una vela encendida), el foco (F) y una línea vertical punteada que pase por el centro de la lente.

El rayo paralelo ① comienza en la punta de la llama, viaja paralelo al eje óptico, diverge después de refractarse en la lente y parece proceder de F en el lado del objeto. El rayo central ② se origina en la punta de la llama y pasa por el centro de la lente, sin cambiar de dirección. Se ve con claridad que esos dos rayos, después de refractarse, divergen y no se intersecan. Sin embargo, parece que provienen del frente de la lente (lado del objeto), y esa intersección aparente es el punto de imagen de la punta de la llama. También se traza el rayo focal ③, para comprobar que esos rayos parecen provenir del mismo punto de imagen. Parece que el rayo focal pasa por el foco del lado de la imagen y va paralelo al eje óptico, después de refractarse en la lente.

Esta imagen es virtual (¿por qué?), derecha y menor que el objeto, de manera que la respuesta correcta es la 2: virtual y reducida. Midiendo en el diagrama (y teniendo en cuenta la escala que se usa) se ve que $d_i \approx -9$ cm (imagen virtual), y que $M = \dfrac{h_i}{h_o} \approx \dfrac{0.5\text{ cm}}{1.4\text{ cm}} = +0.4$.



▲ **FIGURA 23.18 Lente divergente** Diagrama de rayos de una lente divergente. En este caso la imagen es virtual, derecha y menor que el objeto y se encuentra frente a la lente. Véase el Ejemplo integrado 23.8.

b) Razonamiento cuantitativo y solución.

Dado: $d_o = 24$ cm; $f = -15$ cm (lente divergente)

Encuentre: *a*) d_i, M y las características de la imagen

Note que la distancia focal es negativa para una lente divergente (véase la tabla 23.3). De acuerdo con la ecuación 23.5,

$$\frac{1}{24\text{ cm}} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{-15\text{ cm}} \quad \text{o} \quad \frac{1}{d_i} = \frac{1}{-15\text{ cm}} - \frac{1}{24\text{ cm}} = -\frac{13}{120\text{ cm}}$$

y así

$$d_i = -\frac{120\text{ cm}}{13} = -9.2\text{ cm}$$

Entonces

$$M = -\frac{d_i}{d_o} = -\frac{(-9.2\text{ cm})}{24\text{ cm}} = +0.38$$

Así, la imagen es virtual (d_i es negativa), derecha (M es positivo) y tiene 0.38 veces el tamaño (la altura) del objeto. Como f es negativa para una lente divergente, d_i siempre es negativa para cualquier valor positivo de d_o, así que la imagen de un objeto real siempre es virtual.

Ejercicio de refuerzo. Una lente divergente forma siempre una imagen virtual de un objeto real. ¿Qué afirmaciones generales se pueden formular acerca de la orientación y del aumento de la imagen?

PHYSLET®

Ilustración 35.2 Imagen de una lente divergente

Una clase especial de lente que tal vez usted conoce se describe la sección A fondo 23.2 (lentes de Fresnel) en la p. 748.

A FONDO 23.2 LENTES DE FRESNEL

Para enfocar luz de rayos paralelos, o para producir un gran haz de rayos paralelos, se necesita una lente convergente de gran tamaño. La gran masa de vidrio necesaria para formar esa lente es voluminosa y pesada. Además, una lente gruesa absorbe algo de la luz y es probable que genere distorsiones. El físico francés Augustin Fresnel (1788-1827) desarrolló una solución para este problema, que se aplica en las lentes de los faros. Fresnel se dio cuenta de que la refracción de la luz sucede en las superficies de las lentes. Por consiguiente, es posible hacer que una lente sea más delgada —y casi plana— si se elimina vidrio del interior hasta el punto en que no se alteren las propiedades refringentes de las superficies.

Esto se logra cortando una serie de surcos concéntricos en la superficie de la lente (figura 1a). Observe que la superficie de cada segmento curvo que queda es casi paralela a la superficie correspondiente de la lente original. Juntos, los segmentos concéntricos refractan la luz de la misma forma que la lente biconvexa original (figura 1b). De hecho, la lente sólo se ha adelgazado eliminando vidrio innecesario entre las superficies refringentes.

Una lente con esa serie de superficies curvas concéntricas se llama *lente de Fresnel.* Esta clase de lentes se usa mucho en los proyectores de filminas y en los faros (figura 1c). Una lente de Fresnel es muy delgada y, por ende, mucho más ligera que una lente biconvexa convencional con las mismas propiedades ópticas. Además, las lentes de Fresnel se moldean con facilidad en plástico, con frecuencia con un lado plano (planoconvexas) para que se pueda fijar a una superficie de vidrio.

Una desventaja de las lentes de Fresnel es que se ven los círculos concéntricos, cuando el observador las usa y cuando se proyecta la imagen que producen en una pantalla, como sucede con un proyector de filminas.

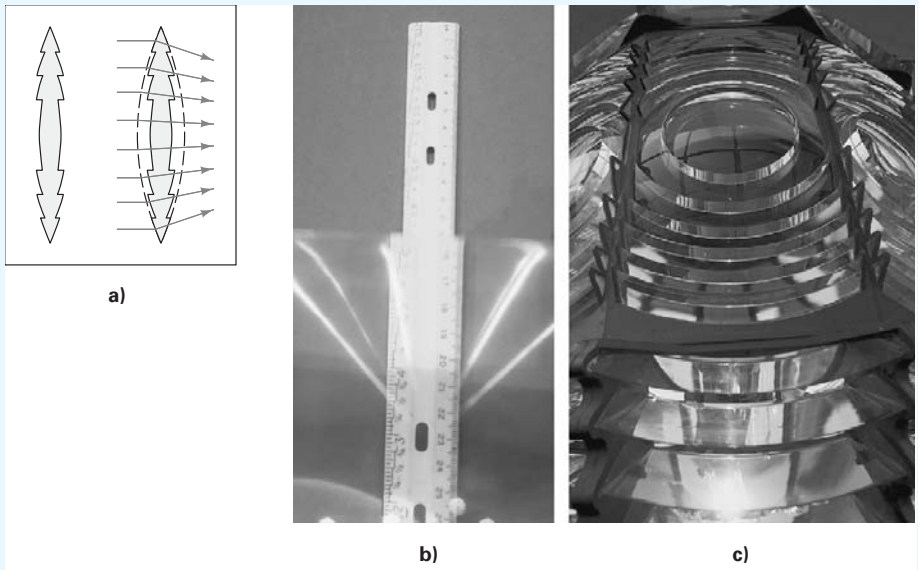


FIGURA 1 Lentes de Fresnel ***a)*** El efecto concentrador de estas lentes se debe a la refracción en sus superficies. Por consiguiente, es posible reducir el espesor de una lente cortando ranuras concéntricas en un vidrio, para formar un conjunto de superficies curvas con las mismas propiedades refringentes que las de la lente de la que se derivan. ***b)*** Una lente de Fresnel plana, con superficies curvas concéntricas, amplifica como si fuera una lente convergente biconvexa. ***c)*** Una serie de lentes de Fresnel produce haces luminosos enfocados en este faro del puerto de Boston. (De hecho, las lentes de Fresnel se desarrollaron para usarse en los faros.) (Véase el pliego a color al final del libro.)

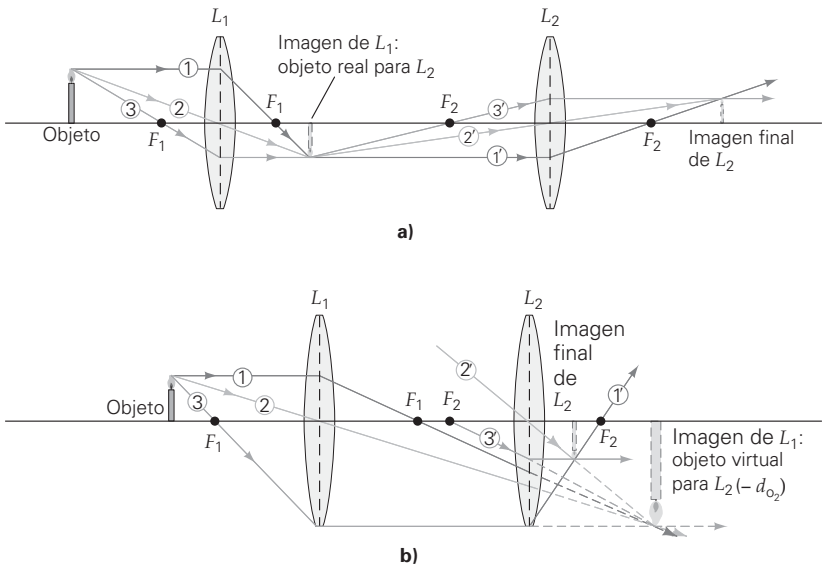
PHYSLET®

Exploración 35.4 ¿Qué hay detrás de la cortina?

Combinaciones de lentes

Muchos instrumentos ópticos, como los microscopios y los telescopios (capítulo 25) usan una combinación de lentes, es decir, son un sistema compuesto de lentes. Cuando en una combinación se usan dos o más lentes, es factible determinar la imagen general que se produce, examinando las lentes de forma individual. Esto es, la imagen que forma la primera lente se vuelve el objeto para la segunda, y así sucesivamente. Por este motivo presentaremos aquí los principios de combinación de lentes, antes de explicar los detalles de sus aplicaciones en la vida real.

Si la primera lente produce una imagen frente a la segunda, esa imagen se considera como objeto real (d_o es positiva) para la segunda (▸figura 23.19a). Sin embargo, si las lentes están lo suficientemente cerca de manera que la imagen de la primera *no* se forme antes que los rayos pasen por la segunda (figura 23.19b), se debe hacer una modificación a la convención de signos. En este caso, la imagen de la primera lente se considera como objeto *virtual* para la segunda, y su distancia al objeto se considera de signo *negativo* en la ecuación de la lente (tabla 23.3).



◀ **FIGURA 23.19 Combinaciones de lentes** La imagen final que produce un sistema compuesto de lentes se determina considerando que la imagen de una lente es el objeto de la lente adyacente. ***a)*** Si la imagen de la primera lente (L_1) se forma frente a la segunda lente (L_2), se dice que el objeto es real para la segunda lente. (Note que los rayos 1′, 2′ y 3′ son los rayos paralelo, central y focal, respectivamente, para L_2. *No* son continuaciones de los rayos 1, 2, 3, que son los rayos paralelo, central y focal, respectivamente, para L_1.) ***b)*** Si los rayos pasan por la segunda lente antes de formar la imagen, se dice que el objeto para la segunda lente es virtual, y la distancia a la segunda lente se toma como negativa.

El aumento total (M_{total}) de un sistema compuesto es el producto de los factores individuales de amplificación de las lentes que lo forman. Por ejemplo, para un sistema de dos lentes, como el de la figura 23.19,

$$M_{\text{total}} = M_1 M_2 \tag{23.7}$$

Los signos convencionales de M_1 y M_2 se tienen en cuenta en el producto para indicar, con el signo de M_{total}, si la imagen final es derecha o invertida. (Véase el ejercicio 83.)

Ejemplo 23.9 ■ Una oferta especial: una combinación de lentes y un objeto virtual

Se tienen dos lentes parecidos a los que se ven en la figura 23.19b. Supongamos que el objeto está a 20 cm frente a la lente L_1, cuya distancia focal es de 15 cm. La lente L_2, con distancia focal de 12 cm, está a 26 cm de L_1. ¿Cuál es el lugar de la imagen final y cuáles son sus características?

Razonamiento. Se trata de una doble aplicación de la ecuación para lentes delgadas. Las lentes se examinan de forma sucesiva. La imagen de la lente L_1 se vuelve el objeto de la lente L_2. Se deben identificar muy bien las cantidades e indicar de forma adecuada las distancias (¡con signos!).

Solución. Se tiene

Dado: $d_{o_1} = +20$ cm
$f_1 = +15$ cm
$f_2 = +12$ cm
$D = 26$ cm (distancia entre las lentes)

Encuentre: d_{i_2} y las características de la imagen

El primer paso es aplicar la ecuación de las lentes delgadas (ecuación 23.5) y el factor de amplificación para lentes delgadas (ecuación 23.6) a L_1:

$$\frac{1}{d_{i_1}} = \frac{1}{f_1} - \frac{1}{d_{o_1}} = \frac{1}{15\text{ cm}} - \frac{1}{20\text{ cm}} = \frac{4}{60\text{ cm}} - \frac{3}{60\text{ cm}} = \frac{1}{60\text{ cm}}$$

o

$$d_{i_1} = 60\text{ cm (imagen real } L_1)$$

y

$$M_1 = -\frac{d_{i_1}}{d_{o_1}} = -\frac{60\text{ cm}}{20\text{ cm}} = -3.0\text{ (invertida y aumentada)}$$

La imagen de la lente L_1 viene a ser el objeto para la lente L_2. Esta imagen se encontrará entonces a $d_{i_1} - D = 60\text{ cm} - 26\text{ cm} = 34$ cm a la derecha de L_2, es decir, en el lado de la imagen. Por consiguiente, es un objeto *virtual* (véase la tabla 23.3), y $d_{o_2} = -34$ cm. (Recuerde que la d_o se toma como negativa para objetos virtuales.)

(continúa en la siguiente página)

A continuación se aplican las ecuaciones a la segunda lente, L_2:

$$\frac{1}{d_{i_1}} = \frac{1}{f_2} - \frac{1}{d_{o_1}} = \frac{1}{12\text{ cm}} - \frac{1}{(-34\text{ cm})} = \frac{23}{204\text{ cm}}$$

o

$$d_{i_2} = 8.9\text{ cm (imagen real)}$$

y

$$M_2 = -\frac{d_{i_1}}{d_{o_2}} = -\frac{8.9\text{ cm}}{(-34\text{ cm})} = 0.26\text{ (derecha y reducida)}$$

(*Nota:* el objeto virtual para L_2 era invertido, por lo que el término *derecha* quiere decir que también la imagen *final* es invertida.) El aumento total M_{total} es entonces

$$M_{\text{total}} = M_1 M_2 = (-3.0)(0.26) = -0.78$$

El signo se incluye en los aumentos. Se determina entonces que la imagen final real está a 8.9 cm al lado derecho (el lado de la imagen) de L_2, y que es invertida (signo negativo) con respecto al objeto inicial; además, es reducida.

Ejercicio de refuerzo. Supongamos que el objeto en la figura 23.19b estuviera a 30 cm frente a L_1. ¿Dónde se formaría la imagen en este caso, y cuáles serían sus características?

23.4 La ecuación del fabricante de lentes

OBJETIVOS: *a*) Describir la ecuación del fabricante de lentes, *b*) explicar cómo difiere de la ecuación de lentes delgadas y c) comprender la potencia de las lentes en dioptrías.

PHYSLET®
Exploración 35.5 Ecuación del fabricante de lentes

El análisis de las lentes delgadas biconvexas y bicóncavas que se ha hecho hasta ahora en este capítulo ha sido relativamente fácil. Sin embargo, hay una diversidad de formas de lentes, como se ilustra en la figura 23.14. Para éstas, el análisis se complica, pero es importante tomar en cuenta las distancias focales en las consideraciones ópticas, porque las lentes se tallan para fines y aplicaciones específicos.

La refracción de una lente depende de las formas de sus superficies y del índice de refracción de su material. Esas propiedades, en conjunto, determinan la distancia focal de una lente delgada. La distancia focal de una lente delgada se determina con la **ecuación del fabricante de lentes**, que expresa la distancia focal de una lente delgada *en el aire* ($n_{\text{aire}} = 1$), como sigue:

$$\frac{1}{f} = (n - 1)\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) \quad \textit{(para una lente delgada en el aire)} \tag{23.8}$$

donde n es el índice de refracción del material de la lente y R_1 y R_2 son los radios de curvatura de las superficies primera (cara frontal) y segunda (cara posterior) de la lente, respectivamente. (La primera superficie es aquella a la que llega por primera vez la luz que emite un objeto.)

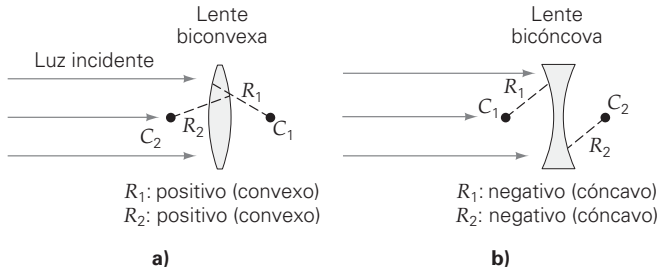
En la ecuación del fabricante de lentes se requiere tener una convención de signos (tabla 23.4). Los signos dependen sólo de la forma de la superficie, esto es, cóncava o convexa (▸figura 23.20). Para la lente biconvexa de la figura 23.20a, tanto R_1 como R_2 son positivos (ambas superficies son convexas) y para la lente bicóncava de la figura 23.20b, tanto R_1 como R_2 son negativos (ambas superficies son cóncavas).

PHYSLET®
Exploración 34.1 Lentes e índices de refracción variables

Si la lente está rodeada de otro medio que no sea aire, el primer término de la ecuación 23.8 se convierte en $(n/n_m) - 1$, donde n y n_m los índices de refracción del material de la lente y del medio que la rodea, respectivamente. Ahora se puede ver por qué algunas lentes convergentes en el aire se vuelven divergentes en el agua: si $n_m > n$, entonces f es negativa y la lente es divergente.

TABLA 23.4 Convenciones de signos en la ecuación del fabricante de lentes

Superficie convexa	R es positivo
Superficie cóncava	R es negativa
Superficie plana	$R = \infty$
Lente convergente (positiva)	f es positivo
Lente divergente (negativa)	f es negativa



◀ **FIGURA 23.20 Centros de curvatura** Las lentes ***a)*** biconvexas y ***b)*** bicóncavas tienen dos centros de curvatura, como en esta lente biconvexa, que definen los signos de los radios de curvatura. Véase la tabla 23.4.

Potencia de la lente: dioptrías

Note que la ecuación del fabricante de lentes (23.8) maneja la inversa de la distancia focal, $1/f$. Los optometristas usan esta relación inversa para expresar la *potencia* (P) de una lente en unidades llamadas **dioptrías** (su símbolo es D). La potencia de la lente es el recíproco de su distancia focal expresada en *metros*:

$$P(\text{expresada en dioptrías}) = \frac{1}{f(\text{expresada en metros})} \tag{23.9}$$

Así, 1 D = 1 m^{-1}. La ecuación del fabricante de lentes expresa la potencia de una lente ($1/f$) en dioptrías, si los rayos de curvatura se expresan en metros.

Si usted usa lentes habrá notado que la prescripción del optometrista mencionaba dioptrías. Las lentes convergentes y divergentes se consideran como lentes positivas (+) y negativas (−), respectivamente. Así, si un optometrista prescribe anteojos de corrección con +2 dioptrías de potencia, se trata de lentes convergentes con distancia focal de

$$f = \frac{1}{P} = \frac{1}{+2\text{ D}} = \frac{1}{2\text{ m}^{-1}} = 0.50\text{ m} = +50\text{ cm}$$

Cuanto mayor sea la potencia de la lente en dioptrías, menor es su distancia focal, y es más fuertemente convergente o divergente. Así, para corregir un problema de la vista más severo, se requieren lentes de mayor potencia y menor f que en el caso de un problema que se considera leve.

Ejemplo integrado 23.10 ■ Una lente menisco convexa: convergente o divergente

La lente menisco convexa mostrada en la figura 23.14 tiene un radio de 15 cm para la superficie convexa y 20 cm para la superficie cóncava. La lente está hecha de vidrio crown y está rodeada de aire. *a*) La lente es 1) convergente o 2) divergente. Explique por qué. *b*) ¿Cuál es la distancia focal y la potencia de la lente?

a) Razonamiento conceptual. El índice de refracción del vidrio crown se indica en la tabla 22.1: $n = 1.52$. Para un menisco convexo, la primera superficie es convexa, así que R_1 es positivo; la segunda superficie es cóncava, así que R_2 es negativo. Como $R_1 = 15\text{ cm} < |R_2| = 20\text{ cm}$, $1/R_1 + 1/R_2$ será positivo. Por consiguiente, la lente es convergente (positiva), de acuerdo con la ecuación 23.8. Así que la respuesta correcta es la 1 (convergente).

b) Razonamiento cuantitativo y solución.

Dado: $R_1 = 15\text{ cm} = 0.15\text{ m}$
$R_2 = -20\text{ cm} = -0.20\text{ m}$
$n = 1.52$ (de la tabla 22.1 para vidrio crown)

Encuentre: f y P

De acuerdo con la ecuación 23.8, tenemos

$$\frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) = (1.52-1)\left(\frac{1}{0.15\text{ m}} + \frac{1}{-0.20\text{ m}}\right) = 0.867\text{ m}^{-1}$$

Así que $f = \dfrac{1}{0.867\text{ m}^{-1}} = +1.15\text{ m}$.

La potencia de la lente es $P = \dfrac{1}{f} = +0.867\text{ D}$.

Ejercicio de refuerzo. En este ejemplo, si la lente estuviera inmersa en agua, ¿cuáles serían sus respuestas?

*23.5 Aberraciones de las lentes

OBJETIVOS: *a*) Describir algunas de las aberraciones comunes de las lentes y *b*) explicar cómo se pueden reducir o corregir.

Las lentes, al igual que los espejos, también pueden generar aberraciones. A continuación se describirán algunas de las más frecuentes.

Aberración esférica

La explicación de las lentes, hasta ahora, se ha concentrado en rayos que están cerca del eje óptico. Sin embargo, al igual que los espejos esféricos, las lentes convergentes pueden presentar **aberración esférica**, que consiste en que los rayos paralelos que pasan por regiones distintas de una lente no se reúnen en un plano focal común. En general, los rayos cercanos al eje de una lente convergente se refractan menos, y se reúnen en un punto más alejado de la lente con respecto a los rayos que pasan por la periferia (▾figura 23.21a).

La aberración esférica se minimiza empleando un diafragma para reducir el área efectiva de la lente, de manera que sólo se transmitan rayos luminosos próximos al eje. También es conveniente utilizar combinaciones de lentes convergentes y divergentes, porque la aberración de una lente se compensa con las propiedades ópticas de otra.

Aberración cromática

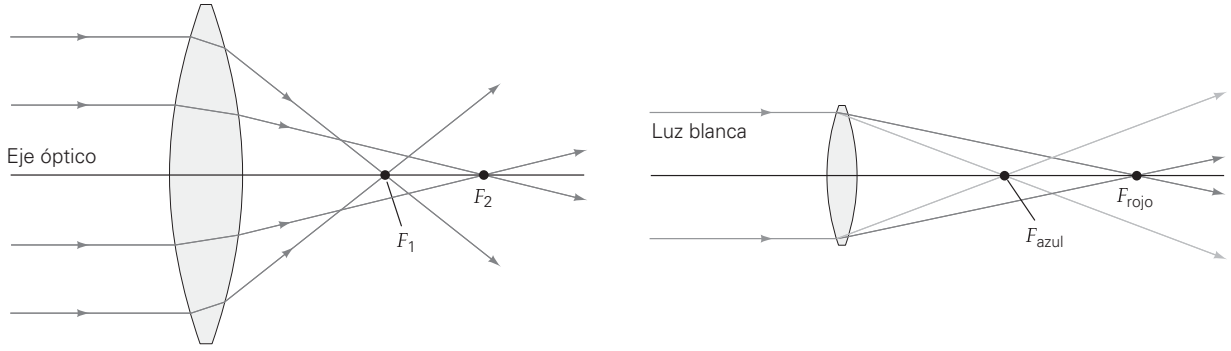
PHYSLET®

Exploración 34.5 Índice de refracción y longitud de onda

La **aberración cromática** es un efecto que se debe a que el índice de refracción del material de una lente *no* es igual para todas las longitudes de onda de la luz (esto es, a que el material es dispersivo). Cuando incide luz blanca en una lente, los rayos transmitidos de diferentes longitudes de onda (colores) no tienen un foco común, y se producen imágenes de diversos colores en distintos lugares (figura 23.21b).

Esta aberración dispersiva se puede reducir al mínimo, aunque no eliminar, si se usa un sistema compuesto de lentes de distintos materiales, por ejemplo, de vidrio crown y vidrio flint. Se escogen las lentes de tal forma que la dispersión que genera una quede compensada con la dispersión contraria que produce la otra. Con un sistema de lentes de dos componentes, bien fabricado y que se llama *doblete acromático* (*acromático* significa "sin color"), es posible hacer que coincidan las imágenes en dos longitudes de onda seleccionadas.

▼ **FIGURA 23.21 Aberraciones de las lentes** ***a*)** Aberración esférica. En general, los rayos más cercanos al eje de una lente se refractan menos y se unen en un punto más alejado de la lente que los rayos que pasan por la periferia de ésta. ***b*)** Aberración cromática. A causa de la dispersión, las diversas longitudes de onda (colores) de la luz se enfocan en planos distintos, lo que ocasiona la distorsión de la imagen general.



a) Aberración esférica **b) Aberración cromática**

Astigmatismo

Un haz luminoso circular que va por el eje de una lente forma una área iluminada circular en ésta. Cuando incide en una lente convergente, el haz paralelo converge en el foco. Sin embargo, cuando a la superficie esférica convexa de una lente llega a un cono circular de luz procedente de una fuente fuera del eje, la luz forma una zona *elíptica* iluminada en la lente. Los rayos que entran siguiendo los ejes mayor y menor de la elipse se enfocan en puntos distintos, después de pasar por la lente. A esta condición se le llama **astigmatismo**.

Como hay distintos focos en diferentes planos, las imágenes en ambos planos son borrosas. Por ejemplo, la imagen de un punto deja de ser tal y se convierte en dos imágenes lineales cortas (puntos borrosos). Para reducir el astigmatismo hay que disminuir el área efectiva de la lente con un diafragma o agregando una lente cilíndrica para compensar.

Repaso del capítulo

- Los **espejos planos** forman imágenes virtuales, derechas y sin aumento. La distancia al objeto es igual a la distancia a la imagen ($d_o = d_i$).
- El **factor de amplificación** o **aumento lateral** para todos los espejos y las lentes es

$$M = -\frac{d_i}{d_o} \qquad (23.4, 23.6)$$

- Los **espejos esféricos** pueden ser cóncavos (convergentes) o convexos (divergentes). Los espejos esféricos divergentes siempre forman imágenes derechas, reducidas y virtuales.

La distancia focal de un espejo esférico es:

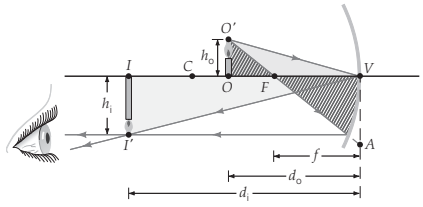
$$f = \frac{R}{2} \qquad (23.2)$$

Ecuación del espejo esférico:

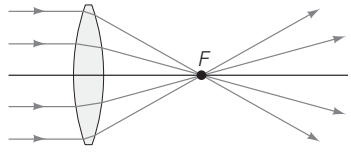
$$\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f} = \frac{2}{R} \qquad (23.3)$$

Forma alternativa:

$$d_i = \frac{d_o f}{d_o - f} \qquad (23.3a)$$



- Las lentes biesféricas pueden ser convexas (convergentes) o cóncavas (divergentes). Las lentes esféricas divergentes siempre forman imágenes derechas, reducidas y virtuales.



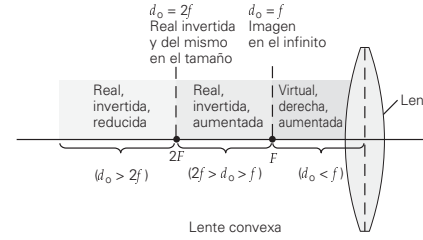
Lente convergente

- La **ecuación de la lente delgada** relaciona la distancia focal, la distancia al objeto y la distancia a la imagen:

$$\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f} \qquad (23.5)$$

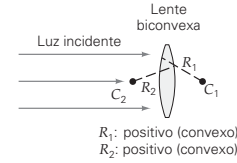
Forma alternativa:

$$d_i = \frac{d_o f}{d_o - f} \qquad (23.5a)$$



- La **ecuación del fabricante de lentes** se usa para calcular los radios de tallado y así obtener una lente de distancia focal determinada:

$$\frac{1}{f} = (n - 1)\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) \quad \text{(sólo para lente delgada en aire)} \qquad (23.8)$$



- La **potencia de la lente en dioptrías** (estando f en metros) se determina con

$$P = \frac{1}{f} \qquad (23.9)$$

Ejercicios

Los ejercicios designados **OM** *son preguntas de opción múltiple; los* **PC** *son preguntas conceptuales; y los* **EI** *son ejercicios integrados. A lo largo del texto, muchas secciones de ejercicios incluirán ejercicios "apareados". Estos pares de ejercicios, que se identifican con* números subrayados*, pretenden ayudar al lector a resolver problemas y aprender. El primer ejercicio de cada pareja (el de número par) se resuelve en la Guía de estudio, que puede consultarse si se necesita ayuda para resolverlo. El segundo ejercicio (de número impar) es similar, y su respuesta se da al final del libro.*

23.1 Espejos planos

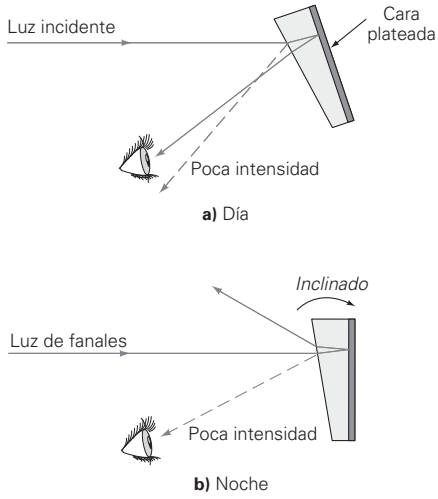
1. **OM** Un espejo plano *a*) tiene mayor distancia a la imagen que distancia al objeto; *b*) produce una imagen virtual, derecha y sin aumento; *c*) cambia la orientación vertical de un objeto, o *d*) invierte las partes superior e inferior del objeto.

2. **OM** Un espejo plano *a*) produce imágenes tanto reales como virtuales, *b*) siempre produce una imagen virtual, *c*) siempre produce una imagen real o *d*) forma imágenes por reflexión difusa.

3. **OM** El aumento lateral de un espejo plano es *a*) mayor que 1, *b*) menor que 1, *c*) igual a +1, *d*) igual a –1.

4. **PC** ¿Qué es la distancia focal de un espejo plano? ¿Por qué?

5. **PC** Los espejos retrovisores para día y noche se usan con frecuencia en los automóviles. Por la noche se inclina el espejo hacia atrás, y se reduce la intensidad y el reflejo de los faros de los automóviles que van detrás (▼figura 23.22). El espejo tiene forma de cuña y está plateado en la cara trasera. Este efecto tiene que ver con las reflexiones de la superficie frontal y trasera. La superficie frontal, no plateada, refleja el 5% de la luz que le llega, y la superficie trasera, plateada, refleja el 90% de la luz incidente. Explique cómo funciona el retrovisor para día y noche.



▲ **FIGURA 23.22 Espejo retrovisor de un automóvil** Véase el ejercicio 5.

6. **PC** Al estar de pie frente a un espejo plano, es evidente la inversión derecha-izquierda. *a*) ¿Por qué no hay inversión arriba-abajo? *b*) Podría usted lograr una inversión arriba-abajo aparente colocando su cuerpo de forma distinta?

7. **PC** ¿Por qué algunas ambulancias tienen el letrero AMBULANCIA (▼figura 23.23) impreso al frente?

▲ **FIGURA 23.23 Hacia atrás y al revés** Véase el ejercicio 7.

8. **PC** ¿Se puede proyectar una imagen virtual en una pantalla? ¿Por qué?

9. ● Una persona se pone de pie a 2.0 m de un espejo plano. *a*) ¿Cuál es la distancia aparente entre la persona y su imagen? *b*) ¿Cuáles son las características de la imagen?

10. ● Un objeto de 5.0 cm de altura se coloca a 40 cm de un espejo plano. Calcule *a*) la distancia del objeto a la imagen, *b*) la altura de la imagen y *c*) el aumento de la imagen.

11. ● Usted se coloca de pie frente a un espejo plano de 2.5 m, con cámara en mano para tomarse una foto. ¿A qué distancia debe enfocar manualmente la cámara para obtener una buena imagen?

12. ●● Si usted sostiene un espejo plano y cuadrado, de 900 cm^2, a 45 cm de sus ojos y justo alcanza a ver el asta de la bandera que hay detrás de usted y que mide 8.5 de longitud, ¿qué tan lejos está usted del asta? [*Sugerencia:* elaborar un diagrama le será útil.]

13. ●● Un perro pequeño está a 1.5 m frente a un espejo plano. *a*) ¿Dónde está la imagen del perro en relación con el espejo? *b*) Si el animal salta hacia el espejo con una velocidad de 0.50 m/s, ¿con qué velocidad se acerca a su imagen?

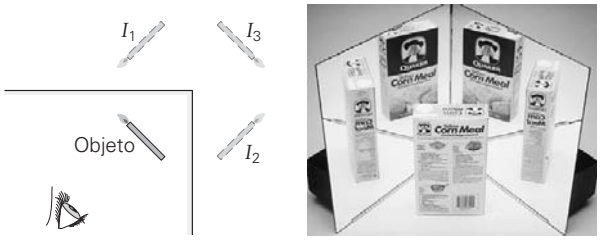
14. **EI** ●● Una señora se arregla el cabello de la parte posterior de su cabeza y sostiene un espejo plano a 30 cm frente a su cara para verse en un espejo plano de su baño, que está atrás de ella. Ella está a 90 cm del espejo del baño. *a*) La imagen de la parte posterior de su cabeza estará 1) sólo en el espejo que tiene enfrente, 2) sólo en el espejo de la pared o 3) en ambos espejos. *b*) ¿Aproximadamente a qué distancia parece estar frente a ella la imagen de su nuca?

15. **El** ●● *a*) Cuando usted está de pie entre dos espejos planos, en las paredes opuestas de un estudio de baile, observa 1) una, 2) dos o 3) varias imágenes. Explique por qué. *b*) Ahora está a 3.0 m del espejo de la pared norte, y a 5.0 m del de la pared sur; ¿cuáles son las distancias a las dos primeras imágenes en ambos espejos?

16. ●● Una mujer de 1.7 m de estatura se coloca de pie a 3.0 m frente a un espejo plano. *a*) ¿Cuál es la altura mínima que debe tener el espejo para que ella vea su imagen completa, desde la coronilla hasta la punta de los pies? Suponga que sus ojos están 10 cm debajo de la coronilla. *b*) ¿Cuál sería la altura mínima necesaria del espejo, si se colocara a 5.0 m de distancia?

17. ●● Demuestre que para un espejo plano, $d_o = d_i$ (igual magnitud). [*Sugerencia:* véase la figura 23.2 y utilice triángulos semejantes e idénticos.]

18. ●●● Dibuje diagramas de rayos que indiquen cómo se forman tres imágenes de un objeto en dos espejos planos en ángulo recto, como se ve en la figura ▼23.24a. [*Sugerencia:* examine rayos que procedan de ambos extremos del objeto en el dibujo de cada imagen.] La figura 23.24b presenta un caso similar, desde un punto de vista distinto, que produce cuatro imágenes. Explique la imagen adicional que se ve en este caso.



a) b)

▲ **FIGURA 23.24 Dos espejos, varias imágenes** Véase el ejercicio 18.

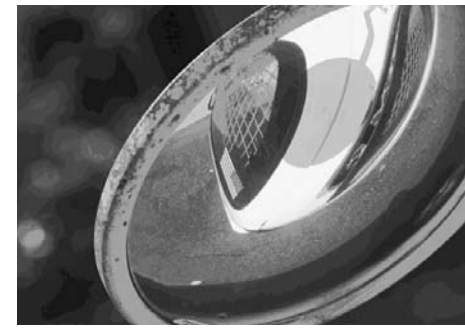
23.2 Espejos esféricos

19. **OM** ¿Cuál de las siguientes afirmaciones acerca de los espejos esféricos es correcta? *a*) Un solo espejo convergente puede producir una imagen virtual invertida. *b*) Un solo espejo divergente puede producir una imagen virtual invertida. *c*) Un espejo divergente puede producir una imagen real e invertida. *d*) Un espejo convergente puede producir una imagen real invertida.

20. **OM** La imagen que produce un espejo convexo siempre es *a*) virtual y derecha, *b*) real y derecha, *c*) virtual e invertida o *d*) real e invertida.

21. **OM** Un espejo para afeitarse o maquillarse se utiliza para formar una imagen que es más grande que el objeto. El espejo es *a*) cóncavo, *b*) convexo, *c*) plano.

22. **PC** *a*) ¿Qué utilidad tiene un espejo dual en un automóvil o camión, como el de la ▸figura 23.25? *b*) Algunos espejos retrovisores del lado del pasajero, en los automóviles, tienen una advertencia: "LOS OBJETOS EN EL ESPEJO ESTÁN MÁS CERCA DE LO QUE PARECEN". Explique por qué. *c*) ¿Se podría considerar que una antena parabólica de TV para satélite es un espejo convergente? Explique por qué.

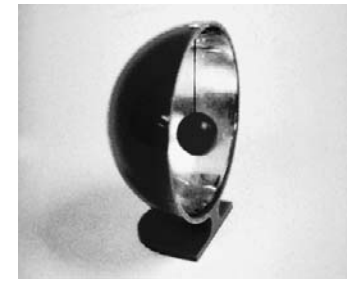


▲ **FIGURA 23.25 Aplicaciones de los espejos** Véase el ejercicio 22.

23. **PC** *a*) Al mirar una cuchara brillante se ve una imagen invertida por una de sus caras, y una imagen derecha en la otra (▼figura 23.26). (Haga la prueba.) ¿Por qué se ven así? *b*) ¿Se podrían ver imágenes derechas en ambas caras? Explique su respuesta.

▲ **FIGURA 23.26 Reflexiones en superficies cóncavas y convexas** Véase el ejercicio 23.

24. **PC** *a*) Un espejo de 10 cm de altura tiene la siguiente leyenda: "Mini espejo de cuerpo completo. Vea todo su cuerpo en 10 cm". ¿Cómo es posible esto? *b*) Una novedad muy común consiste en un espejo cóncavo con una bolita suspendida en el centro de curvatura, o ligeramente dentro (▼figura 23.27). Cuando la bolita oscila hacia el espejo, su imagen crece y de repente llena todo el espejo. La imagen parece saltar fuera del espejo. Explique lo que sucede.



▲ **FIGURA 23.27 Juguete con espejo esférico.** Véase el ejercicio 24.

25. **PC** ¿Cómo se determina de forma experimental la distancia focal de un espejo cóncavo? ¿Se puede hacer lo mismo para un espejo convexo?

26. **PC** ¿Es posible que un espejo convexo produzca una imagen que sea más alta que el objeto? ¿Por qué?

27. **EI** ● Un objeto está a 30 cm frente a un espejo convexo, cuya distancia focal es de 60 cm. *a*) Con un diagrama de rayos, determine si la imagen es 1) real o virtual, 2) derecha o invertida y 3) mayor o menor que el objeto. *b*) Calcule la distancia a la imagen y la altura de ésta.

28. ● Un objeto de 3.0 cm de altura se coloca a 20 cm frente a un espejo cóncavo, cuyo radio de curvatura es de 30 cm. ¿Dónde se forma la imagen y qué altura tiene?

29. ● Si el objeto del ejercicio 28 se mueve a un lugar a 10 cm frente al espejo, ¿cuáles serán las características de su imagen?

30. ● Una vela cuya flama mide 1.5 cm de altura se coloca a 5.0 cm al frente de un espejo cóncavo. Se produce una imagen virtual a 10 cm del vértice del espejo. *a*) Calcule la distancia focal y el radio de curvatura del espejo. *b*) ¿Qué altura tiene la imagen de la llama?

31. ●● Use la ecuación del espejo y el factor de aumento para demostrar que cuando en un espejo cóncavo $d_o = R = 2f$, la imagen es real, invertida y del mismo tamaño que el objeto.

32. ●● Un objeto de 3.0 cm de altura se coloca en distintos lugares frente a un espejo cóncavo, cuyo radio de curvatura es de 30 cm. Calcule la ubicación de la imagen y sus características, cuando la distancia al objeto es de 40, 30, 15 y 5.0 cm, mediante *a*) un diagrama de rayos y *b*) la ecuación del espejo.

33. **EI** ●● Se produce una imagen virtual con +0.50 de aumento cuando se coloca un objeto frente a un espejo esférico. *a*) El espejo es 1) convexo, 2) cóncavo o 3) plano. Explique por qué. *b*) Calcule el radio de curvatura del espejo, si el objeto está a 7.0 cm frente a él.

34. ●● Una botella de 6.0 cm de largo se localiza a 75 cm de la superficie cóncava de un espejo cuyo radio de curvatura es de 50 cm. ¿Dónde se localiza la imagen y cuáles son sus características?

35. **EI** ●● Un espejo para afeitar tiene +4.00 de aumento. *a*) Ese espejo es 1) convexo, 2) cóncavo o 3) plano. ¿Por qué? *b*) ¿Cuál es la distancia focal del espejo, si la cara se coloca a 10 cm frente al espejo?

36. ●● Con la ecuación del espejo esférico y el factor de aumento, demuestre que para un espejo cóncavo en el que $d_o < f$, la imagen de un objeto siempre es virtual, derecha y aumentada.

37. ●● Con la ecuación del espejo esférico y el factor de aumento, demuestre que en un espejo convexo la imagen de un objeto siempre es virtual, derecha y reducida.

38. ●● Un espejo cóncavo para maquillaje produce una imagen virtual que es 1.5 veces el tamaño de una persona cuya cara está a 20 cm del mismo. *a*) Dibuje un diagrama de rayos de esta situación. *b*) ¿Cuál es la distancia focal del espejo?

39. **EI** ●● La imagen de un objeto colocado a 30 cm de un espejo se forma en una pantalla localizada a 20 del espejo. *a*) El espejo es 1) convexo, 2) cóncavo o 3) plano. ¿Por qué? *b*) ¿Cuál es el radio de curvatura del espejo?

40. **EI** ●● La imagen derecha de un objeto a 18 cm frente a un espejo tiene la mitad del tamaño del objeto. *a*) El espejo es 1) convexo, 2) cóncavo o 3) plano. ¿Por qué? *b*) ¿Cuál es la distancia focal del espejo?

41. **EI** ●● Un espejo cóncavo tiene +3.0 de aumento cuando un objeto se coloca a 50 cm frente él. *a*) El tipo de imagen que se produce es 1) virtual y derecha, 2) real y derecha, 3) virtual e invertida, 4) real e invertida. Explique por qué. *b*) Determine el radio de curvatura del espejo.

42. ●● Un espejo cóncavo de afeitar se fabrica de tal forma que un hombre a una distancia de 20 cm de éste ve su imagen aumentada 1.5 veces. ¿Cuál es el radio de curvatura del espejo?

43. ●● Un niño observa en una esfera de Navidad, de 9.0 cm de diámetro, y ve una imagen de su cara que mide la mitad del tamaño real. ¿A qué distancia está el niño de la esfera?

44. **EI** ●● Un dentista utiliza un espejo esférico que produce una imagen derecha de un diente, aumentado cuatro veces. *a*) El espejo es 1) convergente, 2) divergente o 3) plano. ¿Por qué? *b*) ¿Cuál es la distancia focal del espejo en función de la distancia al objeto?

45. ●● Se coloca un lápiz de 15 cm de longitud, con su goma en el eje óptico de un espejo cóncavo y su punta hacia arriba, 20 cm enfrente del espejo. El radio de curvatura del espejo es de 30 cm. Utilice *a*) un diagrama de rayos y *b*) la ecuación del espejo para ubicar la imagen y determinar sus características.

46. **EI** ●● Un frasco de píldoras de 3.0 cm de altura se coloca a 12 cm frente a un espejo. Se forma una imagen derecha de 9.0 cm de altura. *a*) El espejo es 1) convexo, 2) cóncavo o 3) plano. ¿Por qué? *b*) ¿Cuál es su radio de curvatura?

47. ●● Un espejo esférico, en un parque de diversiones, muestra a quienquiera que se pare a 2.5 m frente a él, su imagen aumentada al doble. ¿Cuál es el radio de curvatura del espejo?

48. ●●● Para valores de d_o desde 0 hasta ∞, *a*) trace gráficas de 1) d_i en función de d_o y 2) M en función de d_o para un espejo convergente. *b*) Trace los mismos diagramas, pero para un espejo divergente.

49. ●●● La superficie anterior de un cubo de vidrio de 5.0 cm por lado se coloca a una distancia de 30.0 cm de un espejo convergente, cuya distancia focal es de 20 cm. *a*) ¿Dónde se ubican las imágenes de las caras anterior y posterior del cubo, y cuáles son las características de esas imágenes? *b*) ¿La imagen sigue siendo la de un cubo?

50. ●●● Un casquete esférico está plateado por ambas caras. Si el aumento que produce en un objeto es de +1.8 cuando el casquete se usa como espejo cóncavo, ¿cuál es el aumento de un objeto a la misma distancia del lado convexo?

51. **El** ●●● Un espejo cóncavo, cuyo radio de curvatura mide 20 cm, forma una imagen que tiene el doble de altura del objeto. *a*) Podría haber 1) una, 2) dos 3) tres distancias al objeto que satisfacen las características de la imagen. Explique por qué. *b*) ¿Cuáles son las distancias al objeto?

52. ●●● En el exterior de muchos camiones, del lado del pasajero, hay un espejo convexo (ejercicio 22a). Si la distancia focal de uno de esos espejos es de −40.0 cm, ¿cuál será la ubicación y la altura de la imagen de un automóvil de 2.0 m de altura y *a*) a 100 m detrás del camión y *b*) a 10.0 m frente al espejo?

53. ●●● Dos alumnos en un laboratorio de física tienen, cada uno, un espejo cóncavo del mismo radio de curvatura: 40 cm. Cada estudiante coloca un objeto frente a su espejo. En ambos espejos, la imagen tiene tres veces el tamaño del objeto. Sin embargo, cuando los alumnos comparan sus notas, ven que las distancias al objeto no son iguales. ¿Es posible esto? En caso afirmativo, ¿cuáles son las distancias al objeto?

23.3 Lentes

54. **OM** La imagen producida por una lente divergente siempre es *a*) virtual y aumentada, *b*) real y aumentada, *c*) virtual y reducida o *d*) real y reducida.

55. **OM** Una lente convergente *a*) debe tener al menos una superficie convexa; *b*) no puede producir una imagen virtual y reducida, *c*) es más gruesa en su centro que en su periferia o *d*) todo lo anterior.

56. **OM** Si un objeto se coloca en el foco de una lente convergente, la imagen está *a*) en cero, *b*) también en el foco, *c*) a una distancia igual al doble de la distancia focal, *d*) en el infinito.

57. **PC** Explique por qué un pez dentro de una pecera esférica se ve, desde el exterior, más grande de lo que realmente es.

58. **PC** ¿Una lente convergente puede formar una imagen virtual de un objeto real? Si es así, ¿en qué condiciones?

59. **PC** ¿Cómo se podría determinar con rapidez la distancia focal de una lente convergente? ¿Funcionará ese método con lentes divergentes?

60. **PC** Si se quiere usar una lente convergente para diseñar un proyector sencillo de filminas y proyectar la imagen amplificada de un texto pequeño en una pantalla colocada en la pared, ¿a qué distancia se debe colocar el objeto frente a la lente?

61. ● Un objeto se coloca a 50.0 cm frente a una lente convergente de 10.0 cm de distancia focal. ¿Cuáles son la distancia a la imagen y el aumento lateral?

62. ● Un objeto se coloca a 30 cm frente a una lente convergente, y forma una imagen a 15 cm detrás de la lente. ¿Cuál es la distancia focal de la lente?

63. ● Con una lente convergente de 20 cm de longitud focal se produce una imagen en una pantalla que está a 2.0 m de la lente. ¿Cuál es la distancia al objeto?

64. **El** ●● Un objeto de 4.0 cm de altura está frente a una lente convergente, cuya distancia focal es de 22 cm. El objeto está a 15 cm de la lente. *a*) Con un diagrama de rayos, determine si la imagen es 1) real o virtual, 2) derecha o invertida y 3) mayor o menor que el objeto. *b*) Calcule la distancia a la imagen y el aumento lateral.

65. ●● *a*) Diseñe la lente de un proyector de transparencias que forme una imagen nítida en una pantalla a 4.0 m de distancia, con las transparencias a 6.0 cm de la lente. *b*) Si el objeto en una transparencia tiene 1.0 cm de altura, ¿qué altura tendrá la imagen en la pantalla, y cómo se debe colocar la diapositiva en el proyector?

66. ●● Utilice la ecuación de lentes delgadas y el factor de aumento para demostrar que en el caso de una lente divergente esférica, la imagen de un objeto real siempre es virtual, derecha y reducida.

67. ●● Una lente biconvexa tiene 0.12 m de distancia focal. ¿Dónde se debe colocar un objeto en el eje de la lente para obtener *a*) una imagen real, con aumento de 2.0 y *b*) una imagen virtual con un aumento de 2.0?

68. ●● Un objeto se coloca frente a una lente bicóncava, cuya distancia focal es de −18 cm. ¿Dónde se ubica la imagen, y cuáles son sus características si la distancia al objeto es *a*) 10 cm y *b*) 25 cm? Trace diagramas de rayos para cada caso.

69. ●● Una lente biconvexa produce una imagen real e invertida de un objeto, aumentada 2.5 veces cuando ese objeto está a 20 cm de la lente. ¿Cuál es la distancia focal de la lente?

70. ●● Una cámara sencilla tiene una sola lente (biconvexa) y con ella se fotografía a un hombre de 1.7 m de altura, que está de pie a 4.0 m de la cámara. Si la imagen del hombre llena la longitud (35 mm) de un negativo, ¿cuál es la distancia focal de la lente?

71. ●● Para fotografiar la Luna llena, una persona usa una cámara de 60 mm de distancia focal. ¿Cuál será el diámetro de la imagen de la Luna en la película? [*Nota:* en la tercera de forros de este libro se encuentran datos importantes de la Luna.]

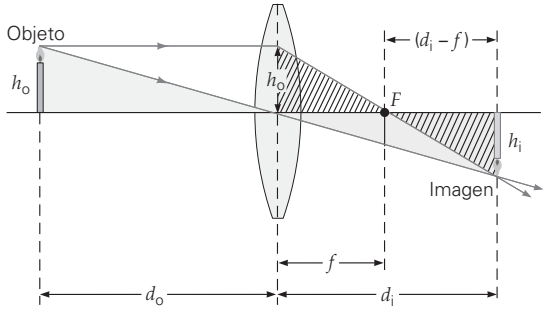
72. ●● *a*) Para valores de d_o desde 0 hasta ∞, dibuje gráficas para 1) d_i en función de d_o y 2) M en función de d_o para una lente convergente. *b*) Trace gráficas similares para una lente divergente. (Compare con el ejercicio 48.)

73. ●● Un objeto se coloca a 40 cm de una pantalla. *a*) ¿En qué punto entre el objeto y la pantalla debe colocarse una lente convergente de 10 cm de distancia focal, para producir una imagen nítida en la pantalla? *b*) ¿Cuál es el aumento de esa lente?

74. ●● Un objeto de 5.0 cm de alto está a 10 cm de una lente cóncava. La imagen producida tiene la quinta parte del tamaño del objeto. ¿Cuál es la distancia focal de la lente?

75. ●● *a*) Para una lente biconvexa, ¿cuál es la distancia *mínima* entre un objeto y su imagen, si esta última es real? *b*) ¿Cuál es la distancia si la imagen es virtual?

76. ●● Use la ▼figura 23.28 para deducir *a*) la ecuación de la lente delgada y *b*) la ecuación del aumento para una lente delgada. [*Sugerencia:* utilice triángulos semejantes.]



▲ **FIGURA 23.28 La ecuación de las lentes delgadas** Geometría para deducir la ecuación de las lentes delgadas (y su factor de aumento). Observe los dos conjuntos de triángulos semejantes. Véase el ejercicio 76.

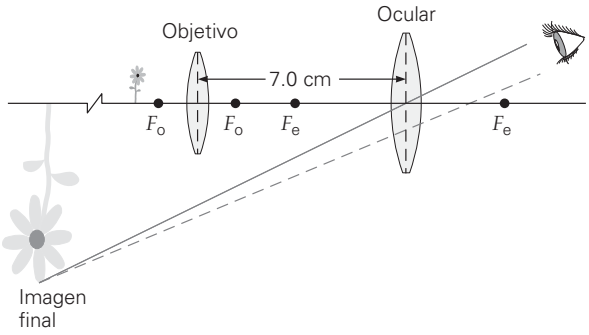
77. ●● *a*) Si se sujeta un libro a 30 cm de una lente de anteojos con −45 cm de distancia focal, ¿dónde se forma la imagen de sus páginas? *b*) Si se usa una lupa de +57 cm de distancia focal, ¿dónde se forma la imagen?

78. **EI** ●● Un alumno de biología quiere examinar un pequeño insecto con una amplificación de +5.00. *a*) Debería utilizar una lente 1) convexa, 2) cóncava o 3) plana. Explique por qué. *b*) Si el insecto está a 5.00 cm de la lente, ¿cuál es la distancia focal de ésta?

79. ●● En una práctica de campo, un alumno de biología examina un pequeño insecto con una lupa. Si ve al insecto aumentado por un factor de 3.5 cuando sostiene la lupa a 3.0 cm de él, ¿cuál es la distancia focal de la lupa?

80. ●● El ojo humano es un complejo sistema de lentes múltiples. Sin embargo, cuando el ojo está relajado, se aproxima a una sola lente convergente equivalente con una distancia focal promedio de 1.7 cm. Si un ojo está viendo un árbol de 2.0 m de alto localizado enfrente a 15 m, ¿cuáles son la altura y la orientación de la imagen del árbol en la retina?

81. ●●● En la ▼figura 23.29 se ilustra la geometría de un microscopio compuesto, formado por dos lentes convergentes. (En el capítulo 25 veremos más detalles de los microscopios.) Las distancias focales del objetivo y el ocular son 2.8 mm y 3.3 cm, respectivamente. Si un objeto se coloca a 3.0 mm del objetivo, ¿dónde se ubica la imagen final y qué tipo de imagen es?



▲ **FIGURA 23.29 Microscopio compuesto** Véase el ejercicio 81.

82. ●●● Dos lentes convergentes, L_1 y L_2, tienen 30 y 20 cm de distancia focal, respectivamente. Las lentes se colocan a 60 cm de distancia en el mismo eje, y se coloca un objeto a 50 cm de L_1, en el lado contrario a L_2. ¿Dónde se forma la imagen, en relación con L_2, y cuáles son sus características?

83. ●●● Para una combinación de lentes, demuestre que el aumento total es $M_{total} = M_1M_2$. [*Sugerencia:* examine la definición de aumento.]

84. ●●● Demuestre que para lentes delgadas de distancias focales f_1 y f_2, en contacto mutuo, la distancia focal efectiva (f) es

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}$$

23.4 La ecuación del fabricante de lentes y *23.5 Aberraciones de las lentes

85. **OM** La potencia de una lente se expresa en unidades de *a*) watts, *b*) dioptrías, *c*) metros, *d*) tanto *b* como *c*.

86. **OM** Una aberración de lente causada por la dispersión se llama *a*) aberración esférica, *b*) aberración cromática, *c*) aberración refringente, *d*) ninguna de las opciones anteriores es válida.

87. **OM** La distancia focal de un bloque rectangular de vidrio es *a*) cero, *b*) infinita, *c*) no está definida.

88. **PC** Determine los signos de R_1 y R_2 para cada lente de la figura 23.14.

89. **PC** Cuando usted abre sus ojos bajo el agua, ve todo borroso. Sin embargo, si usa *goggles*, podrá ver con claridad. Explique por qué.

90. **PC** Una lente que es convergente en el aire, se sumerge en un fluido cuyo índice de refracción es mayor que el de la lente. ¿Sigue siendo convergente esa lente?

91. **PC** *a*) Cuando se sumerge en agua una lente con n = 1.60, ¿cambia su distancia focal? Si es así, ¿en qué forma? *b*) ¿Cuál sería el caso de una lente sumergida cuyo índice de refracción fuera menor que el del fluido?

92. ● Un optometrista prescribió a un alumno miope unos anteojos con −2.0 D de potencia. ¿Cuál es la distancia focal de los anteojos?

93. ● Un adulto mayor con hipermetropía necesita anteojos con una distancia focal de 25 cm. ¿Cuál es la potencia de los anteojos?

94. ●● Un optometrista prescribe anteojos de corrección con +1.5 D de potencia. El fabricante de lentes toma un vidrio materia prima, cuyo índice de refracción es 1.6, y que tiene una superficie delantera convexa con 20 cm de radio de curvatura. ¿A qué radio de curvatura debe tallar la otra superficie?

95. ●● Una lente plano-cóncava de plástico tiene 50 cm de radio de curvatura en su superficie cóncava. Si el índice de refracción del plástico es 1.35, ¿cuál es la potencia de la lente?

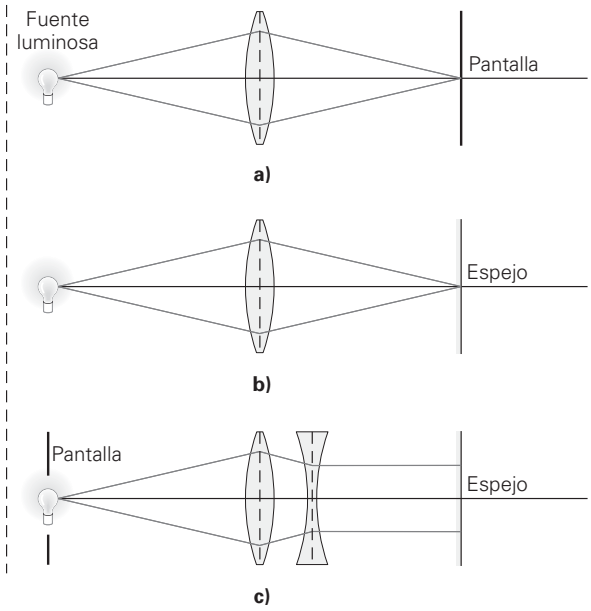
96. **El** ●● Una lente de contacto menisco convexa (figura 23.14) está hecha de un plástico cuyo índice de refracción es 1.55. La lente tiene un radio frontal de 2.50 cm y un radio posterior de 3.00 cm. *a*) Los signos de R_1 y R_2 son 1)+, +, 2) +, −, 3) −, +, 4) −, −. Explique por qué. *b*) ¿Cuál es la distancia focal de la lente?

97. ●● Una lente convergente de vidrio, con índice de refracción de 1.62, tiene una distancia focal de 30 cm en el aire. ¿Cuál es su distancia focal cuando esa lente se sumerge en agua?

98. **El** ●●● Una lente biconvexa es de vidrio con índice de refracción 1.6. Tiene un radio de curvatura de 30 cm en una superficie y 40 cm en la otra. *a*) Si la lente pasa del aire al agua, su distancia focal 1) aumentará, 2) permanecerá igual o 3) disminuirá? ¿Por qué? *b*) Calcule la distancia focal de esta lente en el aire y bajo el agua.

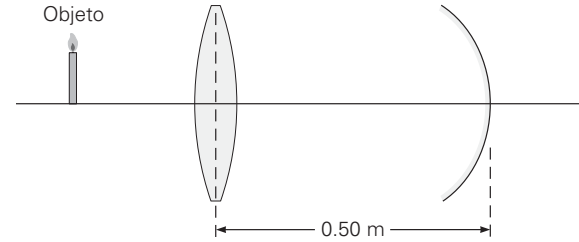
Ejercicios adicionales

99. Un método para determinar la distancia focal de una lente divergente se llama *autocolimación.* Como se ve en la ▼figura 23.30, primero se proyecta una imagen nítida de una fuente luminosa en una pantalla, mediante una lente convergente. Después se sustituye la pantalla por un espejo plano. En el tercer paso se coloca una lente divergente entre la lente convergente y el espejo. La luz se refleja en el espejo y regresa por el sistema de lente compuesto, formando una imagen en una pantalla cercana a la fuente luminosa. Esta imagen se enfoca ajustando la distancia entre la lente divergente y el espejo. La distancia a la cual la imagen es más nítida es igual a la distancia focal de la lente. Explique por qué es efectivo este método.



▲ **FIGURA 23.30 Autocolimación** Véase el ejercicio 99.

100. Para la configuración de la ▼figura 23.31, se coloca un objeto a 0.40 m frente a la lente convergente, cuya distancia focal es de 0.15 m. Si el espejo cóncavo tiene 0.13 m de distancia focal, ¿dónde se forma la imagen final y cuáles son sus características?



▲ **FIGURA 23.31 Combinación de lente y espejo** Véase el ejercicio 100.

101. Dos lentes, cada una con +10 D de potencia, se colocan a 20 cm de distancia a lo largo del mismo eje. Si un objeto está a 60 cm de la primera, en el lado opuesto de la segunda, ¿dónde se forma la imagen final, en relación con la primera lente, y cuáles son sus características?

102. Demuestre que el aumento, para los objetos cercanos al eje óptico de un espejo convexo, es $|M| = d_i/d_o$. [*Sugerencia:* utilice un diagrama de rayos, con los rayos reflejados en el vértice del espejo.]

103. Un objeto está a 15 cm de una lente convergente de 10 cm de distancia focal. En el lado opuesto de esa lente, a 60 cm de distancia, hay una lente convergente de 20 cm de distancia focal. ¿Dónde se forma la imagen final y cuáles son sus características?

104. *a*) Con diagramas de rayos, demuestre que un rayo paralelo al eje óptico de una lente biconvexa se refracta hacia el eje, en la superficie de incidencia, y de nuevo hacia el centro en la superficie de salida. *b*) Demuestre que esto también es válido para una lente bicóncava, pero con ambas refracciones alejándose del eje.

PHYSLET® Los siguientes problemas de física Physlet se pueden utilizar con este capítulo.
33.1, 33.2, 33.3, 33.4, 33.5, 33.6, 33.7, 33.8, 34.4, 35.1, 35.2, 35.3, 35.4, 35.5, 35.6, 35.7, 35.8, 35.9, 35.10

CAPÍTULO 24

ÓPTICA FÍSICA: LA NATURALEZA ONDULATORIA DE LA LUZ

24.1 El experimento de Young de la doble rendija 761

24.2 Interferencia en películas delgadas 764

24.3 Difracción 768

24.4 Polarización 775

*24.5 Dispersión atmosférica de la luz 782

HECHOS DE FÍSICA

- Algunas fuentes afirman que Thomas Young, quien fue el primero en demostrar la naturaleza ondulatoria de la luz, podía leer a la edad de dos años y que leyó la Biblia en dos ocasiones cuando era niño.
- En un DVD-ROM, la distancia entre pistas es de 0.74 μm, mientras que en un CD-ROM es de 1.6 μm. En comparación, el diámetro de un cabello humano mide entre 50 y 150 μm. Las pistas tanto de los DVD-ROM como de los CD-ROM, en realidad, dividen los cabellos.
- Las señales AM de radio se escuchan mejor en algunas áreas que las de FM. Esto se debe a que las ondas AM, que son más largas, se difractan más fácilmente alrededor de los edificios y de otros obstáculos.
- La luz del cielo es parcialmente polarizada. Se cree que algunos insectos, como las abejas, utilizan la luz del cielo polarizada para determinar sus direcciones de navegación con respecto al Sol.
- Para un observador en Tierra, Marte, el "planeta rojo", aparece rojizo porque el material de su superficie contiene óxido de hierro. La oxidación del hierro en la Tierra produce óxido de hierro.

Siempre es intrigante ver los colores brillantes que producen los objetos que, como sabemos, no tienen colores propios. Por ejemplo, el vidrio de un prisma, que es incoloro y transparente, produce todo un conjunto de colores cuando lo atraviesa la luz blanca. Los prismas, al igual que las gotitas de agua que producen el arco iris, no crean colores. Tan sólo separan las distintas longitudes de onda que forman la luz blanca.

Los fenómenos de reflexión y refracción se analizan en forma adecuada recurriendo a la óptica geométrica (capítulo 22). Los diagramas de rayos (capítulo 23) indican lo que sucede cuando la luz se refleja en un espejo o cuando pasa por una lente. Sin embargo, hay otros fenómenos donde interviene la luz, por ejemplo las figuras de interferencia de la foto de esta página (véase el pliego a color al final del libro), que no se pueden explicar ni describir con el concepto de rayo, porque ese concepto no tiene en cuenta la naturaleza ondulatoria de la luz. Otros fenómenos ondulatorios son la difracción y la polarización.

La **óptica física**, u **óptica ondulatoria**, tiene en cuenta las propiedades ondulatorias que en la óptica geométrica se ignoran. La teoría ondulatoria de la luz conduce a explicaciones satisfactorias de los fenómenos que no se pueden analizar mediante rayos. Así, en este capítulo, se usará la naturaleza ondulatoria de la luz para analizar fenómenos como la interferencia y la difracción.

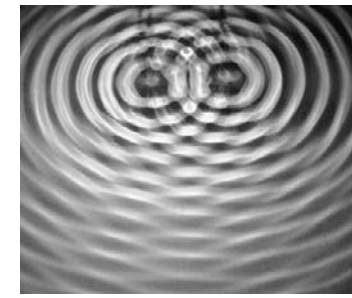
Se debe usar la óptica ondulatoria para explicar cómo se propaga la luz alrededor de objetos pequeños o a través de diminutas aberturas. Vemos esto en la vida cotidiana con los delgados surcos en los CD, DVD y en otros artículos. Se considera que un objeto o una abertura son pequeños si sus dimensiones son del orden de magnitud de la longitud de onda de la luz.

24.1 El experimento de Young de la doble rendija

OBJECTIVOS: *a*) Explicar cómo el experimento de Young demuestra la naturaleza ondulatoria de la luz y *b*) calcular la longitud de onda de la luz a partir de los resultados experimentales.

Se ha afirmado que la luz se comporta como una onda, pero hasta el momento no se ha analizado ninguna prueba de esta aseveración. ¿Cómo demostraría usted la naturaleza ondulatoria de la luz? El científico inglés Thomas Young (1773-1829) ideó un método para ello, que implica el uso de la interferencia. El **experimento de Young de la doble rendija** no sólo demuestra la naturaleza ondulatoria de la luz, sino que también permite medir su longitud de onda. En esencia, se demuestra que la luz es una onda si presenta propiedades ondulatorias, como la interferencia y la difracción.

Recuerde que —como vimos en la descripción de la interferencia de ondas en las secciones 13.4 y 14.4—, las ondas superpuestas pueden interferir en forma constructiva o destructiva. La interferencia constructiva se presenta cuando se sobreponen dos crestas, y la interferencia destructiva se presenta cuando se sobreponen una cresta y un valle. Este fenómeno se puede observar en las ondas en el agua, en donde las interferencias constructivas y destructivas producen obvias figuras de interferencia (▸figura 24.1).



▲ **FIGURA 24.1 Interferencia de ondas en agua** La interferencia constructiva y destructiva de las ondas procedentes de dos fuentes coherentes en el agua de un estanque produce figuras de interferencia.

Nota: compare la figura 24.1 con la 14.8a.

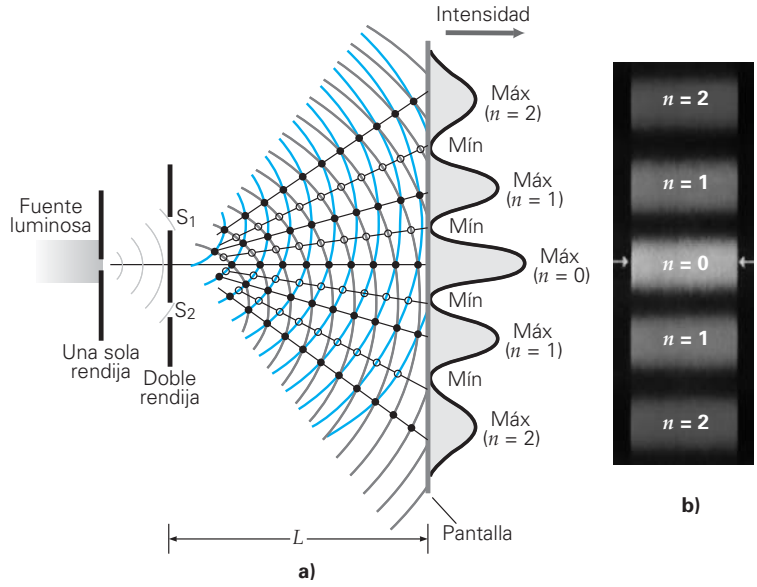
La interferencia de las ondas luminosas (visibles) no se observa con tanta facilidad porque sus longitudes de onda son relativamente cortas ($\approx 10^{-7}$ m) y porque no son monocromáticas (de una sola frecuencia). Además, sólo se producen figuras estacionarias de interferencia cuando las fuentes son *coherentes*, es decir, cuando las fuentes que producen ondas luminosas tienen entre sí una relación constante de fases. Por ejemplo, para que se presente interferencia constructiva en cierto punto, las ondas que lleguen a él deben estar en fase. Al encontrarse las ondas, una cresta *siempre* debe traslaparse con una cresta, y un valle *siempre* debe traslaparse con un valle. Si a través del tiempo se desarrolla una diferencia de fases, cambia la figura de interferencia y no se establece una figura estable o estacionaria.

En una fuente luminosa ordinaria, los átomos se excitan al azar, y las ondas luminosas emitidas fluctúan en amplitud y frecuencia. Por eso, la luz que producen dos de tales fuentes es *incoherente* y no produce una figura estacionaria de interferencia. Sí hay interferencia, pero la diferencia entre las fases de las ondas que se interfieren cambia con tal rapidez, que no se distinguen los efectos de la interferencia. Para obtener dos fuentes coherentes se coloca una barrera con una rendija angosta frente a una fuente luminosa, y una barrera con dos rendijas muy angostas colocadas frente a la primera barrera (▾figura 24.2a).

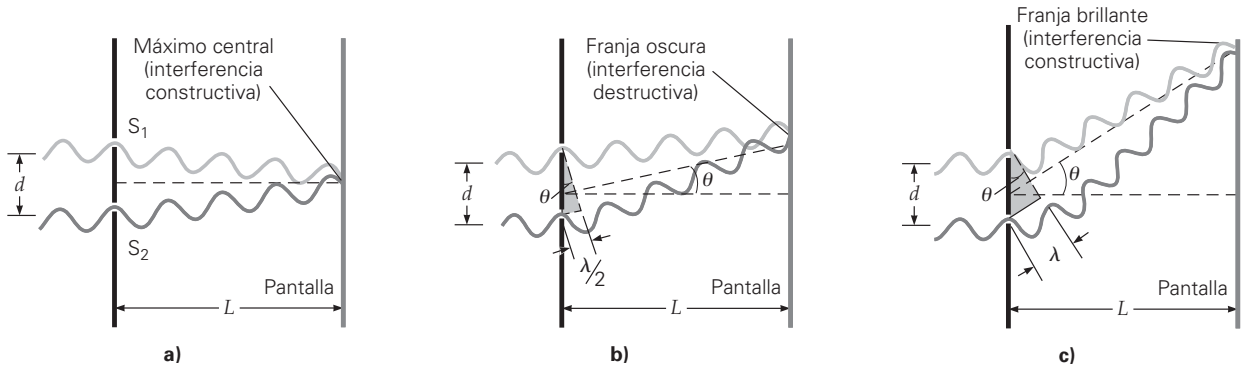
PHYSLET®

Ilustración 37.1 *Ondas en el estanque*

Las ondas que se propagan saliendo de la primera rendija están en fase, y entonces la rendija doble actúa como dos fuentes coherentes, porque cada onda se separa en dos partes. Todo cambio aleatorio en la luz de la fuente original afectará entonces a la luz que pase por ambas rendijas, y la diferencia de fases será constante. El moderno rayo láser, que es una fuente luminosa coherente, facilita mucho la observación de una figu-



◀ **FIGURA 24.2 Interferencia de doble rendija** ***a)*** Las ondas coherentes de dos rendijas se indican en azul (rendija superior) y en gris (rendija inferior). Las ondas se difunden a causa de la difracción en rendijas angostas. Esas ondas interfieren y producen máximos y mínimos que se alternan, es decir, franjas brillantes y oscuras, en la pantalla. ***b)*** Una figura de interferencia. Note la simetría de la figura respecto al máximo central ($n = 0$).



▲ **FIGURA 24.3 Interferencia** La interferencia que produce franjas brillantes u oscuras depende de la diferencia en longitudes de trayectoria de la luz que procede de las dos rendijas. ***a)*** La diferencia de longitudes de trayectoria en el lugar del máximo central es cero, por lo que las ondas llegan en fase e interfieren en forma constructiva. ***b)*** En la posición de la primera franja oscura, la diferencia en longitudes de trayectoria es $\lambda/2$, y las ondas se interfieren en forma destructiva. ***c)*** En la posición de la primera banda brillante, la diferencia de longitudes de trayectoria es λ, y la interferencia es constructiva.

ra estable de interferencia. Se observa entonces una serie de líneas luminosas en una pantalla, relativamente alejada de las rendijas (figura 24.2b).

Para ayudarnos a analizar el experimento de Young, imaginemos que se usa luz con una sola longitud de onda (luz monocromática). Como resultado de la difracción (véase las secciones 13.4 y 14.4 y la sección 24.3 de este capítulo), que es la propagación de la luz al pasar por una rendija, las ondas se extienden e interfieren como se ve en la figura 24.2a. Al venir de dos "fuentes" coherentes, las ondas que interfieren producen una figura estable de interferencia en la pantalla. Esta figura consiste en un máximo central brillante (▲figura 24.3a) y una serie de franjas laterales simétricas, oscuras (figura 24.3b) y claras (figura 24.3c), que indican las posiciones donde se presenta la interferencia destructiva y constructiva. La existencia de esta figura de interferencia demuestra con claridad la naturaleza ondulatoria de la luz. La intensidad de las franjas brillantes a cada lado disminuye en función de la distancia al máximo central.

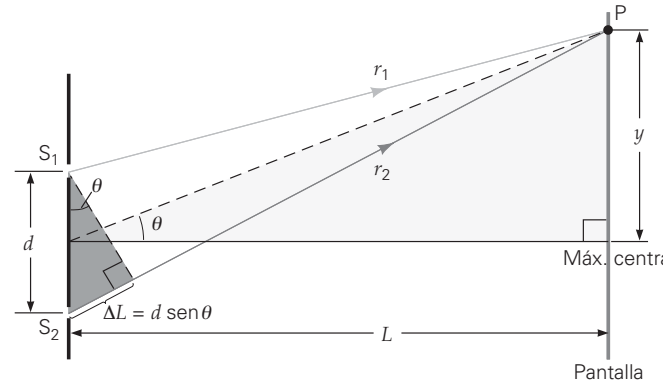
Para medir la longitud de onda de la luz se necesita examinar la geometría del experimento de Young, como se ve en la ▼figura 24.4. Tenemos una pantalla colocada a la distancia L de las rendijas, y un punto P arbitrario en la pantalla. P está a una distancia y del centro del máximo central, y determina un ángulo q en relación con la línea normal entre las rendijas. Las rendijas S_1 y S_2 están separadas por una distancia d. Note que el trayecto de la luz de la rendija S_2 a P es más largo que de S_1 a P. Como se observe en la figura, la diferencia entre longitudes de trayectoria (ΔL) es aproximadamente

$$\Delta L = d \operatorname{sen} \theta$$

El hecho de que el ángulo en el triángulo pequeño sombreado sea casi igual a θ se demuestra con un argumento geométrico sencillo, que implica triángulos semejantes cuando $d \ll L$, como se describe en el pie de la figura 24.4.

La relación entre la diferencia de fases de dos ondas y la diferencia de las longitudes de sus trayectorias se describió en el capítulo 14, al estudiar las ondas sonoras. Las condiciones para interferencia son válidas para cualquier tipo de onda, incluyendo las ondas luminosas. La interferencia constructiva se presenta en cualquier punto en el que la diferencia de longitudes de trayectoria entre las dos ondas es un número entero de longitudes de onda:

$$\Delta L = n\lambda \qquad \text{para } n = 0, 1, 2, 3, \ldots \qquad \textit{condición para interferencia constructiva} \tag{24.1}$$



▶ **FIGURA 24.4 Geometría del experimento de Young de la doble rendija** La diferencia de longitudes de trayectoria de la luz que sale de las dos rendijas y llega a un punto P es $r_2 - r_1 = \Delta L$, que forma un cateto del pequeño triángulo sombreado. Como la barrera con las rendijas es paralela a la pantalla, el ángulo entre r_2 y la barrera (en S_2, en el pequeño triángulo sombreado) es igual al ángulo que forman r_2 y la pantalla. Cuando L es mucho mayor que y, ese ángulo es casi idéntico al que forman la pantalla y la línea punteada, que es un ángulo en el triángulo grande sombreado. Los dos triángulos sombreados son entonces casi exactamente semejantes, y el ángulo en S_1 del triángulo pequeño es casi exactamente igual a θ. Así, $\Delta L = d$ sen θ. (El dibujo no está a escala. Se supone que $d \ll L$.)

De manera similar, en el caso de la interferencia destructiva, la diferencia de longitudes de trayectoria es un número impar de medias longitudes de onda:

$$\Delta L = \frac{m\lambda}{2} \qquad \text{para } m = 1, 3, 5, \ldots \qquad \textit{condición para interferencia destructiva} \tag{24.2}$$

Así, en la figura 24.4, la posición de una franja brillante (interferencia constructiva) satisface

$$d \operatorname{sen} \theta = n\lambda \qquad \text{para } n = 0, 1, 2, 3, \ldots \qquad \textit{condición para franjas brillantes} \tag{24.3}$$

en la que n se llama *número de orden*. La franja de orden cero ($n = 0$) corresponde al máximo central; la franja de primer orden ($n = 1$) es la primera franja brillante en ambos lados del máximo central, y así sucesivamente. Conforme varía la diferencia de longitudes de trayectoria de un punto a otro, también varía la diferencia de fases, y el tipo resultante de interferencia (constructiva o destructiva).

Por lo anterior, la longitud de onda se determina midiendo d y θ en una franja brillante de determinado orden (que no sea el máximo central), porque la ecuación 24.3 se resuelve como $\lambda = (d \operatorname{sen} \theta)/n$.

El ángulo θ localiza una franja en relación con el máximo central y que se puede medir en una fotografía de la figura de interferencia, como la 24.2b. Si θ es pequeño ($y \ll L$), entonces $\operatorname{sen} \theta \approx \tan \theta = y/L$. Se sustituye y/L en lugar de $\operatorname{sen} \theta$ en la ecuación 24.3, y a continuación se despeja y; así se obtiene una buena aproximación de la distancia de la n-ésima franja brillante (y_n) al máximo central en cada lado:

$$y_n \approx \frac{nL\lambda}{d} \qquad \text{para } n = 0, 1, 2, 3, \ldots \qquad \textit{distancia lateral a la franja brillante, sólo para } \theta \textit{ pequeño} \tag{24.4}$$

Con un análisis similar se obtiene la ubicación de las franjas oscuras. (Véase el ejercicio 12a.)

En la ecuación 24.3 se ve que, excepto en la franja de orden cero, $n = 0$ (el máximo central), las posiciones de las franjas dependen de la longitud de onda: diferentes longitudes de onda (λ) producen valores distintos de $\operatorname{sen} \theta$ y, en consecuencia, de θ y y. Por consiguiente, si utilizamos luz blanca, la banda central es blanca porque todas las longitudes de onda tienen la misma ubicación, pero los demás órdenes se convierten en un espectro "extendido" de colores. Como y es proporcional a λ ($y \propto \lambda$), cabe esperar que el rojo esté más alejado que el azul, o que el rojo tenga una mayor longitud de onda que el azul.

Al medir las posiciones de las franjas de color dentro de determinado orden, Young pudo determinar las longitudes de onda de los colores de la luz visible. Hay que advertir también que el tamaño o la "extensión" de la figura de interferencia, y_n, depende inversamente de la distancia d entre las rendijas. Cuanto menor es d, más se extiende la figura de interferencia. Cuando d es grande, esa figura está tan comprimida que parece una sola franja blanca (en el centro).

En este análisis, el término *destructiva no* implica que la energía se destruya. La interferencia destructiva es tan sólo una descripción de un hecho físico; significa que si la energía luminosa no está presente en un determinado lugar, por conservación de energía, debe estar en algún otro sitio. La descripción matemática del experimento de la doble rendija de Young nos indica que no hay energía luminosa en las franjas oscuras. La energía luminosa se distribuye y se ubica en las franjas brillantes. Esto también se observa en el caso de las ondas sonoras.

PHYSLET®

Exploración 37.1 Números variables y orientaciones de las fuentes

PHYSLET®

Exploración 37.2 Cambio en la separación entre fuentes

Ejemplo integrado24.1 ■ Medición de la longitud de onda de la luz: experimento de la doble rendija de Young

En un experimento de laboratorio parecido al que se ilustra en la figura 24.4, una luz monocromática (luz que sólo tiene una longitud de onda o frecuencia) pasa por dos rendijas delgadas que están a 0.050 mm de distancia. En una pared blanca se observa la figura de interferencia, a 1.0 m de las rendijas, y se ve que la franja brillante de segundo orden forma un ángulo $\theta_2 = 1.5°$. *a*) Si la distancia de separación entre las rendijas disminuye, la franja brillante de segundo orden formará un ángulo 1) mayor que 1.5°, 2)1.5°, 3) menor que 1.5°. Explique su respuesta. *b*) ¿Cuál es la longitud de onda de la luz y cuál es la distancia entre las franjas brillantes de segundo y tercer orden? *c*) Si $d = 0.040$ mm, ¿cuál es θ_2?

a) Razonamiento conceptual. De acuerdo con la condición para la interferencia constructiva, $d \operatorname{sen} \theta = n\lambda$, el producto de d y $\operatorname{sen} \theta$ es una constante, para una longitud de onda λ y un número de orden n. Por consiguiente, si d disminuye, $\operatorname{sen} \theta$ aumentará, al igual que θ. Así que la respuesta correcta es la 1.

(continúa en la siguiente página)

b) y c) Razonamiento cuantitativo y solución. La ecuación 24.3 servirá para calcular la longitud de onda. Como $L \gg d$, esto es, 1.0 m $\gg$ 0.050 mm, el ángulo θ es pequeño. Se podrían calcular y_2 y y_3 con la ecuación 24.4, para así determinar la distancia entre las franjas de segundo y de tercer orden ($y_3 - y_2$). Sin embargo, las franjas brillantes para determinada longitud de onda tienen separaciones uniformes (para θ pequeño). En general, la distancia entre las franjas brillantes adyacentes es constante.

Dado: $L = 1.0$ m; $n = 2$; *b)* $\theta_2 = 1.5°$; $d = 0.050$ mm $= 5.0 \times 10^{-5}$ m; *c)* $d = 4.0 \times 10^{-5}$ m

Encuentre: *b)* λ longitud de onda) y $y_3 - y_2$ (distancia entre $n = 2$ y $n = 3$); *c)* θ_2 si $d = 0.040$ mm

b) Se aplica la ecuación 24.3:

$$\lambda = \frac{d \operatorname{sen} \theta}{n} = \frac{(5.0 \times 10^{-5}\ \text{m}) \operatorname{sen} 1.5°}{2} = 6.5 \times 10^{-7}\ \text{m} = 650\ \text{nm}$$

Este valor es 650 nm, que es la longitud de onda de una luz rojo anaranjada (véase la figura 20.23). Con el método general para n y $n + 1$, se obtiene

$$y_{n+1} - y_n = \frac{(n+1)L\lambda}{d} - \frac{nL\lambda}{d} = \frac{L\lambda}{d}$$

En este caso, la distancia entre las franjas sucesivas es

$$y_3 - y_2 = \frac{L\lambda}{d} = \frac{(1.0\ \text{m})(6.5 \times 10^{-7}\ \text{m})}{5.0 \times 10^{-5}\ \text{m}} = 1.3 \times 10^{-2}\ \text{m} = 1.3\ \text{cm}$$

c) $\operatorname{sen} \theta_2 = \dfrac{n\lambda}{d} = \dfrac{(2)(650 \times 10^{-9}\ \text{m})}{(4.0 \times 10^{-5}\ \text{m})} = 0.0325$ de manera que $\theta_2 = \operatorname{sen}^{-1}(0.0325) = 1.9° > 1.5°$.

Ejercicio de refuerzo. Supongamos que se emplea luz blanca, en lugar de la luz monocromática en este ejemplo. ¿Cuál sería la separación entre los componentes rojo ($\lambda = 700$ nm) y azul ($\lambda = 400$ nm) en la franja de segundo orden? (*Las respuestas de todos los ejercicios de refuerzo aparecen al final del libro.*)

24.2 Interferencia en películas delgadas

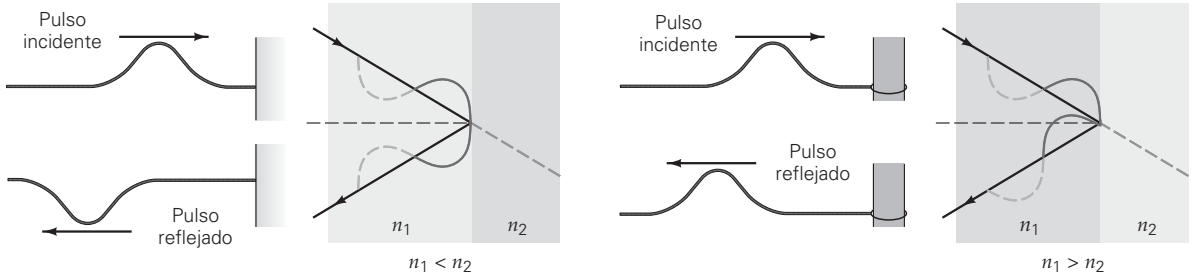
OBJETIVOS: *a)* Describir cómo las películas delgadas producen figuras coloridas y *b)* dar algunos ejemplos de las aplicaciones prácticas de la interferencia en películas delgadas.

¿Alguna vez se ha preguntado qué es lo que causa los colores de arco iris, que se ven cuando se refleja luz blanca en una película delgada de aceite o en una burbuja de jabón? Este efecto se llama *interferencia en película delgada* y es un resultado de la interferencia de la luz que se refleja en las superficies opuestas de la película, y se comprende con facilidad en términos de interferencia de ondas.

Sin embargo, primero se necesita ver cómo se afecta la fase de una onda luminosa en la reflexión. Recuerde que, como vimos en el capítulo 13, un impulso ondulatorio en una cuerda sufre un cambio de fase de 180° [es decir, *de media onda*, $\lambda/2$] cuando se refleja en un soporte rígido, en tanto que no tiene desplazamiento de fase cuando se refleja en un soporte libre (▼figura 24.5). De igual manera, como se ve en la figura, el cambio de fase para la reflexión de las ondas luminosas en una frontera depende de los índices de refracción (n) de los dos materiales:

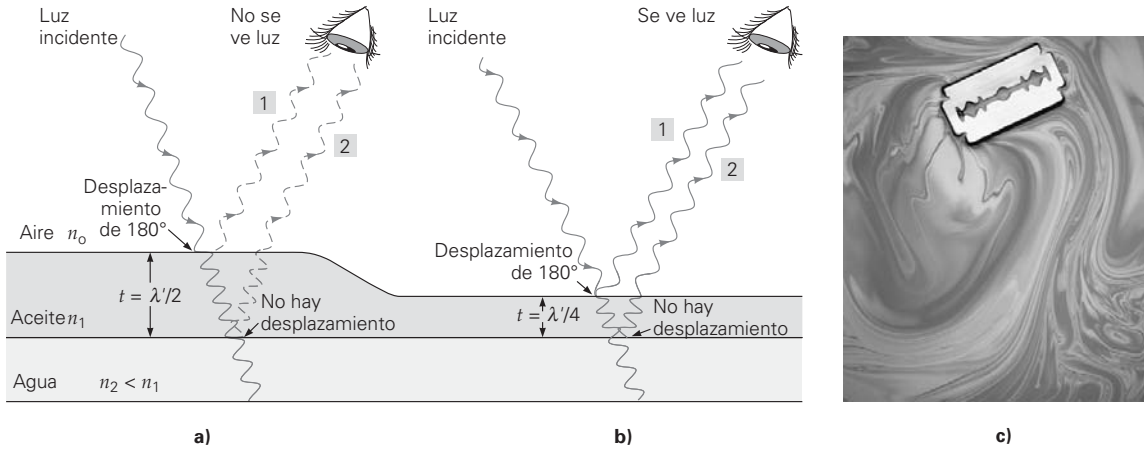
- Una onda luminosa sufre un cambio de fase de 180° al reflejarse si $n_1 < n_2$.
- No hay cambio de fase en la reflexión si $n_1 > n_2$.

▼ **FIGURA 24.5 Reflexión y cambios de fase** Los cambios de fase que sufren las ondas luminosas al reflejarse son análogos a los de los pulsos en cuerdas. ***a)*** La fase de un pulso en una cuerda se desplaza 180° al reflejarse en un extremo fijo, al igual que la fase de una onda luminosa cuando se refleja en un medio ópticamente más denso. ***b)*** Un pulso en una cuerda tiene un corrimiento de fase igual a cero (no se desplaza) cuando se refleja en un extremo libre. De forma análoga, una onda luminosa no varía en su fase cuando se refleja en un medio ópticamente menos denso.



a) Extremo fijo: cambio de fase de 180°

b) Extremo libre: cambio de fase igual a cero



▲ **FIGURA 24.6 Interferencia en una película delgada** Para una película de aceite hay un desplazamiento de fase de 180° en la luz que se refleja en la interfase aire-aceite, y cambio de fase cero en la interfase aceite-agua. λ' es la longitud de onda en el aceite. ***a)*** La interferencia destructiva se presenta si la película de aceite tiene un espesor mínimo de $\lambda'/2$ para la incidencia normal. (Para tener mayor claridad, las ondas están desplazadas y en ángulo.) ***b)*** La interferencia constructiva se presenta con un espesor mínimo de película igual a $\lambda'/4$. ***c)*** Interferencia en la película delgada de una mancha de aceite. Los distintos espesores de la película originan reflexiones de distintos colores. (Véase el pliego a color al final del libro.)

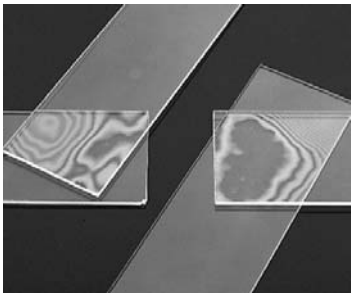
Para comprender por qué se ven los colores en una película de aceite (por ejemplo, cuando flota sobre el agua en el asfalto mojado), examinemos la reflexión de la luz monocromática en una película delgada, que se ilustra en la ▲figura 24.6. La longitud de la trayectoria de la onda en la película depende del ángulo de incidencia (¿por qué?), pero, para simplificar, supondremos que la luz incide de forma normal (perpendicular), aun cuando los rayos se tracen formando un ángulo en la figura para tener mayor claridad.

La película de aceite tiene mayor índice de refracción que el aire, y la luz que se refleja en la interfase aire-aceite (en la figura, la onda 1) sufre un desplazamiento de 180° en su fase. Las ondas transmitidas pasan por la película de aceite, y se reflejan en la interfase aceite-agua. En general, el índice de refracción del aceite es mayor que el del agua (véase la tabla 22.1); esto es, $n_1 > n_2$, por lo que en este caso, una onda reflejada (onda 2) *no* sufre cambio de fase.

Quizá usted piense que si la longitud de trayectoria de la onda en la película de aceite ($2t$, el doble del espesor: hacia abajo y de regreso) fuera una cantidad entera de longitudes de onda [por ejemplo, $2t = 2(\lambda'/2)$ en la figura 24.6a, donde $\lambda' = \lambda/n$ es la longitud de onda en el aceite], entonces las ondas reflejadas en las dos superficies interferirían en forma constructiva. Pero tome en cuenta que la onda reflejada en la superficie superior (onda 1) experimenta un corrimiento de fase de 180°. Las ondas reflejadas en las dos superficies están, por consiguiente, *fuera de fase* para este espesor de película, e interfieren en forma destructiva. Esto quiere decir que con esta longitud de onda, no se ve la luz reflejada. (La luz no se transmite.)

De igual manera, si la longitud de la trayectoria de la onda en la película fuera un número impar de medias longitudes de onda [$2t = 2(\lambda'/4) = \lambda'/2$] en la figura 24.6b, de nuevo donde λ' es la longitud de onda en el aceite, entonces las ondas reflejadas en realidad estarían *en fase* (como resultado del corrimiento de 180° de la onda 1) e interferirían en forma constructiva. La luz de esta longitud de onda se vería al reflejarse en la película de aceite.

Como, en general, las películas de aceite y de jabón tienen distintos espesores en sus diferentes regiones, ciertas longitudes de onda (colores) de la luz blanca interfieren en forma constructiva en diversas regiones después de la reflexión. El resultado es que se produce una vívida demostración de varios colores (figura 24.6c), que puede cambiar si el espesor de la película varía al paso del tiempo. La interferencia en películas se aprecia cuando las caras de dos portaobjetos se pegan una con otra (▼figura 24.7a). Los brillantes colores de las plumas de un pavo real constituyen un ejemplo de la interferencia en la naturaleza, y son el resultado de distintas capas de fibras. La luz que se refleja en las capas sucesivas interfiere en forma constructiva, produciendo colores brillantes, aunque las plumas no tienen pigmento propio. Puesto que la condición de interferencia constructiva depende del ángulo de incidencia, las pautas de color cambian al variar el ángulo de visión y el movimiento del ave (figura 24.7b).



a)

b)

▲ **FIGURA 24.7 Interferencia en una película delgada** ***a)*** Una película delgada de aire entre los portaobjetos produce figuras de colores. ***b)*** La interferencia en varias capas de las plumas del pavo real origina brillantes colores. Los llamativos colores en el pecho de los colibríes también se producen así. (Véase el pliego a color al final del libro.)

Una aplicación práctica de la interferencia en una película delgada son los recubrimientos antirreflectantes para las lentes (véase la sección A fondo, p. 768, sobre el tema). En este caso, se usa una cubierta de película para crear interferencia destructiva entre las ondas reflejadas, con la finalidad de *aumentar la transmisión de la luz* al vidrio (▼figura 24.8). El índice de refracción de la película es intermedio entre el del aire y el del vidrio ($n_0 < n_1 < n_2$). En consecuencia, en las superficies de la película y el vidrio se producen desplazamientos de fase de la luz incidente.

En este caso, la condición para que haya interferencia constructiva de la luz reflejada es

$$\Delta L = 2t = m\lambda' \text{ o } t = \frac{m\lambda'}{2} = \frac{m\lambda}{2n_1} \quad m = 1, 2, \ldots \quad \textit{condición para interferencia constructiva cuando } n_0 < n_1 < n_2 \tag{24.5}$$

y la condición para la interferencia destructiva es

$$\Delta L = 2t = \frac{m\lambda'}{2} \text{ o } t = \frac{m\lambda'}{4} = \frac{m\lambda}{4n_1} \quad m = 1, 3, 5, \ldots \quad \textit{condición para interferencia destructiva cuando } n_0 < n_1 < n_2 \tag{24.6}$$

Así, el espesor *mínimo* de película para que haya interferencia destructiva es cuando $m = 1$, y entonces

$$t_{\text{mín}} = \frac{\lambda}{4n_1} \quad \textit{espesor mínimo de película (para } n_0 < n_1 < n_2) \tag{24.7}$$

Si el índice de refracción de la película es mayor que el del aire y el del vidrio, entonces sólo la reflexión en la interfase aire-película tiene el desplazamiento de fase de 180°. En consecuencia, $2t = m\lambda'$ en realidad será para interferencia destructiva, y $2t = m\lambda'/2$ para interferencia constructiva. (¿Por qué?)

Ejemplo 24.2 ■ Recubrimientos antirreflectantes: interferencia en una película delgada

Una lente de vidrio ($n = 1.60$) se recubre con una película delgada y transparente de fluoruro de magnesio ($n = 1.38$) para que el vidrio no sea reflectante. *a*) ¿Cuál es el espesor mínimo de la película para que la lente no refleje la luz incidente de 550 nm de longitud de onda? *b*) Una película de 996 nm ¿hará no reflectante la lente?

Razonamiento. *a*) Se aplicar directamente la ecuación 24.7 para tener una idea del espesor mínimo de película para que el recubrimiento sea no reflectante. *b*) Se necesita determinar si 996 nm satisface la condición de la ecuación 24.6.

Solución.

Dado: $n_o = 1$ (aire), $n_1 = 1.38$ (película), $n_2 = 1.60$ (lente), $\lambda = 550$ nm

Encuentre: *a*) $t_{\text{mín}}$ (espesor mínimo de película) *b*) determine *si* $t = 996$ nm da por resultado una lente no reflectante

a) Como $n_2 > n_1 > n_o$,

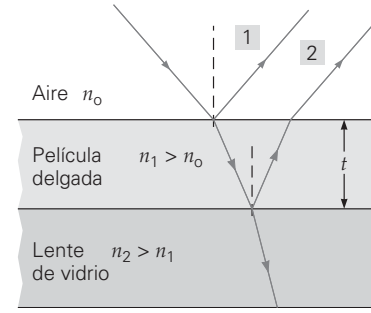
$$t_{\text{mín}} = \frac{\lambda}{4n_1} = \frac{550 \text{ nm}}{4(1.38)} = 99.6 \text{ nm}$$

que es bastante delgada ($\approx 10^{-5}$ cm). En términos de átomos, cuyos diámetros son del orden de 10^{-10} m, o 10^{-1} nm, la película tiene 10^3 átomos de espesor.

PHYSLET®

Ilustración 37.2 Espejos dieléctricos

▶ **FIGURA 24.8 Interferencia en una película delgada** Para una película delgada sobre una lente de vidrio, hay una corrimiento de fase de 180° en cada interfase cuando el índice de refracción de la película es menor que el del vidrio. Las ondas reflejadas en las superficies superior e inferior de la película interfieren entre sí. Para mayor claridad se ha trazado un ángulo de incidencia grande, pero en realidad debe ser casi cero.



b)

$$t = 996\text{ nm} = 10(99.6\text{ nm}) = 10t_{\text{mín}} = 10\left(\frac{\lambda}{4n_1}\right) = 5\left(\frac{\lambda}{2n_1}\right)$$

Esto significa que el espesor de la película *no* satisface la condición necesaria para que la lente sea no reflectante (interferencia destructiva). En realidad, satisface el requisito para interferencia constructiva (ecuación 24.5) con $m = 5$. Ese recubrimiento, específico para radiación infrarroja en ventanas de automóviles y de casas, podría ser útil en climas cálidos porque maximiza la reflexión y minimiza la transmisión.

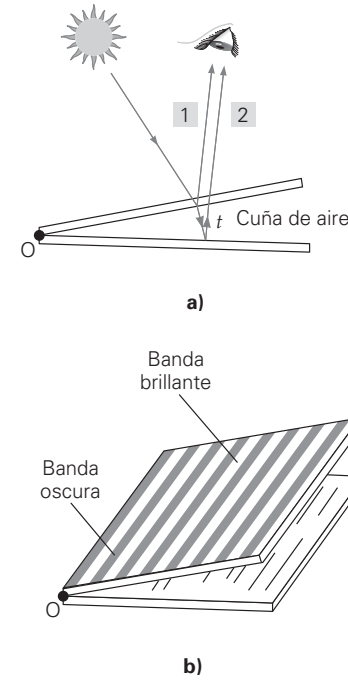
Ejercicio de refuerzo. Para que la lente de vidrio de este ejemplo refleje y no transmita la luz incidente, ¿cuál sería el espesor de película mínimo?

Planos ópticos y anillos de Newton

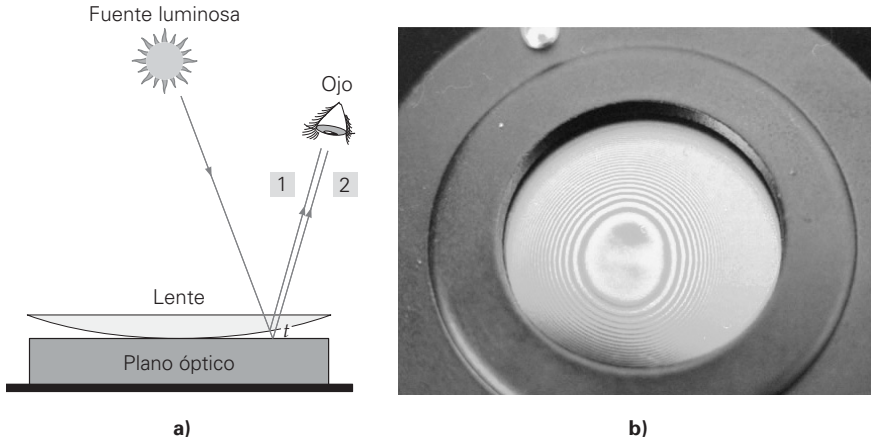
Se puede aprovechar el fenómeno de la interferencia en una película delgada para comprobar la lisura y la uniformidad de componentes ópticos, como espejos y lentes. Los *planos ópticos* se fabrican tallando y puliendo placas de vidrio hasta que queden tan planas y lisas como sea posible. (La rugosidad de la superficie, por lo regular, es del orden de $\lambda/20$.) Para comprobar qué tan planas son esas placas, se colocando juntas dos de ellas formando un ángulo pequeño, de manera que entre ambas quede una cuña de aire muy delgada (▸figura 24.9a). Las ondas reflejadas de las placas superior (onda 1) e inferior (onda 2) interfieren entre sí. Note que la onda 2 tiene un desplazamiento de fase de 180° al reflejarse en una interfase aire-placa. En consecuencia, en cierto punto a alguna distancia de donde se tocan las dos placas (el punto O), la condición para interferencia constructiva es $2t = m\lambda/2$ ($m = 1, 3, 5, ...$), y la condición para interferencia destructiva es $2t = m\lambda$ ($m = 0, 1, 2, ...$). El espesor t determina la clase de interferencia (constructiva o destructiva). Si las placas son lisas y planas, aparece una figura regular de interferencia, de franjas o bandas brillantes y oscuras (figura 24.9b). Esta figura es el resultado de las diferencias de longitud de trayectoria entre las placas, que varía de manera uniforme. Toda irregularidad en la figura indica que hay una irregularidad al menos en una placa. Una vez que se ha comprobado que una superficie es ópticamente plana, se podrá utilizar para comprobar qué tan plana es una superficie reflectora, como la de un espejo de precisión.

En la figura 24.9 se aprecia una prueba directa del desplazamiento de fase en 180°, que se describió antes. En el punto donde se tocan las dos placas ($t = 0$), se ve una banda *oscura*. Si no hubiera desplazamiento de fase, $t = 0$ correspondería a $\Delta L = 0$, y aparecería una banda brillante. El hecho de que se vea una banda oscura en este punto demuestra que hay un desplazamiento de fase en la reflexión en un material ópticamente más denso.

Para comprobar la lisura y la simetría de las lentes se emplea una técnica similar. Cuando se coloca una lente curva sobre un plano óptico, se forma una cuña de aire de simetría radial entre ésta y el plano óptico (▾figura 24.10a). Como el espesor de esa cuña determina la condición para que haya interferencia constructiva y destructiva, en este caso la figura regular de interferencia es un conjunto de franjas concéntricas brillantes y oscuras (figura 24.10b). Se llaman *anillos de Newton*, en honor de Isaac Newton,



▲ **FIGURA 24.9** Planos ópticos ***a)*** Un plano óptico se usa para comprobar la lisura de una superficie reflectante. El plano se coloca de forma que quede una cuña de aire entre él y la superficie. Las ondas reflejadas en las dos placas interfieren entre sí, y el espesor de la cuña de aire en ciertos puntos determina si se ven bandas brillantes u oscuras. ***b)*** Si la superficie es lisa, se ve una figura regular o simétrica de interferencia. Observe que hay una banda oscura en el punto O donde $t = 0$.



◀ **FIGURA 24.10** Anillos de Newton ***a)*** Una lente colocada sobre un plano óptico forma una cuña de aire anular, que origina interferencia de las ondas reflejadas en la parte superior (onda 1) y la parte inferior (onda 2) de esa cuña. ***b)*** La figura de interferencia que resulta es un conjunto de anillos concéntricos, llamados *anillos de Newton*. Observe que en el centro de la figura hay una mancha oscura. Las irregularidades de la lente producen una figura distorsionada. (Véase el pliego a color al final del libro.)

A FONDO 24.1 LENTES NO REFLECTANTES

Tal vez haya notado la tonalidad azul-púrpura de las lentes recubiertas que se usan en cámaras y binoculares. El recubrimiento hace que las lentes sean "antirreflectantes". Si una lente es del tipo antirreflectante, la luz que le llega se transmite en su mayor parte a través de ella. Es preferible que la transmisión de la luz sea máxima para reducir la exposición de la película fotográfica, y para ver con detalle los objetos a través de los binoculares.

En una interfase aire-vidrio, por lo regular se refleja el 4% de la luz y se transmite el 96%. Por ejemplo, una lente fotográfica moderna se fabrica con un grupo de lentes (elementos) para reducir al mínimo las aberraciones y mejorar la calidad de la imagen. Por ejemplo, una lente zoom de 35-70 mm consta de 13 elementos, es decir, tiene 26 superficies reflectoras.

Después de una reflexión se transmite el $0.96 = 96\%$ de la luz. Después de dos reflexiones, esto es, al atravesar un elemento, se transmite el $0.96 \times 0.96 = 0.96^2 = 0.92$ o 92% de la luz incidente. Después de 26 reflexiones, la luz transmitida sólo es el $0.96^{26} = 0.35$ o 35% de la luz incidente, si las lentes tienen recubrimiento. Por consiguiente, casi todas las lentes modernas están recubiertas con películas no reflectantes.

Una lente se hace no reflectante recubriéndola con una película delgada de un material cuyo índice de refracción sea intermedio entre los del aire y del vidrio (figura 24.8). Si el recubrimiento tiene un cuarto de longitud de onda de espesor ($\lambda'/4$), la diferencia en longitudes de trayectoria de los rayos reflejados es $\lambda'/2$, donde λ' es la longitud de onda de la luz en el recubrimiento. Ambas ondas reflejadas experimentan un desplazamiento de fase y están fuera de fase cuando la diferencia de longitudes de trayectoria es $\lambda'/2$; entonces, interfieren destructivamente. Esto es, se transmite la luz incidente y la lente recubierta es no reflectante.

Note que el espesor real de una película de un cuarto de onda es específico de determinada longitud de onda. Por lo general, se escoge el espesor como un cuarto de longitud de onda de la luz verde amarillenta ($\lambda \approx 550$ nm), a la cual el ojo humano es más sensible. Las longitudes de onda en los extremos rojo y azul de la región visible siguen reflejándose parcialmente, lo que da a la lente recubierta una tonalidad azul-púrpura (figura 1). A veces se escogen otros espesores de cuarto de onda, que originan otros matices, como ámbar o púrpura rojizo, dependiendo de la aplicación de las lentes.

También se aplican recubrimientos antirreflectantes a las superficies de las celdas solares. Como el espesor de ese recubrimiento depende de la longitud de onda, las pérdidas por reflexión se pueden reducir desde un 30 hasta un 10%. De esta forma, el proceso mejora la eficiencia de la celda.

FIGURA 1 Lentes recubiertas El recubrimiento no reflectante de las lentes de binoculares y cámaras produce, en general, una tonalidad azul-púrpura. (¿Por qué?) (Véase el pliego a color al final del libro.)

quien fue el primero en describir este efecto de la interferencia. Note que en el punto donde se tocan la lente y el plano óptico ($t = 0$), de nuevo hay una mancha oscura. (¿Por qué?) Las irregularidades de las lentes dan lugar a una figura distorsionada de bandas, y con los radios de esos anillos se calcula el radio de curvatura de la lente.

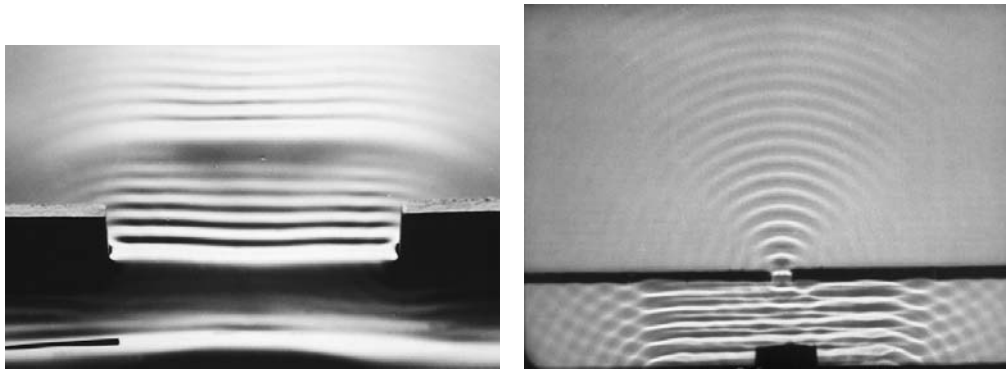
24.3 Difracción

OBJETIVOS: *a*) Definir la difracción y *b*) describir ejemplos de efectos de difracción.

En la óptica geométrica, la luz se representa con rayos y se describe como si se propagara en líneas rectas. Sin embargo, si este modelo representara la naturaleza real de la luz, no habría efectos de interferencia en el experimento de Young de la doble rendija. En lugar de ello, sólo habría dos imágenes brillantes de ranuras en la pantalla, con una zona bien definida de sombra, donde no entraría la luz. Pero el hecho es que *sí* se ven figuras de interferencia, lo que significa que la luz se desvía de una trayectoria en línea recta para entrar en regiones que, de otra forma, estarían en la penumbra. En realidad, las ondas "se despliegan" al pasar por las rendijas; a este despliegue de la onda luminosa se le llama **difracción**. En general, la difracción ocurre cuando las ondas pasan a través de aberturas pequeñas, o cuando rodean aristas agudas. En la ◂figura 24.11 se observa la difracción de las olas del mar. (Véase también la figura 13.18.)

▼ **FIGURA 24.11 Refracción de las olas del mar** Esta fotografía de una playa muestra con claridad la difracción de las olas del mar en una sola rendija, como la que hay en las aberturas de la barrera. Note que los frentes de onda circulares han moldeado la playa. (Véase el pliego a color al final del libro.)

Como se ve en la figura 13.18, la cantidad de difracción depende de la longitud de la onda, en relación con el tamaño de la abertura o del objeto. En general, *cuanto mayor sea la longitud de onda en comparación con la abertura u objeto, mayor será la difracción*. Este principio se ve también en la ▸figura 24.12. Por ejemplo, en la figura 24.12a, el ancho de la abertura w es mucho mayor que la longitud de onda ($w \gg \lambda$), y hay poca difracción: la onda sigue avanzando sin extenderse mucho. (También existe *algún* grado de difracción en torno a las orillas de la abertura.) En la figura 24.12b, donde la longitud de onda y el ancho de la abertura son del mismo orden de magnitud ($w \approx \lambda$), hay una



a) b)

▲ **FIGURA 24.12 Dimensiones de la longitud de onda y de la abertura** En general, cuanto más angosta es la abertura en comparación con la longitud de onda, mayor es la difracción. ***a)*** Sin mucha difracción ($w \gg \lambda$), la onda sigue propagándose en su dirección original. ***b)*** Con difracción apreciable ($w \approx \lambda$), la onda se desvía en torno a la abertura y se difunde.

difracción apreciable: la onda se extiende hacia fuera y se desvía de su dirección original de propagación. Parte de ella sigue propagándose en su dirección original, pero el resto *da vuelta* a la abertura y se extiende claramente en muchas direcciones.

La difracción del sonido (capítulo 14) es muy evidente. Cuando alguien le habla a uno desde otra habitación, o a la vuelta de la esquina de una construcción, aun en ausencia de reflexiones se le puede oír con claridad. Las ondas sonoras tienen longitudes del orden de centímetros a metros. Por ello, el ancho de los diversos objetos y aberturas son más o menos iguales, o más angostos, que las longitudes de las ondas sonoras y por ello la difracción se presenta con facilidad en el sonido.

Sin embargo, las ondas de la luz visible tienen longitudes del orden de 10^{-7} m. Por eso, los fenómenos de difracción en ellas a menudo pasan desapercibidos, en especial cuando se realizan a través de grandes aberturas, como las puertas, donde el sonido fácilmente se difracta. Sin embargo, al examinar con cuidado el área en torno de una hoja de afeitar afilada, se verá una figura de franjas brillantes y oscuras (▸figura 24.13). La difracción puede conducir a la interferencia, y estas figuras de interferencia son la evidencia de la difracción de la luz en torno a la orilla del objeto.

Como ejemplo de la difracción en "una rendija", considere una rendija en una barrera (▾figura 24.14). Supongamos que la rendija (de ancho w) se ilumina con luz monocromática. En una pantalla que está a la distancia L de la rendija (se supone que $L \gg w$), aparece una figura de difracción, formada por un máximo central brillante y un conjunto simétrico de franjas brillantes (regiones de interferencia constructiva) en ambos lados.

Así, una figura de difracción es el resultado del hecho de que varios puntos en el frente de onda que pasan a través de la rendija se consideran como pequeñas fuentes luminosas puntuales. La interferencia de esas ondas origina la *difracción* máxima y mínima.

Sin embargo, no se presentará aquí todo ese análisis complejo. A partir de consideraciones geométricas se pueden ver los mínimos (regiones de interferencia destructiva) satisfacen la relación

$$w \operatorname{sen} \theta = m\lambda \qquad \text{para } m = 1, 2, 3, \ldots \qquad \textit{condición para los mínimos} \tag{24.8}$$

donde θ es el ángulo de determinados mínimos, que se designa como $m = 1, 2, 3, \ldots$, en cualquier lado del máximo central, y m se llama número de orden. (No hay $m = 0$. ¿Por qué?)

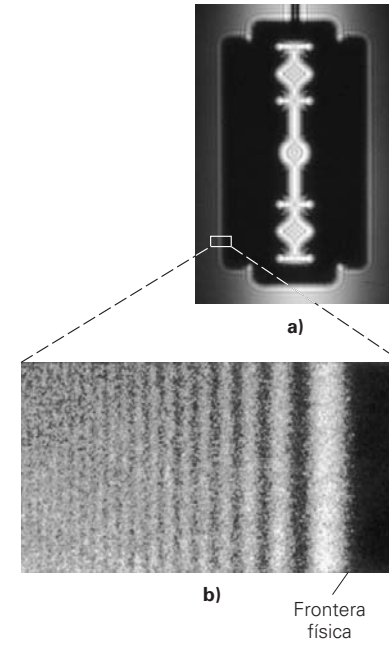
Aunque el resultado anterior tiene una forma muy parecida a la del experimento de Young de doble rendija (ecuación 24.3), es muy importante hacer notar que para el experimento de una sola rendija se analizan las franjas oscuras, y no las franjas brillantes. Note también que el ancho de la rendija (w) aparece en la difracción. Físicamente, ésta es una difracción a partir de una sola rendija, y *no* una interferencia a partir de dos rendijas.

La aproximación $\operatorname{sen} \theta \approx y/L$, para ángulos pequeños, se utiliza cuando $y \ll L$. En este caso, las distancias de los mínimos relativos en ambos lados del centro del máximo central se determinan:

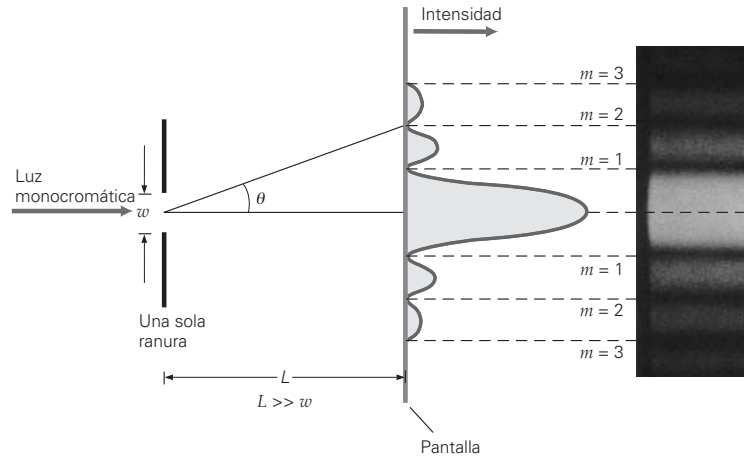
$$y_m = m\left(\frac{L\lambda}{w}\right) \qquad \text{para } m = 1, 2, 3, \ldots \qquad \textit{ubicación de los mínimos} \tag{24.9}$$

PHYSLET®

Ilustración 38.1 Rejilla de difracción



▲ **FIGURA 24.13 La difracción en acción** ***a)*** Figuras de difracción producidas por una hoja de afeitar. ***b)*** Acercamiento de las franjas que se forman en el filo de la navaja.



▶ **FIGURA 24.14 Difracción en una sola rendija** La difracción de la luz por una sola rendija origina una figura de difracción formada por un máximo central grande y brillante, y un conjunto simétrico de franjas brillantes laterales. El número de orden m corresponde a los mínimos, es decir, a las franjas oscuras. (Véase la descripción en el texto.)

Las predicciones cualitativas de la ecuación 24.9 son bastante interesantes e instructivas:

- Para determinado ancho de rendija (w), cuanto mayor sea la longitud de onda (λ), más ancha (o más extendida) será la figura de difracción.
- Para determinada longitud de onda (λ), cuanto menor sea el ancho de la rendija (w), más ancha será la figura de difracción.
- El ancho del máximo central es el doble del ancho de los máximos laterales.

Examinemos con detenimiento cada una de estas predicciones. Conforme la rendija se hace más angosta, el máximo central y las franjas laterales se distribuyen y se agrandan. La ecuación 24.9 no es aplicable a rendijas muy angostas (por la aproximación para ángulos pequeños). Si el ancho de la rendija disminuye hasta que tiene el mismo orden de magnitud que la longitud de onda de la luz, el máximo central se reparte en toda la pantalla. Esto es, la difracción se hace evidente de forma drástica, cuando el ancho de la rendija es aproximadamente igual que la longitud de onda de la luz que se usa. Los efectos de la difracción se observan con más facilidad cuando $\lambda/w \approx 1$ o $w \approx \lambda$.

A la inversa, si la rendija se hace más ancha para determinada longitud de onda de la luz, la figura de difracción se hace más angosta. Las franjas brillantes se acercan entre sí, y al final es difícil distinguirlas cuando w es mucho mayor que λ ($w \gg \lambda$). Entonces la figura parece como una sombra difusa en torno al máximo central, que es la imagen iluminada de la rendija. Este tipo de figura se observa cuando la imagen de la luz solar entra a un cuarto oscuro por un agujero en una cortina. Esa observación fue la que condujo a los primeros experimentadores a investigar la naturaleza ondulatoria de la luz. La aceptación de este concepto se debió, en gran parte, a la explicación de la difracción que ofrecía la óptica física.

El máximo central tiene el doble del ancho que las franjas brillantes laterales. Si se supone que el ancho del máximo central es la distancia entre los mínimos o franjas oscuras que lo rodean a cada lado ($m = 1$), es decir, si tiene un valor de $2y_1$, a partir de la ecuación 24.9, con $y_1 = L\lambda/w$, se obtiene

$$2y_1 = \frac{2L\lambda}{w} \quad \textit{ancho del máximo central} \tag{24.10}$$

De forma similar, el ancho de las franjas brillantes laterales se determina con

$$y_{m+1} - y_m = (m + 1)\left(\frac{L\lambda}{w}\right) - m\left(\frac{L\lambda}{w}\right) = \frac{L\lambda}{w} = y_1 \tag{24.11}$$

Por lo anterior, el ancho del máximo central es el doble del de las franjas laterales.

Ejemplo conceptual 24.3 ■ La difracción y la radiorrecepción

Tal vez usted haya notado que al conducir con la radio encendida, en la ciudad o en zonas montañosas, que en ciertas bandas la calidad de la recepción del radio varía mucho de un lugar a otro; la señal de algunas estaciones se pierde de repente y luego reaparece. ¿La difracción podría ser la causa de esto? ¿Cuál de las siguientes bandas será probablemente la menos afectada? *a*) Meteorológica (162 MHz), *b*) FM (88-108 MHz); *c*) AM (525-1610 kHz).

Razonamiento y respuesta. Las ondas de radio, al igual que las de luz, son ondas electromagnéticas, por lo que tienden a propagarse en líneas rectas, a grandes distancias de sus fuentes. En su trayectoria es probable que se encuentren con objetos que las bloqueen, en especial si éstos son masivos (como montañas y edificios).

Sin embargo, a causa de la difracción, las ondas de radio también pueden "rodear" obstáculos, o "difundirse" al pasar por obstáculos y aberturas, *siempre y cuando* su longitud de onda sea por lo menos del tamaño aproximado del obstáculo o abertura. Cuanto mayor sea la longitud de onda, mayor será la difracción, y habrá *menos probabilidad* de que las ondas de radio resulten obstruidas.

Para determinar qué banda aprovecha más esa difracción es necesario calcular las longitudes de onda correspondientes a las frecuencias dadas, con la relación $c = \lambda f$. Al hacerlo, se ve que las ondas de AM, con $\lambda = 186$ a 571 m son las más largas de las tres bandas (por un factor aproximado de 100). En consecuencia, la conclusión es que las transmisiones de AM son las que tienen más probabilidad de difractarse en torno a objetos como edificios o montañas, o a través de las aberturas entre ellos. Así que la respuesta correcta es la *c*.

Ejercicio de refuerzo. Los instrumentos de viento, como el clarinete y la flauta, tienen aberturas de menor tamaño que los metales, como la trompeta y el trombón. Durante el medio tiempo de un partido de fútbol, cuando la banda musical está frente a uno, el sonido de los instrumentos de viento y los metales se escucha con facilidad. Sin embargo, cuando la banda se aleja, se opacan los metales, pero los instrumentos de viento se escuchan bastante bien. ¿Por qué?

Ejemplo integrado 24.4 ■ Ancho de un máximo central: difracción en una sola rendija

Una luz monocromática pasa por una rendija de 0.050 mm de ancho. *a*) La figura de difracción, en general, es 1) más grande para mayores longitudes de onda, 2) más grande para menores longitudes de onda, 3) igual para todas las longitudes de onda. Explique por qué. *b*) ¿A qué ángulo se verá el tercer mínimo y cuál es el ancho del máximo central, en una pantalla que está a 1.0 m de la rendija, para $\lambda = 400$ y 550 nm, respectivamente?

a) Razonamiento conceptual. El tamaño general de la figura de difracción se caracteriza por la posición de una franja brillante u oscura en particular. De acuerdo con la ecuación 24.8, se ve que para un ancho w y un número de orden m dados, la posición de un mínimo sen θ es directamente proporcional a la longitud de onda λ. Por lo tanto, una mayor longitud de onda corresponderá a un mayor sen θ o a un mayor θ, y la respuesta correcta es la 1.

b) Razonamiento cuantitativo y solución. Esta parte es una aplicación directa de la ecuación 24.8 y 24.10.

Dado: $\lambda_1 = 400\text{ nm} = 4.00 \times 10^{-7}\text{ m}$ ***Encuentre:*** θ_3 y $2y_1$ (ancho del máximo central)
$\lambda_2 = 550\text{ nm} = 5.50 \times 10^{-7}\text{ m}$
$w = 0.050\text{ mm} = 5.0 \times 10^{-5}\text{ m}$
$m = 3$
$L = 1.0\text{ m}$

Para $\lambda = 400$ nm:

De acuerdo con la ecuación 24.8, tenemos

$$\text{sen}\,\theta_3 = \frac{m\lambda}{w} = \frac{3(4.00 \times 10^{-7}\text{ m})}{5.0 \times 10^{-5}\text{ m}} = 0.024 \qquad \text{así que} \qquad \theta_3 = \text{sen}^{-1}\,0.024 = 1.4°$$

La ecuación 24.10 nos da

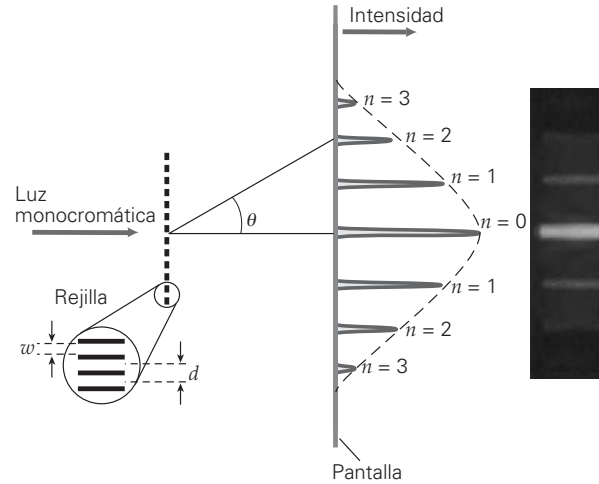
$$2y_1 = \frac{2L\lambda}{w} = \frac{2(1.0\text{ m})(4.00 \times 10^{-7}\text{ m})}{5.0 \times 10^{-5}\text{ m}} = 1.6 \times 10^{-2}\text{ m} = 1.6\text{ cm}$$

Para $\lambda = 700$ nm:

$$\text{sen}\,\theta_3 = \frac{m\lambda}{w} = \frac{3(5.50 \times 10^{-7}\text{ m})}{5.0 \times 10^{-5}\text{ m}} = 0.033 \qquad \text{de manera que} \qquad \theta_3 = \text{sen}^{-1}\,0.033 = 1.9°$$

$$2y_1 = \frac{2L\lambda}{w} = \frac{2(1.0\text{ m})(5.50 \times 10^{-7}\text{ m})}{5.0 \times 10^{-5}\text{ m}} = 2.2 \times 10^{-2}\text{ m} = 2.2\text{ cm}$$

Ejercicio de refuerzo. ¿Por qué factor cambiaría el ancho del máximo central si en este ejemplo se usara luz roja ($\lambda = 700$ nm) en lugar de 550 nm?



▶ **FIGURA 24.15 Rejilla de difracción** Una rejilla de difracción produce una figura de interferencia y difracción con mucha definición. Son dos los parámetros que definen una rejilla: la distancia d entre rendijas y el ancho w de una rendija. La combinación de interferencia por múltiples rendijas y la difracción por una sola rendija determinan la distribución de intensidades de los distintos órdenes de máximos.

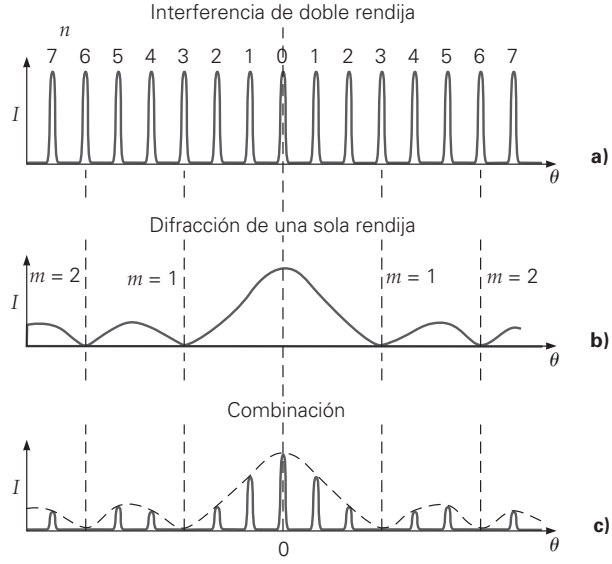
PHYSLET®

Ilustración 38.2 Aplicación de las rejillas de difracción

Rejillas de difracción

Las franjas brillantes y oscuras son el resultado de la difracción, acompañada por la interferencia cuando la luz monocromática atraviesa un conjunto de rendijas dobles. Al aumentar la cantidad de rendijas, las franjas brillantes se vuelven más agudas (más angostas) y las franjas oscuras se hacen más anchas. Las franjas brillantes son muy útiles en el análisis óptico de fuentes luminosas, así como en otras aplicaciones. En la ▲figura 24.15 se ve un experimento típico con luz monocromática que incide en una **rejilla de difracción**, formada por grandes cantidades de rendijas paralelas, muy cercanas entre sí. Hay dos parámetros que definen una rejilla de difracción: la separación d entre dos rendijas sucesivas y el ancho w de cada rendija. La figura resultante de la interferencia y la difracción se presenta en la ▼figura 24.16.

Las primeras rejillas de difracción se fabricaban con hilos de alambre. Sus efectos eran similares a lo que se aprecia cuando se ve la llama de una vela a través de una pluma cercana al ojo. Las mejores rejillas tienen una gran cantidad de líneas o ranuras finas, sobre superficies de vidrio o de metal. Si se transmite la luz a través de la rejilla, se tiene una *rejilla de transmisión*. Sin embargo, también son frecuentes las *rejillas de reflexión*. Los surcos cercanos de un disco compacto o de un DVD actúan como rejilla de reflexión, lo que le da su característico brillo iridiscente (▸figura 24.17). Para fabricar las rejillas maestras comerciales se deposita una capa delgada de aluminio sobre una superficie ópticamente plana y luego se elimina parte del metal reflector cortando lí-



▶ **FIGURA 24.16 Distribución de intensidades en la interferencia y la difracción** ***a)*** La interferencia determina las posiciones de los máximos de interferencia: d sen $\theta = n\lambda$, $n = 0, 1, 2, 3, \ldots$ ***b)*** La difracción localiza las posiciones de los mínimos de difracción: w sen $\lambda = m\lambda$, $m = 1, 2, 3, \ldots$, y la intensidad relativa de los máximos. ***c)*** La combinación (el producto) de la interferencia y la difracción determina la distribución de la intensidad de las franjas.

neas paralelas a distancias regulares. Las rejillas de difracción de precisión se fabrican con dos rayos láser coherentes que se cruzan formando un ángulo. Los rayos dejan expuesto un material fotosensible, que después se graba. La distancia entre las líneas de la rejilla queda determinada por el ángulo de intersección de los rayos. Las rejillas de precisión tienen 30 000 líneas por centímetro o más, por lo que son costosas y difíciles de fabricar. La mayor parte de las rejillas que se usan en los instrumentos de laboratorio son *réplicas*, coladas en plástico en rejillas maestras de alta precisión.

Se puede demostrar que la condición para los máximos de interferencia de una rejilla iluminada con luz monocromática es idéntica a la de las dobles rendijas. La ecuación es

$$d \operatorname{sen} \theta = n\lambda \qquad \text{para } n = 0, 1, 2, 3, \ldots \qquad \textit{máximos de interferencia} \qquad (24.12)$$

donde n es el llamado *máximo de orden de interferencia* y θ es el ángulo en el que se presenta ese máximo para determinada longitud de onda. El máximo de orden cero coincide con el máximo central de la figura de difracción. La distancia d entre ranuras adyacentes se obtiene a partir de la cantidad de líneas o ranuras por unidad de longitud de la rejilla: $d = 1/N$. Por ejemplo, si N = 5000 líneas/cm, entonces

$$d = \frac{1}{N} = \frac{1}{5000/\text{cm}} = 2.0 \times 10^{-4}\ \text{cm}$$

Si la luz que incide en una rejilla es blanca (policromática), las franjas son de varios colores (▾figura 24.18a). No hay desviación de los componentes de la luz para el orden cero (sen $\theta = 0$ para todas las longitudes de onda), por lo que el máximo central es blanco. Sin embargo, los colores se separan en los órdenes superiores, porque la posición del máximo depende de la longitud de onda (ecuación 24.12). La mayor longitud de onda tiene un θ mayor y esto produce un espectro. Note que es posible que se traslapen los órdenes superiores que se producen en una rejilla de difracción. En otras palabras, es posible que los ángulos de distintos órdenes sean iguales para dos longitudes de onda diferentes.

Sólo se puede ver una cantidad limitada de órdenes espectrales cuando se usa una rejilla de difracción. Esa cantidad depende de la longitud de onda de la luz y del espaciamiento d de la rejilla. De acuerdo con la ecuación 24.12, como sen θ no puede exceder los 90° (esto es, sen $\theta \leq 1$), tenemos

$$\operatorname{sen} \theta = \frac{n\lambda}{d} \leq 1 \qquad \text{o} \qquad n_{\text{máx}} \leq \frac{d}{\lambda}$$

Las rejillas de difracción han reemplazado casi por completo a los prismas en espectroscopia. La creación de un espectro y la medición de longitudes de onda mediante una rejilla sólo dependen de medidas geométricas, como longitudes y/o ángulos. En contraste, la determinación de la longitud de onda con un prisma depende de las características dispersoras del material con que esté hecho el prisma. Así, es fundamental conocer con precisión la dependencia entre el índice de refracción y la longitud de onda de la luz. A diferencia de un prisma, que desvía menos la luz roja y más la violeta, una rejilla de difracción produce el ángulo mínimo con la luz violeta (λ corta) y el máximo con la roja (λ larga). Hay que advertir que un prisma dispersa la luz blanca y

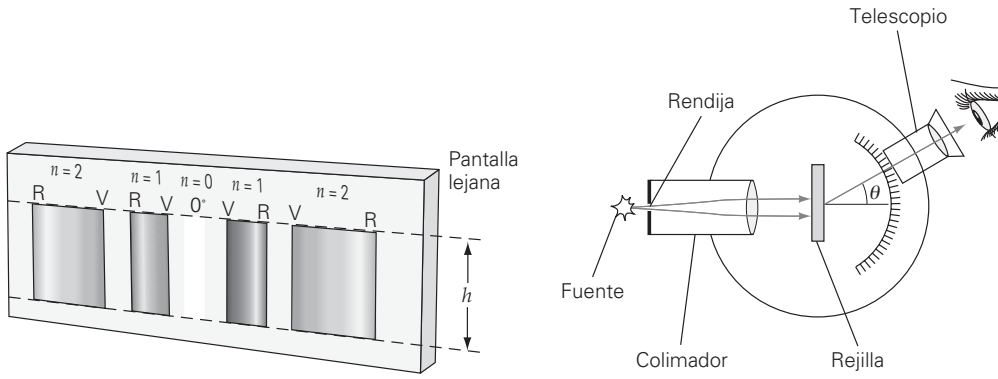
▲ **FIGURA 24.17 Efectos de la difracción** Las ranuras angostas de los discos compactos (CD) actúan como rejillas de difracción y producen un despliegue de colores. (Véase el pliego a color al final del libro.)

Nota: d es la distancia entre rendijas adyacentes.

PHYSLET®

Exploración 38.2 Rejilla de difracción

▼ **FIGURA 24.18 Espectroscopia** ***a)*** En cada franja brillante lateral se separan los componentes de distintas longitudes de onda (R = rojo y V = violeta), porque la desviación depende de la longitud de onda: $\theta = \operatorname{sen}^{-1}(n\lambda/d)$. ***b)*** Por esta razón, se usan rejillas en los espectrómetros para determinar las longitudes de onda presentes en un rayo de luz, midiendo sus ángulos de difracción y separando las diversas longitudes de onda para su análisis posterior. (Véase el pliego a color al final del libro.)



forma un solo espectro. Sin embargo, una rejilla de difracción produce varios espectros, uno para cada orden distinto de $n = 0$, y cuanto más alto sea el orden, mayor será la dispersión.

Los espectros nítidos que producen las rejillas de difracción se usan en los instrumentos llamados *espectrómetros* (figura 24.18b). En un espectrómetro se iluminan materiales con luz de diversas longitudes de onda, para determinar cuáles de ellas se transmiten o se reflejan con intensidad. Entonces se mide su absorción para determinar las características del material.

Ejemplo 24.5 ■ Una rejilla de difracción: distancia entre líneas y órdenes espectrales

Determinada rejilla de difracción produce un orden espectral $n = 2$ a un ángulo de 30°, con luz de 500 nm de longitud de onda. *a*) ¿Cuántas líneas por centímetro tiene la rejilla? *b*) ¿A qué ángulo se debe ver el orden espectral $n = 3$?

Razonamiento. *a*) Para calcular la cantidad de líneas por centímetro (N) que tiene la rejilla, se necesita conocer la distancia entre líneas d, ya que $N = 1/d$. Con los datos del problema se puede calcular d mediante la ecuación 24.12. *b*) Aplicando de nuevo la ecuación 24.12, se calcula θ para $n = 3$.

Solución.

Dado: $\lambda = 500 \text{ nm} = 5.00 \times 10^{-7} \text{ m}$
$n = 2$
$\theta = 30°$ para $n = 2$

Encuentre: *a*) N (líneas/cm)
b) θ para $n = 3$

a) Se sustituyen datos en la ecuación 24.12 para calcular la distancia entre líneas:

$$d = \frac{n\lambda}{\text{sen } \theta} = \frac{2(5.00 \times 10^{-7} \text{ m})}{\text{sen } 30°} = 2.00 \times 10^{-6} \text{ m} = 2.00 \times 10^{-4} \text{ cm}$$

Entonces

$$N = \frac{1}{d} = \frac{1}{2.00 \times 10^{-4} \text{ cm}} = 5000 \text{ líneas/cm}$$

b)

$$\text{sen } \theta = \frac{n\lambda}{d} = \frac{3(5.00 \times 10^{-7} \text{ m})}{2.00 \times 10^{-6} \text{ m}} = 0.75$$

de manera que

$$\theta = \text{sen}^{-1} 0.75 = 48.6°$$

Ejercicio de refuerzo. Si se utilizara luz blanca con longitud de onda entre 400 y 700 nm, ¿cuál sería el ancho angular del espectro para el segundo orden?

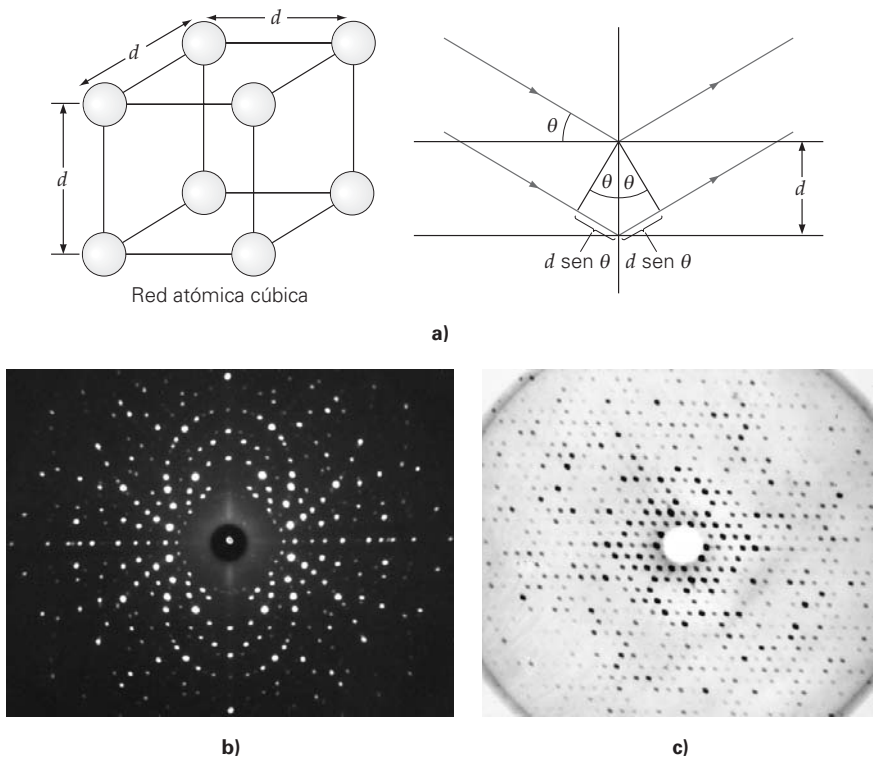
Difracción de rayos X

En principio, es posible calcular la longitud de cualquier onda electromagnética con una rejilla de difracción que tenga la separación adecuada entre ranuras. A principios del siglo XX se usó la difracción para determinar las longitudes de onda de los rayos X. Las pruebas experimentales indicaban que era probable que esas longitudes de onda fueran aproximadamente de 10^{-10} m o 0.1 nm, pero sería imposible construir una rejilla de difracción con este espaciamiento. El físico alemán Max von Laue (1879-1960) sugirió que las distancias regulares entre los átomos de un sólido cristalino podrían hacer que el cristal funcionara como rejilla de difracción para los rayos X, ya que el espaciamiento atómico en los cristales es del orden de 0.1 nm (▸figura 24.19). Cuando se dirigieron rayos X hacia cristales, se observaron figuras de difracción (véase la figura 24.19b).

La figura 24.19a ilustra la difracción que causan los planos de átomos en un cristal como el del cloruro de sodio. La diferencia entre longitudes de trayectoria es $2d \text{ sen } \theta$, donde d es la distancia entre los planos internos del cristal. Así, la condición para la interferencia constructiva es

$$2d \text{ sen } \theta = n\lambda \qquad \text{para } n = 1, 2, 3, \ldots \qquad \begin{matrix}\textit{interferencia constructiva} \\ \textit{difracción de rayos X}\end{matrix} \tag{24.13}$$

A esta relación se le llama **ley de Bragg**, en honor a W. L. Bragg (1890-1971), el físico inglés que la dedujo. Note que θ *no* se mide a partir de la normal, como es la convención en óptica.



◀ **FIGURA 24.19 Difracción en cristales** ***a)*** El conjunto de átomos en una estructura de red cristalina funciona como rejilla de difracción, y los rayos X se difractan en los planos de los átomos. Cuando el espaciamiento en la red es d, la diferencia de longitudes de trayectoria de los rayos X difractados en planos adyacentes es $2d$ sen θ. ***b)*** Figura de difracción de rayos X en un cristal de sulfato de potasio. Si se analizan las características geométricas de esas figuras, es posible deducir la estructura del cristal y la posición de sus diversos átomos. ***c)*** Figura de difracción de la proteína hemoglobina, que se encarga de transportar el oxígeno en la sangre.

En la actualidad, la difracción de rayos X sirve para investigar la estructura interna no sólo de los cristales sencillos, sino también de las moléculas biológicas grandes y complejas, como las proteínas y el ADN (figura 24.19c). Gracias a sus cortas longitudes de onda, que son comparables con los espacios atómicos *dentro* de las moléculas, los rayos X ofrecen un método para investigar la estructura atómica de las moléculas.

24.4 Polarización

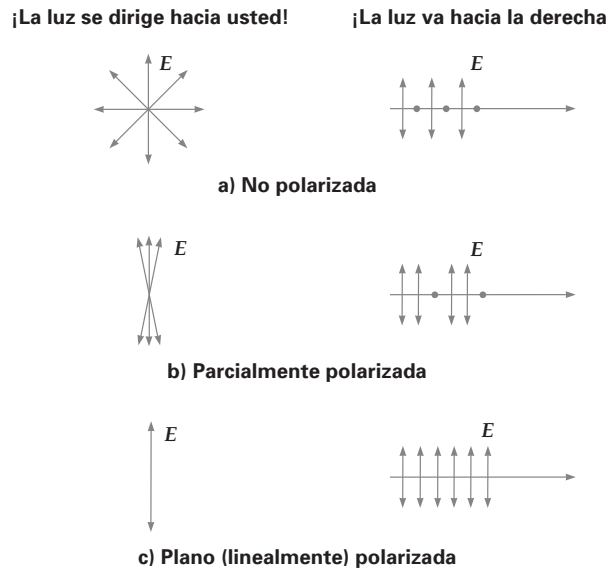
OBJETIVOS: *a*) Explicar la polarización de la luz y *b*) describir ejemplos de la polarización, tanto en el ambiente como en sus aplicaciones comerciales.

Cuando pensamos en luz polarizada, quizá visualizamos los anteojos polarizados (o Polaroid) para sol, porque ésta es una de las aplicaciones más comunes de la polarización. Cuando algo se polariza, tiene una dirección u orientación preferente. En términos de ondas luminosas, la **polarización** se refiere a la orientación de las oscilaciones transversales de sus ondas (campo eléctrico).

Recuerde que en el capítulo 20 se explicó que la luz es una onda electromagnética, con vectores de campo eléctrico y magnético ($\vec{\mathbf{E}}$ y $\vec{\mathbf{B}}$, respectivamente) oscilatorios, perpendiculares (transversales) a la dirección de propagación. La luz de la mayor parte de las fuentes consiste en una gran cantidad de ondas electromagnéticas que emiten los átomos de esa fuente. Cada átomo produce una onda con determinada orientación, que corresponde a la dirección de su vibración atómica. Sin embargo, como son muchos los átomos que producen las ondas electromagnéticas de una fuente típica, son posibles muchas orientaciones aleatorias de los campos ($\vec{\mathbf{E}}$ y $\vec{\mathbf{B}}$ en la luz compuesta que se emite. Cuando los vectores de campo tienen orientación aleatoria, se dice que la luz es *no polarizada*. Por lo regular, esta situación se representa de forma esquemática en función del vector campo eléctrico, como se ve en la ▼figura 24.20a. Visto a lo largo de la dirección de propagación, el campo eléctrico está distribuido al azar, es decir, igualmente en todas las direcciones. Sin embargo, visto paralelamente a la dirección de propagación, esta distribución aleatoria o igual se puede representar por dos direcciones (como las direcciones x y y en un sistema de coordenadas bidimensional). En este caso, las flechas verticales representan los componentes del campo eléctrico en esa direc-

Nota: en muchas figuras, los puntos representan una dirección del campo eléctrico perpendicular al papel y las flechas denotan una dirección a lo largo de la del campo eléctrico.

PHYSLET®
Ilustración 39.2 *Ondas electromagnéticas polarizadas*

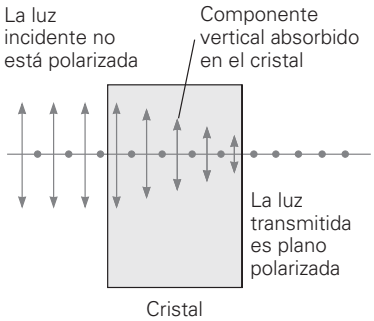


▶ **FIGURA 24.20 Polarización** La polarización se representa con la orientación del plano de vibración de los vectores de campo eléctrico. ***a)*** Cuando los vectores tienen orientación aleatoria, la luz no es polarizada. Los puntos representan una dirección del campo eléctrico perpendicular al papel, y las flechas verticales indican una dirección del campo eléctrico hacia arriba y hacia abajo. La luz no polarizada se representa con cantidades iguales de flechas y puntos. ***b)*** Cuando la orientación de los vectores de campo es preferente, la luz está parcialmente polarizada. En este caso hay menos puntos que flechas. ***c)*** Cuando los vectores están en un plano, la luz es plano polarizada, o linealmente polarizada. En este caso no se ven puntos.

ción, y los puntos representan componentes que entran al papel o que salen de él. En este apartado se usará esta notación.

Si hay una orientación preferente de los vectores de campo, se dice que la luz está *parcialmente polarizada*. Ambas representaciones de la figura 24.20b muestran que hay más vectores de campo eléctrico en dirección vertical que en dirección horizontal. Si los vectores de campo sólo oscilan en *una* dirección, la luz es *plano polarizada*, o *linealmente polarizada* (figura 24.20c). Note que la polarización es una prueba de que la luz es una onda transversal. Las ondas longitudinales verdaderas, como las ondas sonoras en el aire, no se pueden polarizar porque las moléculas del medio no vibran de forma perpendicular a la dirección de propagación.

La luz se polariza de varias maneras. Aquí se describirá la polarización por absorción selectiva, por reflexión y por doble refracción. En el apartado 24.5 se describirá la polarización por dispersión.



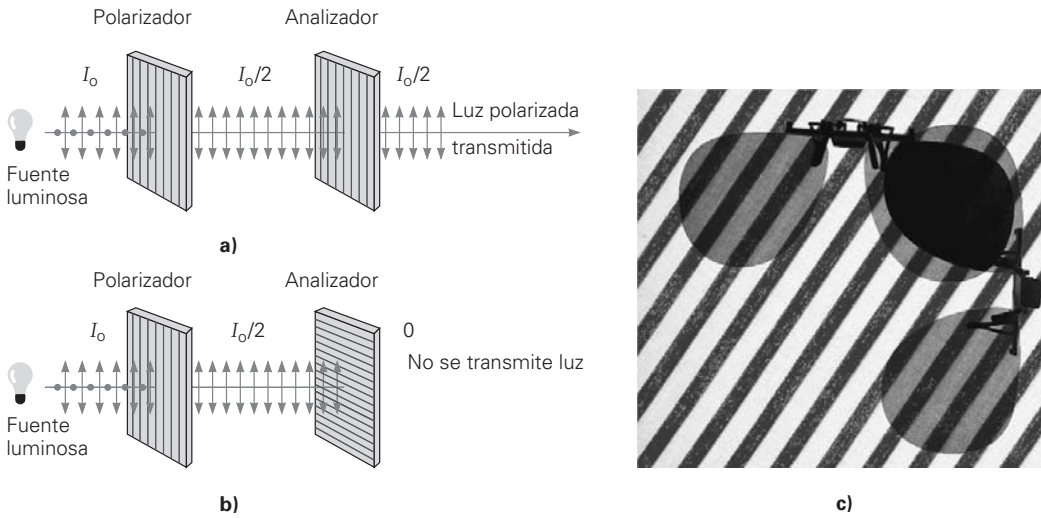
▲ **FIGURA 24.21 Absorción selectiva (dicroísmo)** Los cristales dicroicos absorben de forma selectiva un componente polarizado (aquí, el componente vertical) más que el otro. Si el cristal tiene el suficiente espesor, el rayo que emerge está linealmente polarizado.

Polarización por absorción selectiva (dicroísmo)

Algunos cristales, como los del mineral turmalina, presentan la interesante propiedad de absorber uno de los componentes de campo eléctrico más que el otro. A esta propiedad se le llama **dicroísmo**. Si un cristal dicroico tiene espesor suficiente, se absorberá por completo uno de los componentes y, en ese caso, el haz que emerge es plano polarizado (◂figura 24.21).

Otro cristal dicroico es el del sulfato de iodoquinina (llamado *herapatita*, en honor de W. Herapath, médico inglés que descubrió en 1852 sus propiedades polarizantes). Este cristal tuvo gran importancia práctica en el desarrollo de los polarizadores modernos. Alrededor de 1930, Edwin H. Land (1909-1991), científico estadounidense, encontró una forma de alinear diminutos cristales dicroicos aciculares (en forma de aguja) para formar láminas de celuloide transparente. El resultado fue una película delgada de material polarizante, que recibió el nombre comercial de *Polaroid*.

Se han desarrollado mejores películas polarizantes que, en lugar de celuloide, utilizan polímeros sintéticos. Durante el proceso de manufactura esta clase de películas se estira para alinear las largas cadenas moleculares del polímero. Con un tratamiento adecuado, los electrones externos (de valencia) de las moléculas pueden moverse a lo largo de las cadenas orientadas. El resultado es que se absorbe con facilidad la luz cuyos vectores $\vec{\mathbf{E}}$ son paralelos a las cadenas orientadas, pero se transmite la luz con vectores $\vec{\mathbf{E}}$ perpendiculares a las cadenas. La dirección *perpendicular* a la orientación de las cadenas moleculares se llama **eje de transmisión**, o **dirección de polarización**. Así, cuando la luz no polarizada llega a una lámina polarizadora, ésta funciona como polarizador y transmite luz polarizada (▸figura 24.22). Como se absorbe uno de los dos componentes del



▲ **FIGURA 24.22 Películas polarizantes** ***a)*** Cuando las películas polarizantes se orientan de tal forma que sus ejes de transmisión tienen la misma dirección, la luz que sale es polarizada. La primera lámina funciona como polarizador y la segunda como analizador. ***b)*** Cuando una de las láminas gira 90° y los ejes de transmisión son perpendiculares (polarizadores cruzados), se transmite poca luz (en el caso ideal, nada). ***c)*** Polarizadores cruzados hechos con anteojos polarizantes para el sol.

campo eléctrico, la intensidad de la luz después del polarizador es la mitad de la intensidad de la luz incidente ($I_o/2$). El ojo humano no es capaz de distinguir entre luz polarizada y no polarizada. Para saber si la luz está polarizada, se necesita un *analizador*, que puede ser simplemente otra hoja de película polarizante. Como se ve en la figura 24.22a, si el eje de transmisión de un analizador es paralelo al plano de polarización de la luz, la transmisión es máxima. Si el eje de transmisión del analizador es perpendicular al plano de polarización, se transmitirá poca luz (en el caso ideal, ninguna).

En general, la intensidad de la luz transmitida se determina con

$$I = I_o \cos^2 \theta \qquad \textit{Ley de Malus} \qquad (24.14)$$

donde θ es el ángulo que forman los ejes de transmisión del polarizador y el analizador. Esta expresión se conoce como *ley de Malus*, en honor de su descubridor, el físico francés E. L. Malus (1775-1812).

Los anteojos polarizantes cuyos vidrios tienen distintos ejes de transmisión se usan para ver algunas películas en tercera dimensión. Dos proyectores que transmiten imágenes un poco distintas, tomadas con cámaras a corta distancia entre sí, proyectan las películas en una pantalla. La luz de cada proyector está linealmente polarizada, pero en dirección perpendicular a la de la otra cámara. Las lentes de los anteojos "3D" también tienen ejes de transmisión perpendiculares entre sí. De esta forma, un ojo ve la imagen de un proyector y el otro ve la del otro proyector. El cerebro interpreta como profundidad, o tercera dimensión, la ligera diferencia en la perspectiva (o "ángulo de visión) de las dos imágenes, exactamente igual que en la visión normal.

Ejemplo integrado 24.6 ■ Hacer algo de la nada: tres polarizadores

En las figuras 24.22b y c no hay luz transmitida después del analizador, porque los ejes de transmisión del polarizador y el analizador son perpendiculares. Supongamos que la luz no polarizada que incide en el primer polarizador tiene una intensidad I_o. Entre el primer polarizador y el analizador se inserta un segundo polarizador, cuyo eje de transmisión forma un ángulo θ con el del primer polarizador. *a*) ¿Es posible que algo de luz atraviese todo esta configuración? En caso afirmativo, ¿ese paso será cuando 1) $\theta = 0°$, 2) $\theta = 30°$, 3) $\theta = 45°$ o 4) $\theta = 90°$. Explique por qué. ¿Qué sucede si se gira el segundo polarizador? *b*) Cuando $\theta = 30°$, ¿cuál es la intensidad de la luz que se transmite en términos de la intensidad de la luz que incide?

PHYSLET®
Exploración 39.2 Polarizadores

(continúa en la siguiente página)

a) Razonamiento conceptual. Sí, es posible que algo de luz atraviese esta configuración a cualquier otro ángulo que no sea 0° o 90°. La sección Aprender dibujando que aparece en esta página le ayudará a comprender esta situación.

Sólo con el primer polarizador y el analizador, no se transmite luz, de acuerdo con la ley de Malus (ecuación 24.14), porque el ángulo entre los ejes de transmisión es de 90°. Sin embargo, cuando se inserta un segundo polarizador entre el primero y el analizador, en realidad pasa algo de luz por el sistema. Por ejemplo, si el eje de transmisión del segundo polarizador forma un ángulo θ con el del primer polarizador, entonces el ángulo entre los ejes de transmisión del segundo polarizador y el analizador será $90° - \theta$. (¿Por qué?)

Cuando la luz no polarizada de intensidad I_o incide en el primer polarizador, la intensidad transmitida por éste es $I_o/2$, porque sólo se transmite uno de los dos componentes del campo eléctrico. Después del segundo polarizador, la intensidad disminuye por un factor de $\cos^2\theta$. Después del analizador, la intensidad se reduce más por un factor de $\cos^2(90° - \theta) = \text{sen}^2\,\theta$. Por lo anterior, la intensidad transmitida es $I = (I_o/2)(\cos^2\theta)(\text{sen}^2\theta)$. Así, mientras θ no sea 0° ni 90°, habrá algo de luz que atraviese el sistema.

Puesto que la luz transmitida depende del ángulo θ, si se gira el segundo polarizador cambia la intensidad transmitida.

b) Razonamiento cuantitativo y solución. Una vez comprendida la situación, el inciso *b* se resuelve con un cálculo directo.

Dado: $\theta = 30°$ ***Encuentre:*** *b*) I después de tres polarizadores en términos de I_o

Cuando $\theta = 30°$, $$I = \frac{I_o}{2}(\cos^2 30°)(\text{sen}^2\,30°) = \frac{I_o}{2}\cdot\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)^2\cdot\left(\frac{1}{2}\right)^2 = \frac{3I_o}{32}$$

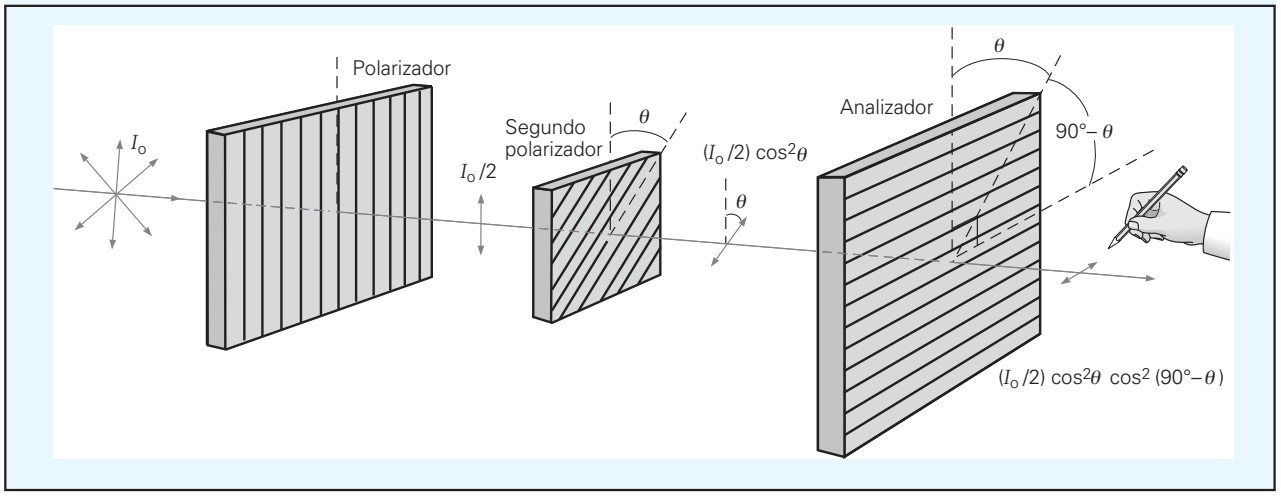
Ejercicio de refuerzo. ¿Para qué valor de θ será máxima la intensidad transmitida en este ejemplo?

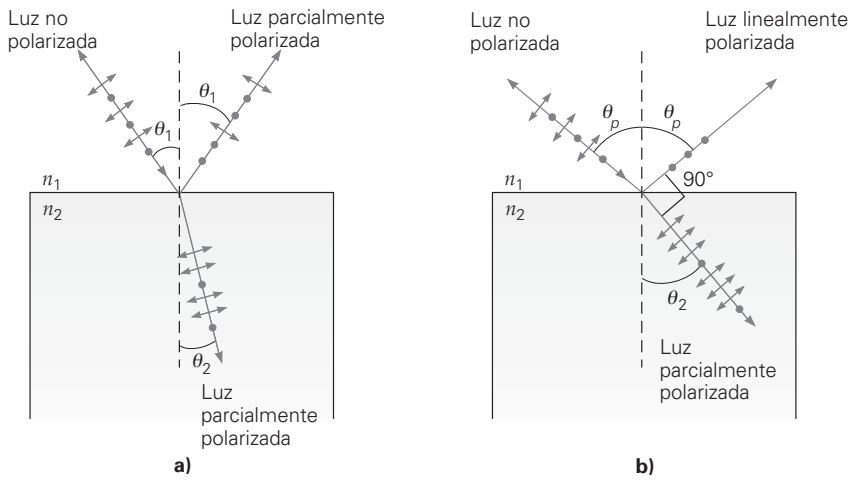
Polarización por reflexión

Cuando un haz de luz no polarizada llega a un medio transparente y liso, como el vidrio, por ejemplo, se refleja en forma parcial y se transmite también en forma parcial. La luz reflejada puede estar total o parcialmente polarizada, o no polarizada, dependiendo del ángulo de incidencia. El caso no polarizado se presenta para 0°, es decir, la incidencia normal. Al variar el ángulo de incidencia a partir de 0°, se polarizan parcialmente tanto la luz reflejada como la refractada. Por ejemplo, los componentes del campo eléctrico normales a la superficie se reflejan con más intensidad y producen polarización parcial (▸figura 24.23a). Sin embargo, en determinado ángulo de incidencia, el haz re-

APRENDER DIBUJANDO

TRES POLARIZADORES (VÉASE EL EJEMPLO INTEGRADO 24.6)





▲ **FIGURA 24.23 Polarización por reflexión** ***a)*** Cuando un haz de luz incide en una interfase, la luz reflejada y la refractada normalmente están parcialmente polarizadas. ***b)*** Cuando los rayos reflejado y refractado forman 90°, la luz reflejada es linealmente polarizada y la refractada es parcialmente polarizada. Esta situación ocurre cuando $\theta_1 = \theta_p = \tan^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$.

flejado está totalmente polarizado (figura 24.23b). (En este ángulo, sin embargo, el haz refractado sólo está parcialmente polarizado.)

David Brewster (1781-1868), un físico escocés, descubrió que la polarización total del rayo reflejado se presenta cuando los rayos reflejado y refractado son perpendiculares entre sí. El ángulo de incidencia al que ocurre esta polarización se llama **ángulo de polarización (θ_p)** o **ángulo de Brewster**, y depende de los índices de refracción de los dos medios. En la figura 24.23b, los rayos reflejado y refractado forman 90°, y el ángulo de incidencia θ_1 es el ángulo de polarización θ_p; por consiguiente, $\theta_1 = \theta_p$, y

$$\theta_1 + 90° + \theta_2 = 180° \qquad \text{o} \qquad \theta_2 = 90° - \theta_1$$

Según la ley de Snell (capítulo 22),

$$n_1 \operatorname{sen} \theta_1 = n_2 \operatorname{sen} \theta_2$$

En este caso, $\operatorname{sen} \theta_2 = \operatorname{sen}(90° - \theta_1) = \cos \theta_1$. Por consiguiente,

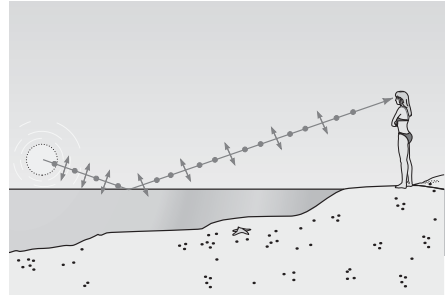
$$\frac{\operatorname{sen} \theta_1}{\operatorname{sen} \theta_2} = \frac{\operatorname{sen} \theta_1}{\cos \theta_1} = \tan \theta_1 = \frac{n_2}{n_1}$$

Cuando $\theta_1 = \theta_P$, el resultado es

$$\tan \theta_p = \frac{n_2}{n_1} \qquad \text{o bien} \qquad \theta_p = \tan^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \tag{24.15}$$

Si el primer medio es aire ($n_1 = 1$), entonces $\tan \theta_p = \frac{n_2}{1} = n_2 = n$, donde n es el índice de refracción del segundo medio.

Ahora con seguridad usted comprende el principio en que se basan los anteojos polarizadores. La luz que se refleja en una superficie lisa está parcialmente polarizada. La dirección de polarización es, en su mayor parte, paralela a la superficie. (Véase la figura 24.23b.) La luz que se refleja en la superficie del asfalto o del agua puede tener tal intensidad que produce resplandores (▼figura 24.24a). Para reducir este efecto, las lentes polarizantes de los anteojos tienen la orientación vertical de su eje de transmisión, para que se absorba algo de la luz parcialmente polarizada que proviene de las superficies reflectoras. Por otra parte, los filtros polarizantes permiten a las cámaras tomar fotos "limpias", es decir, sin la interferencia del resplandor (figura 24.24b).



a)

b)

▲ **FIGURA 24.24** Reducción del resplandor ***a)*** La luz reflejada en una superficie horizontal está parcialmente polarizada en el plano horizontal. Cuando los anteojos solares se orientan de tal forma que su eje de transmisión es vertical, el componente polarizado horizontalmente de esa luz no se transmite, y se reduce el resplandor. ***b)*** En los filtros polarizantes de las cámaras se usa el mismo principio. La foto de la derecha se tomó con uno de esos filtros. Note la reducción de los reflejos en el escaparate de una tienda. (Véase el pliego a color al final del libro.)

Ejemplo 24.7 ■ Luz solar en un estanque: polarización por reflexión

La luz solar se refleja en la superficie lisa de un estanque. ¿Cuál es la altitud del Sol (el ángulo entre el Sol y el horizonte) cuando es máxima la polarización de la luz reflejada?

Razonamiento. Como el ángulo de incidencia se mide con respecto a la normal y el ángulo de altitud se mide con respecto al horizonte, el ángulo de incidencia y el ángulo de altitud son complementarios (trace un diagrama para visualizar la situación). La luz que incide en el ángulo de Brewster tiene la máxima polarización al reflejarse, por lo que la altitud del Sol debe estar a $90° - \theta_p$ con el horizonte.

Solución. El índice de refracción del agua está en la tabla 22.1.

Dado: $n_1 = 1$
$n_2 = 1.33$ (tabla 22.1)

Encuentre: θ (ángulo de altitud para que la polarización sea máxima)

El Sol debe estar a un ángulo $\theta = 90° - \theta_p$, donde θ_p es el ángulo de Brewster. Se usa la ecuación 24.15:

$$\theta_p = \tan^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{1.33}{1}\right) = 53.1°$$

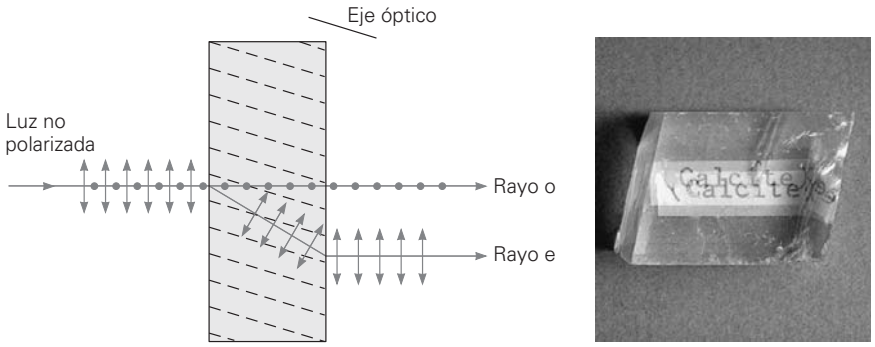
Así,

$$\theta = 90° - \theta_p = 90° - 53.1° = 36.9°$$

Ejercicio de refuerzo. La luz incide en un material plano y transparente cuyo índice de refracción es 1.52. ¿En qué ángulo de refracción la luz transmitida tendrá la máxima polarización si el material transparente está en agua?

Polarización por doble refracción (birrefringencia)

Cuando la luz monocromática se propaga en el vidrio, su velocidad es igual en todas direcciones, y el vidrio se caracteriza por tener un solo índice de refracción. Todo material que tiene esta propiedad se llama *isotrópico*, lo que significa que tiene las mismas



a) b)

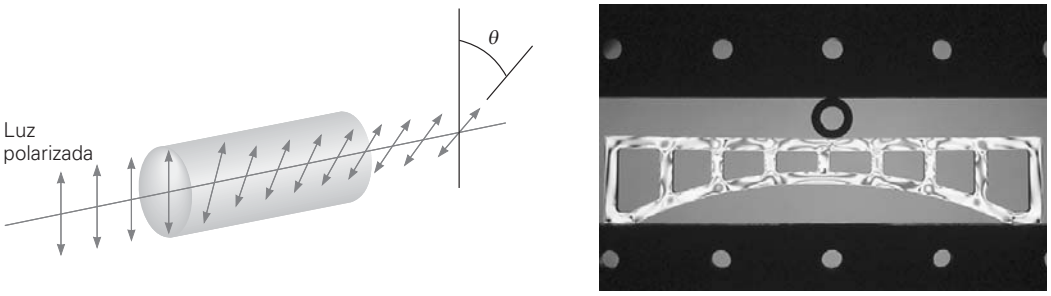
▲ **FIGURA 24.25 Doble refracción o birrefringencia** ***a)*** La luz no polarizada que incide normal a la superficie de un cristal birrefringente, formando cierto ángulo con determinada dirección en el cristal (líneas punteadas), se separa en dos componentes: el rayo ordinario (o) y el rayo extraordinario (e), que están plano polarizados en direcciones perpendiculares entre sí. ***b)*** Doble refracción en un cristal de calcita.

características ópticas en todas las direcciones. Algunos materiales cristalinos, como el cuarzo, la calcita y el hielo, son *anisotrópicos*; esto es, la rapidez de la luz —y por consiguiente el índice de refracción— es diferente en direcciones distintas dentro del material. La anisotropía origina algunas propiedades ópticas interesantes. Se dice que esos materiales son doblemente refringentes, o que poseen **birrefringencia**, y en este fenómeno interviene la polarización.

Por ejemplo, un haz de luz no polarizada que incide en un cristal birrefringente de calcita ($CaCO_3$, carbonato de calcio) se ilustra en la ▲figura 24.25. Cuando el haz se propaga formando un ángulo respecto a determinado eje cristalino, el haz se refracta doblemente y se separa en dos componentes o rayos. Esos dos rayos están linealmente polarizados en direcciones perpendiculares entre sí. Uno, llamado *rayo ordinario* (o), pasa en línea recta por el cristal y se caracteriza por un índice de refracción n_o. El segundo rayo, llamado *rayo extraordinario* (e), se refracta y se caracteriza por un índice de refracción n_e. La dirección particular del eje, indicada por las líneas punteadas de la figura 24.25a, se llama *eje óptico*. A lo largo de esta dirección, $n_o = n_e$, y no se nota nada extraordinario en la luz transmitida.

Algunos materiales transparentes tienen la capacidad de *hacer girar* el plano de polarización de la luz plano polarizada. Esta propiedad se llama **actividad óptica**, y se debe a la estructura molecular del material (▼figura 24.26a). La rotación puede ser en

▼ **FIGURA 24.26 Actividad óptica y detección de tensión** ***a)*** Algunas sustancias tienen la propiedad de hacer girar el plano de polarización de la luz linealmente polarizada. Esta propiedad, que depende de la estructura molecular de la sustancia, se llama *actividad óptica*. ***b)*** Los vidrios y los plásticos se tornan ópticamente activos cuando se someten a tensión, y los puntos de máxima tensión se aprecian cuando el material se ve a través de polarizadores cruzados. Los ingenieros pueden entonces probar modelos de elementos estructurales en plástico, para ver dónde se presentarán las tensiones máximas cuando se "carguen" los modelos. En el caso que se ilustra se está analizando un modelo de la armadura de suspensión de un puente



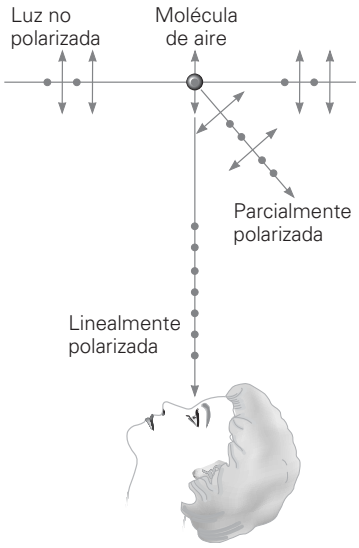
a) b)

el sentido de las manecillas del reloj o en sentido contrario, dependiendo de la orientación molecular. Entre las moléculas ópticamente activas están algunas proteínas, aminoácidos y azúcares.

Los vidrios y los plásticos se vuelven ópticamente activos cuando están sometidos a tensión. La máxima rotación de la dirección de polarización de la luz transmitida se realiza en las regiones donde la tensión es máxima. Al ver un trozo de material sometido a tensión, a través de polarizadores cruzados, es posible identificar los puntos de tensión máxima. A esta determinación se le llama *análisis óptico de tensión* (figura 24.26b). Otra aplicación de las películas polarizantes es la pantalla de cristal líquido (LCD), que se describe en la sección A fondo 24.2.

*24.5 Dispersión atmosférica de la luz

OBJETIVOS: *a*) Describir la dispersión y *b*) explicar por qué el cielo es azul y los crepúsculos son rojos.



▲ **FIGURA 24.27 Polarización por dispersión** Cuando una molécula de gas en el aire dispersa la luz solar no polarizada que incide en la atmósfera, la luz perpendicular a la dirección del rayo incidente está linealmente polarizada. La luz que se dispersa en cierto ángulo arbitrario está parcialmente polarizada. Un observador que vea en ángulo recto (90°) con respecto a la dirección de la luz solar incidente recibe luz linealmente polarizada.

Cuando la luz incide en una suspensión de partículas, como las moléculas del aire, parte de ella se absorbe y se vuelve a irradiar. A este proceso se le llama *dispersión*. La dispersión de la atmósfera produce algunos efectos interesantes, que incluyen la polarización de la luz celeste (la luz que ha dispersado la atmósfera), el color azul del cielo y el color rojo de los crepúsculos y los amaneceres.

La dispersión atmosférica hace que la luz del cielo esté polarizada. Cuando llega la luz solar no polarizada a las moléculas de aire, el campo eléctrico de la onda luminosa pone a vibrar los electrones de las moléculas. Las vibraciones son complejas, pero esas cargas aceleradas emiten radiación, de igual forma que los electrones en vibración de una antena de radiodifusión (véase la sección 20.4). La intensidad de esta radiación emitida es más intensa a lo largo de una perpendicular a la oscilación y, como se ve en la ◂figura 24.27, un observador cuya visual forme 90° con la dirección de la luz solar recibirá luz linealmente polarizada, porque las oscilaciones de la carga son normales a la superficie. En otros ángulos de la visual, están presentes ambos componentes, y la luz del cielo, vista a través de un filtro polarizante, parece parcialmente polarizada, a causa del componente más intenso.

Como la dispersión de la luz con el máximo grado de polarización forma un ángulo recto con la dirección del Sol, en el amanecer y en el ocaso la luz dispersa, directamente sobre uno, tiene el grado máximo de polarización. La polarización del cielo se aprecia cuando éste se ve a través de un filtro polarizador (o unos anteojos polarizantes), que se hace girar. La luz que procede de distintas regiones del cielo se transmitirá en diversos grados que dependen de su grado de polarización. Se cree que algunos insectos, como las abejas, usan la luz polarizada del cielo para determinar sus direcciones de navegación en relación con el Sol.

Por qué el cielo es azul

La dispersión de la luz solar por las moléculas de aire también hace que el cielo se vea azul. Este efecto no se debe a la polarización, sino a la absorción selectiva de la luz. Como los osciladores, las moléculas de aire tienen frecuencias de resonancia (a las cuales dispersan con máxima eficiencia) en la región ultravioleta. En consecuencia, cuando se dispersa la luz del Sol, la luz del extremo azul de la región visible se dispersa más que la del extremo rojo.

Para partículas como las moléculas de aire, que son mucho menores que la longitud de onda de la luz, la intensidad de la luz que se dispersa es inversamente proporcional a la cuarta potencia de la longitud de onda (I/λ^4). Esta relación entre longitud de onda e intensidad de dispersión se llama **dispersión de Rayleigh**, en honor de Lord Rayleigh (1842-1919), el físico inglés que la dedujo. Esta relación inversa predice que la luz de menor longitud de onda del espectro, es decir, la luz azul, se dispersa más que la de mayor longitud de onda, la roja. La luz azul dispersada se vuelve a dispersar en la atmósfera y al final se dirige hacia el suelo. Ésta es la causa de que el cielo se vea azul.

A FONDO

24.2 LAS PANTALLAS DE CRISTAL LÍQUIDO Y LA LUZ POLARIZADA

Las *pantallas de cristal líquido* (o pantallas LCD, por *liquid crystal displays*) son comunes en relojes, calculadoras, televisores y computadoras. El nombre "cristal líquido" parece ser contradictorio. Por lo regular, cuando se funde un sólido cristalino, el líquido que resulta ya no tiene una configuración atómica o molecular ordenada. Sin embargo, hay ciertos compuestos orgánicos que pasan por un estado intermedio en el que las moléculas se reordenan en cierto grado, pero manteniendo el orden general característico de un cristal.

Una clase común de LCD, llamada *pantalla de cristal nemático torcido*, emplea el efecto de un cristal líquido sobre la luz polarizada (figura 1). Estos cristales líquidos especiales son activos desde el punto de vista óptico y girarán en la dirección de la polarización de la luz 90° si no se aplica voltaje a través de ellos. Sin embargo, si se aplica voltaje, los cristales perderán esta actividad óptica.

A continuación los cristales líquidos se colocan entre hojas polarizantes cruzadas, y se respaldan con una superficie de espejo. Cuando no hay voltaje, la luz que entra y pasa por la LCD se polariza, gira 90°, se refleja y de nuevo gira 90°. Después del viaje de regreso a través del cristal líquido, la dirección de polarización de la luz es la misma que la del polarizador inicial. Así, la luz se transmite y sale de la pantalla. A causa de la reflexión y la transmisión, la pantalla parece tener color claro (por lo general, gris claro) cuando se ilumina con luz blanca no polarizada.

Cuando se aplica un voltaje, la luz polarizada que pasa a través del cristal líquido es absorbida por el segundo polarizador. Por eso, el cristal líquido es opaco y oscuro. Al cristal líquido se le aplican recubrimientos de una película transparente y conductora de la electricidad, arreglados en bloques de siete capas. Cada bloque, o segmento de la pantalla, tiene una conexión eléctrica por separado. Los números o letras oscuros en una pantalla LCD se forman al aplicar un voltaje eléctrico a ciertos segmentos del cristal líquido. Observe que todos los números, del 0 al 9, se forman con piezas de la pantalla segmentada.

Si se usa un analizador se demuestra con facilidad que la luz procedente de las regiones claras de una LCD está polarizada (figura 2). La pantalla se ve o se deja de ver si se hace girar el analizador sobre el reloj. Usted seguramente habrá notado este efecto, si alguna vez ha tratado de ver la hora en un reloj de pulso con LCD usando lentes polarizantes para el sol.

Una de las ventajas principales de las LCD es su bajo consumo de energía. Otras pantallas equivalentes, como las que usan diodos emisores de luz (LED), producen luz y usan cantidades relativamente grandes de energía. Las LCD no producen luz, pero utilizan la luz reflejada.

Los monitores de computadora y televisión planos y a color, que se basan en la tecnología LCD, son cada vez más comunes. Ocupan una cuarta parte del espacio, consumen menos de la mitad de la energía y son más benignos para la vista que los monitores que dependen de un tubo de rayos catódicos (CRT) y las pantallas de televisión tradicionales del mismo tamaño. Las pantallas de las computadoras y de los televisores se miden en *pixeles*, que se parecen mucho a un cuadro pequeño de papel milimétrico. Para producir color, los tres segmentos de LCD (rojo, verde y azul) de un monitor plano se agrupan en cada pixel. Al controlar las intensidades de los tres colores, cada pixel puede generar cualquier color del espectro visible.

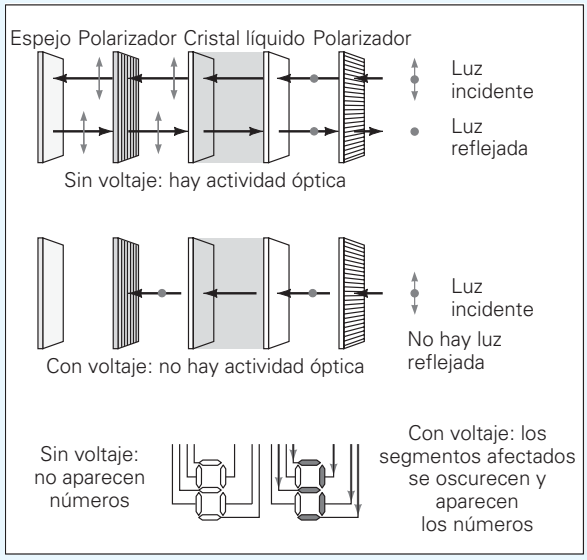


FIGURA 1 Pantalla de cristal líquido (LCD) Una pantalla nemática torcida es una aplicación donde intervienen la actividad óptica de un cristal líquido y los polarizadores cruzados. Cuando un campo eléctrico de un voltaje aplicado desorienta el orden cristalino, el cristal líquido pierde su actividad óptica en esa región, y la luz no se transmite ni se refleja. Los números y las letras se forman aplicando voltajes a segmentos de una pantalla.

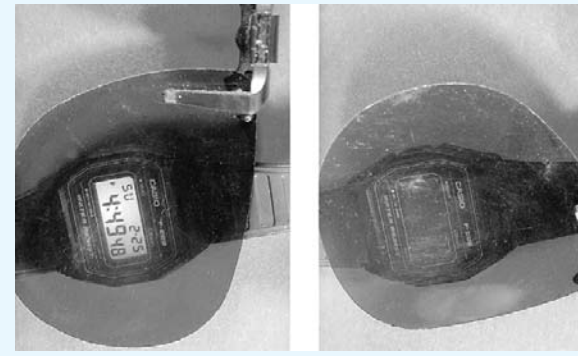


FIGURA 2 Luz polarizada La luz de una pantalla de cristal líquido está polarizada, lo que se puede ver usando anteojos polarizantes a modo de analizador.

Ejemplo 24.8 ■ El rojo y el azul: dispersión de Rayleigh

¿Cuánta más luz dispersan las moléculas de aire en el extremo azul del espectro visible que en el extremo rojo?

Razonamiento. Se sabe que la dispersión de Rayleigh es proporcional a I/λ^4, y que la luz del extremo azul del espectro (con menor longitud de onda) se dispersa más que la del extremo rojo. La expresión "cuánta más", que abre la pregunta, implica un factor o una relación.

Solución. La relación de dispersión de Rayleigh es $I \propto 1/\lambda^4$, donde I es la cantidad o intensidad de dispersión para determinada longitud de onda. Así, se puede establecer la relación

$$\frac{I_{\text{azul}}}{I_{\text{rojo}}} = \left(\frac{\lambda_{\text{rojo}}}{\lambda_{\text{azul}}}\right)^4$$

El extremo azul del espectro (luz violeta) tiene una longitud de onda aproximadas de $l_{\text{azul}} = 400$ nm, y la luz roja tiene una longitud de onda aproximada de $l_{\text{rojo}} = 700$ nm. Al sustituir estos valores se obtiene

$$\frac{I_{\text{azul}}}{I_{\text{rojo}}} = \left(\frac{\lambda_{\text{rojo}}}{\lambda_{\text{azul}}}\right)^4 = \left(\frac{700\text{ nm}}{400\text{ nm}}\right)^4 = 9.4 \qquad \text{o} \qquad I_{\text{azul}} = 9.4 I_{\text{rojo}}$$

Se ve que la luz azul se dispersa casi 10 veces más que la luz roja.

Ejercicio de refuerzo. ¿Qué longitud de onda de la luz se dispersa el doble que la luz roja? ¿De qué color es?

Por qué los amaneceres y los crepúsculos son rojos

▲ **FIGURA 24.28 Cielo rojo al atardecer** Una espectacular puesta de sol, de tonalidades rojizas, en un observatorio ubicado en la cima de una montaña en Chile. El cielo rojo es el resultado de la dispersión de la luz solar por los gases atmosféricos y las pequeñas partículas sólidas. El enrojecimiento del Sol, cuando se observa en forma directa, se debe a la dispersión de las longitudes de onda hacia el extremo azul del espectro, en línea directa hacia el Sol. (Véase el pliego a color al final del libro.)

Con frecuencia se observan hermosos amaneceres y crepúsculos. Cuando el Sol está cerca del horizonte, la luz solar recorre mayor distancia atravesando el aire más denso cerca de la superficie de la Tierra. Como en ese proceso la luz sufre mucha dispersión, quizá usted piense que sólo la luz que se dispersa menos, la roja, llega a los observadores en la superficie terrestre. Así se explicarían los crepúsculos rojos. Sin embargo, se ha demostrado que el color dominante de la luz blanca después de la dispersión molecular es el anaranjado. En consecuencia, debe haber otras clases de dispersión que cambian la luz del Sol poniente (o naciente) hacia el extremo rojo del espectro (◂figura 24.28).

Se sabe que la dispersión de la luz solar por los gases atmosféricos *y* por las pequeñas partículas son la causa de los crepúsculos rojos. Esas partículas no son necesarias para el azul celeste, pero son indispensables para los crepúsculos y los amaneceres rojos. (Por eso es que se observan amaneceres y crepúsculos espectacularmente rojos en los meses posteriores a una gran erupción volcánica, que emite muchas toneladas de materia en forma de partículas a la atmósfera.) Los crepúsculos rojos suceden con más frecuencia cuando hay una masa de aire de alta presión hacia el oeste, porque la concentración de las partículas es mayor en las masas de aire con alta presión, que cuando la presión es baja. De forma similar, los amaneceres rojos suceden con más frecuencia cuando hay una masa de aire de alta presión hacia el este.

Ahora se comprende el antiguo adagio "Cielo rojo por la noche, deleite de los marineros. Cielo rojo por la mañana, advertencia a los marineros". En general, el buen tiempo acompaña a las masas de alta presión, porque se asocian con menos formación de nubes. La mayor parte del territorio de Estados Unidos está en la zona de los vientos alisios, donde en general las masas de aire se mueven del oeste al este. Un cielo rojo al anochecer probablemente indica que hay una masa de aire de alta presión al oeste, que se acerca. Un cielo rojo por la mañana quiere decir que la masa de aire de alta presión ha pasado, y que podría haber mal tiempo.

Como nota final, ¿a usted le gustaría que el cielo fuera *rojo*? Si su respuesta es sí, entonces debería ir a Marte, el "planeta rojo". La delgada atmósfera marciana tiene un 95% de dióxido de carbono (CO_2). La molécula de CO_2 es más masiva que la de oxígeno (O_2) o la de nitrógeno (N_2). En consecuencia, las moléculas de CO_2 tienen menor frecuencia de resonancia (mayor longitud de onda) y tienden a dispersar el extremo rojo del espectro visible. Por consiguiente, el cielo marciano es rojo durante el día. ¿Y cómo son entonces los amaneceres y los ocasos en Marte? Piense en ello...

Y, por último, veamos cómo se utiliza la luz en una aplicación biomédica, la biopsia óptica, que se describe en la sección A fondo 24.3.

A FONDO 24.3 BIOPSIA ÓPTICA

Una de las formas más confiables de detectar enfermedades es practicar una biopsia, que consiste en extraer muestras de tejido, y luego buscar si hay *cambios* anormales en esas muestras. La "biopsia óptica", o dispersión biomédica, es una herramienta prometedora para diagnosticar y tener control en el caso de enfermedades como el cáncer, *sin* necesidad de practicar ese procedimiento quirúrgico.

Las biopsias ópticas se basan en el siguiente principio físico. Las partículas en los tejidos absorben y reemiten luz; por esa razón, la luz dispersada contiene información acerca de la constitución del tejido. Lograr una dispersión a partir de un tejido depende de las estructuras internas, como la presencia de fibras de colágeno y el estado de hidratación en el tejido. La medición de la luz dispersada como una función de la longitud de onda, polarización o ángulo se convierte entonces en una importante herramienta de diagnóstico.

Un ejemplo de una biopsia óptica es el diagnóstico y medición de las fibras de colágeno. Un componente principal de la piel y de los huesos es el colágeno, una proteína fibrosa que se encuentra en las células animales. Las fibras de la forma inactiva del colágeno (que miden entre 2 y 3 μm de diámetro) se componen de haces de pequeñas fibrillas de colágeno, que miden aproximadamente 0.3 μm de diámetro, como se observa en la figura 1. Las fibrillas están hechas de moléculas entrelazadas de tropocolágeno y forman figuras en forma de bandas de estrías con una periodicidad de 70 nm, que se deben a la alineación escalonada de las moléculas de tropocolágeno. Cada una de estas moléculas tiene un "grupo frontal" denso en electrones, que aparece oscuro en la micrografía de electrones. Esta variación periódica en el índice de refracción a este nivel dispersa la luz fuertemente en las regiones visible y ultravioleta. La información contenida en la luz dispersada revelará si existen condiciones anormales en las fibras de colágeno

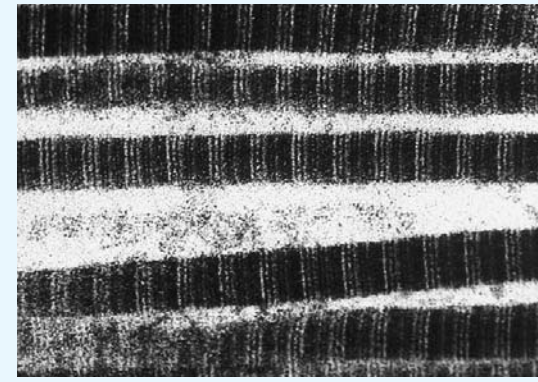


FIGURA 2 Una micrografía de electrones de las fibras de colágeno Los detalles de las fibras de colágeno muestran la presencia de fibrillas de colágeno y de moléculas de tropocolágeno.

Repaso del capítulo

- El **experimento de Young de la doble rendija** es una prueba de la naturaleza ondulatoria de la luz, y una forma de medir su longitud de onda ($\approx 10^{-7}$ m).

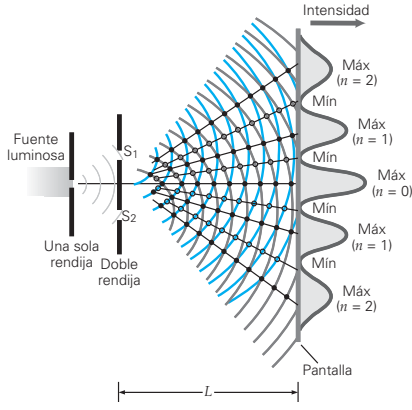
La posición angular (θ) de las **franjas brillantes (máxima)** satisface la condición

$$d \operatorname{sen} \theta = n\lambda \qquad \text{para } n = 0, 1, 2, 3, \ldots \tag{24.3}$$

donde d es la distancia entre las rendijas.

Cuando θ es pequeño, la distancia entre la n-ésima franja brillante (máxima) y el máximo central es

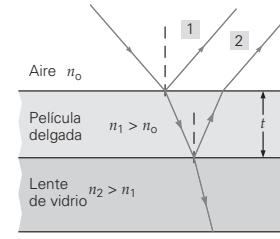
$$y_n \approx \frac{nL\lambda}{d} \qquad \text{para } n = 0, 1, 2, 3, \ldots \tag{24.4}$$



- La luz reflejada en la interfase entre medios, cuando $n_2 > n_1$ experimenta un **cambio de fase** de 180°. Si $n_2 < n_1$ no hay cambio de fase en la reflexión. Los cambios de fase afectan la interferencia en películas delgadas, que también depende del espesor de la película y del índice de refracción.

El **espesor mínimo de una película antirreflectante** es

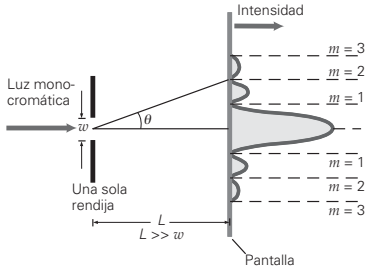
$$t_{\text{mín}} = \frac{\lambda}{4n_1} \; (\text{para } n_2 > n_1 > n_o) \tag{24.7}$$



- En un experimento de **difracción en una sola rendija**, los **mínimos** que están en el lugar θ satisfacen

$$w \operatorname{sen} \theta = m\lambda \quad \text{para } m = 1, 2, 3, \ldots \tag{24.8}$$

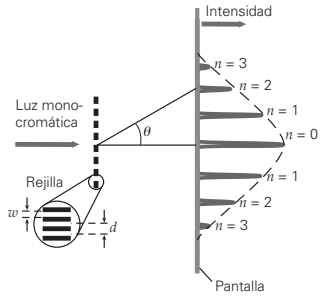
donde w es el ancho de la rendija. En general, cuanto mayor es la longitud de onda en comparación con el ancho w de una abertura o de un objeto, mayor será la difracción.



- Con una **rejilla de difracción**, los máximos (franjas brillantes) satisfacen

$$d \operatorname{sen} \theta = n\lambda \qquad \text{para } n = 0, 1, 2, \ldots \tag{24.12}$$

donde $d = 1/N$, y N es la cantidad de líneas por unidad de longitud.



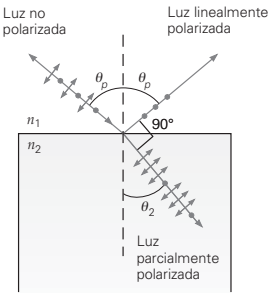
- La **polarización** es la orientación preferente de los vectores de campo eléctrico que constituyen una onda luminosa, y hay pruebas de que la luz es una onda transversal. La luz puede polarizarse mediante absorción selectiva, reflexión, doble refracción (**birrefringencia**) y dispersión.

Cuando los ejes de transmisión de un polarizador y un analizador forman un ángulo θ, la intensidad de la luz transmitida se determina con la **ley de Malus**:

$$I = I_o \cos^2 \theta \tag{24.14}$$

En la reflexión, si el ángulo de incidencia es igual al **ángulo de Brewster (de polarización)** θ_p, la luz reflejada es plano polarizada:

$$\tan \theta_p = \frac{n_2}{n_1} \qquad \text{o} \qquad \theta_p = \tan^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \tag{24.15}$$



- La intensidad de la **dispersión de Rayleigh** es inversamente proporcional a la cuarta potencia de la longitud de la onda de la luz. El azul del cielo terrestre es el resultado de la dispersión preferencial de la luz solar por las moléculas de aire.

Ejercicios

Los ejercicios designados **OM** *son preguntas de opción múltiple; los* **PC** *son preguntas conceptuales; y los* **EI** *son ejercicios integrados. A lo largo del texto, muchas secciones de ejercicios incluirán ejercicios "apareados". Estos pares de ejercicios, que se identifican con* números subrayados*, pretenden ayudar al lector a resolver problemas y aprender. El primer ejercicio de cada pareja (el de número par) se resuelve en la Guía de estudio, que puede consultarse si se necesita ayuda para resolverlo. El segundo ejercicio (de número impar) es similar, y su respuesta se da al final del libro.*

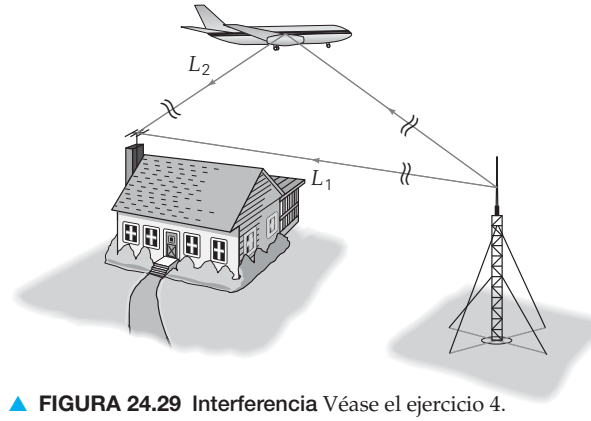
24.1 El experimento de Young de la doble rendija

1. **OM** En un experimento de Young con luz monocromática, si disminuye la distancia d entre rendijas, la distancia entre franjas de interferencia *a*) disminuye, *b*) aumenta, *c*) permanece constante o *d*) desaparece.

2. **OM** Si la diferencia de longitudes de trayectorias de dos rayos idénticos y coherentes es 2.5λ cuando llegan a un punto de una pantalla, el punto será *a*) brillante, *b*) oscuro, *c*) multicolor o *d*) gris.

3. **PC** Cuando se usa luz blanca en el experimento de Young de doble rendija, se ven muchas bandas brillantes con un espectro de colores. En determinada franja, el color más cercano al máximo central es *a*) rojo, *b*) azul, *c*) todos los colores.

4. **PC** Con frecuencia, las imágenes de televisión aérea vibran cuando pasa cerca un avión (▸figura 24.29). Explique una causa probable de esta vibración, con base en efectos de interferencia.



▲ **FIGURA 24.29 Interferencia** Véase el ejercicio 4.

5. **PC** Describa lo que sucedería a la figura de interferencia en el experimento de Young de doble rendija si aumentara la longitud de onda de la luz monocromática.

6. **PC** La intensidad del máximo (o franja brillante) central en la figura de interferencia de un experimento de Young de doble rendija es unas cuatro veces mayor que la de cualquier onda luminosa. ¿Viola esto la conservación de la energía? Explique por qué.

7. ● En el desarrollo del experimento de Young se usó una aproximación para ángulo pequeño ($\tan\theta \approx \operatorname{sen}\theta$) para determinar los desplazamientos laterales de las franjas brillantes y oscuras. ¿Qué tan buena es esta aproximación? Por ejemplo, ¿cuál es el porcentaje de error cuando $\theta = 15°$?

8. ● Para estudiar la interferencia entre ondas, un alumno usa dos altavoces o bocinas activadas por la misma onda sonora de 0.50 m de longitud. Si las distancias de un punto a las bocinas difieren en 0.75 m, las ondas interferirán ¿en forma constructiva o destructiva en ese punto? ¿Y si las distancias difieren en 1.0 m?

9. ● Dos rendijas paralelas a 0.075 mm de distancia están iluminadas con luz monocromática de 480 nm de longitud de onda. Determine el ángulo entre el centro del máximo central y el centro de la primera franja brillante lateral.

10. ●● *a*) Deduzca una relación que defina los lugares de las franjas oscuras en un experimento de Young de doble rendija. ¿Cuál es la distancia entre las franjas oscuras? *b*) Para que haya una franja oscura de tercer orden (la tercera a partir del máximo central), ¿cuál es la diferencia de longitudes de onda entre ese lugar y las dos rendijas?

11. ●● En un experimento de doble rendija donde se usa luz monocromática, la separación angular entre el máximo central y la franja brillante de segundo orden es 0.160°. ¿Cuál es la longitud de onda de la luz, si la distancia entre las rendijas es 0.350 mm?

12. **EI** ●● Una luz monocromática pasa a través de dos rendijas angostas y forma una figura de interferencia en una pantalla. *a*) Si aumenta la longitud de onda de la luz que se use, la distancia entre las franjas brillantes 1) aumentará, 2) permanecerá constante, 3) disminuirá. Explique por qué. *b*) Si la separación entre rendijas es 0.25 mm, la pantalla está a 1.5 m de éstas, y si se usa luz de 550 nm, ¿cuál es la distancia del centro del máximo central al centro de la franja brillante de tercer orden? c) ¿Y si la longitud de onda es de 680 nm?

13. ●● En un experimento con doble rendija y luz monocromática, una pantalla se coloca a 1.25 m de las rendijas, cuya separación es 0.0250 mm. La franja brillante de tercer orden está a 6.60 cm del centro del máximo central. Calcule *a*) la longitud de onda de la luz y *b*) la posición de la franja brillante de segundo orden.

14. **EI** ●● *a*) Si la longitud de onda utilizada en un experimento de doble rendija disminuye, la distancia entre franjas brillantes adyacentes 1) aumentará, 2) también disminuirá, 3) permanecerá constante. Explique por qué. *b*) La separación entre las dos rendijas es de 0.20 mm. Las franjas brillantes adyacentes de la figura de interferencia en una pantalla (colocada a 1.5 m de las rendijas) están separadas 0.45 cm. ¿Cuál es la longitud de onda y el color de la luz? *c*) Si la longitud de onda es de 550 nm, ¿cuál será la distancia entre franjas brillantes adyacentes?

15. **EI** ●● Se iluminan con luz monocromática dos rendijas paralelas, y se observa una figura de interferencia en una pantalla. *a*) Si la distancia entre las rendijas disminuye, la distancia entre las franjas brillantes 1) aumenta, 2) permanece constante o 3) disminuye. Explique por qué. *b*) Si la separación de las rendijas es de 1.0 mm, la longitud de onda es 640 nm y la distancia de las rendijas a la pantalla es de 3.00 m, ¿cuál es la distancia entre los máximos de interferencia adyacentes? *c*) ¿Y si la separación entre las rendijas es de 0.80 mm?

16. **EI** ●● *a*) En un experimento de doble rendija, si la distancia de las rendijas a la pantalla aumenta, la separación entre franjas brillantes adyacentes 1) aumenta, 2) disminuye, o 3) permanece constante. Explique por qué. *b*) La luz verde amarillenta (λ = 550 nm) se usa en un experimento de doble rendija, en el que la separación de las rendijas es 1.75×10^{-4} m. Si la pantalla está a 2.00 m de las rendijas, determine la separación entre franjas brillantes adyacentes. *c*) ¿Y si la pantalla está a 3.00 m de las rendijas?

17. ●● En un experimento de doble rendija con luz monocromática y una pantalla a 1.50 m de las rendijas, el ángulo entre la franja brillante de segundo orden y el máximo central es de 0.0230 rad. Si la distancia entre las rendijas es de 0.0350 mm, ¿cuáles son *a*) la longitud de onda y el color de la luz y *b*) el desplazamiento lateral de la franja?

18. **EI** ●●● *a*) Si el aparato de un experimento de Young de doble rendija se sumerge por completo en agua, la distancia entre las franjas de interferencia 1) aumenta, 2) permanece constante o 3) disminuye. Explique por qué. *b*) ¿Cuál sería el desplazamiento lateral en el ejercicio 12, si todo el sistema se sumergiera en agua tranquila?

19. ●●● En un experimento de doble rendija se usa luz de dos longitudes de onda distintas. El lugar de la franja brillante de tercer orden, para la primera luz, que es amarillo naranja (λ = 600 nm), coincide con el lugar de la franja brillante de cuarto orden de la otra luz. ¿Cuál es la longitud de onda de la otra luz?

24.2 Interferencia en películas delgadas

20. **OM** Para una película delgada con $n_1 > n_o$ y $n_1 > n_2$, donde n_1 es el índice de refracción de la película, el espesor adecuado para que haya interferencia constructiva de la luz reflejada es *a*) $\lambda'/4$, *b*) $\lambda'/2$, *c*) λ' o *d*) *a* y *b*.

21. **OM** Para una película delgada con $n_o < n_1 < n_2$, donde n_1 es el índice de refracción de la película, el espesor mínimo para que haya interferencia destructiva de la luz reflejada es *a*) $\lambda'/4$, *b*) $\lambda'/2$ o *c*) λ'.

22. **OM** Cuando se extiende una película delgada de queroseno en agua, la parte más delgada se ve brillante. El índice de refracción del queroseno es *a*) mayor, *b*) menor o *c*) igual que el del agua.

23. **PC** La mayor parte de las lentes de las cámaras están recubiertas con películas delgadas que les dan una tonalidad azul púrpura con la luz reflejada. ¿Cuáles longitudes de onda no se ven en la luz reflejada?

24. PC Cuando se presenta interferencia destructiva de dos ondas en cierto lugar, ahí no hay energía. ¿Viola eso la conservación de la energía? Explique por qué.

25. PC Al centro de una figura de anillos de Newton (figura 24.10a), el espesor de la cuña de aire es cero. ¿Por qué siempre es oscura esta zona?

26. **EI** ● Un recubrimiento de una lente con un índice de refracción de 1.5 mide 1.0×10^{-7} m de espesor, y se ilumina con luz blanca. El índice de refracción de la capa es 1.4. *a*) El número de ondas que experimentan el cambio de fase de 180° es 1) cero, 2) uno o 3) dos. Explique por qué. *b*) ¿Para qué longitud de onda de la luz visible la lente será no reflectante?

27. ● Una luz de 550 nm en aire incide normalmente en una placa de vidrio ($n = 1.5$), cuyo espesor es 1.1×10^{-5} m. *a*) ¿Cuál es el grosor del vidrio en función de la longitud de onda de la luz en el vidrio? *b*) La luz ¿interferirá en forma constructiva o destructiva?

28. ● Se va a recubrir una lente con índice de refracción de 1.60 con un material ($n = 1.40$) que la haga no reflectora para la luz roja ($\lambda = 700$ nm), que incide normalmente. ¿Cuál es el espesor mínimo requerido para el recubrimiento?

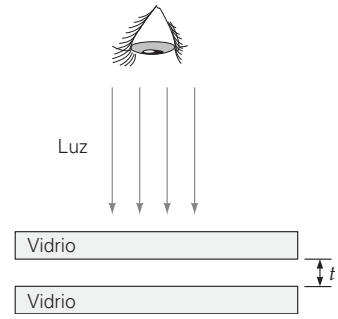
29. ●● El fluoruro de magnesio ($n = 1.38$) se utiliza con frecuencia como recubrimiento de lentes, para hacerlos antirreflectantes. ¿Cuál es la diferencia en el espesor mínimo de la película necesario para la transmisión máxima de la luz azul ($\lambda = 400$ nm) y de la luz roja ($\lambda = 700$ nm)?

30. ●● Una celda solar debe tener un recubrimiento no reflectante de un material transparente. *a*) El espesor del recubrimiento ¿dependerá del índice de refracción del sustrato en la celda solar? Describa los posibles escenarios. *b*) Si $n_{\text{solar}} > n_{\text{película}}$ y $n_{\text{película}} = 1.22$, ¿cuál es el espesor mínimo de la película cuando se usa luz con una longitud de onda de 550 nm?

31. **EI** ●● Sobre el agua flota una película delgada de aceite ($n = 1.50$). Se observa interferencia destructiva con luz de 480 nm y de 600 nm, cada una en distinto lugar. *a*) Si el número de orden es el mismo para ambas longitudes de onda, ¿cuál longitud de onda está en el mayor espesor? 1) 480 nm, 2) 600 nm o 3) ambas. Explique por qué. *b*) Calcule los dos espesores mínimos de la película de aceite, suponiendo que la incidencia es normal.

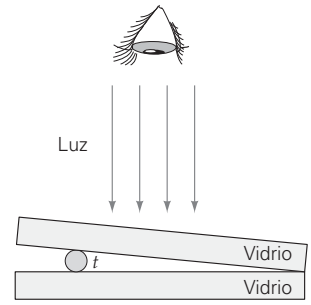
32. ●● Una lente de cámara ($n = 1.50$) está recubierta con una capa delgada de un material cuyo índice de refracción es 1.35. Ese recubrimiento hace que la lente no refleje luz de 450 nm de longitud de onda (en aire) que incide normalmente sobre ella. ¿Cuál es el espesor de la capa más delgada que hará no reflectante a la lente?

33. ●● Dos placas paralelas de vidrio están separadas por una distancia pequeña, como se ve en la ▸figura 24.30. Si se ilumina la placa superior con luz de un láser de He-Ne ($\lambda = 632.8$ nm), ¿para qué distancias mínimas de separación la luz *a*) se reflejará constructivamente y *b*) se reflejará destructivamente? [*Nota:* $t = 0$ *no es* una respuesta en el inciso *b*.]



◀ **FIGURA 24.30 ¿Reflexión o transmisión?** Véase el ejercicio 33.

34. **EI** ●●● En la ▾figura 24.31 se ve una cuña de aire, que se podría usar para medir dimensiones pequeñas, como el diámetro de un alambre delgado. *a*) Si el vidrio superior se ilumina con luz monocromática, la figura de interferencia que se observará es 1) brillante, 2) oscura o 3) líneas brillantes y oscuras de acuerdo con el espesor de la película de aire. Explique por qué. *b*) Exprese los lugares de las franjas brillantes de interferencia en términos del espesor de la cuña, medido desde el vértice de ésta.



◀ **FIGURA 24.31 Cuña de aire** Véanse los ejercicios 34 y 35.

35. ●●● Las placas de vidrio de la figura 24.31 están separadas por un filamento delgado y redondo. Cuando la placa superior se ilumina en dirección normal con luz cuya longitud de onda es de 550 nm, el filamento queda directamente debajo de la sexta franja brillante. ¿Cuál es el diámetro del filamento?

24.3 Difracción

36. OM En una figura de difracción con una sola rendija, *a*) todos los máximos tienen el mismo ancho, *b*) el máximo central tiene ancho doble con respecto a los máximos laterales, *c*) los máximos laterales tienen ancho doble con respecto al máximo central o *d*) ninguna de las opciones anteriores es válida.

37. OM Al aumentar la cantidad de líneas de una rejilla de difracción por unidad de longitud, el espacio entre las franjas brillantes *a*) aumenta, *b*) disminuye o *c*) permanece constante.

38. OM En una figura de difracción de una sola rendija, si la longitud de onda de la luz aumenta, el ancho del máximo central, *a*) aumenta, *b*) disminuye o *c*) permanece constante.

39. PC De acuerdo con la ecuación 24.8, ¿se pueden ver los mínimos $m = 2$ si $w = \lambda$? ¿Y la franja oscura $m = 1$?

40. PC Al explicar la difracción en una sola rendija, se supuso que la longitud de la rendija es mucho mayor que su ancho. ¿Qué cambiaría en la figura de difracción si la longitud fuera aproximadamente igual al ancho de la rendija?

41. PC En una rejilla de difracción, las rendijas están muy próximas entre sí. ¿Qué ventaja tiene este diseño?

42. ● Se ilumina una rendija de 0.20 mm de ancho con luz monocromática de 480 nm de longitud de onda, y se forma una figura de difracción en una pantalla a 1.0 m de la rendija. *a*) ¿Cuál es el ancho del máximo central? *b*) ¿Cuáles son los anchos de las franjas brillantes (máximos) de segundo y tercer orden?

43. ● Se ilumina una rendija de 0.025 mm de ancho con luz roja (λ = 680 nm). ¿Cuál es el ancho de *a*) el máximo central y *b*) los máximos laterales de la figura de difracción que se forma en una pantalla a 1.0 m de la rendija?

44. ● ¿A qué ángulo se verá el máximo de difracción de segundo orden, usando una rejilla de difracción con espaciamiento de 1.25 μm, cuando se ilumina con luz de 550 nm de longitud de onda?

45. ● Una persiana veneciana es, en esencia, una rejilla de difracción, no para la luz visible sino para ondas de mayores longitudes. Si la distancia entre las hojas de una persiana veneciana es de 2.5 cm, *a*) ¿para qué longitud de onda habrá un máximo de primer orden en un ángulo de 10° y *b*) ¿qué clase de radiación es ésa?

46. **EI** ●● Se ilumina una sola rendija con luz monocromática, y se coloca detrás de ella una pantalla, para observar la figura de difracción. *a*) Si el ancho de la rendija aumenta, el ancho del máximo central 1) aumentará, 2) no cambiará o 3) disminuirá. ¿Por qué? *b*) Si el ancho de la rendija es de 0.50 mm, la longitud de onda es de 680 nm y la pantalla está a 1.80 m de la rendija, ¿cuál es el ancho del máximo central? *c*) ¿Y si el ancho de la rendija fuera de 0.60 mm?

47. ●● Una rejilla de difracción debe tener los máximos de segundo orden a 10° del máximo central para el extremo rojo (λ= 700 nm) del espectro visible. ¿Cuántas líneas por centímetro tiene la rejilla?

48. ●● Cierto cristal produce un ángulo de desviación de 25° para el máximo de primer orden de rayos X monocromáticos, cuya frecuencia es de 5.0×10^{17} Hz. ¿Cuál es el espaciamiento de la red cristalina?

49. ●● Calcule los ángulos de difracción que produce una rejilla con 7500 líneas/cm con los componentes azul (λ = 420 nm) y rojo (λ = 680 nm) de los espectros de primer y segundo orden.

50. **EI** ●● *a*) Sólo es posible observar un número limitado de franjas brillantes con una rejilla de difracción. El factor (o factores) que limita el número de franjas brillantes que se observan es 1) la longitud de onda, 2) el espaciamiento de la rejilla o 3) ambos. Explique por qué. *b*) ¿Cuántas franjas brillantes se ven cuando una luz monocromática de 560 nm de longitud de onda ilumina una rejilla de difracción que tiene 10 000 líneas/cm, y cuáles son sus números de orden?

51. ●● En determinada figura de difracción, el componente rojo (700 nm) del espectro de segundo orden se desvía formando un ángulo de 20°. *a*) ¿Cuántas líneas por centímetro tiene la rejilla? *b*) Si la rejilla se ilumina con luz blanca, ¿cuántas franjas brillantes del espectro visible completo se producen?

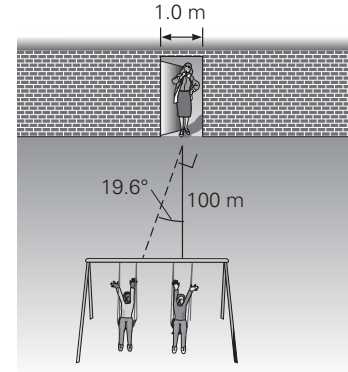
52. ●● Una luz blanca cuyos componentes tienen longitudes de onda de 400 a 700 nm ilumina una rejilla de difracción, con 4000 líneas/cm. ¿Se traslapan los espectros de primer y segundo orden? Justifique la respuesta.

53. **EI** ●● Una luz blanca cuyas longitudes de onda van del azul (400 nm) al rojo (700 nm) ilumina una rejilla de difracción con 8000 líneas/cm. *a*) Para el primer orden espectral, ¿cuál color, el azul o el rojo, estará más cerca del máximo central? ¿Por qué? *b*) ¿Cuáles son los ángulos del primer orden para el azul y el rojo?

54. ●● Una rejilla de difracción con 8000 líneas/cm se ilumina con un haz de luz roja monocromática de un láser de He-Ne (λ = 632.8 nm). ¿Cuántos máximos laterales se forman en la figura de difracción, y en qué ángulos se observan?

55. ●●● Demuestre que para una rejilla de difracción, la parte violeta (λ = 400 nm) del espectro de tercer orden se traslapa con la parte amarillo-anaranjada (λ = 600 nm) del espectro de segundo orden, independientemente de la distancia entre líneas.

56. **EI** ●●● Una maestra de pie en el umbral de una puerta de 1.0 m de ancho sopla un silbato con una frecuencia de 1000 Hz para que se reúnan los niños que están jugando en el patio (▼figura 24.32). Dos niños juegan en los columpios a 100 m del edificio de la escuela. Uno de ellos está a un ángulo de 0° y el otro a un ángulo de 19.6° en relación con la normal de la puerta. *a*) No escuchará el silbato 1) sólo el niño a 0°, 2) sólo el niño a 19.6° o 3) ninguno de los dos niños. Explique por qué. *b*) Si la rapidez del sonido en el aire es de 335 m/s, ¿el niño ubicado a 19.6° escuchará el silbato?



▲ **FIGURA 24.32 El momento de la verdad** Véase el ejercicio 56. (El dibujo no se trazó a escala.)

24.4 Polarización

57. **OM** Se puede polarizar la luz por *a*) reflexión, *b*) refracción, *c*) absorción o *d*) todo lo anterior.

58. **OM** El ángulo de Brewster depende de *a*) el índice de refracción del material, *b*) la ley de Bragg, *c*) la reflexión interna, o *d*) la interferencia.

59. **OM** Una onda sonora no puede polarizarse. Esto es porque el sonido *a*) no es una onda de luz, *b*) es una onda transversal, *c*) es una onda longitudinal, *d*) ninguna de las opciones anteriores es válida.

60. **PC** Dados dos pares de anteojos para el sol, ¿podría usted decir si uno o los dos son polarizantes?

61. **PC** Supongamos que sostiene dos láminas polarizantes frente a usted, y que mira a través de ellas. ¿Cuántas veces se vería que las láminas se aclaran y oscurecen, si *a*) una de ellas girara una revolución completa, *b*) si las dos giraran una revolución completa, con la misma rapidez pero en sentidos contrarios, *c*) si ambas se giraran una vuelta completa con la misma rapidez y con el mismo sentido y *d*) si una girara el doble de rápido que la otra, y la más lenta girara una revolución completa?

62. **PC** ¿Cómo produce luz polarizada la absorción selectiva?

63. **PC** Si se pone un par de anteojos polarizantes frente a la pantalla de cristal líquido de una calculadora, y se hacen girar, ¿qué se observa?

64. ● Algunas clases de vidrio tienen un intervalo de índices de refracción entre 1.4 y 1.7, aproximadamente. ¿Cuál es el intervalo del ángulo de polarización (de Brewster) para esos vidrios cuando la luz incide en ellos procedente del aire?

65. **EI** ● Una luz incide en un cierto material en aire. *a*) Si el índice de refracción del material aumenta, el ángulo de polarización (de Brewster) 1) aumentará también, 2) disminuirá o 3) permanecerá constante. Explique por qué. *b*) ¿Cuáles son los ángulos de polarización si el índice de refracción es 1.6 y 1.8?

66. ● Un par de polarizador-analizador puede tener los ejes de transmisión formando ángulos de 30 o 45°. ¿Cuál ángulo permite la mayor transmisión de luz?

67. **EI** ●● Una luz no polarizada de intensidad I_o incide en un par polarizador-analizador. *a*) Si el ángulo entre el polarizador y el analizador aumenta en el intervalo que va de 0 a 90°, la intensidad de la luz transmitida 1) también aumentará, 2) disminuirá o 3) permanecerá constante. Explique por qué. *b*) Si el ángulo entre el polarizador y el analizador es de 30°, ¿qué intensidad de luz se transmite a través del polarizador y del analizador, respectivamente? *c*) ¿Y si el ángulo es de 60°?

68. ●● Un rayo de luz incide en una placa de vidrio (n = 1.62) en aire, y el rayo reflejado se polariza por completo. ¿Cuál es el ángulo de refracción del rayo?

69. ●● El ángulo crítico para reflexión interna en cierto medio es de 45°. ¿Cuál es el ángulo de polarización (de Brewster) para la luz que incide externamente en ese medio?

70. **EI** ●● El ángulo de incidencia se ajusta de tal forma que haya polarización lineal máxima en la reflexión de la luz en una pieza de plástico transparente en aire. *a*) ¿Habrá luz transmitida? 1) No, 2) habrá transmisión máxima o 3) se transmitirá algo de luz a través del plástico. Explique por qué. *b*) Si el índice de refracción del plástico es 1.22, ¿cuál es el ángulo de refracción en él?

71. ●● La luz solar se refleja en los vidrios verticales de una ventana (n = 1.55). ¿Cuál será la altitud (el ángulo sobre el horizonte) del Sol para que la luz reflejada esté totalmente polarizada?

72. **EI** ●● Una pieza de vidrio (n = 1.60) podría estar en el aire o sumergida en agua. *a*) El ángulo de polarización (de Brewster) en el agua 1) es mayor, 2) menor o 3) igual que en el aire. Explique por qué. *b*) ¿Cuál es el ángulo de polarización cuando la pieza está en el aire y cuando está sumergida en el agua?

73. ●●● Se cubre una placa de vidrio crown con una capa de agua. Un rayo de luz viene del aire e incide en el agua, donde se transmite en forma parcial. ¿Hay algún ángulo de incidencia para el que la luz que se refleja en la interfase agua-vidrio tenga polarización lineal máxima? Justifique matemáticamente la respuesta.

*24.5 Dispersión atmosférica de la luz

74. **OM** ¿Cuál de los siguientes colores de dispersa más en la atmósfera? *a*) azul, *b*) amarillo, *c*) rojo, *d*) no hay diferencia entre los colores.

75. **OM** La dispersión implica *a*) la reflexión de la luz en las partículas, *b*) la refracción de la luz en las partículas, *c*) la absorción e irradiación de la luz por las partículas o *d*) ninguna de las opciones anteriores es válida.

76. **PC** Explique por qué el cielo es rojo al amanecer y al atardecer, y azul durante el día.

77. **PC** *a*) ¿Por qué no es uniforme el azul del cielo en un día claro y sin nubes? *b*) ¿De qué color sería el cielo o el espacio para un astronauta en la Luna?

Ejercicios adicionales

78. Una cuña delgada de aire entre dos placas planas de vidrio forma bandas de interferencia claras y oscuras cuando se ilumina con una luz monocromática en incidencia normal. (Véase la figura 24.9.) *a*) Demuestre que el espesor de la cuña de aire varía $\lambda/2$ de una banda brillante a la siguiente; λ es la longitud de onda de la luz. *b*) ¿Cuál sería el cambio de espesor de la cuña entre las franjas claras, si el espacio estuviera lleno con un líquido con índice de refracción n?

79. Un vendedor está tratando de venderle una fibra óptica y le dice que ésta da luz linealmente polarizada cuando la luz se refleja internamente por completo en la interfase fibra-aire. *a*) ¿La compraría? Explique por qué. *b*) Si la reflexión total interna ocurre a un ángulo de 35°, ¿cuál es el ángulo de polarización (de Brewster)?

80. Tres rendijas paralelas de ancho w tienen una separación d entre ellas, donde $d = 3w$. *a*) ¿Sería posible ver todos los máximos de interferencia? Explique por qué. *b*) Si no es así, ¿cuáles máximos de interferencia faltarían? [*Sugerencia:* véase la figura 24.16.]

81. Si se aumentara al doble el ancho de la rendija en un experimento con una sola rendija, la distancia a la placa se redujera una tercera parte y la longitud de onda de la luz cambiara de 600 a 450 nm, ¿cómo resultaría afectado el ancho de las franjas brillantes?

82. Demuestre que cuando la luz reflejada está completamente polarizada, la suma del ángulo de incidencia y del ángulo de refracción es igual a 90°.

83. ¿Cuál es el máximo orden espectral que se puede ver en una rejilla de difracción con 9000 líneas/cm cuando se ilumina con luz blanca?

Los siguientes problemas de física Physlet pueden utilizarse con este capítulo.
37.2, 37.4, 37.7, 37.9, 37.10, 38.1, 38.2, 38.4, 38.5, 38.6, 39.9, 39.10

CAPÍTULO 25

LA VISIÓN Y LOS INSTRUMENTOS ÓPTICOS

25.1 El ojo humano 793
25.2 Microscopios 799
25.3 Telescopios 803
25.4 Difracción y resolución 807
*25.5 Color 810

La visión es uno de los medios principales de que disponemos para adquirir información sobre el mundo que nos rodea. Sin embargo, las imágenes que muchos ojos ven no son claras ni están enfocadas, y son necesarios los anteojos o algún otro remedio. En la última década se han conseguido grandes avances en la terapia a base de lentes de contacto y en la corrección quirúrgica de defectos de la visión. Un procedimiento muy difundido es la cirugía con láser, que se ilustra en la fotografía de esta página. (Véase el pliego a color al final del libro.) Esa cirugía es recomendable en procedimientos tales como la reparación de retinas desprendidas, destrucción de tumores oculares y la detención de crecimiento anormal de los vasos sanguíneos, que pueden poner en riesgo la visión.

Los instrumentos ópticos tienen la función básica de mejorar y ampliar el poder de la observación con el ojo humano, y aumentan nuestra visión. En una variedad de instrumentos ópticos, que incluyen los microscopios y los telescopios, se usan espejos y lentes.

Las primeras lentes de aumento fueron gotas de agua en un agujero pequeño. Para el siglo XVII, los artesanos podían tallar lentes de regular calidad para microscopios simples o para vidrios de aumento, que se utilizaban sobre todo en estudios botánicos. (Estas primeras lentes también se usaban en las gafas.) Pronto se desarrolló el microscopio compuesto básico, que requiere de dos lentes. Los microscopios compuestos modernos, capaces de aumentar un objeto hasta 200 veces, permitieron a nuestra visión penetrar en el mundo de los microbios.

Alrededor de 1609 Galileo usó lentes para construir un telescopio astronómico que le permitió observar los valles y las montañas de la Luna, las manchas solares y los cuatro satélites mayores de Júpiter. Actualmente existen telescopios gigantescos que usan lentes y espejos, que nos permiten remontarnos en el pasado conforme vemos las galaxias más alejadas tal y como eran tiempo atrás.

HECHOS DE FÍSICA

- Alrededor del 80% de la capacidad de refracción de un ojo humano proviene de la córnea, mientras que el otro 20% proviene del cristalino. Este último modifica su forma para enfocar objetos más cercanos o más alejados, gracias a los músculos ciliares.
- El ojo humano capta una gran cantidad de información. Si se le compara con una cámara digital, el ojo humano es equivalente a una de 500 megapixeles. Una cámara digital común ofrece una resolución de entre 2 y 10 megapixeles.
- Un glóbulo rojo tiene un diámetro aproximado de 7 μm (7×10^{-6} m). Cuando se observa con un microscopio compuesto de 1000×, parece medir 7 mm (7×10^{-3} m).
- Algunas cámaras instaladas en satélites artificiales tienen una excelente resolución. Desde el espacio son capaces de leer las placas de los automóviles.

¿Qué conoceríamos del universo y de nuestro mundo si esos instrumentos no se hubieran inventado? No conoceríamos las bacterias, y los planetas, estrellas y galaxias seguirían siendo para nosotros sólo puntos misteriosos de luz.

Los espejos y las lentes se describieron en el capítulo 23, y otros fenómenos ópticos en el capítulo 24. Las bases establecidas en esos capítulos se aplicarán ahora en el estudio de la visión y de los instrumentos ópticos. En este capítulo conoceremos el instrumento óptico fundamental: el ojo humano, sin el cual los demás casi hubieran sido inútiles. También aprenderemos más acerca del diseño de microscopios y telescopios, y acerca de los factores que limitan la visión con esos dispositivos.

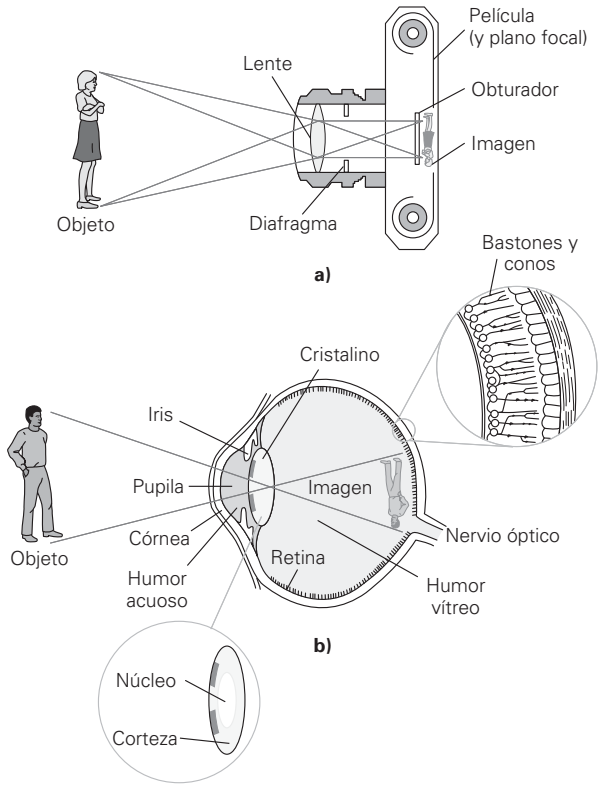
25.1 El ojo humano

OBJETIVOS: *a*) Describir el funcionamiento óptico del ojo y *b*) explicar algunos defectos frecuentes de la visión, y la forma en que se corrigen.

El ojo humano es el instrumento óptico más fundamental, porque sin él no existiría el campo de la óptica. El ojo humano se asemeja en muchos aspectos a una cámara sencilla (▾figura 25.1). Una cámara sencilla está formada por una lente convergente, que se utiliza para enfocar las imágenes en una película sensible a la luz (en el caso de las cámaras tradicionales), o en un *dispositivo de cargas interconectadas* o CCD (en las cámaras digitales), en la parte posterior del interior de la cámara. (Recuerde que en el capítulo 23 se dijo que para objetos relativamente lejanos, una lente convergente produce una imagen real, invertida y más pequeña.) La cámara tiene un diafragma para ajustar la abertura, y un obturador para controlar la cantidad de luz que entra a la cámara.

Nota: en la sección 23.3 se describió la formación de imágenes por una lente convergente; véase la figura 23.15a.

También el ojo tiene una lente convergente que enfoca las imágenes en el recubrimiento sensible a la luz (la retina) en la superficie posterior del globo ocular. El párpado se puede considerar como un obturador; sin embargo, el obturador de una cámara, que controla el tiempo de exposición de la película, se abre en general sólo durante una fracción de segundo, mientras que el párpado está normalmente abierto y la exposición es continua. El sistema nervioso humano hace una función análoga a la de un obturador: analiza las señales de la imagen que produce el ojo, con una frecuencia de 20 a 30 veces por segundo. El ojo más bien debería compararse con una cámara de cine o de video, que exponen una cantidad similar de cuadros (o imágenes) por segundo.



◀ **FIGURA 25.1 Analogía de una cámara con el ojo** En algunos aspectos, ***a)*** una cámara se parece al ***b)*** ojo humano. Se forma una imagen en la película, en una cámara y en la retina en el ojo. (Las propiedades refringentes complejas del ojo no se muestran aquí, porque intervienen varios medios con refracción.) Para una descripción comparativa, véase el texto.

PHYSLET®
Ilustración 36.2 Cámara

PHYSLET®
Exploración 36.1 Cámara

Aunque las funciones ópticas del ojo son relativamente sencillas, sus funciones fisiológicas son bastante complejas. Como se ve en la figura 25.1b, el globo ocular es una cámara casi esférica. Tiene un diámetro interior aproximado de 1.5 cm, y está lleno de una sustancia parecida a la jalea, llamada *humor vítreo*. Tiene una cubierta externa blanca, llamada *esclerótica*, parte de la cual es visible y forma el "blanco" del ojo. La luz entra en el ojo a través de un tejido curvo y transparente llamado córnea, y pasa a un fluido transparente llamado *humor acuoso*. Detrás de la córnea hay un diafragma circular, el *iris*, cuya abertura central se llama *pupila*. El iris contiene el pigmento que determina el color del ojo. Mediante acción muscular, el iris puede cambiar el área de la pupila (de 2 a 8 mm de diámetro) controlando así la cantidad de luz que entra al ojo.

Detrás del iris está el *cristalino*, que es una lente convergente formada por fibras vítreas microscópicas. (Véase el ejemplo conceptual 22.5 en la p. 713 acerca de los elementos internos, el núcleo y la corteza, dentro del cristalino.) Cuando los músculos fijos al cristalino ejercen tensión sobre éste, las fibras vítreas se deslizan una sobre la otra, modificando la forma de la lente y, por consiguiente, su distancia focal; de esta forma, ayudan a enfocar la imagen sobre la retina adecuadamente. Note que la imagen está *invertida* (figura 25.1b). Sin embargo, no vemos una imagen invertida porque el cerebro reinterpreta esta imagen como si estuviera derecha.

En la pared interna trasera del globo ocular hay una superficie sensible a la luz, llamada **retina**, desde donde el nervio óptico transmite señales al cerebro. La retina está formada por nervios y por dos tipos de receptores de luz, o células fotosensibles, llamadas **bastones** y **conos**, por sus formas. Los bastones son más sensibles a la luz que los conos, y distinguen la luz de la oscuridad con bajas intensidades luminosas (visión crepuscular). Los conos pueden distinguir intervalos de frecuencia de luz con suficiente intensidad, que el ojo interpreta como colores (visión de color). La mayoría de los conos están agrupados en torno a una región central de la retina llamada *mácula*. Los bastones, más numerosos que los conos, están fuera de esa región, y se distribuyen en la retina de manera no uniforme.

El ajuste del foco del ojo difiere del de una cámara. Una lente de cámara tiene distancia focal constante, y se varía la distancia a la imagen moviendo la lente con respecto a la película, para producir imágenes nítidas cuando las distancias al objeto son distintas. En el ojo, la distancia a la imagen es constante y se varía la distancia focal del cristalino (porque actúan los músculos adyacentes para variar la forma del ojo) para producir imágenes nítidas, independientemente de las distancias al objeto. Cuando el ojo está enfocado en objetos distantes, los músculos están relajados y el cristalino es más delgado; tiene una potencia aproximada de 20 D (dioptrías). Recuerde que, como vimos en el capítulo 23, la potencia (P) de una lente, en dioptrías (D), es igual al recíproco de su distancia focal *en metros*. Entonces 20 D corresponde a una distancia focal de $f = 1/(20\text{ D}) = 0.050\text{ m} = 5.0\text{ cm}$. Cuando el ojo está enfocado en objetos más cercanos, el cristalino es más grueso y disminuyen el radio de curvatura y la distancia focal. Para un acercamiento, el poder de la lente puede aumentar hasta 30 D ($f = 0.033$ m) o más en los niños pequeños. El ajuste de la distancia focal del cristalino se llama *acomodamiento*. (Vea un objeto cercano y después uno en la lejanía, y note lo rápido que es el acomodamiento. Prácticamente es instantáneo.)

Los extremos del intervalo en el que es posible tener una visión clara (enfoque agudo) se llaman *punto lejano* y *punto cercano*. El *punto lejano* es la máxima distancia a la que puede ver el ojo los objetos con claridad, y se supone que es el infinito para el ojo normal. El *punto cercano* es el lugar más cercano al ojo en el que los objetos se pueden ver con claridad. Esta posición depende del grado con el que se puede deformar (engrosar) el cristalino por acomodamiento. El intervalo de acomodamiento disminuye en forma gradual al aumentar la edad, porque el cristalino pierde su elasticidad. En general, el punto cercano se aleja en forma gradual con la edad. En la tabla 25.1 se ven las posiciones aproximadas del punto cercano a diversas edades.

Los niños pueden ver imágenes nítidas de objetos que están a menos de 10 cm de sus ojos, y el cristalino de un adulto joven normal es capaz de hacer lo mismo con objetos ubicados a una distancia de entre 12 y 15 cm. Sin embargo, los adultos a la edad aproximada de 40 años sufren un corrimiento en el punto cercano, hasta más allá de los 25 cm. Es probable que usted haya notado que las personas de más de 40 años apartan de sus ojos el material de lectura, para ponerlo dentro de su intervalo de acomodamiento. Cuando las letras son demasiado pequeñas o los brazos demasiado cortos, la solución son las lentes especiales para leer. La recesión del punto cercano con la edad no se considera defecto o visión anormal, porque avanza más o menos al mismo ritmo en la mayor parte de los ojos normales; en cambio, se considera una parte normal del proceso de envejecimiento.

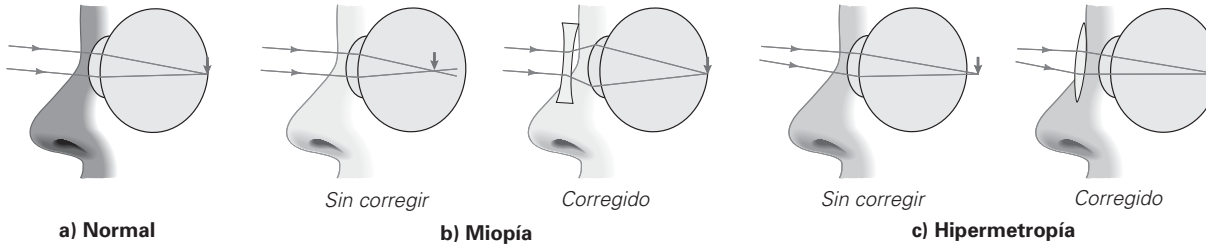
TABLA 25.1

Puntos cercanos aproximados del ojo normal a distintas edades

Edad (años)	*Punto cercano (centímetros)*
10	10
20	12
30	15
40	25
50	40
60	100

Nota: la relación entre potencia de una lente en dioptrías y distancia focal se presenta en la ecuación 23.9, en la sección 23.4.

Nota: el ojo ve con claridad entre su punto cercano y su punto lejano.



▲ **FIGURA 25.2** Miopía e hipermetropía ***a)*** El ojo normal produce imágenes nítidas en la retina de objetos ubicados entre su punto cercano y su punto lejano. La imagen es real, invertida y siempre es menor que el objeto. (¿Por qué?) Aquí el objeto es una flecha lejana, que apunta hacia arriba (y que no se muestra); y los rayos de luz provienen de su punta. ***b)*** En un ojo miope, la imagen de un objeto *lejano* se enfoca *frente* a la retina. Este defecto se corrige con una lente divergente. ***c)*** En un ojo hipermétrope, la imagen de un objeto *cercano* se enfocaría *atrás* de la retina. Este defecto se corrige con una lente convergente. (El dibujo no está a escala.)

Defectos de la visión

Hablar del ojo "normal" (▲figura 25.2a) implica que algunos ojos producen visión defectuosa. Ése es precisamente el caso, y se manifiesta en la cantidad aparente de personas que usan anteojos o lentes de contacto. Los ojos de muchas personas no se pueden acomodar dentro del intervalo normal (de 25 cm al infinito). Esas personas tienen uno de los dos defectos de la visión más comunes: miopía o visión cercana, o hipermetropía o visión lejana. Los dos defectos se pueden corregir con anteojos, lentes de contacto o cirugía.

La **miopía** o visión cercana es la capacidad de ver con claridad objetos cercanos, pero no objetos lejanos. Esto es, el punto lejano no es el infinito, sino uno más cercano. Cuando un miope ve un objeto más allá de su punto lejano, los rayos se enfocan *frente* a la retina (figura 25.2b). En consecuencia, la imagen sobre la retina es borrosa, o fuera de foco. Al acercar el objeto hacia el ojo, la imagen retrocede hacia la retina. Cuando el objeto alcanza el punto lejano para ese ojo, se forma una imagen nítida sobre la retina.

La miopía se origina cuando el globo ocular es demasiado largo, o porque la curvatura de la córnea es demasiado pronunciada. Sea cual fuere la razón, las imágenes de objetos lejanos se enfocan frente a la retina. Esta condición se corrige con lentes divergentes adecuadas, que hacen que los rayos diverjan antes de alcanzar la córnea. Entonces el ojo enfoca la imagen más atrás, para que caiga en la retina.

La **hipermetropía** o visión lejana es la capacidad de ver con claridad objetos lejanos, pero no objetos cercanos. Esto es, el punto cercano está más alejado del ojo de lo normal. La imagen de un objeto que está más cercano al ojo que el punto cercano se formaría detrás de la retina (figura 25.2c). La hipermetropía se produce porque el globo ocular es demasiado corto, porque la córnea tiene una curvatura insuficiente, o porque el cristalino ha perdido elasticidad. Si esto ocurre como parte del proceso de envejecimiento, como se explicó antes, se le llama *presbiopía* o vista cansada.

La visión lejana se corrige con anteojos de lentes convergentes. De esta forma, los rayos convergen y el ojo puede enfocar la imagen en la retina. También se prescriben lentes convergentes a personas de mediana edad que padecen presbiopía, una condición de la visión en la cual el cristalino pierde su flexibilidad, lo que dificulta enfocar los objetos cercanos.

PHYSLET®

Ilustración 36.1 El ojo humano

Ejemplo integrado 25.1 ■ Corrección de la miopía: uso de lentes divergentes

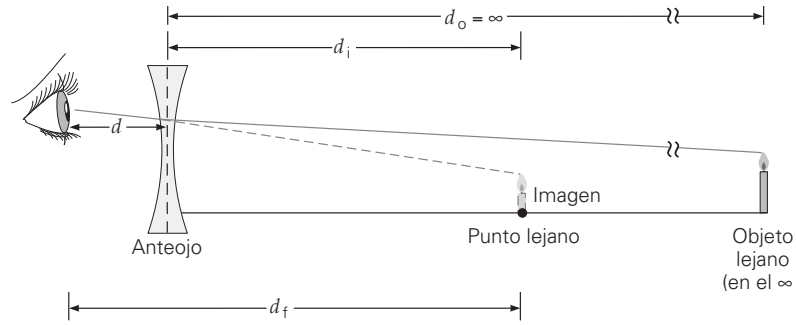
a) Un optometrista tiene la opción de prescribir anteojos convencionales o lentes de contacto a un paciente, para corregir su miopía (▼figura 25.3). Normalmente, los anteojos convencionales se ponen a algunos centímetros frente al ojo, y los lentes de contacto sobre el mismo ojo. La potencia de los lentes de contacto que prescriba debe ser 1) igual, 2) mayor o 3) menor que la de los anteojos convencionales. ¿Por qué? *b*) Cierta persona miope no puede ver con claridad los objetos que están a más de 78.0 cm de sus ojos. ¿Qué potencia deben tener los anteojos convencionales o los lentes de contacto para que esta persona vea con claridad los objetos lejanos? Supongamos que los anteojos están a 3.0 cm del ojo.

a) Razonamiento conceptual. Para la miopía, los lentes de corrección son divergentes (figura 25.3). El lente debe poner la imagen de un objeto lejano ($d_o = \infty$) en el punto lejano del ojo, esto es, a d_f. La imagen, que actúa como objeto para el ojo, queda entonces dentro del intervalo de acomodamiento. Como la distancia a la imagen se *mide a partir del lente*, un lente de contacto debe tener una *mayor* distancia a la imagen. Para un lente de contacto $d_i = -(d_f)$, y para los anteojos convencionales $d_i = -|d_f - d|$, donde d es la distancia entre los lentes normales y el ojo. Para especificar la distancia a la imagen se usa signo menos y valores absolutos, porque la imagen es virtual y está en el lado del objeto del lente. (Como recordará, en el capítulo 23 se explicó que las lentes divergentes sólo pueden formar imágenes virtuales.)

Nota: repase los ejemplos 23.6 y 23.8.

Nota: la formación de imágenes mediante lentes convergentes se explicó en la sección 23.3; véase la figura 23.18.

(continúa en la siguiente página)



▶ **FIGURA 25.3 Corrección de la miopía** Se usan lentes divergente. Véase el Ejemplo integrado 25.1. Sólo se muestran anteojos normales. Si los lentes son de contacto, están directamente frente al ojo ($d = 0$).

Advierta que d_i es negativa. Recuerde que la potencia de una lente es $P = 1/f$ (ecuación 23.9). Si se pueden determinar las distancias al objeto y a la imagen, d_o y d_i, se aplica la ecuación de la lente delgada (ecuación 23.5) para calcular P:

$$P = \frac{1}{f} = \frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{\infty} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{d_i} = -\frac{1}{|d_i|}$$

Esto es, una mayor $|d_i|$ causará una menor P, por lo que los lentes de contacto deben tener menor potencia que los anteojos convencionales. Por consiguiente, la respuesta es 3.

b) Razonamiento cuantitativo y solución. Una vez comprendido el funcionamiento de los lentes correctivos, el cálculo de la parte *b* es directo.

Dado: $d_f = 78$ cm $= 0.780$ m (punto lejano)
$d = 3.0$ cm $= 0.0300$ m

Encuentre: P (en dioptrías) para anteojos normales
P (en dioptrías) para lentes de contacto

Para anteojos normales,

$$|d_i| = |d_f - d| = 0.780 \text{ m} - 0.0300 \text{ m} = 0.750 \text{ m}$$

(Véase la figura 25.3, considerando que no está a escala.) Por consiguiente, $d_i = -0.750$ m.

Entonces, aplicando la ecuación de la lente delgada, se obtiene

$$P = \frac{1}{f} = \frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{\infty} + \frac{1}{-0.750 \text{ m}} = -\frac{1}{0.750 \text{ m}} = -1.33 \text{ D}$$

Se necesita una lente negativa, o divergente, con una potencia de 1.33 D.

Para lentes de contacto:

$$|d_i| = |d_f| = 0.780 \text{ m}$$

(ya que $d = 0$). Entonces, $d_i = -0.78$ m.

Entonces se aplica la ecuación de la lente delgada para obtener

$$P = \frac{1}{\infty} + \frac{1}{-0.780 \text{ m}} = -\frac{1}{0.780 \text{ m}} = -1.28 \text{ D}$$

Ejercicio de refuerzo. Supongamos que se cometió un error en los anteojos normales de este ejemplo de manera que se usarán lentes "de corrección" de +1.33 D. ¿Qué sucederá con la imagen de objetos en el infinito? (*Las respuestas a todos los ejercicios de refuerzo aparecen al final del libro.*)

Si el punto lejano cambia utilizando anteojos o lentes de contacto de corrección (véase el ejemplo 25.1), también se afectará el punto cercano. Esto hace que la visión cercana empeore, pero en tal caso se pueden usar *lentes bifocales* para resolver el problema. Benjamin Franklin inventó los bifocales al pegar dos lentes. En la actualidad se fabrican tallando o moldeando lentes con diferentes curvaturas en dos regiones distintas. Con los bifocales se corrige tanto la miopía como la hipermetropía. También existen trifocales, que tienen lentes con tres curvaturas distintas. El lente superior es para la visión lejana y el inferior para la visión cercana. El lente de en medio es para la visión intermedia.

Técnicas más modernas implican la terapia con lentes de contacto o el uso del láser para corregir la miopía. Esto se explica en detalle en la sección A fondo 25.1 de la siguiente página, sobre cirugía y corrección de la córnea. La finalidad de cualquiera de las dos técnicas es cambiar la forma de la superficie expuesta de la córnea, que entonces modifica sus características refringentes. El resultado, en el caso de la miopía, es que la imagen de un objeto lejano cae en la retina.

A FONDO 25.1 CORRECCIÓN DE LA CÓRNEA Y CIRUGÍA

Las formas o superficies imperfectas de la córnea son causa frecuente de errores de refringencia que, a su vez, provocan defectos de visión. Por ejemplo, una córnea con demasiada curvatura causa miopía, mientras que una más aplanada de lo normal causa hipermetropía; y una superficie irregular de la córnea provoca astigmatismo (sección 23.4).

En fecha reciente se ha desarrollado un tratamiento no quirúrgico, a base de lentes de contacto, para mejorar la visión en cuestión de horas. Este procedimiento, llamado *ortoqueratología*, u *Ortho-K*, se realiza en una forma única, pues supone usar lentes de contacto especialmente diseñadas para el paciente. Estas lentes de contacto modifican lentamente la forma de la córnea por medio de una suave presión que mejora la visión de manera rápida y segura. Una buena analogía para describir el procedimiento Ortho-K es el de "ortodoncia para el ojo".

También se utiliza la cirugía con láser para modificar la forma de la córnea. El procedimiento quirúrgico corrige la forma defectuosa o la superficie irregular de la córnea para que ésta pueda enfocar mejor la luz en la retina, lo que reduce o incluso elimina los defectos de visión (figura 1).

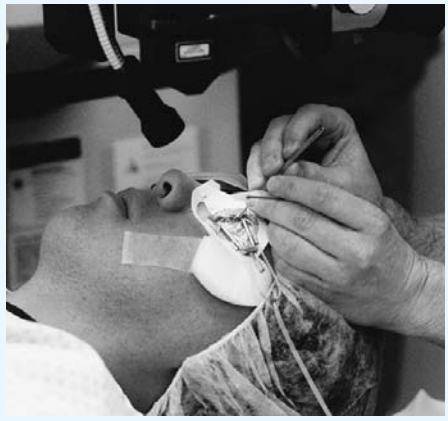


FIGURA 1 Cirugía del ojo La cirugía con láser se practica para corregir la forma de la córnea. Cabe destacar que el cirujano no usa guantes de látex. El talco fino que se utiliza en ellos como lubricante podría contaminar el ojo.

En la cirugía con láser primero se emplea un instrumento muy preciso, llamado *microqueratomo* para producir una capa delgada de la córnea, que queda unida a ésta por un lado (figura 2a). Una vez hecha la capa y doblada hacia atrás, se usa un láser ultravioleta pulsado y enfocado con precisión para dar la forma deseada a la córnea. Cada impulso de láser quita una capa microscópica de la córnea interna del área que se va a modificar para corregir los defectos de la visión (figura 2b). Luego se reinstala la capa de la córnea en su posición original sin necesidad de dar puntadas (figura 2c). El procedimiento suele ser indoloro y los pacientes sólo padecen incomodidades mínimas. Algunos pacientes han reportado que su problema de visión se corrigió al día siguiente de que se realizó el procedimiento.

Todavía se prevén más avances en el tratamiento de la visión. Por ejemplo, se han desarrollado técnicas para reemplazar una córnea dañada con tejidos que se producen gracias a la bioingeniería. Si el paciente tiene un ojo saludable, se cosechan células primarias de él para cultivarlas. Las células crecerán y formarán una capa robusta de tejido, que servirá para reemplazar los tejidos de la córnea dañada. Si el paciente tiene ambos ojos dañados, es posible obtener tejidos donados por los parientes más cercanos.

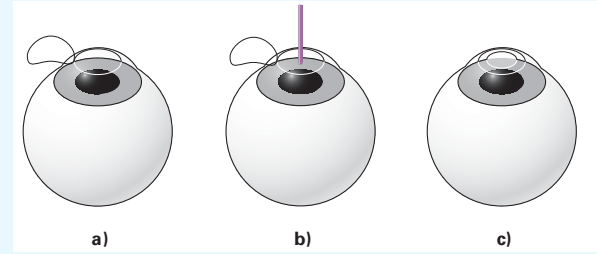


FIGURA 2 Moldeado de la córnea ***a)*** Se levanta una capa en la superficie de la córnea. ***b)*** Se usa un rayo láser para moldear la córnea. ***c)*** Se vuelve a colocar la capa.

Ejemplo integrado 25.2 ■ Corrección de hipermetropía: uso de una lente convergente

Una persona hipermétrope tiene un punto cercano de 75 cm en el ojo izquierdo, y de 100 cm en el derecho. *a*) Si usa lentes de contacto, la potencia del lente para el ojo izquierdo debe ser 1) mayor, 2) igual o 3) menor que la potencia del lente para el ojo derecho. Explique por qué. *b*) ¿Qué potencias deben tener los lentes de contacto para que le permitan ver con claridad un objeto a 25 cm de distancia?

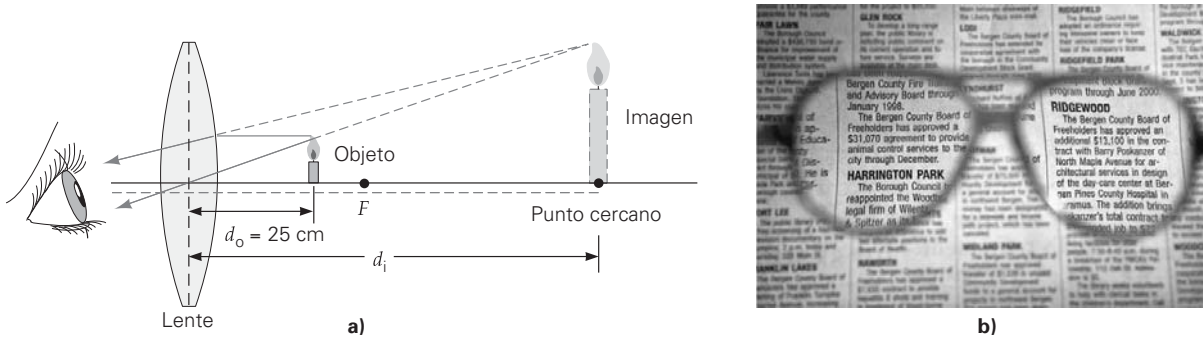
a) Razonamiento conceptual. El punto cercano de un ojo normal es de 25 cm. Para la hipermetropía, el lente de corrección debe ser convergente, y debe formar la imagen en el punto cercano del ojo que coincida con el punto cercano normal. Como el punto cercano del ojo izquierdo (75 cm) está más cercano a la posición normal de 25 cm que el ojo derecho, el lente izquierdo debería tener menor potencia, así que la respuesta correcta es la 3.

b) Razonamiento cuantitativo y solución. Se identificarán los ojos como L (izquierdo) y R (derecho). Las distancias a la imagen son negativas. (¿Por qué?)

Dado: $d_{i_L} = -75\text{ cm} = -0.75\text{ m}$
$d_{i_R} = -100\text{ cm} = -1.0\text{ m}$
$d_o = 25\text{ cm} = 0.25\text{ m}$

Encuentre: P_1 y P_2 (la potencia del lente para cada ojo)

(continúa en la siguiente página)



▲ **FIGURA 25.4 Anteojos para lectura y corrección de la hipermetropía** ***a)*** Cuando se ve un objeto en el punto cercano normal (25 cm) con anteojos para lectura que tengan lentes convergentes, la imagen se forma más lejos, pero dentro del intervalo de acomodamiento del ojo (más allá del punto cercano, que ya está atrasado). Véase el Ejemplo integrado 25.2. ***b)*** Letras pequeñas vistas con anteojos para lectura. La cámara que se usó para tomar esta foto está enfocada atrás de la página, donde se ubica la imagen virtual.

Las ópticas de los ojos de una persona suelen ser distintas, como en este problema, y normalmente se requiere una receta distinta para cada uno. En este caso, cada lente debe formar una imagen en el punto cercano del ojo para un objeto que esté a la distancia (d_o) de 0.25 m. Entonces la imagen actuará como objeto dentro del intervalo de acomodamiento del ojo. Este caso es el de una persona que usa anteojos para leer (▲figura 25.4). (Para tener mayor claridad, el lente de la figura 25.4a no está en contacto con el ojo.)

Las distancias a la imagen son negativas, porque las imágenes son virtuales (es decir, la imagen está en el mismo lado que el objeto). Con los lentes de contacto, la distancia del ojo al objeto y la del lente al objeto se suponen iguales. Entonces

$$P_L = \frac{1}{f_L} = \frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_{i_L}} = \frac{1}{0.25\text{ m}} - \frac{1}{0.75\text{ m}} = \frac{2}{0.75\text{ m}} = +2.7\text{ D}$$

y

$$P_R = \frac{1}{f_R} = \frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_{i_R}} = \frac{1}{0.25\text{ m}} - \frac{1}{1.0\text{ m}} = \frac{3}{1.0\text{ m}} = +3.0\text{ D}$$

Note que el lente izquierdo tiene menor potencia que el derecho, como se esperaba.

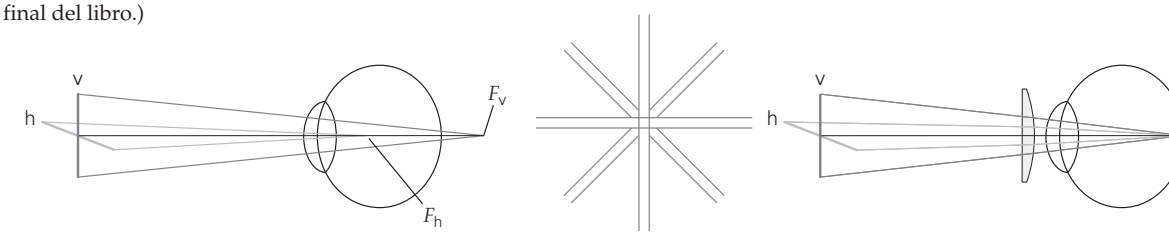
Ejercicio de refuerzo. Se cometió un error al tallar o moldear los lentes de corrección de este ejemplo: el lente para el ojo derecho se talló con la receta para el ojo izquierdo, y viceversa. Analice qué sucede a las imágenes de un objeto a una distancia de 25 cm.

Otro defecto común de la visión es el **astigmatismo**, que se presenta cuando una superficie refringente, como la córnea o el cristalino, no es esférica. En consecuencia, el ojo tiene distancias focales diferentes en distintos planos (▼figura 25.5a). Los puntos pueden aparecer como rayas, y la imagen de una raya puede estar bien definida en una dirección y borrosa en otra, o borrosa en ambas direcciones. En la figura 25.5b se muestra una prueba para el astigmatismo.

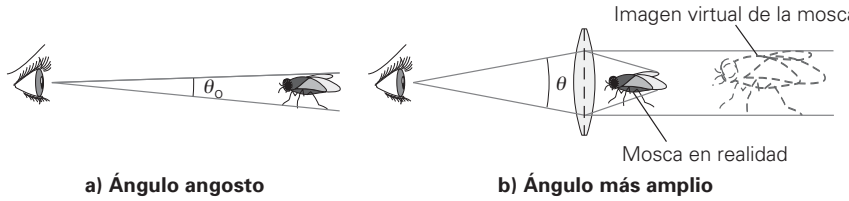
El astigmatismo se corrige con lentes que tengan mayor curvatura en el plano en el que la curvatura del cristalino o la córnea sean deficientes (figura 25.5c). El astigmatismo se reduce con la luz brillante, porque la pupila del ojo se hace más pequeña y al ojo sólo entran rayos cercanos al eje, evitando las orillas de la córnea.

Es probable que usted haya oído hablar de la *visión 20/20*. Pero, ¿qué es? La *agudeza visual* es una medida de cómo se afecta la visión en función de la distancia al objeto. Esta cantidad se determina con una tabla de letras, que se coloca a cierta distancia de los ojos. El resultado se expresa como una fracción: el *numerador* es la distancia a la cual el ojo que se somete a prueba ve con claridad un símbolo común, como la letra "E"; el *denominador* es la distancia a la cual un ojo *normal* ve con claridad la letra. Una califica-

▼ **FIGURA 25.5 Astigmatismo** Cuando una de las partes refringentes del ojo no es esférica, el ojo tiene diferentes distancias focales en distintos planos. ***a)*** El efecto se debe a que los rayos en el plano vertical (rojo) y en el plano horizontal (azul) se enfocan en puntos distintos: F_v y F_h, respectivamente. ***b)*** Para alguien que tenga ojos astigmáticos, algunas o todas las líneas de este diagrama le parecerán borrosas. ***c)*** Los lentes no esféricos, como los cilíndricos planoconvexos, se usan para corregir el astigmatismo. (Véase el pliego a color al final del libro.)



a) Astigmatismo sin corregir b) Prueba del astigmatismo c) Corrección con lentes



◀ **FIGURA 25.6** Aumento y ángulo ***a)*** Lo grande que parece un objeto se relaciona con el ángulo que subtiende o abarca. ***b)*** El ángulo y el tamaño de la imagen virtual de un objeto aumentan con un lente convergente.

ción de 20/20 (prueba/normal), que a veces se llama visión "perfecta", quiere decir que a 20 pies de distancia el ojo que se prueba distingue letras de tamaño estándar con tanta claridad como un ojo normal.

25.2 Microscopios

OBJETIVOS: *a*) Diferenciar entre aumento lateral y aumento angular y *b*) describir los microscopios simples y compuestos, así como sus aumentos.

Los microscopios se usan para amplificar los objetos y así poder verlos con más detalle y observar características que, de otra forma, no se podrían estudiar. A continuación se describirán dos tipos básicos de microscopio.

La lente de aumento (microscopio simple)

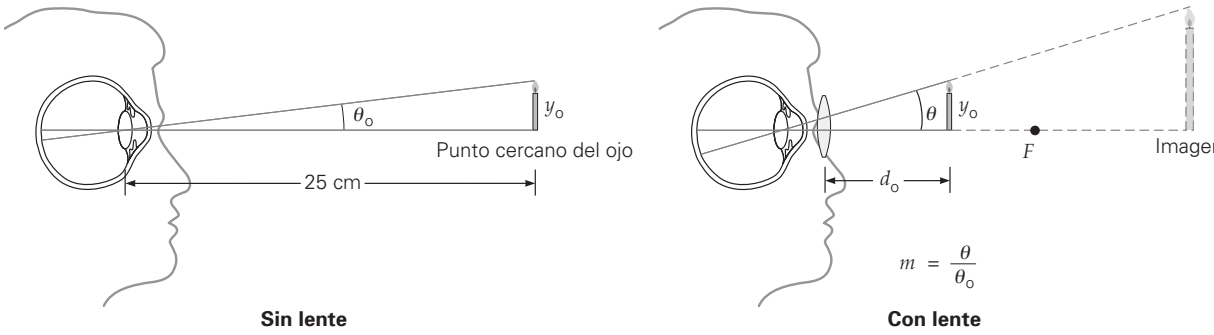
Cuando vemos un objeto lejano, parece muy pequeño. Conforme nuestros ojos se acercan, el objeto parece mayor. Esa dimensión depende del tamaño de la imagen en la retina, que se relaciona con el ángulo que subtiende el objeto (▲figura 25.6): cuanto mayor es el ángulo, más grande resulta la imagen.

Cuando se desea examinar los detalles de un objeto u observar algo con detenimiento, acercamos nuestros ojos para que el objeto subtienda un ángulo mayor. Por ejemplo, usted podrá examinar el detalle de una figura en este libro, acercándola a sus ojos. Verá la máxima cantidad de detalle cuando el libro esté en su punto cercano. Si sus ojos se pueden acomodar a menores distancias, un objeto muy cercano a ellos aparecería aún mayor. Sin embargo, como se demuestra con facilidad si acerca este libro a sus ojos, cuando los objetos están más próximos que el punto cercano, las imágenes son borrosas.

Una **lupa** o **lente de aumento**, que no es más que una simple lente convergente (a veces se le llama *microscopio simple*), forma una imagen clara de un objeto cuando está más próximo que el punto cercano (figura 23.15b). En esa posición, la imagen de un objeto subtiende un ángulo mayor y, en consecuencia, parece mayor o aumentada (▼figura 25.7). La lente produce una imagen virtual más allá del punto cercano que enfoca el ojo. Si se usa una lupa manual, es posible ajustar su posición hasta que la imagen se vea con claridad.

Como se ilustra en la figura 25.7, el ángulo subtendido por la imagen virtual de un objeto es mucho mayor cuando se usa una lupa. El aumento de un objeto *visto a través de una lupa* se expresa en función de este ángulo. Este **aumento angular** o poder de aumento, se representa con el símbolo m. El aumento angular se define como la relación

▼ **FIGURA 25.7** Aumento angular El aumento angular (m) de una lente se define como la relación entre el tamaño angular de un objeto, visto a través de la lente, y el tamaño angular sin la lente: $m = \theta/\theta_o$.



Nota: el aumento angular no es igual al aumento lateral, que se describió en la sección 23.1 (véase la ecuación 23.1).

entre el tamaño angular del objeto visto a través de la lupa (θ) y el tamaño angular del objeto visto sin la lupa (θ_o):

$$m = \frac{\theta}{\theta_o} \quad \textit{aumento angular} \tag{25.1}$$

(Esta m no es igual a la M que representa el aumento lateral y es una relación entre alturas: $M = h_i/h_o$.)

El aumento angular máximo se presenta cuando la imagen vista con la lupa está en el punto cercano del ojo, $d_i = -25$ cm, porque esa posición es la más cercana a la que se puede ver con claridad. (Se supondrá un valor de 25 cm como el normal del punto cercano en esta descripción. El signo menos se usa porque la imagen es virtual; véase el capítulo 23.) La distancia correspondiente al objeto se calcula con la ecuación de la lente delgada (ecuación 23.5) corno sigue:

$$d_o = \frac{d_i f}{d_i - f} = \frac{(-25\text{ cm})f}{-25\text{ cm} - f}$$

esto es,

$$d_o = \frac{(25\text{ cm})f}{25\text{ cm} + f} \tag{25.2}$$

donde f se debe expresar en centímetros.

Los tamaños angulares del objeto se relacionan con su altura como sigue:

$$\tan\theta_o = \frac{y_o}{25} \qquad \text{y} \qquad \tan\theta = \frac{y_o}{d_o}$$

(Véase la figura 25.7.) Suponiendo válida una aproximación para ángulo pequeño ($\tan\theta \approx \theta$), se obtiene

$$\theta_o \approx \frac{y_o}{25} \qquad \text{y} \qquad \theta \approx \frac{y_o}{d_o}$$

Entonces, el aumento angular máximo se expresa como sigue:

$$m = \frac{\theta}{\theta_o} = \frac{y_o/d_o}{y_o/25} = \frac{25}{d_o}$$

Al sustituir d_o de la ecuación 25.2, se obtiene

$$m = \frac{25}{25f/(25 + f)}$$

que se simplifica a

$$m = 1 + \frac{25\text{ cm}}{f} \quad \textit{aumento angular con la imagen en el punto cercano (25 cm)} \tag{25.3}$$

donde f está en centímetros. Las lentes con menores distancias focales producen mayores aumentos angulares.

Para deducir la ecuación 25.3 se supuso que el objeto visto por el ojo sin ayuda está en el punto cercano, al igual que la imagen que se ve en la lente. En realidad, el ojo normal puede enfocar una imagen ubicada en cualquier lugar entre el punto cercano y el infinito. En el extremo, cuando la imagen está en el infinito, el ojo está más relajado; los músculos fijos al cristalino están relajados y el cristalino es delgado. Para que la imagen esté en el infinito, el objeto debe estar en el punto focal de la lente. En este caso,

$$\theta \approx \frac{y_o}{f}$$

y el aumento angular es

$$m = \frac{25\text{ cm}}{f} \quad \textit{aumento angular con la imagen en el infinito} \tag{25.4}$$

Desde el punto de vista matemático, parece que el poder de aumento se puede incrementar hasta cualquier valor que se desee, usando lentes que tengan distancias focales suficientemente cortas. Sin embargo, desde el punto de vista físico, las aberraciones de las lentes limitan el intervalo práctico de empleo de las lupas, hasta 3 o 4×, es decir, una imagen aumentada a 3 o 4 veces el tamaño del objeto, cuando se usan normalmente.

Ejemplo 25.3 ■ Elemental: aumento angular de una lupa

Sherlock Holmes usa una lupa con 12 cm de distancia focal, para examinar el detalle fino de unas fibras textiles en la escena de un crimen. *a*) ¿Cuál es el aumento máximo que da la lupa? *b*) ¿Cuál es el aumento para ver con ojo relajado?

Razonamiento. En este caso se aplican las ecuaciones 25.3 y 25.4. El inciso *a* pide el aumento máximo, que se describió al deducir la ecuación 25.3, y se presenta cuando la imagen formada por la lente está en el punto cercano del ojo. Para contestar la parte *b*, note que el ojo está más relajado cuando ve objetos lejanos.

Solución.

Dado: $f = 12$ cm

Encuentre: *a*) m (d_i = punto cercano)
b) m ($d_i = \infty$)

a) Se supuso que el punto cercano está a 25 cm en la ecuación 25.3:

$$m = 1 + \frac{25\text{ cm}}{f} = 1 + \frac{25\text{ cm}}{12\text{ cm}} = 3.1\times$$

b) La ecuación 25.4 determina el aumento de la imagen que forma la lente en el infinito:

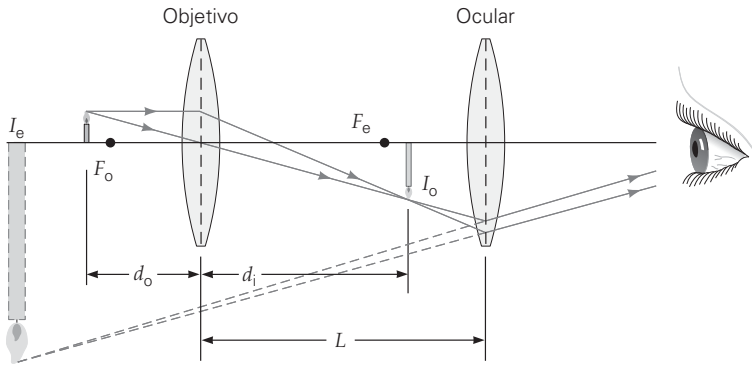
$$m = \frac{25\text{ cm}}{f} = \frac{25\text{ cm}}{12\text{ cm}} = 2.1\times$$

Ejercicio de refuerzo. Suponiendo que el aumento práctico máximo de una lupa es 4×, ¿qué tendría más distancia focal, una lupa para ver el punto cercano, o una para punto lejano? ¿Cuánta distancia más?

El microscopio compuesto

Un microscopio compuesto da más aumento que el que se consigue con una sola lente, o microscopio simple. Un **microscopio compuesto** básico consiste en un par de lentes convergentes, cada una de las cuales contribuye al aumento (▼figura 25.8a). La lente convergente con distancia focal relativamente corta ($f_o < 1$ cm) se llama **objetivo**. Produce una imagen real, invertida y agrandada de un objeto colocado un poco más allá de su foco. La otra lente, llamada **ocular**, tiene mayor distancia focal (f_e de algunos centímetros) y se coloca de manera que la imagen que forma el objetivo cae justo *dentro* de su foco, es decir, un poco más cerca que su foco. Esta lente forma una imagen virtual, aumentada e invertida, que ve el observador. En esencia, el objetivo produce una imagen real, y el ocular no es más que una lupa.

El **aumento total (m_{total})** de una combinación de lentes es igual al *producto* de los aumentos que produce cada una. La imagen formada por el objetivo es mayor que su objeto por un factor M_o igual al aumento lateral ($M_o = -d_i/d_o$). Note que en la figura 25.8a la distancia a la imagen, para la lente objetivo, es aproximadamente igual a L, la distancia entre las lentes; esto es, $d_i \approx L$. (El objetivo forma la imagen I_o justo dentro



a)

b)

▼ **FIGURA 25.8** El microscopio compuesto ***a)*** En el sistema óptico de un microscopio compuesto, la imagen real formada por el objetivo está justo atrás del foco del ocular (F_e) y funciona como objeto para esta lente. Un observador que vea por el ocular verá una imagen ampliada. ***b)*** Un microscopio compuesto.

Nota: sería de ayuda repasar la sección 23.3 y la figura 23.15.

del foco del ocular.) Además, como el objeto está muy cercano al foco del objetivo, $d_o \approx f_o$. Con estas aproximaciones

$$M_o \approx -\frac{L}{f_o}$$

La ecuación 25.4 define el aumento angular de un ocular para una imagen en el infinito:

$$m_e = \frac{25\text{ cm}}{f_e}$$

Como el objeto para el ocular (que es la imagen formada por el objetivo) está muy cerca de su foco, una buena aproximación es

$$m_{\text{total}} = M_o m_e = -\left(\frac{L}{f_o}\right)\left(\frac{25\text{ cm}}{f_e}\right)$$

o bien

$$m_{\text{total}} = -\frac{(25\text{ cm})L}{f_o f_e} \qquad \textit{aumento angular del microscopio compuesto} \tag{25.5}$$

donde f_o, f_e y L se expresan en centímetros.

El aumento angular de un microscopio compuesto es negativo, lo que indica que la imagen final está invertida, en comparación con la orientación inicial del objeto. Sin embargo, con frecuencia sólo se menciona el aumento (un microscopio de 100×, y no de −100×).

Ejemplo 25.4 ■ Microscopio compuesto: cálculo del aumento

Un microscopio tiene un objetivo, cuya distancia focal es de 10 mm, y un ocular con 4.0 cm de distancia focal. Las lentes se colocan a 20 cm de distancia entre sí, en el tubo. Calcule el aumento total aproximado del microscopio.

Razonamiento. Se trata de una aplicación directa de la ecuación 25.5.

Solución.

Dado: $f_o = 10\text{ mm} = 1.0\text{ cm}$, $f_e = 4.0\text{ cm}$, $L = 20\text{ cm}$

Encuentre: m_{total} (aumento total)

Al usar la ecuación 25.5, se obtiene

$$m_{\text{total}} = -\frac{(25\text{ cm})L}{f_o f_e} = -\frac{(25\text{ cm})(20\text{ cm})}{(1.0\text{ cm})(4.0\text{ cm})} = -125\times$$

Note la distancia focal relativamente corta del objetivo. El signo negativo indica que la imagen está invertida.

Ejercicio de refuerzo. Si la distancia focal del ocular en este ejemplo aumentara al doble, ¿cómo tendría que modificarse la longitud del microscopio para obtener el mismo aumento? (Exprese el cambio como un porcentaje.)

En la figura 25.8b se observa un microscopio compuesto moderno. Existen objetivos intercambiables con aumentos desde 5× hasta más de 100×. Para el trabajo normal en biología o los laboratorios médicos se utilizan objetivos de 5 y 10×. Con frecuencia, los microscopios tienen revólveres para tres objetivos que ofrecen distintos aumentos, por ejemplo, 10, 43 y 97×. Estos objetivos se pueden usar con oculares de 5 y 10× en diversas combinaciones para obtener aumentos de 50 hasta 970×. El aumento máximo que se obtiene con un microscopio compuesto es, aproximadamente, 2000×.

Por lo regular, los objetos opacos se iluminan con una fuente de luz que se coloca sobre ellos. Los especímenes que son transparentes, como las células o los cortes delgados de tejidos que se colocan en el portaobjetos, se iluminan con la fuente de luz bajo la platina del microscopio para que la luz atraviese al espécimen. Un microscopio moderno tiene un condensador de luz (lente convergente) y un diafragma bajo la platina, con los que se concentra la luz y se controla su intensidad. Algunos microscopios tienen una fuente luminosa interna. La luz se refleja de un espejo al condensador. Los

microscopios antiguos tenían dos espejos: uno era plano, para reflejar la luz de una fuente externa de gran intensidad, y el otro cóncavo para la luz convergente de baja intensidad, como la de la luz del cielo.

25.3 Telescopios

OBJETIVOS: *a*) Diferenciar entre telescopios refractores y reflectores y *b*) describir las ventajas de cada uno.

En los telescopios se aplican los principios ópticos de los espejos y las lentes para mejorar nuestra capacidad de ver objetos lejanos. Se utilizan para hacer observaciones terrestres y astronómicas, para ver algunos objetos con mayor detalle, o simplemente para distinguir otros objetos más distantes. En esencia, hay dos clases de telescopios: los refractores y los reflectores, que se caracterizan por usar lentes o espejos, respectivamente, para reunir la luz y hacerla converger.

Telescopio refractor

El principio en el que se basa un tipo de **telescopio refractor** es similar al de un microscopio compuesto. Los componentes principales de un telescopio refractor son las lentes objetivo y ocular, como se ve en la ▼figura 25.9. El objetivo es una lente convergente grande, con gran distancia focal, y el ocular móvil tiene una distancia focal relativamente corta. Los rayos procedentes de un objeto lejano son paralelos en esencia, y forman una imagen (I_o) en el foco (F_o) del objetivo. Esta imagen funciona como objeto para el ocular, que se mueve hasta que la imagen está justo dentro de su foco (F_e). El observador ve una imagen grande, invertida y virtual (I_e).

Para tener una visión relajada, el ocular se ajusta de tal forma que su imagen (I_e) esté en el infinito, lo que significa que la imagen del objetivo (I_o) está en el foco del ocular (f_e). Como se ilustra en la figura 25.9, la distancia entre las lentes es entonces la suma de las distancias focales ($f_o + f_e$), que es la longitud del tubo del telescopio. El **poder de aumento de un telescopio refractor** enfocado para que la imagen final esté en el infinito es

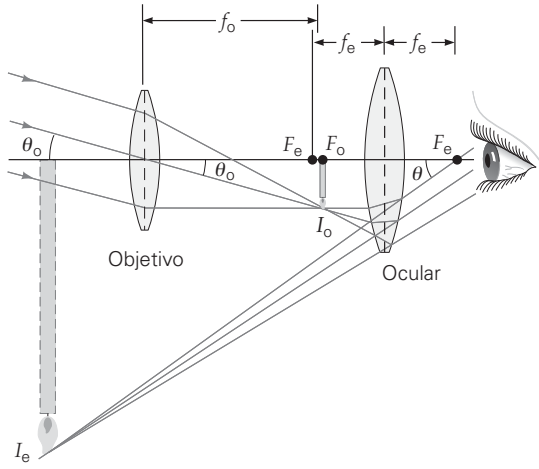
$$m = -\frac{f_o}{f_e} \qquad \textit{aumento angular del telescopio refractor} \qquad (25.6)$$

donde se intercala el signo menos para indicar que la imagen es invertida, de acuerdo con la convención de signos para lentes, en la sección 23.3. Así, para alcanzar el aumento máximo, la distancia focal del objetivo debe ser la mayor posible, y la distancia focal del ocular la menor posible.

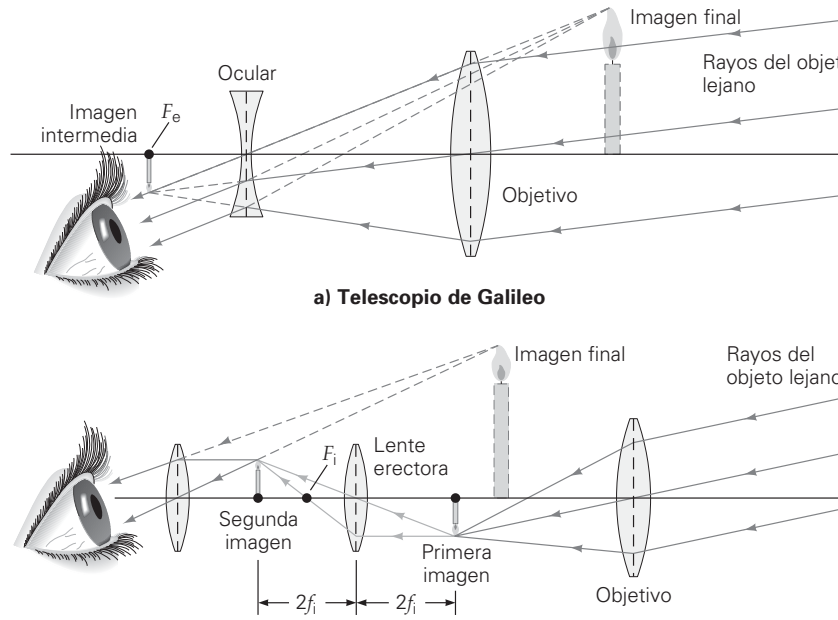
El telescopio de la figura 25.9 se llama **telescopio astronómico**. La imagen final que produce un telescopio astronómico es invertida, pero esta condición no significa un problema para los astrónomos. (¿Por qué?) Sin embargo, para quien vea en la Tie-

PHYSLET®
Exploración 36.2 Telescopio

Nota: los telescopios astronómicos producen una imagen invertida.



◀ **FIGURA 25.9 El telescopio astronómico refractor** En un telescopio astronómico, los rayos de un objeto lejano forman una imagen intermedia (I_o) en el foco del objetivo (F_o). El ocular se mueve de tal forma que la imagen quede en su punto focal (F_e), o un poco más cerca. Un observador ve una imagen ampliada en el infinito (I_e, que aquí se muestra a una distancia finita con fines ilustrativos).



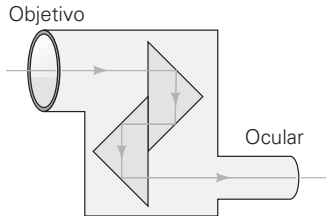
▶ **FIGURA 25.10 Telescopios terrestres** ***a)*** En un telescopio de Galileo se usa una lente divergente como ocular, y se producen imágenes virtuales derechas. ***b)*** Otra forma de producir imágenes derechas es usar una lente "erectora" convergente (con distancia focal f_i) entre el objetivo y el ocular, en un telescopio astronómico. Esta adición alarga el telescopio, pero la longitud se puede acortar usando prismas de reflexión interna.

rra un objeto con un telescopio lo más conveniente es que la imagen esté derecha. Un telescopio en el que la imagen final es derecha se llama **telescopio terrestre**. Una imagen final derecha se puede obtener de varias formas; dos de ellas se ilustran en la ▲figura 25.10.

En el telescopio de la figura 25.10a hay una lente divergente que se usa como ocular. Esta clase de telescopio terrestre se llama *telescopio de Galileo*, porque Galileo construyó uno así en 1609. El objetivo forma una imagen real a la izquierda del ocular, y esta imagen funciona como objeto "virtual" para el ocular (véase la sección 23.3). Un observador ve una imagen aumentada, derecha y virtual. (Note que con una lente divergente y distancia focal negativa, la ecuación 25.6 da como resultado una m positiva, lo que indica que la imagen es derecha.)

Los telescopios de Galileo tienen varias desventajas; una es que sus campos de visión son muy estrechos, y la otra, que su aumento es limitado. En la figura 25.10b se muestra un tipo mejor de telescopio terrestre, que usa una tercera lente, llamada *lente erectora* o *lente inversora*, entre las lentes convergentes objetivo y ocular. Si el objetivo forma la imagen a una distancia que sea el doble de la distancia focal de la lente erectora intermedia ($2f_i$), la lente sólo invierte la imagen sin aumentarla y el aumento del telescopio se sigue calculando con la ecuación 25.6.

Sin embargo, para obtener la imagen derecha con este método, se requiere una mayor longitud del telescopio. Al usar la lente erectora intermedia para invertir la imagen, la longitud del telescopio aumenta cuatro veces la distancia focal de la lente erectora ($2f_i$ a cada lado). Esta longitud inconveniente se puede evitar utilizando prismas de reflexión interna. Éste es el principio de los binoculares prismáticos, que en realidad son telescopios dobles, uno para cada ojo (◂figura 25.11).



▲ **FIGURA 25.11 Prismáticos** Corte esquemático de un ocular (la mitad de un par de binoculares prismáticos) donde se indican las reflexiones internas en los prismas, que reducen la longitud física general.

Ejemplo 25.5 ■ Telescopio astronómico (y un telescopio terrestre más largo)

Un telescopio astronómico tiene un objetivo con 30 cm de distancia focal, y un ocular con 9.0 cm de distancia focal. *a)* ¿Cuál es el aumento del telescopio? *b)* Si se emplea una lente erectora con una distancia focal de 7.5 cm para convertir al telescopio en uno terrestre, ¿cuál será la longitud general del tubo del telescopio?

Razonamiento. La ecuación 25.6 se aplica directamente en el inciso *a*. En la parte *b*, la lente inversora alarga el telescopio en cuatro veces su distancia focal ($4f_i$) (figura 25.10b).

Solución. La lista de datos es la siguiente:

Dado: $f_o = 30$ cm
$f_e = 9.0$ cm
$f_i = 7.5$ cm (lente erectora intermedia)

Encuentre: *a*) m (aumento)
b) L (longitud del tubo del telescopio)

a) El aumento se calcula con la ecuación 25.6:

$$m = -\frac{f_o}{f_e} = -\frac{30 \text{ cm}}{9.0 \text{ cm}} = -3.3\times$$

donde el signo menos indica que la imagen es invertida.

b) Suponiendo que la longitud del tubo del telescopio sea la distancia entre las lentes, se ve que esa longitud no es más que la suma de las distancias focales de éstas:

$$L_1 = f_o + f_e = 30 \text{ cm} + 9.0 \text{ cm} = 39 \text{ cm}$$

Entonces, la longitud total será

$$L = L_1 + L_2 = 39 \text{ cm} + 4f_i = 39 \text{ cm} + 4(7.5 \text{ cm}) = 69 \text{ cm}$$

Por consiguiente, el telescopio mide más de dos terceras partes de un metro y produce imágenes derechas, pero con el mismo aumento de 3.3×. (¿Por qué?)

Ejercicio de refuerzo. Un telescopio terrestre mide 66 cm de longitud, con una lente erectora intermedia con una distancia focal de 12 cm. ¿Cuál es la distancia focal de una lente erectora que podría reducir la longitud del telescopio a 50 cm, una longitud más cómoda?

Ejemplo conceptual 25.6 ■ Construcción de un telescopio

A un alumno se le dan dos lentes convergentes, una con distancia focal de 5.0 cm y la otra con 20 cm de distancia focal. Con este material tiene que construir un telescopio, que le permita ver mejor objetos lejanos; el alumno debe montar las lentes *a*) a más de 25 cm de distancia, *b*) a una distancia comprendida entre 20 y 25 cm, *c*) a una distancia comprendida entre 5.0 y 20 cm o *d*) a menos de 5.0 cm de distancia. Especifique cuál lente se debe usar como ocular.

Razonamiento y respuesta. Primero veamos cuál lente se debe usar como ocular. El único tipo de telescopio que se puede construir con dos lentes convergentes es un telescopio astronómico. En esta clase de telescopios, la lente con mayor distancia focal se usa como objetivo, para formar una imagen real de un objeto lejano. A continuación esta imagen se examina con la lente de menor distancia focal, que es el ocular y que se utiliza como si fuera una lupa simple.

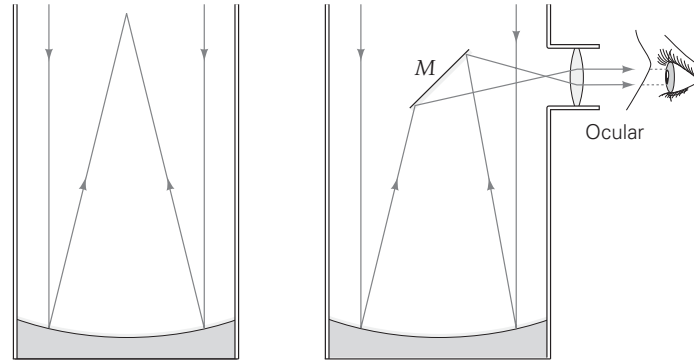
Si el objeto está a gran distancia, el objetivo forma una imagen real en su plano focal (figura 25.9). Esta imagen constituye el objeto para el ocular, que se coloca en tal forma que la imagen-objeto esté justo dentro de su foco, para producir una segunda imagen invertida.

Sin embargo, las dos lentes deben estar a *poco menos* de 25 cm de distancia, por lo que la respuesta *a* es incorrecta. Tampoco las respuestas *c* y *d* son correctas, porque el ocular estaría demasiado cerca del objetivo para producir la gran imagen secundaria necesaria para ver un objeto distante en forma óptima. En esos casos, los rayos pasarían por la segunda lente antes de formar la imagen y producirían una imagen *reducida* (véase la sección 23.3). Por todo lo anterior, la respuesta correcta es la *b*, con la imagen del objetivo justamente dentro del foco del ocular.

Ejercicio de refuerzo. Para obtener un telescopio terrestre se usa una tercera lente convergente, con una distancia focal de 4.0 cm, en combinación con las dos lentes antes mencionadas; la función de la tercera lente es la de invertir la imagen. ¿Cómo se deben montar las lentes y a qué distancia deben estar entre sí para que se forme una imagen final derecha y de tamaño máximo?

Telescopio reflector

Para ver el Sol, la Luna y los planetas cercanos es importante tener muchos aumentos para apreciar los detalles. Sin embargo, aun con el aumento máximo posible, las estrellas aparecen en el cielo sólo como débiles puntos de luz. Para observar las estrellas y las galaxias distantes, es más importante reunir la luz suficiente que tener un mayor aumento; de esta forma, se podrá no sólo ver el objeto, sino también analizar su espectro más rápidamente. La intensidad de la luz procedente de una fuente lejana es muy baja. En muchos casos, esa fuente sólo se detecta cuando su luz se reúne y enfoca en una placa fotográfica durante largo tiempo.



a) b)

▶ **FIGURA 25.12 Telescopios reflectores** En un telescopio se puede usar un espejo cóncavo para reunir la luz y formar una imagen de un objeto lejano. ***a)*** La imagen puede estar en el foco primario, o bien, ***b)*** se utilizan un espejo y una lente pequeños para enfocar la imagen fuera del telescopio; a esta configuración se le llama *foco newtoniano*.

Recuerde que en la sección 14.3 se explicó que la intensidad es la energía por unidad de tiempo y por unidad de *área*. Por lo tanto, será posible reunir más luz si se aumenta el tamaño del objetivo. Eso aumenta la distancia a la cual el telescopio puede detectar objetos con luz débil, como las galaxias lejanas. (Recuerde que la intensidad luminosa de una fuente puntual es inversamente proporcional al *cuadrado* de la distancia entre la fuente y el observador.) Sin embargo, la producción de una lente grande implica dificultades relacionadas con la calidad, el tallado y el pulido del vidrio. Se requieren sistemas de lentes compuestas, para reducir aberraciones; además, una lente muy grande podría "colgarse" bajo el influjo de su propio peso, produciendo más aberraciones. La lente objetivo de mayor tamaño que está en uso tiene 40 pulgadas (102 cm) de diámetro, y es parte del telescopio refractor del Observatorio Yerkes en Williams Bay, Wisconsin.

Los problemas anteriores se reducen con un **telescopio reflector** que usa un espejo parabólico grande y cóncavo (▲figura 25.12). Un espejo parabólico no tiene aberración esférica; y, en general, un espejo no tiene aberración cromática inherente. (¿Por qué?) No se necesita un vidrio de alta calidad, porque la luz se refleja en una superficie frontal de tipo especular. Sólo hay que tallar, pulir y platear una superficie.

El mayor telescopio de un solo espejo, que mide 8.2 m (323 in.) de diámetro, es el del Observatorio Europeo Meridional en Chile (▼figura 25.13a). El mayor telescopio reflector en Estados Unidos tiene un espejo de 5.1 m (200 in.) de diámetro y es el del Observatorio Hale, en Monte Palomar, California.

Aun cuando los telescopios reflectores tienen ventajas en comparación con los refractores, también presentan desventajas. Al igual que una lente grande, un espejo grande se puede colgar bajo su propio peso, y este último aumenta, necesariamente, con el tamaño del espejo. El factor peso también eleva los costos de construcción, porque los elementos de soporte para un espejo más pesado son enormes.

Estos problemas se están solucionando con las nuevas tecnologías. Un método consiste en usar un conjunto de espejos pequeños, configurados para que funcionen como un solo espejo enorme. Como ejemplos están los telescopios Keck gemelos en

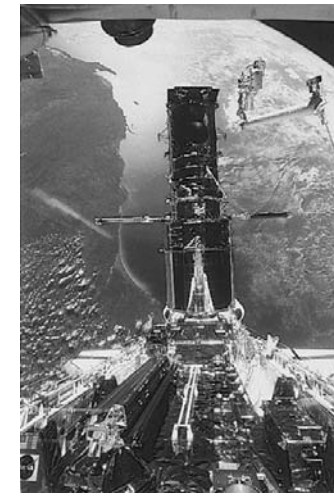
a) b)

▶ **FIGURA 25.13 Observatorio Europeo Meridional, cerca de Paranal, Chile** ***a)*** Un espejo de 8.2 m de diámetro en la fase final del pulido. ***b)*** Cuatro telescopios de 8.2 m formarán un telescopio VLT (*very large telescope*) con diámetro equivalente de 16 m.

Mauna Kea, Hawai. Cada uno tiene un espejo formado por 36 segmentos hexagonales, que se posicionan por medio de una computadora para obtener el equivalente a un espejo de 10 m de diámetro. El Observatorio Europeo Meridional tiene planes para construir cuatro espejos de 8.2 m de diámetro y formar un telescopio VLT (siglas para *very large telescope*) con un diámetro equivalente de 16 m (figura 25.13b).

Otra forma de ampliar nuestra visión en el espacio es enviar telescopios en órbita en torno a la Tierra. Sobre la atmósfera, la visión no se afecta por el efecto de centelleo que provocan la turbulencia y refracción atmosféricas, ni tampoco se presentan los problemas que suponen las luces de las ciudades. En 1990 se puso en órbita el Telescopio Espacial Hubble (▸figura 25.14). Aun cuando su espejo tiene un diámetro de sólo 2.4 m, su posición privilegiada le ha permitido obtener imágenes siete veces más nítidas que las que forman los telescopios en Tierra.

Por último, hay que hacer notar que no todos los telescopios funcionan en la región visible. Para ver más sobre esto, véase la sección A fondo 25.2 acerca de los telescopios que utilizan radiación no visible, en la p. 808.



▲ **FIGURA 25.14 Telescopio espacial Hubble (HST)** A fines de 1993, los astronautas del trasbordador espacial *Endeavor* visitaron el HST en órbita. Instalaron equipo corrector que compensó muchos de los errores ópticos del telescopio y reemplazaron otros sistemas que presentaban fallas. Actualmente, el HST de nuevo necesita reparaciones.

25.4 Difracción y resolución

OBJETIVOS: *a*) Describir la relación entre difracción y resolución y *b*) enunciar y explicar el criterio de Rayleigh.

La difracción de la luz establece un límite a nuestra capacidad de distinguir objetos cercanos entre sí, cuando usamos microscopios o telescopios. Este efecto se comprende mejor si imaginamos dos fuentes puntuales situadas lejos de una rendija angosta de ancho w (▾figura 25.15). Las fuentes podrían ser, por ejemplo, estrellas lejanas. En ausencia de la difracción se observarían dos manchas brillantes, o imágenes, en una pantalla. Sin embargo, como se explicó en la sección 24.3, la rendija difracta la luz y cada imagen consiste en un máximo central con una distribución de franjas brillantes y oscuras a cada lado. Si las fuentes están cercanas entre sí, es probable que los dos máximos centrales se traslapen. En tal caso, no se distinguen las imágenes; en otras palabras, las imágenes *no están resueltas*. Para *resolver* las imágenes, los máximos centrales no se deben traslapar en forma apreciable.

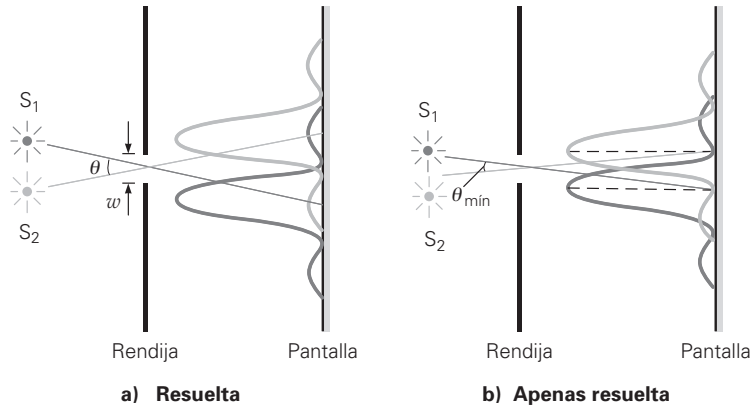
En general, es factible resolver imágenes de dos fuentes si el máximo central de una está en la primera franja oscura (o mínimo) de la otra o más allá. Fue Lord Rayleigh (1842-1919), un físico inglés, quien propuso por primera vez esta condición limitante para la **resolución** de dos imágenes —esto es, la capacidad de distinguirlas por separado—. Por eso, la condición se llama **criterio de Rayleigh**:

> Se dice que dos imágenes apenas se resuelven cuando el máximo central de una cae en el primer mínimo de la figura de difracción de la otra.

El criterio de Rayleigh se puede expresar en función de la separación angular (θ) de las fuentes (véase la figura 25.15). El primer mínimo ($m = 1$) de una figura de difracción formada por una sola rendija satisface la relación:

$$w \operatorname{sen} \theta = m\lambda = \lambda \qquad \text{o bien} \qquad \operatorname{sen} \theta = \frac{\lambda}{w}$$

De acuerdo con la figura 25.15, ésta es la separación angular mínima para que dos imágenes apenas se resuelvan, según el criterio de Rayleigh. En general, para la luz vi-



◀ **FIGURA 25.15 La resolución** Dos fuentes luminosas frente a una rendija producen figuras de difracción. ***a)*** Cuando el ángulo que subtienden las fuentes en la rendija es suficientemente grande para distinguir las figuras de difracción, se dice que las imágenes están resueltas. ***b)*** Cuando los ángulos son menores, los máximos centrales están próximos entre sí. En $\theta_{\text{mín}}$, el máximo central de la figura de difracción de una imagen cae en la primera franja oscura de la figura de la otra imagen, y se dice que las imágenes están apenas resueltas. Cuando los ángulos son menores, se dice que las figuras no están resueltas.

A FONDO 25.2 TELESCOPIOS PARA RADIACIÓN NO VISIBLE

La palabra *telescopio* se relaciona casi siempre con el acto de observar. Sin embargo, la región visible es una parte muy pequeña del espectro electromagnético, y los objetos celestes emiten radiaciones de muchas otras clases, incluyendo las ondas de radio. Fue el ingeniero Carl Jansky quien descubrió este hecho de manera fortuita en 1931, mientras trabajaba en el problema de la estática de interferencia en las radiocomunicaciones intercontinentales. Jansky encontró un ruido molesto de estática que provenía de una dirección fija en el espacio, aparentemente de una fuente celeste. Pronto se vio que las ondas de radio son otra fuente de información astronómica, y se construyeron radiotelescopios para investigar esa fuente.

Un radiotelescopio funciona en forma parecida a un telescopio óptico reflector. Un reflector de área grande reúne y enfoca las ondas de radio en un punto, donde un detector capta la señal (figura 1). El colector parabólico, llamado *plato*, está recubierto con malla de alambre metálico, o de placas metálicas. Como las longitudes de onda de radio van desde algunos milímetros hasta varios metros, la malla metálica es suficientemente "lisa" como para formar una buena superficie reflectora para las ondas de radio.

Los radiotelescopios complementan la labor de los telescopios ópticos, y tienen algunas ventajas definitivas sobre ellos. Por ejemplo, las ondas de radio atraviesan libremente las gigantescas nubes de polvo que esconden una gran parte de nuestra galaxia. Además, las ondas de radio penetran con facilidad a la atmósfera terrestre, que refleja y dispersa un gran porcentaje de la luz visible que le llega.

La luz infrarroja también resulta afectada por la atmósfera terrestre. Por ejemplo, el vapor de agua absorbe la radiación infrarroja. Así, las observaciones con telescopios infrarrojos se hacen a veces desde aviones que vuelan a gran altura, o en naves espaciales en órbita, que están más allá de la influencia del vapor de agua de la atmósfera. El primer observatorio infrarrojo *en órbita* fue lanzado en 1983. No sólo se eliminan las interferencias atmosféricas, sino que un telescopio puede enfriarse a temperaturas muy bajas sin cubrirse de vapor de agua condensado de la atmósfera. El enfriamiento del telescopio ayuda a eliminar la interferencia por radiación infrarroja generada por el telescopio mismo. El telescopio infrarrojo en órbita, lanzado en 1983, se enfriaba con helio líquido hasta unos 10 K; hizo un reconocimiento infrarrojo de todo el firmamento.

FIGURA 1 Radiotelescopios Algunas de las antenas de plato que forman el radiotelescopio VLA (*Very Large Array*) cerca de Socorro, Nuevo México. Hay 27 platos móviles, cada uno de 25 m de diámetro, que forman el conjunto dispuesto en una red en forma de Y. Los datos de todas las antenas se combinan para producir una sola imagen de radio. De esta forma, se logra una resolución equivalente a la de una antena gigante de radio (de unos 200 pies o 60 metros de diámetro).

La atmósfera es virtualmente opaca a la radiación ultravioleta, los rayos X y los rayos gamma procedentes de fuentes lejanas, así que los telescopios que detectan estos tipos de radiaciones no tienen su base en la Tierra. Los satélites en órbita, con telescopios sensibles a esas radiaciones, han cartografiado partes del cielo, y se planea realizar más estudios. Los observatorios que funcionan dentro de satélites en órbita en la región visible no se ven afectados por la turbulencia del aire o la refracción. Quizá en un futuro no muy lejano, un observatorio tripulado en órbita, con varios telescopios, reemplace al Hubble y contribuya a aumentar nuestro conocimiento del universo.

sible, la longitud de onda es mucho menor que el ancho de la rendija ($\lambda < w$), por lo que θ es pequeño y sen $\theta \approx \theta$. En este caso, el **ángulo limitante** o **mínimo de resolución ($\theta_{\text{mín}}$)** para una rendija de ancho w es

$$\theta_{\text{mín}} = \frac{\lambda}{w} \qquad \textit{ángulo mínimo de resolución (para una rendija)} \tag{25.7}$$

(Note que $\theta_{\text{mín}}$ es un número puro, por lo que debe expresarse en radianes.) Entonces, las imágenes de dos fuentes se resuelven *en forma distinta* si la separación angular de las fuentes es mayor que λ/w.

En general, las aberturas de las cámaras, los microscopios y los telescopios son circulares. Por esa razón, hay una figura de difracción *circular* en torno al máximo central, que tiene la forma de un disco circular brillante (▸figura 25.16). El análisis detallado para una abertura circular indica que el **ángulo mínimo de resolución para una abertura circular** para que apenas se resuelvan las imágenes de dos objetos es similar, aunque ligeramente diferente, al de la ecuación 25.7. Esto es

$$\theta_{\text{mín}} = \frac{1.22\lambda}{D} \qquad \textit{ángulo mínimo de resolución (para una abertura circular)} \tag{25.8}$$

en donde D es el diámetro de la abertura y $\theta_{\text{mín}}$ está en radianes.

La ecuación 25.8 se aplica al objetivo de un microscopio o un telescopio, o al iris del ojo, que se consideran aberturas circulares para la luz. De acuerdo con las ecuaciones 25.7 y 25.8, cuanto menor es $\theta_{\text{mín}}$, mejor es la resolución. El ángulo mínimo de reso-

lución, $\theta_{\text{mín}}$, debe ser pequeño para resolver los objetos cercanos entre sí; por consiguiente, la abertura debe ser tan *grande* como sea posible. Ésta es otra de las razones por las que se utilizan lentes (y espejos) grandes en los telescopios.

Ejemplo 25.7 ■ El ojo y el telescopio: evaluación de la resolución con el criterio de Rayleigh

Calcule el ángulo mínimo de resolución, con el criterio de Rayleigh, para *a*) la pupila del ojo (su diámetro en luz diurna es de unos 4.0 mm) con luz visible de 660 nm de longitud de onda; *b*) el telescopio reflector del Observatorio Europeo Meridional (de 8.2 m de diámetro), para la luz visible de la misma longitud de onda que la del inciso *a*, y *c*) un radiotelescopio de 25 m de diámetro, para radiación con 21 cm de longitud de onda.

Razonamiento. Ésta es una comparación de $\theta_{\text{mín}}$ para aberturas de distintos diámetros: una aplicación directa de la ecuación 25.8.

Solución.

Dado: *a*) $D = 4.0\text{ mm} = 4.0 \times 10^{-3}\text{ m}$
$\lambda = 660\text{ nm} = 6.60 \times 10^{-7}\text{ m}$
b) $D = 8.2\text{ m}$
$\lambda = 660\text{ nm} = 6.60 \times 10^{-7}\text{ m}$
c) $D = 25\text{ m}$
$\lambda = 21\text{ cm} = 0.21\text{ m}$

Encuentre: *a*) $\theta_{\text{mín}}$ (ángulos mínimos de resolución)
b) $\theta_{\text{mín}}$
c) $\theta_{\text{mín}}$

a) Para el ojo,

$$\theta_{\text{mín}} = \frac{1.22\lambda}{D} = \frac{1.22(6.60 \times 10^{-7}\text{ m})}{4.0 \times 10^{-3}\text{ m}} = 2.0 \times 10^{-4}\text{ rad}$$

b) Para el telescopio óptico,

$$\theta_{\text{mín}} = \frac{1.22(6.60 \times 10^{-7}\text{ m})}{8.2\text{ m}} = 9.8 \times 10^{-8}\text{ rad}$$

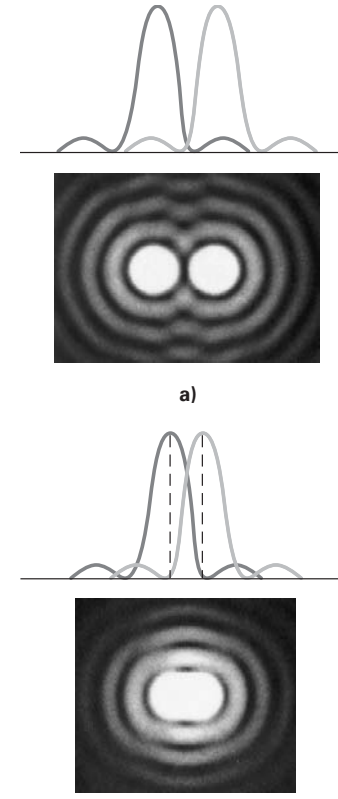
(*Nota:* la resolución de los telescopios terrestres con objetivos de gran diámetro no suele limitarse por la difracción, sino por otros efectos como la turbulencia atmosférica. Por eso, en la actualidad, estos telescopios tienen un $\theta_{\text{mín}}$ del orden de 10^{-6} rad, o una resolución tan buena como un décimo de la que se obtendría sin la atmósfera.)

c) Para el radiotelescopio

$$\theta_{\text{mín}} = \frac{1.22(0.21\text{ m})}{25\text{ m}} = 0.010\text{ rad}$$

Cuanto menor es la separación angular, mejor es la resolución. ¿Qué indican estos resultados?

Ejercicio de refuerzo. Como se dijo en la sección 25.3, el Telescopio Espacial Hubble tiene un diámetro de espejo de 2.4 m. ¿Cómo se compara su resolución con la de los mayores telescopios terrestres? (Véase la nota en la parte *b* de este ejemplo.)



▲ **FIGURA 25.16** Resolución con abertura circular ***a)*** Cuando la separación angular de dos objetos es suficientemente grande, las imágenes están bien resueltas. (Compare con la figura 25.15a.) ***b)*** Criterio de Rayleigh: el máximo central de la figura de difracción de una imagen cae en la primera franja oscura de la figura de difracción de la otra imagen. (Compare con la figura 25.15b.) Las imágenes de los objetos con menores separaciones angulares no se distinguen con claridad como imágenes individuales.

En el caso de un microscopio, es más conveniente especificar la separación real (s) entre dos fuentes puntuales. Como los objetos por lo regular están cerca del plano focal del objetivo, entonces, con buena aproximación

$$\theta_{\text{mín}} = \frac{s}{f} \qquad \text{o} \qquad s = f\theta_{\text{mín}}$$

donde f es la distancia focal de la lente y $\theta_{\text{mín}}$ se expresa en radianes. (Aquí, s se considera la longitud del arco subtendido por $\theta_{\text{mín}}$ y $s = r\theta_{\text{mín}} = f\theta_{\text{mín}}$.) Entonces, usando la ecuación 25.8, se obtiene

$$s = f\theta_{\text{mín}} = \frac{1.22\lambda f}{D} \qquad \textit{poder de resolución de un microscopio} \qquad (25.9)$$

Esta distancia mínima entre dos puntos cuyas imágenes apenas pueden resolverse se llama **poder de resolución** del microscopio. Observe que s es directamente proporcional a λ, así que una menor longitud de onda produce una mejor resolución. En la práctica, el poder de resolución de un microscopio indica la capacidad que tiene el objetivo para distinguir las estructuras de detalle fino en los especímenes. Véase en la ▼figura 25.17 otro ejemplo de la resolución en la vida real.

a) b) c)

▶ **FIGURA 25.17 La resolución en la vida real** *a*), *b*), *c*) Una secuencia de los faros de un automóvil que se acerca. En *a*, los faros casi no están resueltos por la abertura circular de la cámara (o de los ojos). Conforme el automóvil se acerca, la imagen de los faros se resuelve.

Ejemplo conceptual 25.8 ■ Paisaje desde el espacio: la Gran Muralla China

La Gran Muralla China medía originalmente 2400 km (1500 mi) de longitud, y su ancho aproximado en la base era de 6.0 m y de 3.7 m en la parte superior. En la actualidad, varios cientos de kilómetros de la muralla permanecen intactos (◂figura 25.18). Se dice que la muralla es la única construcción que un astronauta en órbita terrestre puede ver a ojo desnudo. Con el resultado de la parte *a* del ejemplo 25.7, compruebe si eso es cierto. (Ignore los efectos atmosféricos.)

Razonamiento y respuesta. A pesar de la longitud de la muralla, no sería visible desde el espacio a menos que su *ancho* ocupara el ángulo mínimo de resolución del ojo de un astronauta ($\theta_{\text{mín}} = 2.0 \times 10^{-4}$ rad, según el ejemplo 25.7). Las torres de vigilancia con techos mayores de 7.0 m de ancho estaban a cada 180 m a lo largo de la muralla, por lo que supondremos que la dimensión del ancho máximo observable debe ser de 7.0 m. (En realidad, es la longitud del arco circular que subtiende el ángulo, pero a ese radio, la longitud de la cuerda es casi igual a la longitud del arco circular. Véase el ejemplo 7.2 y elabore un esquema.)

Supongamos que el astronauta apenas puede distinguir la torre de vigilancia. Recuerde que $s = r\theta$ (ecuación 7.3), donde s es una aproximación del ancho máximo observable de la muralla, y r es la distancia radial (la altura, en este caso). Entonces, el astronauta tendría que estar, a lo sumo, a una distancia de

$$r = \frac{s}{\theta} = \frac{7.0\text{ m}}{2.0 \times 10^{-4}\text{ (rad)}} = 3.5 \times 10^{4}\text{ m} = 35\text{ km } (= 22\text{ mi})$$

Así que a más de 35 km, *no* sería posible ver la muralla a ojo desnudo. Los satélites están en órbita a unos 300 km (190 mi) o más sobre la Tierra. Así que la afirmación de la posibilidad de ver la muralla desde el espacio es falsa.

Ejercicio de refuerzo. ¿Cuál sería el diámetro mínimo del objetivo de un telescopio que permitiera ver la Gran Muralla a un astronauta en órbita a 300 km sobre la Tierra? (Supongamos que todas las condiciones son iguales a las que se describen en este ejemplo, y que la longitud de onda de la luz es 550 nm.)

▲ **FIGURA 25.18 La Gran Muralla** El corredor de la Gran Muralla China, que fue construida como fortificación a lo largo de la frontera norte de China.

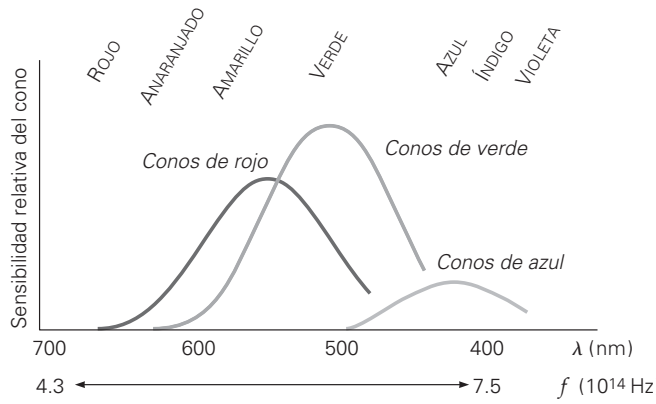
Nota: la relación entre la longitud de onda y el índice de refracción se explicó en la sección 22.3; véase la ecuación 22.4.

A partir de la ecuación 25.8, se sabe que es posible alcanzar la mayor resolución usando radiación de longitud de onda más corta. Así, un telescopio con un objetivo de determinado diámetro tendrá más resolución con la luz violeta que con la roja. En los microscopios es posible aumentar el poder de resolución acortando las longitudes de onda de la luz que se usa para crear la imagen. Eso se logra con un objetivo especial, llamado *lente de inmersión en aceite*. Cuando se utiliza esa lente, se pone una gota de aceite transparente que llena el espacio entre el objetivo y el espécimen. Recuerde que la longitud de onda de la luz en el aceite es $\lambda' = \lambda/n$, donde n es el índice de refracción del aceite, y λ es la longitud de onda de la luz en el aire. Con valores de n de aproximadamente 1.50 o mayores, la longitud de onda se reduce en forma significativa, y el poder de resolución aumenta de manera proporcional.

*25.5 Color

OBJETIVO: Relacionar el color con la luz.

En general, las propiedades físicas son fijas o absolutas. Por ejemplo, determinada clase de radiación absoluta tiene cierta frecuencia o longitud de onda. Sin embargo, la *percepción* visual de esa radiación varía de una persona a otra. La manera en que "vemos" (o nuestro cerebro "interpreta") la radiación origina lo que se llama *visión en colores*.



◀ **FIGURA 25.19 Sensibilidad de los conos** Diversos tipos de conos en la retina del ojo humano responden a distintas frecuencias de la luz, para dar tres respuestas generales al color: rojo, verde y azul. (Véase el pliego a color al final del libro.)

Visión en colores

El color se percibe gracias a la respuesta fisiológica a la excitación luminosa por parte de los conos receptores en la retina del ojo humano. (Muchos animales no tienen conos, por lo que viven en un mundo en blanco y negro.) Los conos son sensibles a la luz de frecuencias aproximadas entre 7.5×10^{14} y 4.3×10^{14} Hz (longitudes de onda de 400 a 700 nm). Las distintas frecuencias de la luz se perciben como colores diferentes en el cerebro. La asociación de un color con determinada frecuencia es subjetiva, y puede variar de una persona a otra. La altura es al sonido y la audición lo que el color es a la luz y a la visión.

Los detalles sobre el proceso de la visión en colores aún no se comprenden del todo. Se sabe que hay tres clases de conos en la retina, que responden a distintas partes del espectro visible, en especial en las regiones del rojo, verde y azul (▲figura 25.19). Es posible que cada tipo de conos absorban luz de intervalos específicos de frecuencias y que los tres se traslapen funcionalmente entre sí para formar combinaciones que el cerebro interpreta como los diversos colores del espectro. Por ejemplo, cuando los conos rojo y verde se estimulan por igual con luz de determinada frecuencia, el cerebro interpreta las dos señales traslapadas como amarillo. Pero cuando se estimulan con más intensidad los conos rojos que los verdes, el cerebro percibe el anaranjado (es decir, "amarillo" pero dominado por rojo). La *ceguera al color* se presenta cuando falta una o más clases de conos, o cuando éstos son disfuncionales.

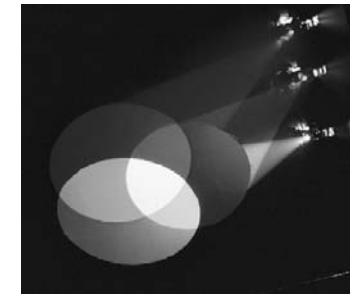
Como se ve en la figura 25.19, el ojo humano no percibe por igual todos los colores. Algunos evocan una mayor respuesta que otros y, en consecuencia, aparecen más brillantes con la misma intensidad. La longitud de onda de la sensibilidad visual máxima es de unos 550 nm, en la región del amarillo-verde.

Esta teoría de la visión en colores (que postula la mezcla o combinación de ellos) se basa en el hecho experimental que la mayor parte de los colores se produce con haces de luz roja, verde y azul de intensidad variable. El rojo, azul y verde, de donde interpretamos un espectro completo de colores, se llaman **colores primarios aditivos**. Cuando se proyectan rayos luminosos de los primarios aditivos en una pantalla blanca de forma que se traslapen, se producirán otros colores, como se ve en la ▸figura 25.20. A esta técnica se le llama **método aditivo de producción de color**. En los tubos de cinescopio de televisión se usan tríadas de puntos formados por tres fósforos, que emiten los colores primarios aditivos cuando se excitan, para producir imágenes en color.

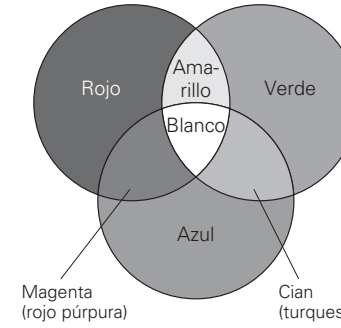
Observe que en la figura 25.20, determinada combinación de los colores primarios parece blanca. Además, muchos *pares* de colores le parecen blancos al ojo cuando se combinan. Los colores de esos pares se llaman **colores complementarios**. El complemento del azul es el amarillo, el del rojo es el cian y el del verde es el magenta. Como se ve en la figura, el color complementario de determinado primario es la combinación o suma de los otros dos primarios. Por consiguiente, el primario junto con su complemento forman el blanco.

Edwin H. Land (el inventor de la película Polaroid) demostró que cuando las mezclas adecuadas de dos longitudes de onda (colores) se pasan a través de transparencias en blanco y negro (sin color), las longitudes de onda producen imágenes de diversos colores. Land escribió: "En este experimento llegamos a la sorprendente conclusión que los rayos, en sí mismos, no forman colores. Más bien son portadores de información que el ojo utiliza para asignar colores adecuados a diversos objetos en una imagen".*

*Tomado de Edwin H. Land, "Experiments in Color Vision", *Scientific American*, mayo de 1959, pp. 84-89.



a)



b)

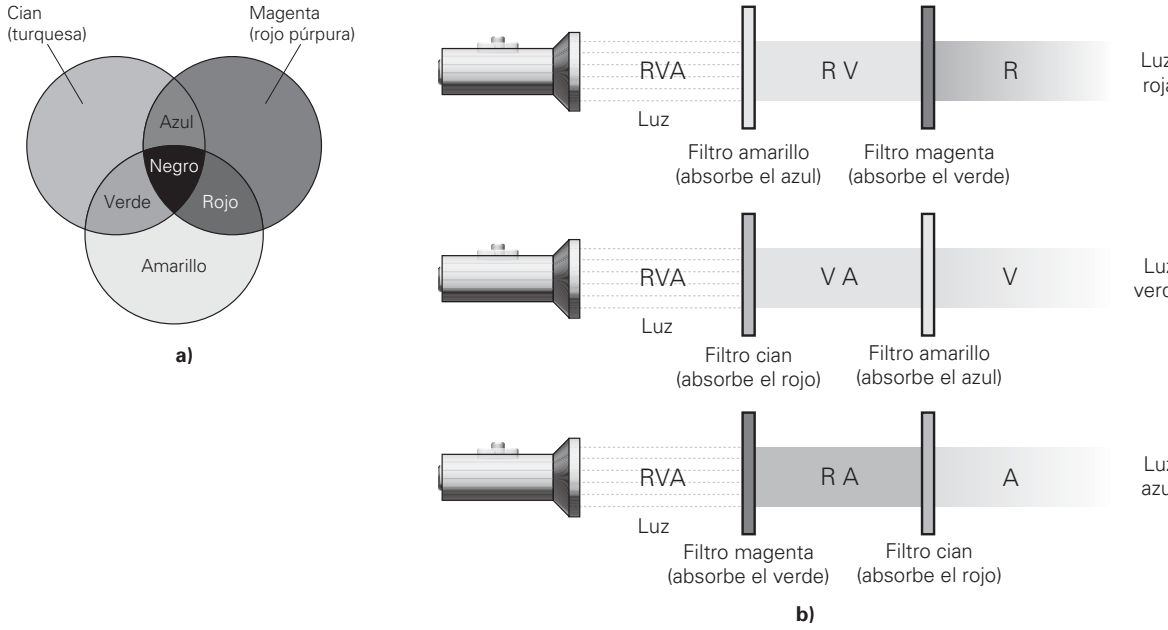
▲ **FIGURA 25.20 Método aditivo de producción de color** Cuando se proyectan haces luminosos de los colores primarios (rojo, azul y verde) en una pantalla blanca, sus mezclas producen diversos colores. Si se varían las intensidades de los haces es posible generar la mayor parte de los colores. (Véase el pliego a color al final del libro.)

Los objetos tienen un color cuando se iluminan con luz blanca, porque reflejan (dispersan) o transmiten, en forma predominante, luz de la frecuencia de ese color. Las demás frecuencias de la luz blanca se absorben en su mayor parte. Por ejemplo, cuando la luz blanca llega a una manzana roja, se reflejan principalmente las ondas de la parte roja del espectro; todas las demás (y, por consiguiente, todos los demás colores) se absorben casi por completo. De igual manera, cuando la luz blanca pasa por un trozo de vidrio o *filtro* rojo transparente, se transmiten principalmente los rayos rojos. Esto sucede porque los pigmentos coloreados (aditivos) del vidrio son absorbentes selectivos.

Para producir diversos colores se mezclan pigmentos, como en la producción de pinturas y colorantes. Tal vez usted sepa que para obtener un color verde, se mezclan pinturas amarilla y azul. Esto se debe a que el pigmento amarillo absorbe la mayor parte de las longitudes de onda, excepto las de la región del amarillo y las que se encuentran cerca (verde más anaranjado) del espectro visible, y el pigmento azul absorbe la mayor parte de las longitudes de onda excepto las de la región azul y adyacentes (violeta más verde). Las longitudes de onda en la región verde intermedia (traslapada), entre el amarillo y el azul, *no* se absorben intensamente en alguno de los pigmentos, y en consecuencia, la mezcla parece verde. El mismo efecto se obtiene cuando se hace pasar luz blanca a través de filtros amarillo y azul apilados. La luz que sale después de atravesarlos parece verde.

La mezcla de pigmentos causa la *sustracción* de colores. El color resultante se forma por lo que *no* absorbió el pigmento; esto es, lo que *no* se sustrajo del haz original. Éste es el principio de lo que se llama **método sustractivo de producción de color**. A tres pigmentos determinados, cian, magenta y amarillo, se les llama **pigmentos primarios sustractivos**. Diversas combinaciones de dos de los tres primarios sustractivos producen los tres colores primarios aditivos (rojo, azul y verde), como se ilustra en la ▼figura 25.21. Cuando se mezclan los primarios sustractivos en las proporciones adecuadas, la mezcla parece negra (porque se absorben todas las longitudes de onda). Con frecuencia, los pintores dicen que los primarios sustractivos son rojo, amarillo y azul. En realidad se refieren al magenta (rojo púrpura), amarillo y cian (azul "verdadero").

▼ **FIGURA 25.21 Método sustractivo de producción de color** ***a)*** Cuando los pigmentos primarios (cian, magenta y amarillo) se mezclan, se producen distintos colores por absorción sustractiva; por ejemplo, la mezcla de amarillo y magenta produce rojo. Cuando se mezclan los tres pigmentos y se absorben todas las longitudes de onda de la luz visible, la mezcla parece negra. ***b)*** Mezcla sustractiva de colores, usando filtros. El principio es igual que el del inciso *a*. Cada pigmento absorbe selectivamente ciertos colores, eliminándolos de la luz blanca. Los colores que quedan son los que vemos. (Véase el pliego a color al final del libro.)

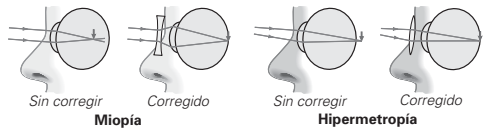


Al mezclar esas pinturas en las proporciones correctas se produce un amplio espectro de colores.

Note en la figura 25.21 que el pigmento magenta sustrae en esencia el color verde cuando se traslapa con el cian y el amarillo. En consecuencia, al magenta se le llama a veces "menos verde". Si se colocara un filtro magenta frente a una luz verde, no se transmitiría luz. De igual manera, al cian se le llama "menos rojo" y al amarillo "menos azul". Un ejemplo de mezcla sustractiva de colores es cuando los fotógrafos utilizan un filtro amarillo, para hacer destacar las nubes blancas en la película de blanco y negro. Este filtro absorbe el azul del cielo, oscureciéndolo en relación con las nubes, que reflejan luz blanca. De esta forma, aumenta el contraste entre el cielo y las nubes. ¿Qué clase de filtro usaría usted para oscurecer la vegetación verde en una película en blanco y negro? ¿Y para aclararla?

Repaso del capítulo

- Las personas miopes no pueden ver con claridad los objetos lejanos. Las personas hipermétropes no distinguen con claridad los objetos cercanos. Estas condiciones se corrigen utilizando lentes divergentes y convergentes, respectivamente.



- El aumento de una lupa (o microscopio simple) se expresa en términos de **aumento angular** (m), distinto del aumento lateral (M; véase el capítulo 23):

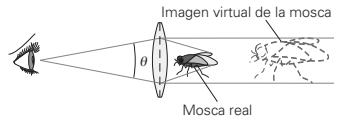
$$m = \frac{\theta}{\theta_o} \tag{25.1}$$

El aumento de una lupa, con la imagen en el punto cercano (25 cm) se expresa como

$$m = 1 + \frac{25\text{ cm}}{f} \tag{25.3}$$

El aumento de una lupa con la imagen en el infinito se expresa como

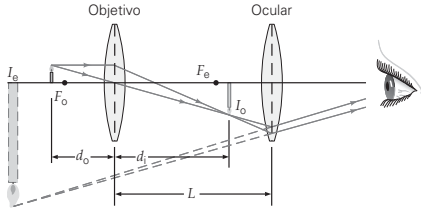
$$m = \frac{25\text{ cm}}{f} \tag{25.4}$$



- El objetivo de un microscopio compuesto tiene distancia focal relativamente corta, y el ocular tiene mayor distancia focal. Ambos contribuyen al **aumento total**, m_{total}, de acuerdo con

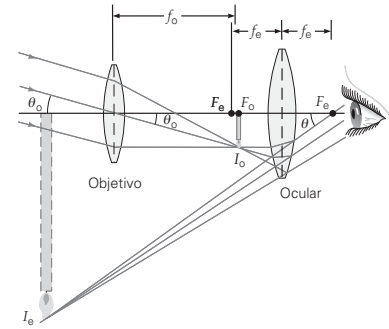
$$m_{total} = M_o m_e = -\frac{(25\text{ cm})L}{f_o f_e} \tag{25.5}$$

donde L, f_o y f_e se expresan en centímetros.

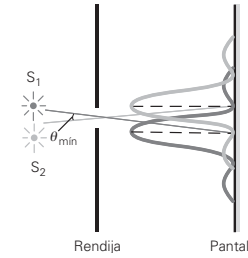


- Un telescopio refractor usa una lente convergente para reunir la luz, y un telescopio reflector utiliza un espejo convergente. El ocular aumenta la imagen creada por cualquiera de ellos. El **aumento de un telescopio refractor** es

$$m = -\frac{f_o}{f_e} \tag{25.6}$$



- La difracción establece un límite para la **resolución**, la capacidad de resolver o distinguir objetos cercanos entre sí. Se dice que dos imágenes están apenas resueltas cuando el máximo central de una cae en el primer mínimo de la figura de difracción de la otra (**criterio de Rayleigh**).



- Para una rendija rectangular, el **ángulo mínimo de resolución es**

$$\theta_{mín} = \frac{\lambda}{w} \tag{25.7}$$

El **ángulo mínimo de resolución para una abertura circular** de diámetro D es

$$\theta_{mín} = \frac{1.22\lambda}{D} \tag{25.8}$$

El **poder de resolución** de un microscopio es

$$s = f\theta_{mín} = \frac{1.22\lambda f}{D} \tag{25.9}$$

Ejercicios

Los ejercicios designados **OM** *son preguntas de opción múltiple; los* **PC** *son preguntas conceptuales; y los* **EI** *son ejercicios integrados. A lo largo del texto, muchas secciones de ejercicios incluirán ejercicios "apareados". Estos pares de ejercicios, que se identifican con* números subrayados*, pretenden ayudar al lector a resolver problemas y aprender. El primer ejercicio de cada pareja (el de número par) se resuelve en la Guía de estudio, que puede consultarse si se necesita ayuda para resolverlo. El segundo ejercicio (de número impar) es similar, y su respuesta se da al final del libro.*

25.1 El ojo humano

1. **OM** Los bastones de la retina *a*) son responsables de la visión 20/20, *b*) son responsables de la visión blanco y negro crepuscular, *c*) son responsables de la visión en colores o *d*) enfocan la luz.

2. **OM** Una córnea imperfecta puede causar *a*) astigmatismo, *b*) miopía, *c*) hipermetropía o *d*) todo lo anterior.

3. **OM** La imagen de un objeto formado en la retina es *a*) invertida, *b*) derecha, *c*) del mismo tamaño que el objeto, *d*) todo lo anterior.

4. **OM** La distancia focal del cristalino en el ojo humano varía de acuerdo con la acción de sus músculos. Cuando se ve un objeto lejano, el radio del cristalino *a*) se agranda, *b*) se reduce, *c*) se adelgaza, *d*) ninguna de las opciones anteriores es válida.

5. **PC** Las personas y los animales salen con "ojos rojos" en fotografías tomadas con *flash*. La luz reflejada en la retina es roja por los vasos sanguíneos cerca de su superficie. Algunas cámaras tienen una opción contra ojos rojos, que cuando se activa, produce un destello rápido antes del destello de más duración con el que se toma la fotografía. Explique cómo es que esta función de la cámara reduce los ojos rojos.

6. **PC** ¿Qué partes de la cámara corresponden al iris, cristalino y retina del ojo?

7. **PC** *a*) Si un ojo tiene punto lejano a 15 m y punto cercano a 25 cm, ¿es miope o hipermétrope? *b*) ¿Y un ojo que tenga punto lejano en el infinito, y punto cercano a 50 cm? *c*) ¿Qué clase de lentes de corrección (convergentes o divergentes) recomendaría para corregir los defectos de visión en los incisos *a* y *b*?

8. **PC** ¿El uso de lentes de corrección para la miopía y la hipermetropía afectarán, respectivamente, el tamaño de la imagen en la retina? Explique por qué.

9. ● ¿Cuáles son las potencias de *a*) una lente convergente de 20 cm de distancia focal y *b*) una lente divergente de −50 cm de distancia focal?

10. **EI** ● El punto lejano de cierta persona miope está a 90 cm. *a*) ¿Qué clase de lentes de contacto debe recetarle un optometrista para permitirle ver los objetos lejanos con claridad? 1) Convergentes, 2) divergentes o 3) bifocales. ¿Por qué? *b*) ¿Cuál sería la potencia de los lentes, en dioptrías?

11. **EI** ● Cierta persona hipermétrope tiene su punto cercano a 50 cm. *a*) ¿Qué clase de lentes de contacto debe recetarle un optometrista para permitirle ver con claridad objetos a 25 cm de distancia? 1) Convergentes, 2) divergentes o 3) bifocales. ¿Por qué? *b*) ¿Cuál es la potencia de los lentes, en dioptrías?

12. ●● Una mujer no puede ver con claridad objetos cuando están a más de 12.5 m de distancia. *a*) Ella tiene 1) miopía, 2) hipermetropía o 3) astigmatismo. Explique por qué. *b*) ¿Qué clase de lentes le permitirán ver con claridad objetos lejanos, y de qué potencia deben ser?

13. ●● Una mujer miope tiene punto lejano no corregido de 200 cm. ¿Qué clase de lentes de contacto corregirían esta condición, y de qué potencia deben ser?

14. ●● Una persona *apenas* distingue con claridad las letras en un libro cuando lo sujeta con su brazo extendido (a 0.80 m de sus ojos). *a*) Ella tiene 1) miopía, 2) hipermetropía o 3) astigmatismo. Explique por qué. *b*) ¿Qué clase de lentes le permitirán leer el texto en el punto cercano normal, y cuál es la distancia focal de esos lentes?

15. ●● Para corregir un caso de hipermetropía, un optometrista receta lentes de contacto positivos que acercan el punto cercano del paciente de 100 a 25 cm. *a*) ¿Podrá ver el paciente objetos lejanos con claridad con los lentes de contacto puestos, o se los tendrá que quitar? ¿Por qué? *b*)¿Cuál es la potencia de los lentes?

16. ●● Una persona hipermétrope con un punto cercano de 0.95 m compra unos lentes de contacto con los que puede leer un periódico a 25 cm de distancia. ¿Cuál es la potencia de los lentes? (Suponga que los lentes son iguales para ambos ojos.)

17. **EI** ●● Una persona hipermétrope no logra enfocar objetos que estén más cercanos de 1.5 m. *a*) Los lentes de contacto que le permitirían enfocar las letras en un libro a 25 cm de sus ojos son 1) convergentes, 2) divergentes o 3) planos. Explique por qué. *b*) ¿De qué potencia deben ser?

18. ●● Un alumno miope usa lentes de contacto que le corrigen su punto lejano que está a 4.00 m de sus ojos. Cuando no usa sus lentes de contacto, su punto cercano está a 20 cm. ¿Cuál es su punto cercano cuando usa sus lentes de contacto?

19. ●● Una mujer miope tiene punto lejano a 2.0 m de uno de sus ojos. *a*) Si usa un lente de corrección a 2.0 cm de su ojo, ¿cuál debe ser la potencia necesaria para que vea objetos lejanos? *b*) ¿Cuál sería la potencia necesaria de un lente de contacto?

20. ●● Un profesor de preparatoria ve con claridad objetos que estén sólo entre 70 y 500 cm de sus ojos. Su optometrista le receta bifocales (▼figura 25.22) que le permiten ver objetos lejanos utilizando la mitad superior, y leer los trabajos de los alumnos a 25 cm de distancia, utilizando la parte inferior. ¿Cuáles son las potencias respectivas de los lentes superior e inferior? [Suponga que ambos lentes (derecho e izquierdo) son iguales.]

*Suponga que los lentes de corrección están en contacto con el ojo (lentes de contacto) a menos que se indique otra cosa.

▲ **FIGURA 25.22 Anteojos bifocales** Véanse los ejercicios 20 y 25.

21. ●● Un hombre miope usa anteojos con −0.15 D de potencia. ¿A qué distancia tiene su punto lejano?

22. ●● Unos anteojos de +2.8 D de potencia permiten que un individuo hipermétrope lea un libro a 25 cm de sus ojos. ¿A qué distancia debe tener el libro para leerlo sin lentes?

23. ●●● Cierto individuo miope tiene un punto lejano de 150 cm. *a*) ¿Qué potencia deben tener unos lentes de contacto que le permitan ver con claridad objetos lejanos? *b*) Si puede leer a 25 cm usando sus lentes de contacto, su punto cercano ¿está a menos de 25 cm? Si es así, ¿dónde está ese punto? *c*) Estime la edad aproximada del sujeto con base en la tasa normal de recesión del punto cercano.

24. ●●● Un hombre de edad madura comienza a usar anteojos con lentes de +2.0 D, que le permiten leer un libro a 25 cm. Después de algunos años, se da cuenta de que necesita tener un libro a no menos de 33 cm para leerlo con claridad, con los mismos anteojos, así que compra unos nuevos. ¿Cuál es la potencia de los nuevos lentes? (Suponga que ambos lentes son iguales.)

25. ●●● Los anteojos bifocales se usan para corregir al mismo tiempo la miopía y la hipermetropía (figura 25.22). Si los puntos cercanos de los ojos derecho e izquierdo están a 35.0 y 45.0 cm, respectivamente, y el punto lejano está a 220 cm de ambos ojos, ¿cuáles son las potencias de los lentes que se prescriben? Suponga que los lentes se usan a 3.00 cm de los ojos.

25.2 Microscopios

26. OM Una lupa *a*) es una lente cóncava, *b*) forma imágenes virtuales, *c*) amplifica porque aumenta el ángulo que subtiende el objeto o *d*) tanto *b* como *c*.

27. OM Un microscopio compuesto tiene *a*) aumento ilimitado, *b*) dos lentes de la misma distancia focal, *c*) una lente divergente como objetivo o *d*) un objetivo de distancia focal relativamente corta.

28. PC Con un objeto en el punto focal de una lupa, el aumento es $m = (25\text{ cm})/f$ (ecuación 25.4). De acuerdo con esta ecuación, el aumento podría incrementarse en forma indefinida usando lentes de distancia focal cada vez más corta. ¿Entonces por qué necesitamos microscopios compuestos?

29. PC Cuando se usa una lente convexa simple como lente de aumento, ¿dónde se debe poner el objeto: más alejado que la distancia focal, o dentro de la distancia focal? Explique por qué.

*Se considera que el punto cercano normal está a 25 cm, a menos que se especifique otra cosa.

30. ● Utilice la aproximación para ángulos pequeños y compare los tamaños angulares de un automóvil de 1.0 m de altura cuando está a las distancias de *a*) 500 m, *b*) 1025 m.

31. ● Se coloca un objeto a 10 cm de una lente convergente de 18 cm de distancia focal. ¿Cuáles son *a*) el aumento lateral y *b*) el aumento angular?

32. ● Un estudiante de biología usa una lente convergente para examinar los detalles de un insecto pequeño. Si la distancia focal de la lente es de 12 cm, ¿cuál es el aumento angular máximo?

33. ● Al ver un objeto con una lente de aumento, cuya distancia focal es de 10 cm, un estudiante coloca la lente de forma que no tenga que forzar la vista. ¿Cuál es el aumento que observa?

34. **EI** ● Un alumno de física usa una lente convergente con 15 cm de distancia focal para leer una escala de medición pequeña. *a*) El aumento máximo se alcanza cuando la imagen está 1) en el punto cercano, 2) en el infinito, 3) en cualquier lugar. Explique por qué. *b*) ¿Cuál es el aumento cuando la imagen está en el punto cercano y cuando se hace la observación con el ojo relajado?

35. **EI** ●● Un detective quiere obtener el aumento máximo al examinar una huella digital con una lupa. *a*) Debería usar una lente 1) de alta potencia, 2) de baja potencia o 3) convergente pequeña. Explique por qué. *b*) Si usa lentes con potencia de +3.5 D y +2.5 D, ¿cuáles son los máximos aumentos de la huella digital?

36. ●● ¿Cuál es el aumento máximo de una lupa de +3.0 D de potencia para *a*) una persona con punto cercano de 25 cm, y *b*) una persona con punto cercano de 10 cm?

37. ●● Un microscopio compuesto tiene un objetivo de 4.00 mm de distancia focal, y un ocular con 10.0× de aumento. Si el objetivo y el ocular están a 15.0 cm de distancia, ¿cuál es el aumento total del microscopio?

38. ●● La distancia entre las lentes de un microscopio compuesto es de 15 cm; el ocular tiene 8.0 mm de distancia focal. ¿De qué potencia debe ser el objetivo para obtener un aumento total de −360×?

39. **EI** ●● Dos lentes con distancias focales de 0.45 y 0.35 cm están disponibles para un microscopio compuesto que tiene un ocular con distancia focal de 3.0 cm; la distancia entre las lentes debe ser de 15 cm. *a*) ¿Cuál de las dos lentes debe utilizarse como objetivo? 1) La de mayor distancia focal, 2) la de menor distancia focal o 3) cualquiera de las dos. *b*) ¿Cuáles son los dos posibles aumentos del microscopio?

40. ●● La distancia focal del objetivo de un microscopio compuesto es de 4.5 mm. El ocular tiene 3.0 cm de distancia focal. Si la distancia entre las lentes es de 18 cm, ¿cuál es el aumento de la imagen que se ve?

41. ●● Un microscopio compuesto tiene un objetivo con 0.50 cm de distancia focal, y un ocular con 3.25 cm de distancia focal. La separación entre las lentes es de 22 cm. Un alumno con punto cercano normal usa ese microscopio. *a*) ¿Cuál es el aumento total? *b*) Compare el aumento total (como porcentaje) con el aumento del ocular solamente, cuando se usa como lupa simple.

42. ●● Un microscopio con −150× tiene un objetivo con 0.75 cm de distancia focal. Si la distancia entre las lentes es de 20 cm, calcule la distancia focal del ocular.

43. ●● Un espécimen está a 5.0 mm del objetivo de un microscopio compuesto, cuya potencia es de +250 D. ¿Cuál debe ser el aumento del ocular, si el aumento total del espécimen es −100×?

44. ●●● Se usa una lente con +10 D de potencia como microscopio simple. *a*) Para ver con claridad la imagen de un objeto, ¿se puede poner el objeto infinitamente cerca de la lente, o hay algún límite de la cercanía a la que debe estar? ¿Por qué? *b*) Calcule qué tanto se puede acercar un objeto a la lente. *c*) ¿Cuál es el aumento angular en ese punto?

45. **EI** ●●● Un microscopio moderno tiene un revólver con tres objetivos, cuyas distancias focales son 16, 4.0 y 1.6 mm; tiene oculares intercambiables de 5.0 y 10×. Se coloca un espécimen de tal forma que cada objetivo produce una imagen a 150 mm de distancia de él. *a*) ¿Cuál combinación de objetivo y ocular emplearía si quisiera obtener el máximo aumento? ¿Y el aumento mínimo? ¿Por qué? *b*) ¿Cuáles son el aumento máximo y el mínimo posible?

25.3 Telescopios

46. OM Un telescopio astronómico tiene *a*) aumento ilimitado, *b*) dos lentes de la misma distancia focal, *c*) un objetivo de distancia focal relativamente grande, *d*) un objetivo de distancia focal relativamente corta.

47. OM Una imagen invertida se produce con *a*) un telescopio terrestre, *b*) un telescopio astronómico, *c*) un telescopio de Galileo o *d*) todos los anteriores.

48. OM En comparación con los grandes telescopios refractores, los grandes telescopios reflectores tienen la ventaja de *a*) mayor capacidad de captación de luz, *b*) que no tienen aberración cromática, *c*) que son menos costosos o *d*) todo lo anterior.

49. PC En la figura 25.12b, parte de la luz que entra al espejo cóncavo es obstruida por un espejo plano pequeño, que se usa para redirigir los rayos hacia el observador. ¿Eso significa que sólo se puede ver una parte de una estrella? ¿Cómo afecta a la imagen el tamaño de la obstrucción?

50. PC ¿Por qué la aberración cromática es un factor importante en los telescopios refractores, pero no en los reflectores?

51. PC Si le dan a usted dos lentes con distintas distancias focales, ¿cuál debe usar como objetivo en un telescopio? ¿Por qué?

52. ● Calcule el aumento y longitud de un telescopio si su objetivo tiene una distancia focal de 50 cm, y su ocular una de 2.0 cm.

53. ● Un telescopio astronómico tiene un objetivo y un ocular, cuyas distancias focales son de 60 y 15 cm, respectivamente. ¿Cuáles son *a*) el aumento y *b*) la longitud del telescopio?

54. ●● Un telescopio tiene un ocular cuya distancia focal es de 10.0 mm. Si la longitud del tubo es de 1.50 m, ¿cuál es el aumento angular del telescopio, cuando enfoca un objeto en el infinito?

55. El aumento angular de un telescopio es −50×, y su tubo tiene 1.02 m de longitud. ¿Cuáles son las distancias focales del objetivo y del ocular?

56. **EI** ●● Un telescopio terrestre tiene tres lentes: un objetivo, una lente inversora y un ocular. *a*) La lente inversora 1) incrementa el aumento, 2) aumenta la longitud física del telescopio, 3) reduce el aumento o 4) disminuye la longitud física del telescopio. ¿Por qué? *b*) Las tres lentes de este telescopio terrestre tienen 40, 20 y 15 cm de distancia focal, respectivamente para el objetivo, la lente erectora y el ocular. ¿Cuál es el aumento del telescopio cuando el objeto está en el infinito? *c*) ¿Cuál es la longitud del tubo del telescopio?

57. ●● Un telescopio terrestre o catalejo usa un objetivo y un ocular con distancias focales de 45 y 15 cm, respectivamente. ¿Cuál debe ser la distancia focal de la lente erectora si la longitud total del telescopio debe ser de 0.80 m?

58. ●● Un telescopio astronómico tiene un objetivo con una potencia de +2.0 D. Si la longitud del telescopio es de 52 cm, ¿cuál es su aumento angular?

59. **EI** ●● Se le dan a usted dos objetivos y dos oculares, y se le pide fabricar con ellos un telescopio. Las distancias focales de los objetivos son 60.0 y 40.0 cm, y las de los oculares son 0.90 y 0.80 cm, respectivamente. *a*) ¿Con qué combinación de lentes se obtendría el aumento máximo? ¿Y el aumento mínimo? ¿Por qué? *b*) Calcule los aumentos máximo y mínimo.

25.4 Difracción y resolución

60. OM Se dice que las imágenes de dos fuentes están resueltas cuando *a*) los máximos centrales de las figuras de difracción caen uno sobre otro, *b*) las primeras bandas brillantes de las figuras de difracción caen una sobre otra, *c*) el máximo central de una figura de difracción cae en la primera franja oscura de la otra o *d*) ninguna de las opciones anteriores es válida.

61. OM Para un telescopio con abertura circular, el ángulo mínimo de resolución es *a*) mayor para la luz roja que para la azul, *b*) independiente de la frecuencia de la luz, *c*) directamente proporcional al radio de la abertura o *d*) independiente del área de la abertura.

62. OM La finalidad de usar lentes de inmersión en aceite en los microscopios es *a*) reducir el tamaño del microscopio *b*) incrementar el aumento, *c*) aumentar la longitud de onda de la luz para aumentar el poder de resolución o *d*) reducir la longitud de onda de la luz, y con ello aumentar el poder de resolución.

*Ignore la obstrucción de la atmósfera, a menos que se indique otra cosa.

63. PC Cuando se diseña un instrumento óptico se desea tener una gran resolución, para poder ver con él detalles finos. Esta mayor resolución, ¿implica un ángulo de resolución mayor o menor? Explique por qué.

64. PC Un telescopio reflector con un espejo objetivo grande es capaz de reunir más luz estelar que un telescopio reflector con un espejo objetivo de menor tamaño. ¿Qué otra ventaja se gana con un espejo grande? Explique por qué.

65. PC Las modernas cámaras digitales cada vez son más pequeñas. Analice la resolución de imagen de estas pequeñas cámaras.

66. **EI** ● *a*) Para una determinada longitud de onda, una sola rendija ancha dará 1) mayor, 2) menor o 3) el mismo ángulo mínimo de resolución que una rendija delgada, de acuerdo con el criterio de Rayleigh. *b*) ¿Cuál es el ángulo mínimo de resolución para dos fuentes puntuales de luz roja (λ = 680 nm) en la figura de difracción producida por rendijas individuales de 0.55 y 0.45 mm de ancho?

67. ● La separación angular mínima de las imágenes de dos fuentes puntuales monocromáticas idénticas en una figura de difracción con una sola rendija es de 0.0055 rad. Si se usa un ancho de rendija de 0.10 mm, ¿cuál es la longitud de onda de las fuentes?

68. ● ¿Cuál es el límite de resolución, que se debe a la difracción, del telescopio reflector del Observatorio Europeo Meridional (de 8.20 m o 323 pulgadas de diámetro) para luz con 550 nm de longitud de onda?

69. ● ¿Cuál es la resolución, que se debe a la difracción, del telescopio Hale en Monte Palomar, con su espejo de 200 pulgadas de diámetro, para luz de 550 nm? Compare este valor con el límite de resolución para el telescopio del Observatorio Europeo Meridional, en el ejercicio 68.

70. ●● Desde una nave espacial en órbita a 150 km de la superficie terrestre, una astronauta desea ver su pueblo natal al pasar sobre él. ¿Qué tamaño de detalles podrá identificar, a ojo desnudo, sin tener en cuenta los efectos de la atmósfera? [*Sugerencia:* estime el diámetro del iris humano.]

71. **EI** ●● Un ojo humano ve objetos pequeños de distintos colores, y con ello se mide su resolución. *a*) El ojo tiene la máxima resolución y ve los detalles más finos con el color 1) rojo, 2) amarillo, 3) azul o 4) no importa cuál. ¿Por qué? *b*) El diámetro máximo de la pupila del ojo, por la noche, es de unos 7.0 mm. ¿Cuáles son los ángulos mínimos de separación para dos fuentes con longitudes de onda de 550 y 650 nm?

72. ●● Algunos miembros de tribus africanas afirman que pueden ver las lunas de Júpiter sin la ayuda de instrumentos ópticos. Si dos lunas de Júpiter están a una distancia mínima de 3.1×10^8 km de la Tierra, y tienen una separación máxima de 3.0×10^6 km, ¿será posible que las vean? Explique por qué. Suponga que las lunas reflejan la luz suficiente, y que Júpiter no estorba la observación de ellas. [*Sugerencia:* véase el ejercicio 71b.]

73. ●● Suponiendo que los faros de un automóvil sean fuentes puntuales a 1.7 m de distancia entre sí, ¿cuál es la distancia máxima de un observador al automóvil, a la cual puede distinguir los faros uno de otro? [*Sugerencia:* véase el ejercicio 71b.]

74. ●● Con un telescopio refractor, cuya lente mide 30.0 cm de diámetro, se contempla un sistema de estrellas binarias, que emite luz en la región visible. *a*) ¿Cuál es la separación angular mínima de las dos estrellas para que apenas queden resueltas? *b*) Si la estrella binaria está a 6.00×10^{20} km de la Tierra, ¿cuál es la distancia entre las dos estrellas? (Suponga que la línea que une a las estrellas es perpendicular a la visual.)

75. ●● Un radiotelescopio tiene 300 m de diámetro y utiliza una longitud de onda de 4.0 para observar un sistema de estrellas binarias que está a 2.5×10^{18} km de la Tierra. ¿Cuál es la mínima distancia entre las dos estrellas que se distingue con el telescopio?

76. ●● El objetivo de un microscopio tiene 2.50 cm de diámetro y 30.0 mm de distancia focal. *a*) Si para iluminar un espécimen se usa luz amarilla de 570 nm de longitud de onda, ¿cuál es la separación angular mínima de dos detalles finos de la muestra para que apenas se resuelvan? *b*) ¿Cuál es el poder de resolución de la lente?

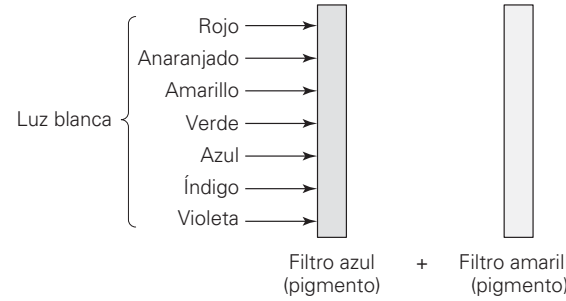
77. ●●● Para ver un espécimen con una luz de mercurio, con longitud de onda de 546.1 nm, se usa un microscopio con un objetivo de 1.20 cm de diámetro. *a*) ¿Cuál es el ángulo límite de resolución? *b*) Si se deben observar detalles más finos que los observables en la parte *a*), ¿qué color de luz del espectro visible hay que usar? *c*) Si se usara una lente de inmersión en aceite (n_{aceite} = 1.50), ¿cuál sería el cambio (expresado en porcentaje) del poder de resolución?

*25.5 Color

78. OM Un color primario aditivo es *a*) azul, *b*) verde, *c*) rojo o *d*) todos los anteriores.

79. OM Un color primario sustractivo es *a*) cian, *b*) amarillo, *c*) magenta o *d*) todos los anteriores.

80. OM Sobre dos filtros incide una luz blanca, como se ve en la ▼figura 25.23. El color de la luz que sale del filtro amarillo es *a*) azul, *b*) amarillo, *c*) rojo o *d*) verde.



▲ **FIGURA 25.23 Absorción de los colores**
Véase el ejercicio 80.

81. PC Describa cómo se vería la bandera estadounidense si se iluminara con luz de cada uno de los colores primarios.

82. PC ¿Puede obtenerse el blanco con el método sustractivo de producción de colores? Explique por qué. A veces se dice que el negro es la ausencia de todos los colores, o que un objeto negro absorbe toda la luz incidente. Si es así, ¿por qué vemos objetos negros?

83. PC Algunas bebidas, como la cerveza oscura, producen una capa de espuma cuando se vierten en el vaso. ¿Por qué la espuma tiene un color blanco o claro, mientras que el líquido es oscuro?

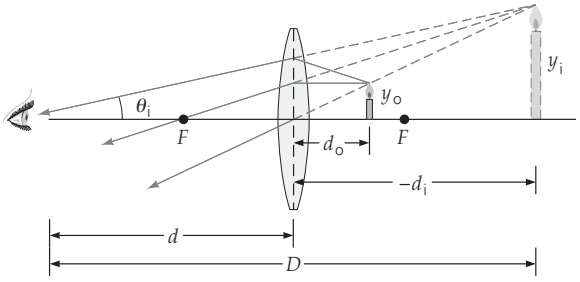
Ejercicios adicionales

84. Un estudiante utiliza una lupa para examinar con detalle un microcircuito en el laboratorio. Si la lente tiene una potencia de 12.5 D y se forma una imagen virtual en el punto cercano (25 cm) del estudiante, *a*) ¿a qué distancia del circuito sostiene la lupa y *b*) ¿cuál es el aumento angular?

85. Con respecto a la ▼figura 25.24, demuestre que la potencia de aumento de una lupa que se sostiene a una distancia d del ojo está determinada por

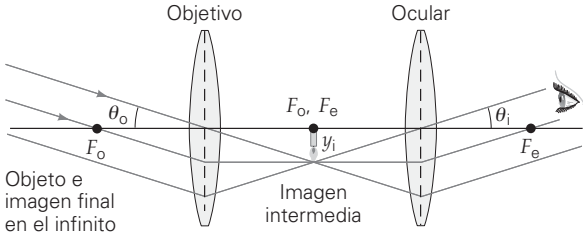
$$m = \left(\frac{25}{f}\right)\left(1 - \frac{d}{D}\right) + \frac{25}{D}$$

cuando el objeto real se ubica en el punto cercano (25 cm). [*Sugerencia:* utilice un aproximación para ángulos pequeños y tome en cuenta que $y_i/y_o = -d_i/d_o$, para triángulos similares.]



▲ **FIGURA 25.24 Potencia de una lente de aumento** Véase el ejercicio 85.

86. En relación con la ▶figura 25.25, demuestre que el aumento angular de un telescopio refractor enfocado para que la imagen final esté en el infinito es $m = -f_o/f_e$. (Como los telescopios están diseñados para observar objetos lejanos, el tamaño angular de un objeto visto con el ojo desnudo es el tamaño angular del objeto en su ubicación real y no en el punto cercano, como sucede con un microscopio.)



▲ **FIGURA 25.25 Modificación angular de un telescopio refractor** Véase el ejercicio 86.

87. Dos telescopios astronómicos tienen las características que muestra la siguiente tabla.

Telescopio	Distancia focal del objetivo (cm)	Distancia focal del ocular (cm)	Diámetro del objetivo (cm)
A	90.0	0.840	75.0
B	85.0	0.770	60.0

a) ¿Cuál telescopio escogería 1) para el mayor aumento y 2) para la mayor resolución? ¿Por qué? *b*) Calcule el aumento máximo y el ángulo mínimo de resolución para una longitud de onda de 550 nm.

88. Un telescopio refractor tiene un objetivo con 50 cm de distancia focal, y un ocular con 15 mm de distancia focal. Se usa para ver un objeto de 10 cm de altura a 50 m de distancia. ¿Cuál es la altura angular aparente del objeto, visto con el telescopio?

89. La cantidad de luz que llega a la película de una cámara depende de la abertura de la lente (el área efectiva), que se controla con el diafragma. La abertura f es la relación entre la distancia focal de la lente y su diámetro efectivo. Por ejemplo, un ajuste de f/8 significa que el diámetro de la abertura es la octava parte de la distancia focal de la lente. Esta distancia se llama *abertura f* o simplemente *abertura*. *a*) Determine cuánta luz admite cada una de las siguientes aberturas de la cámara, en comparación con la f/8: 1) f/3.2 y 2.) f/16. *b*) El tiempo de exposición de una cámara se controla con la velocidad del obturador. Si un fotógrafo usa en forma correcta una abertura de f/8 con un tiempo de exposición de 1/60 s, ¿qué tiempo de exposición debe usar para tener la misma cantidad de exposición a la luz si ajusta la abertura a f/5.6?

PHYSLET® Los siguientes problemas de física Physlet pueden utilizarse con este capítulo.
36.1, 36.2, 36.3, 36.4, 36.5

APÉNDICES

APÉNDICE I A Símbolos, operaciones aritméticas, exponentes y notación científica
B Álgebra y relaciones algebraicas comunes
C Relaciones geométricas
D Relaciones trigonométricas
E Logaritmos

APÉNDICE II Teoría cinética de los gases

APÉNDICE III Datos planetarios

APÉNDICE IV Lista alfabética de los elementos químicos

APÉNDICE V Propiedades de isótopos seleccionados

RESPUESTAS A LOS EJERCICIOS DE REFUERZO

RESPUESTAS A LOS EJERCICIOS CON NÚMERO IMPAR

APÉNDICE I* Repaso de matemáticas (con ejemplos) para *Física*

A Símbolos, operaciones aritméticas, exponentes y notación científica

Símbolos utilizados comúnmente en fórmulas

$=$ significa que dos cantidades son iguales, como $2x = y$

$\equiv$ significa "definido como", por ejemplo, en la definición de pi:

$$\pi \equiv \frac{\text{circunferencia de un círculo}}{\text{el diámetro de ese círculo}}.$$

$\approx$ significa aproximadamente igual, como en $30\frac{\text{m}}{\text{s}} \approx 60\frac{\text{mi}}{\text{h}}$.

$\neq$ significa desigualdad, como en $\pi \neq \frac{22}{7}$.

$\geq$ significa que una cantidad es mayor o igual que otra. Por ejemplo, la edad del universo $\geq$ 5 mil millones de años.

$\leq$ significa que una cantidad es menor o igual que otra. Por ejemplo, si en una sala de conferencias caben $\leq$ 45 estudiantes, el máximo es 45 estudiantes.

$>$ significa que una cantidad es mayor que otra, como 14 huevos $>$ 1 docena de huevos.

$\gg$ significa que una cantidad es *mucho* mayor que otra. Por ejemplo, número de habitantes en la Tierra $\gg$ 1 millón.

$<$ significa que una cantidad es menor que otra, como $3 \times 10^{22} <$ número de Avogadro.

$\ll$ una cantidad es mucho *menor* que otra, como $10 \ll$ número de Avogadro.

$\propto$ significa linealmente proporcional a. Esto es, si $y = 2x$, entonces $y \propto x$. Esto significa que si x se incrementa por un determinado factor de multiplicación, y también se incrementa de la misma forma. Por ejemplo, si $y = 3x$, y x cambia por un factor de n (esto es, si x se convierte en nx), lo mismo sucede con y, porque $y' = 3x' = 3(nx) = n(3x) = ny$.

ΔQ significa "cambio en la cantidad Q". En otras palabras, "final menos inicial". Por ejemplo, si por la mañana el valor del portafolio de acciones de un inversionista es $V_i = \$10\,100$ y al cierre de la jornada es $V_f = \$10\,050$, entonces $\Delta V = \$10\,050 - \$10\,100 = -\$50$.

La letra griega mayúscula sigma (Σ) indica la suma de una serie de valores para la cantidad Q_i donde $i = 1, 2, 3, ..., N$, esto es,

$$\sum_{i=1}^{N} Q_i = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \cdots Q_N.$$

$|Q|$ denota el valor absoluto de una cantidad Q sin signo. Si Q es positivo, entonces $|Q| = Q$; si Q es negativo, entonces $|Q| = -Q$. Por lo tanto, $|-3| = 3$.

*Este apéndice no incluye una explicación acerca de cifras significativas, ya que se presentó una explicación completa en el apartado 1.6 del capítulo 1.

Ejercicios del apéndice I-A

1. ¿Qué valores de x satisfacen $3 \leq |x| \leq 8$?
2. ¿Cuál entero y se acerca más a $y \approx |\sqrt{10}|$?
3. Si al final de la semana usted cuenta sus utensilios y encuentra $\Delta w = -10$ y el número de utensilios el viernes era de 500, ¿cuántos tendrá el lunes por la mañana?
4. Dé un número razonable z que satisfaga $1 < z \ll 100$.
5. Si $y \propto x^2$ y el valor de x se duplica, ¿qué sucede con el valor de y?
6. ¿Cuánto es $\dfrac{\sum_{i=1}^{3} 3^i}{10}$?

Operaciones aritméticas y su orden de uso

Las operaciones aritméticas básicas son suma o adición ($+$), resta o sustracción ($-$), multiplicación ($\times$ o $\cdot$) y división ($/$ o $\div$). Otra operación común, la potenciación o exponenciación (x^n), implica elevar una cantidad (x) a una determinada potencia (n). Si en una ecuación se incluyen varias de estas operaciones, se realizan en el siguiente orden: *a*) paréntesis, *b*) potenciación, *c*) división, *d*) multiplicación, *e*) suma y resta.

Un recurso mnemotécnico que le ayudará a recordar este orden es la frase: "**P**or favor, **e**xplícame con **m**ás **d**etalle la **s**uma y la **r**esta", donde las letras iniciales marcadas en negritas se refieren a las operaciones: **p**aréntesis, **e**xponentes, **m**ultiplicación, **d**ivisión, **s**uma y **r**esta. Observe que las operaciones dentro de un paréntesis siempre se realizan primero, de manera que es in-

dispensable utilizar adecuadamente los paréntesis. Por ejemplo $24^2/8 \cdot 4 + 12$ puede evaluarse de varias maneras. Sin embargo, de acuerdo con el orden establecido, tiene un valor único: $24^2/8 \cdot 4 + 12 = 576/8 \cdot 4 + 12 = 576/32 + 12 = 18 + 12 = 30$. Para evitar posibles confusiones, la cantidad podría escribirse con dos conjuntos de paréntesis, como sigue: $(24^2/(8 \cdot 4)) + 12 = (576/(32)) + 12 = 18 + 12 = 30$.

Ejercicio del ápendice I-B

1. Coloque los paréntesis de tal forma que $3^2 + 4^2 \cdot 1^3 - \sqrt{4} + 7$ dé 30 sin lugar a dudas.
2. Evalúe $2 \cdot 3/4 + 5/2 \times 4 - 1$.
3. Evalúe $2 \times 4 + 7 - 6/3 \times 2$.
4. ¿Cómo utilizaría los paréntesis para escribir $3^2 + 4^2 \cdot 1^3 - \sqrt{4} + 7$ de manera que todos aquellos que evalúen la expresión lleguen al resultado de 0, incluso si no conocen las reglas de orden?

Exponentes y notación exponencial

Los exponentes y la notación exponencial son muy importantes cuando se emplea la notación científica (véase el siguiente apartado). Por eso es importante familiarizarse con las potencias y con la notación exponencial (tanto con números positivos y negativos, como con enteros y fraccionarios), como en las siguientes expresiones:

$$x^0 = 1$$

$$x^1 = x \qquad x^{-1} = \frac{1}{x}$$

$$x^2 = x \cdot x \qquad x^{-2} = \frac{1}{x^2} \qquad x^{\frac{1}{2}} = \sqrt{x}$$

$$x^3 = x \cdot x \cdot x \qquad x^{-3} = \frac{1}{x^3} \qquad x^{\frac{1}{3}} = \sqrt[3]{x} \qquad \text{etc.}$$

Los exponentes se combinan de acuerdo con las siguientes reglas:

$$x^a \cdot x^b = x^{(a+b)} \qquad x^a/x^b = x^{(a-b)} \qquad (x^a)^b = x^{ab}$$

Ejercicios del apéndice I-C

1. ¿Cuál es el valor de $\frac{2^3}{2^4}$?
2. Evalúe $3^3 \times |9^{-1/2}|$.
3. Encuentre el valor (o valores) de $3^4 \times \sqrt{4^6}$.
4. ¿Cuánto es $\left(\sqrt{10}\right)^4$?

Notación científica (también conocida como notación de potencias de 10)

En física, muchas cantidades tienen valores muy grandes o muy pequeños. Para expresarlos, a menudo se emplea la **notación científica**. Esta notación también se conoce como notación de potencias de 10, por obvias razones. (Véase el apartado anterior para una explicación de los exponentes.) Cuando el número 10 se eleva al cuadrado o al cubo, se tiene $10^2 = 10 \times 10 = 100$ o $10^3 = 10 \times 10 \times 10 = 1000$. Como se observa, el número de ceros es igual a la potencia de 10. Así, 10^{23} es una forma compacta de expresar el número 1 seguido de 23 ceros.

Un número puede representarse de muchas maneras, todas las cuales son correctas. Por ejemplo, la distancia de la Tierra al Sol es de 93 millones de millas. Este valor se escribe como 93 000 000 millas. En notación científica, que es una forma más compacta, existen muchas maneras correctas de expresarlo, como 93×10^6 millas, 9.3×10^7 millas o 0.93×10^8 millas. Cualquiera de estas formas es correcta, aunque 9.3×10^7 es la que se prefiere, porque al utilizar potencias de 10 se acostumbra dejar sólo un dígito a la izquierda del punto decimal, en este caso, el 9. (Esto se llama la forma estándar.) Así que el exponente, o potencia de 10, cambia cuando el punto decimal del número que le precede se mueve.

También se emplean potencias negativas de 10. Por ejemplo, $10^{-2} = \frac{1}{10^2} = \frac{1}{100} = 0.01$. Entonces, si una potencia de 10 tiene un exponente negativo, el punto decimal se moverá a la izquierda una vez por cada potencia de 10. Por ejemplo, 5.0×10^{-2} es igual a 0.050 (dos movimientos hacia la izquierda).

El punto decimal de una cantidad expresada en notación de potencias de 10 se moverá hacia la derecha o hacia la izquierda independientemente de si la potencia de 10 es positiva o negativa. Las reglas generales para mover el punto decimal son las siguientes:

1. El exponente, o potencia de 10, *aumenta* por 1 por cada lugar que el punto decimal se mueva hacia la *izquierda*.
2. El exponente, o potencia de 10, *disminuye* por 1 por cada lugar que el punto decimal se mueva hacia la *derecha*.

Esto es simplemente una forma de decir que conforme el coeficiente (es decir, el número precedente) disminuye, el exponente aumenta de manera correspondiente, o viceversa. Al final, el número es el mismo.

Ejercicios del apéndice I-D

1. Exprese su peso (en libras) en notación científica.
2. La circunferencia de la Tierra mide aproximadamente 40 000 km. Exprese este valor en notación científica.
3. Evalúe y exprese la respuesta en notación científica: $\frac{12.1}{1.10 \times 10^{-1}}$.
4. Encuentre el valor de $(1.44 \times 10^2)^{1/2}$ en notación científica.
5. ¿Cómo se expresa $(3.0 \times 10^8)^2$ en notación científica?

B Álgebra y relaciones algebraicas comunes

Generalidades

La regla básica de álgebra que se utiliza para resolver ecuaciones es que si usted realiza cualquier operación legítima en ambos lados de la ecuación, ésta permanece como tal, es decir, como una igualdad. (Un ejemplo de una operación no permitida es dividir por cero; ¿por qué?) De acuerdo con esto, al sumar un número en ambos lados, al sacar la raíz cuadrada de ambos lados, al elevar al cubo ambos lados o al dividir ambos lados por el mismo número, la igualdad se mantiene.

Por ejemplo, supongamos que quiere resolver $\frac{x^2 + 6}{2} = 11$ para x. Para hacer esto, primero multiplique ambos lados por 2, lo que da $\left(\frac{x^2 + 6}{\cancel{2}}\right) \times \cancel{2} = 11 \times 2 = 22$ o $x^2 + 6 = 22$. Después, reste 6 a ambos lados para obtener $x^2 + 6 - 6 = 22 - 6 = 16$ o $x^2 = 16$. Por último, saque la raíz cuadrada de ambos lados; la solucion es $x = \pm 4$ (se esperaban dos raíces; ¿por qué?).

Algunos resultados útiles

Muchas veces se solicita *el cuadrado de la suma y/o diferencia de dos números*. Para cualesquiera números a y b:

$$(a \pm b)^2 = a^2 \pm 2ab + b^2$$

De manera similar, *la diferencia de dos cuadrados* se factoriza como:

$$(a^2 - b^2) = (a + b)(a - b)$$

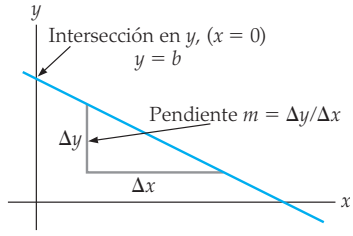
Una ecuación cuadrática es aquella que puede expresarse en la forma $ax^2 + bx + c = 0$. En esta forma, siempre es posible resolverla (generalmente para dos diferentes raíces) utilizando la *fórmula cuadrática*: $x = \dfrac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$. En cinemática, este resultado es especialmente útil, ya que es común tener que resolver ecuaciones de la forma: $4.9t^2 - 10t - 20 = 0$. Sólo hay que insertar los coeficientes (asegurándose de incluir el signo) y despejar t (aquí, t representa el tiempo que tarda una pelota en llegar al suelo luego de que se le arrojó desde un risco; véase el capítulo 2). El resultado es

$$x = \frac{10 \pm \sqrt{10^2 - 4(4.9)(-20)}}{2(4.9)} = \frac{10 \pm 22.2}{9.8}$$
$$= +3.3\text{ s} \quad \text{o} \quad -1.2\text{ s}$$

En todos los problemas de este tipo, el tiempo es el tiempo "de cronómetro" y comienza desde cero; así, la respuesta negativa se ignora, pues no es razonable desde el punto de vista de la física, aun cuando sea una solución válida para la ecuación.

Resolución de ecuaciones simultáneas

En ocasiones, resolver un problema requiere resolver dos o más ecuaciones de forma simultánea. En general, si se tienen N incógnitas en un problema, necesitaremos exactamente N ecuaciones independientes. Si se tienen menos de N ecuaciones, no son suficientes para obtener soluciones completas. Si se tienen más de N ecuaciones, entonces algunas son redundantes, y aún así es posible obtener una solución, aunque más complicada. En general, en este libro, nos enfrentaremos a dos ecuaciones simultáneas, y ambas serán lineales. Las ecuaciones lineales tienen la forma $y = mx + b$. Recuerde que cuando se grafica en un sistema de coordenadas cartesianas x-y, el resultado es una línea recta con una pendiente m ($\Delta y/\Delta x$) y una intersección de b en y, como muestra la línea azul.



Para resolver dos ecuaciones lineales de manera simultánea *gráficamente*, sólo hay que trazarlas en los ejes y evaluar las coordenadas en su punto de intersección. Mientras que esto es posible en principio, sólo se obtiene una respuesta aproximada y, por lo general, requiere un poco más de tiempo.

El método más común (y exacto) de resolver ecuaciones simultáneas implica el uso del álgebra. En esencia, se resuelve una ecuación para una incógnita y se sustituye el resultado en la otra ecuación, para terminar con una ecuación y una incógnita. Supongamos que tenemos dos ecuaciones y dos incógnitas (x y y), pero, en general, cualesquiera dos cantidades desconocidas:

$$3y + 4x = 4 \qquad \text{y} \qquad 2x - y = 2$$

Al resolver la segunda ecuación para y, se tiene $y = 2x - 2$. Al sustituir este valor para y en la primera ecuación, tenemos $3(2x - 2) + 4x = 4$. Por lo tanto, $10x = 10$ y $x = 1$. Se coloca este valor en la segunda de las dos ecuaciones originales y se obtiene $2(1) - y = 2$ y, por consiguiente, $y = 0$. (Desde luego, en este momento es conveniente sustituir las respuestas para hacer una doble verificación y ver si resuelven ambas ecuaciones.)

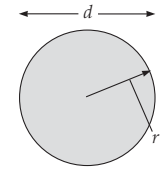
Ejercicios del apéndice I-E

1. Desarrolle $(y - 2x)^2$.
2. Exprese $x^2 - 4x + 4$ como un producto de dos factores.
3. Resuelva la siguiente ecuación para t: $4.9t^2 - 30t + 10 = 0$. ¿Cuántas raíces razonables desde el punto de vista de la física hay aquí?
4. Demuestre que una ecuación cuadrática tiene raíces reales sólo si $b^2 \geq 4ac$. ¿En qué condiciones (para a, b y c) son idénticas las dos raíces?
5. Resuelva estas ecuaciones de manera simultánea empleando el álgebra: $2x - 3y = 2$ y $3y + 5x = 7$.
6. Resuelva las dos ecuaciones del ejercicio 5 de manera aproximada utilizando métodos gráficos.

C Relaciones geométricas

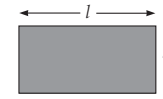
En física y en muchas otras áreas de la ciencia, es importante saber cómo encontrar circunferencias, áreas y volúmenes de algunas formas comunes. He aquí algunas ecuaciones para tales formas.

Circunferencia (c), Área (A), y Volumen (V)



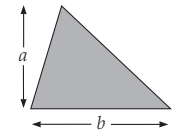
Círculo: $c = 2\pi r = \pi d$

$A = \pi r^2 = \dfrac{\pi d^2}{4}$

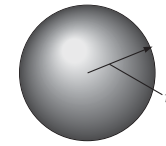


Rectángulo: $c = 2l + 2w$

$A = l \times w$

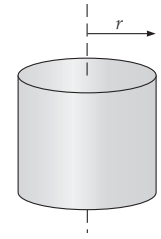


Triángulo: $A = \dfrac{1}{2}ab$



Esfera: $A = 4\pi r^2$

$V = \dfrac{4}{3}\pi r^3$



Cilindro: $A = \pi r^2$ (extremo)

$A = 2\pi rh$ (cuerpo)

$V = \pi r^2 h$

Para practicar, realice los siguientes ejercicios.

Ejercicios del apéndice I-F

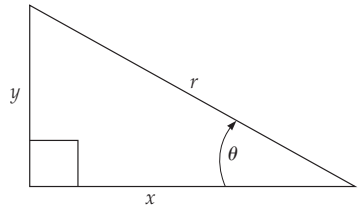
1. Estime el volumen de una bola para jugar a los bolos en centímetros cúbicos y en pulgadas cúbicas.

2. Un agujero de forma cuadrada mide 5.0 cm de lado. ¿Cuál es el área del extremo de una varilla cilíndrica que apenas cabe en el agujero?
3. Un vaso de agua tiene un diámetro interior de 4.5 cm y contiene una columna de agua de 4.0 in de alto. ¿Qué volumen de agua contiene en litros?
4. ¿Cuál es el área de la superficie total de un panqué que mide 16 cm de diámetro y 8.0 mm de grosor?
5. Calcule el volumen del panqué del ejercicio 4 en centímetros cúbicos.

D Relaciones trigonométricas

Comprender la trigonometría elemental es esencial en física, ya que muchas de las cantidades que se manejan son vectores. Aquí presentamos un breve resumen de las definiciones comunes, las primeras de las cuales usted debe conocer de memoria.

Definiciones de las funciones trigonométricas



$$\text{sen}\,\theta = \frac{y}{r} \qquad \cos\theta = \frac{x}{r} \qquad \tan\theta = \frac{\text{sen}\,\theta}{\cos\theta} = \frac{y}{x}$$

$\theta°$ (rad)	sen θ	cos θ	tan θ
0°(0)	0	1	0
30° ($\pi/6$)	0.500	0.866	0.577
45° ($\pi/4$)	0.707	0.707	1.00
60° ($\pi/3$)	0.866	0.500	1.73
90° ($\pi/2$)	1	0	$\to \infty$

Para ángulos muy pequeños,

θ pequeño:

$$y \longrightarrow s$$
$$x \longrightarrow r$$

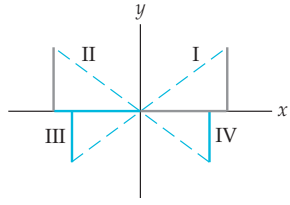
$$\theta\,(\text{en rad}) = \frac{s}{r} \approx \frac{y}{r} \approx \frac{y}{x}$$

$$\theta\,(\text{en rad}) \approx \text{sen}\,\theta \approx \tan\theta$$

$$\cos\theta \approx 1 \qquad \text{sen}\,\theta \approx \theta\ (\text{radianes})$$

$$\tan\theta = \frac{\text{sen}\,\theta}{\cos\theta} \approx \theta\ (\text{radianes})$$

El signo de una función trigonométrica depende del cuadrante o de los signos de x y y. Por ejemplo, en el segundo cuadrante, x es negativa y y positiva, por lo tanto, cos $q = x/r$ es negativo y sen $q = x/r$ es positivo. (Observe que r siempre se toma como positiva.) En esta figura, las líneas grises son positivas y las azules negativas.



Algunas identidades trigonométricas útiles

$$\text{sen}^2\theta + \cos^2\theta = 1$$
$$\text{sen}\,2\theta = 2\,\text{sen}\,\theta\cos\theta$$
$$\cos 2\theta = \cos^2\theta - \text{sen}^2\theta = 2\cos^2\theta - 1 = 1 - 2\,\text{sen}^2\theta$$
$$\text{sen}^2\theta = \frac{1}{2}(1 - \cos 2\theta)$$
$$\cos^2\theta = \frac{1}{2}(1 + \cos 2\theta)$$

Para identidades de ángulo medio ($\theta/2$), simplemente reemplace θ con $\theta/2$; por ejemplo,

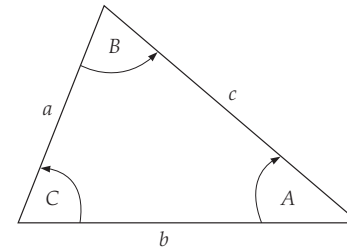
$$\text{sen}^2\,\theta/2 = \frac{1}{2}(1 - \cos\theta)$$
$$\cos^2\theta/2 = \frac{1}{2}(1 + \cos\theta)$$

En ocasiones, resultan de interés valores trigonométricos de sumas y diferencias de ángulos. He aquí varias relaciones básicas.

$$\text{sen}(\alpha \pm \beta) = \text{sen}\,\alpha\cos\beta \pm \cos\alpha\,\text{sen}\,\beta$$
$$\cos(\alpha \pm \beta) = \cos\alpha\cos\beta \mp \text{sen}\,\alpha\,\text{sen}\,\beta$$
$$\tan(\alpha \pm \beta) = \frac{\tan\alpha \pm \tan\beta}{1 \mp \tan\alpha\tan\beta}$$

Ley de los cosenos

Para un triángulo con ángulos A, B y C, y lados opuestos a, b y c, respectivamente:



$$a^2 = b^2 + c^2 - 2bc\cos A \quad \textit{(con resultados similares para } b^2 = \cdots \textit{ y } c^2 = \cdots\textit{).}$$

Si $A = 90°$, esta ecuación se reduce al teorema de Pitágoras, tal como debería:

$$a^2 = b^2 + c^2 \quad (\textit{de la forma } r^2 = x^2 + y^2)$$

Ley de los senos

Para un triángulo con ángulos A, B y C, y lados opuestos a, b y c, respectivamente:

$$\frac{a}{\text{sen}\,A} = \frac{b}{\text{sen}\,B} = \frac{c}{\text{sen}\,C}$$

Ejercicios del apéndice I-G

1. Si usted está de pie a nivel del piso, tiene que mirar hacia arriba a un ángulo de 60 grados para ver la parte superior de un edificio que está a 50 m de usted. ¿Qué tan alto es el edificio? ¿Qué tan lejos está la parte superior del edificio de usted?
2. En un conjunto de ejes cartesianos x-y, un punto se encuentra en $x = -2.5$ y $y = -4.2$. ¿En qué cuadrante se localiza? ¿Cuál es el ángulo de la línea dibujada entre el punto y el origen? (Exprese la respuesta en grados y en radianes.)

3. Utilice la ecuación del seno para la suma de dos ángulos, uno de 30° y el otro de 60°, para demostrar que el seno de un ángulo de 90° es 1.00.
4. Suponga que la órbita de la Tierra alrededor del Sol es un círculo con un radio de 150 millones de km. Calcule la distancia de la longitud de arco que recorre la Tierra alrededor del Sol en cuatro meses. Utilizando las leyes de los senos y los cosenos, determine la distancia de la línea recta entre los puntos inicial y final de este arco.
5. Un triángulo recto tiene una hipotenusa que mide 11 cm y un ángulo de 25°. Determine los dos catetos, el área y el perímetro del triángulo.

E Logaritmos

Las siguientes son definiciones y relaciones fundamentales de los logaritmos. En física, los logaritmos se utilizan a menudo; usted debe saber qué son y cómo se utilizan. Los logaritmos son muy útiles porque permiten multiplicar y dividir números muy grandes y muy pequeños sumando y restando exponentes (a los que llamamos logaritmos de los números).

Definición general de logaritmos

Si un número x se escribe como otro número a a una potencia n, como $x = a^n$, entonces n se define como *el logaritmo del número x a la base a*. Esto se escribe de forma resumida como

$$n \equiv \log_a x.$$

Logaritmos comunes

Si la base a es 10, los logaritmos se llaman *logaritmos comunes*. Cuando se utiliza la abreviación *log* sin especificar una base, se supone que ésta es 10. Si se utiliza otra base, debe especificarse claramente. Por ejemplo, $1000 = 10^3$; por consiguiente, $3 = \log_{10} 1000$, o simplemente $3 = \log 1000$. Esto se lee "3 es el logaritmo de 1000".

Identidades para logaritmos comunes

Para cualesquiera dos números x y y:

$$\log(10^x) = x$$
$$\log(xy) = \log x + \log y$$
$$\log\left(\frac{x}{y}\right) = \log x - \log y$$
$$\log(x^y) = y \log x$$

Logaritmos naturales

El logaritmo natural tiene como base el número irracional e. Para seis cifras significativas, su valor es $e \approx 2.71828\ldots$ Por fortuna, la mayoría de las calculadoras tienen este número (al igual que otros números irracionales, como pi) en la memoria. (Localice tanto e como π en su calculadora.) El logaritmo natural recibió ese nombre porque ocurre naturalmente cuando se describe una cantidad que aumenta o disminuye a un porcentaje o tasa constante. El logaritmo natural se abrevia *ln* para distinguirlo del logaritmo común, *log*. Esto es, $\log_e x \equiv \ln x$, y si $n = \ln x$, entonces, $x = e^n$. De manera similar al logaritmo común, tenemos las siguientes relaciones para cualesquiera dos números x y y:

$$\ln(e^x) = x$$
$$\ln(xy) = \ln x + \ln y$$
$$\ln\left(\frac{x}{y}\right) = \ln x - \ln y$$
$$\ln(x^y) = y \ln x$$

En ocasiones, usted tendrá que hacer conversiones entre los dos tipos de logaritmos. En tal caso, las siguientes relaciones le ayudarán:

$$\log x = 0.43429 \ln x$$
$$\ln x = 2.3026 \log x$$

Para practicar con logaritmos de los dos tipos, realice los siguientes ejercicios:

Ejercicios del apéndice I-H:

1. Utilice su calculadora para encontrar lo siguiente: log 20, log 50, log 2500 y log 3.
2. Explique por qué los números menores de 10 tienen un logaritmo negativo. ¿Tiene sentido hablar de log(−100)? Explique por qué.
3. Utilice su calculadora para encontrar lo siguiente: ln 20, log 2, ln 100 y log 3.
4. Verifique dos veces sus respuestas para ln 2 y log 2 en los ejercicios 1 y 3 utilizando las relaciones $\log x = 0.43429 \ln x$ y $\ln x = 2.3026 \log x$.
5. Demuestre que las reglas para combinar logaritmos funcionan en el siguiente caso evaluando cada lado y mostrando una equivalencia: $\log 1500 = \log (15 \times 100)$, $\log 6400 = \log\left(\frac{64}{0.01}\right)$ y $\log 8 = \log(2^3)$.
6. Demuestre que las reglas para combinar logaritmos funcionan en el siguiente caso evaluando cada lado y mostrando una equivalencia: $\ln 4 = \ln(2 \times 2)$, 1n 20 5 2.3026 log (2×10) y $\log 49 = 0.43429 \ln(7^2)$.
7. Al describir el crecimiento de una colonia bacteriana, el número N de bacterias en un tiempo dado t (a partir del inicio de la observación) se escribe en términos de un número al comienzo, N_o, como sigue: $N = N_o e^{0.020t}$, donde t está en minutos. ¿Cuántos minutos tarda la colonia en duplicar su tamaño?
8. Al describir la desintegración de una muestra radiactiva de núcleos atómicos, el número N de núcleos sin desintegrar en cualquier tiempo dado t (a partir del inicio de la observación) se escribe en términos del número al comienzo, N_o, como sigue: $N = N_o e^{-0.050t}$, donde t está en años. ¿Al cabo de cuántos años aún permanece una décima parte del número original de núcleos?

APÉNDICE II Teoría cinética de los gases

Los supuestos básicos son:

1. Todas las moléculas de un gas puro tienen la misma masa (m) y están en movimiento continuo y totalmente aleatorio. (La masa de cada molécula es tan pequeña que el efecto de la gravedad sobre ella es insignificante.)
2. Las moléculas de gas están separadas por grandes distancias y ocupan un volumen insignificante en comparación con éstas.
3. Las moléculas no ejercen fuerzas unas sobre otras, excepto cuando chocan.

4. Los choques entre las moléculas y con las paredes del recipiente son perfectamente elásticos.

La magnitud de la fuerza que ejerce una molécula de gas sobre la pared del recipiente con la que choca es $F = \Delta p/\Delta t$. Suponiendo que la dirección de la velocidad (v_x) es normal a la pared, la magnitud de la fuerza promedio es

$$F = \frac{\Delta(mv)}{\Delta t} = \frac{mv_x - (-mv_x)}{\Delta t} = \frac{2mv_x}{\Delta t} \tag{1}$$

Después de chocar contra una pared del recipiente, que por simplicidad supondremos que es un cubo con lados de longitud L, la molécula rebota en línea recta. Supongamos que la molécula llega a la pared opuesta sin chocar con ninguna otra molécula en el camino. Entonces, la molécula recorre la distancia L en un tiempo igual *a* L/v_x. Después del choque contra esa pared, suponiendo de nuevo que no hay choques en el camino de regreso, el trayecto de ida y vuelta tardará $\Delta t = 2L/v_x$. Por lo tanto, el número de choques por unidad de tiempo de una molécula contra una pared dada es $v_x/2L$, y la fuerza promedio sobre la pared por choques sucesivos es

$$F = \frac{2mv_x}{\Delta t} = \frac{2mv_x}{2L/v_x} = \frac{mv_x^2}{L} \tag{2}$$

Los movimientos aleatorios de la gran cantidad de moléculas producen una fuerza relativamente constante sobre las paredes; la presión (p) es la fuerza total sobre una pared dividida por el área de la pared:

$$p = \frac{\Sigma F_i}{L^2} = \frac{m(v_{x_1}^2 + v_{x_2}^2 + v_{x_3}^2 + \cdots)}{L^3} \tag{3}$$

Los subíndices se refieren a moléculas individuales.

El promedio de los cuadrados de las rapideces se determina así:

$$\overline{v_x^2} = \frac{v_{x_1}^2 + v_{x_2}^2 + v_{x_3}^2 + \cdots}{N}$$

donde N es el número de moléculas en el recipiente. En términos de este promedio, podemos escribir la ecuación 3 como

$$p = \frac{Nm\overline{v_x^2}}{L^3} \tag{4}$$

Sin embargo, los movimientos de las moléculas se dan con igual frecuencia a lo largo de los tres ejes, así que $\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2}$ y $\overline{v^2} = \overline{v_x^2} + \overline{v_y^2} + \overline{v_z^2} = 3\overline{v_x^2}$. Entonces

$$\sqrt{\overline{v^2}} = v_{\text{rms}}$$

donde v_{rms} es la rapidez efectiva o cuadrática media. Si sustituimos este resultado en la ecuación 4 y reemplazamos L^3 por V (dado que L^3 es el volumen del recipiente cúbico), obtenemos

$$pV = \tfrac{1}{3}Nmv_{\text{rms}}^2 \tag{5}$$

Este resultado es correcto aunque se ignoraron los choques entre moléculas. Estadísticamente, estos choques se cancelan en promedio, de manera que el número de choques con cada pared es el descrito. Este resultado también es independiente de la forma del recipiente, pero, en este caso, el uso de un cubo simplifica la deducción.

Ahora combinamos este resultado con la ley empírica de los gases perfectos:

$$pV = Nk_BT = \tfrac{1}{3}Nmv_{\text{rms}}^2$$

Entonces, la energía cinética promedio por molécula de gas es proporcional a la temperatura absoluta del gas:

$$\overline{K} = \tfrac{1}{2}mv_{\text{rms}}^2 = \tfrac{3}{2}k_BT \tag{6}$$

El tiempo de choque es insignificante en comparación con el tiempo entre choques. Algo de la energía cinética se convertirá momentáneamente en energía potencial durante un choque; sin embargo, podemos ignorar esta energía potencial, porque cada molécula pasa un tiempo insignificante chocando. Por lo tanto, con esta aproximación, la energía cinética total es la energía interna del gas, y la energía interna de un gas perfecto es directamente proporcional a su temperatura absoluta.

APÉNDICE III Datos planetarios

Nombre	Radio ecuatorial (km)	Masa (en comparación con la de la Tierra)*	Densidad promedio ($\times 10^3$ kg/m^3)	Gravedad en la superficie (en comparación con la de la Tierra)	Eje semimayor $\times 10^6$ km	Eje semimayor UA†	Periodo orbital Años	Periodo orbital Días	Excentricidad	Inclinación respecto a la elíptica
Mercurio	2439	0.0553	5.43	0.378	57.9	0.3871	0.24084	87.96	0.2056	7°00′26″
Venus	6052	0.8150	5.24	0.894	108.2	0.7233	0.61515	224.68	0.0068	3°23′40″
Tierra	6378.140	1	5.515	1	149.6	1	1.00004	365.25	0.0167	0°00′14″
Marte	3397.2	0.1074	3.93	0.379	227.9	1.5237	1.8808	686.95	0.0934	1°51′09″
Júpiter	71398	317.89	1.36	2.54	778.3	5.2028	11.862	4337	0.0483	1°18′29″
Saturno	60000	95.17	0.71	1.07	1427.0	9.5388	29.456	10760	0.0560	2°29′17″
Urano	26145	14.56	1.30	0.8	2871.0	19.1914	84.07	30700	0.0461	0°48′26″
Neptuno	24300	17.24	1.8	1.2	4497.1	30.0611	164.81	60200	0.0100	1°46′27″
Plutón	1500–1800	0.02	0.5–0.8	~0.03	5913.5	39.5294	248.53	90780	0.2484	17°09′03″

*Masa del planeta/masa de la Tierra, donde $M_E = 6.0 \times 10^{24}$ kg.

†Unidad astronómica: 1 AU $= 1.5 \times 10^8$ km, la distancia promedio entre la Tierra y el Sol.

APÉNDICE IV Lista alfabética de elementos químicos (la tabla periódica aparece al final del libro).

Elemento	Símbolo	Número atómico (núm. de protones)	Masa atómica	Elemento	Símbolo	Número atómico (núm. de protones)	Masa atómica	Elemento	Símbolo	Número atómico (núm. de protones)	Masa atómica
Actinio	Ac	89	227.0278	Francio	Fr	87	(223)	Plata	Ag	47	107.8682
Aluminio	Al	13	26.98154	Gadolinio	Gd	64	157.25	Platino	Pt	78	195.08
Americio	Am	95	(243)	Galio	Ga	31	69.72	Plomo	Pb	82	207.2
Antimonio	Sb	51	121.757	Germanio	Ge	32	72.561	Plutonio	Pu	94	(244)
Argón	Ar	18	39.948	Hafnio	Hf	72	178.49	Polonio	Po	84	(209)
Arsénico	As	33	74.9216	Hahnio	Ha	105	(262)	Potasio	K	19	39.0983
Astato	At	85	(210)	Hassio	Hs	108	(265)	Praseodimio	Pr	59	140.9077
Azufre	S	16	32.066	Helio	He	2	4.00260	Prometio	Pm	61	(145)
Bario	Ba	56	137.33	Hidrógeno	H	1	1.00794	Protactinio	Pa	91	231.0359
Berilio	Be	4	9.01218	Hierro	Fe	26	55.847	Radio	Ra	88	226.0254
Berkelio	Bk	97	(247)	Holmio	Ho	67	164.9304	Radón	Rn	86	(222)
Bismuto	Bi	83	208.9804	Indio	In	49	114.82	Renio	Re	75	186.207
Bohrio	Bh	107	(264)	Iridio	Ir	77	192.22	Rodio	Rh	45	102.9055
Boro	B	5	10.81	Iterbio	Yb	70	173.04	Rubidio	Rb	37	85.4678
Bromo	Br	35	79.904	Itrio	Y	39	88.9059	Rutenio	Ru	44	101.07
Cadmio	Cd	48	112.41	Kriptón	Kr	36	83.80	Rutherfordio	Rf	104	(261)
Calcio	Ca	20	40.078	Lantano	La	57	138.9055	Samario	Sm	62	150.36
Californio	Cf	98	(251)	Lawrencio	Lr	103	(260)	Seaborgio	Sg	106	(263)
Carbono	C	6	12.011	Litio	Li	3	6.941	Selenio	Se	34	78.96
Cerio	Ce	58	140.12	Lutecio	Lu	71	174.967	Silicio	Si	14	28.0855
Cesio	Cs	55	132.9054	Magnesio	Mg	12	24.305	Sodio	Na	11	22.989 77
Cloro	Cl	17	35.453	Manganeso	Mn	25	54.9380	Talio	TI	81	204.383
Cobalto	Co	27	58.9332	Meitnerio	Mt	109	(268)	Tantalio	Ta	73	180.9479
Cobre	Cu	29	63.546	Mendelevio	Md	101	(258)	Tecnecio	Tc	43	(98)
Cromo	Cr	24	51.996	Mercurio	Hg	80	200.59	Telurio	Te	52	127.60
Curio	Cm	96	(247)	Molibdeno	Mo	42	95.94	Terbio	Tb	65	158.9254
Disprosio	Dy	66	162.50	Neodimio	Nd	60	144.24	Titanio	Ti	22	47.88
Dubnio	Db	105	(262)	Neón	Ne	10	20.1797	Torio	Th	90	232.0381
Einstenio	Es	99	(252)	Neptunio	Np	93	237.048	Tulio	Tm	69	168.9342
Erbio	Er	68	167.26	Niobio	Nb	41	92.9064	Tungsteno	W	74	183.85
Escandio	Sc	21	44.9559	Níquel	Ni	28	58.69	Uranio	U	92	238.0289
Estaño	Sn	50	118.710	Nitrógeno	N	7	14.0067	Vanadio	V	23	50.9415
Estroncio	Sr	38	87.62	Nobelio	No	102	(259)	Xenón	Xe	54	131.29
Europio	Eu	63	151.96	Oro	Au	79	196.9665	Yodo	1	53	126.9045
Fermio	Fm	100	(257)	Osmio	Os	76	190.2	Zinc	Zn	30	65.39
Flúor	F	9	18.998403	Oxígeno	O	8	15.9994	Zirconio	Zr	40	91.22
Fósforo	P	15	30.973 76	Paladio	Pd	46	106.42				

APÉNDICE V Propiedades de isótopos seleccionados

Número atómico (Z)	Elemento	Símbolo	Número de masa (A)	Masa atómica*	Abundancia (%) o modo de desintegración† (si es radiactivo)	Semivida (si es radiactivo)
0	(Neutrón)	n	1	1.008 665	β^-	10.6 min
1	Hidrógeno	H	1	1.007 825	99.985	
	Deuterio	D	2	2.014 102	0.015	
	Tritio	T	3	3.016 049	β^-	12.33 años
2	Helio	He	3	3.016 029	0.00014	
			4	4.002 603	≈100	
3	Litio	Li	6	6.015 123	7.5	
			7	7.016 005	92.5	

Número atómico (Z)	Elemento	Símbolo	Número de masa (A)	Masa atómica*	Abundancia (%) o modo de desintegración† (si es radiactivo)	Semivida (si es radiactivo)
4	Berilio	Be	7	7.016 930	CE, γ	53.3 d
			8	8.005 305	2α	6.7×10^{-17} s
			9	9.012 183	100	
5	Boro	B	10	10.012 938	19.8	
			11	11.009 305	80.2	
			12	12.014 353	β^-	20.4 ms
6	Carbono	C	11	11.011 433	β^+, CE	20.4 ms
			12	12.000 000	98.89	
			13	13.003 355	1.11	
			14	14.003 242	β^-	5730 años
7	Nitrógeno	N	13	13.005 739	β^-	9.96 min
			14	14.003 074	99.63	
			15	15.000 109	0.37	
8	Oxígeno	O	15	15.003 065	β^+, CE	122 s
			16	15.994 915	99.76	
			18	17.999 159	0.204	
9	Flúor	F	19	18.998 403	100	
10	Neón	Ne	20	19.992 439	90.51	
			22	21.991 384	9.22	
11	Sodio	Na	22	21.994 435	β^+, CE, γ	2.602 años
			23	22.989 770	100	
			24	23.990 964	β^-, γ	15.0 h
12	Magnesio	Mg	24	23.985 045	78.99	
13	Aluminio	Al	27	26.981 541	100	
14	Silicio	Si	28	27.976 928	92.23	
			31	30.975 364	β^-, γ	2.62 h
15	Fósforo	P	31	30.973 763	100	
			32	31.973 908	β^-	14.28 d
16	Azufre	S	32	31.972 072	95.0	
			35	34.969 033	β^-	87.4 d
17	Cloro	Cl	35	34.968 853	75.77	
			37	36.965 903	24.23	
18	Argón	Ar	40	39.962 383	99.60	
19	Potasio	K	39	38.963 708	93.26	
			40	39.964 000	β^-, CE, γ, β^+	1.28×10^9 años
20	Calcio	Ca	30	39.962 591	96.94	
24	Cromo	Cr	52	51.940 510	83.79	
25	Manganeso	Mn	55	54.938 046	100	
26	Hierro	Fe	56	55.934 939	91.8	
27	Cobalto	Co	59	58.933 198	100	
			60	59.933 820	β^-, γ	5.271 años
28	Níquel	Ni	58	57.935 347	68.3	
			60	59.930 789	26.1	
			64	63.927 968	0.91	
29	Cobre	Cu	63	62.929 599	69.2	
			64	63.929 766	β^-, β^+	12.7 h
			65	64.927 792	30.8	
30	Zinc	Zn	64	63.929 145	48.6	
			66	65.926 035	27.9	
33	Arsénico	As	75	74.921 596	100	
35	Bromo	Br	79	78.918 336	50.69	
36	Kriptón	Kr	84	83.911 506	57.0	
			89	88.917 563	β^-	3.2 min
38	Estroncio	Sr	86	85.909 273	9.8	
			88	87.905 625	82.6	
			90	89.907 746	β^-	28.8 años
39	Itrio	Y	89	89.905 856	100	
43	Tecnecio	Tc	98	97.907 210	β^-, γ	4.2×10^6 años

Número atómico (Z)	Elemento	Símbolo	Número de masa (A)	Masa atómica*	Abundancia (%) o modo de desintegración† (si es radiactivo)	Semivida (si es radiactivo)
47	Plata	Ag	107	106.905 095	51.83	
			109	108.904 754	48.17	
48	Cadmio	Cd	114	113.903 361	28.7	
49	Indio	In	115	114.903 88	95.7; β^-	5.1×10^{14} años
50	Estaño	Sn	120	119.902 199	32.4	
53	Yodo	I	127	126.904 477	100	
			131	130.906 118	β^-, γ	8.04 d
54	Xenón	Xe	132	131.904 15	26.9	
			136	135.907 22	8.9	
55	Cesio	Cs	133	132.905 43	100	
56	Bario	Ba	137	136.905 82	11.2	
			138	137.905 24	71.7	
			144	143.922 73	β^-	11.9 s
61	Prometio	Pm	145	144.912 75	CE, α, γ	17.7 años
74	Tungsteno	W	184	183.950 95	30.7	
76	Osmio	Os	191	190.960 94	β^-, γ	15.4 d
			192	191.961 49	41.0	
78	Platino	Pt	195	194.964 79	33.8	
79	Oro	Au	197	196.966 56	100	
80	Mercurio	Hg	202	201.970 63	29.8	
81	Talio	Tl	205	204.974 41	70.5	
			210	209.990 069	β^-	1.3 min
82	Plomo	Pb	204	203.973 044	β^-, 1.48	1.4×10^{17} años
			206	205.974 46	24.1	
			207	206.975 89	22.1	
			208	207.976 64	52.3	
			210	209.984 18	α, β^-, γ	22.3 años
			211	210.988 74	β^-, γ	36.1 min
			212	211.991 88	β^-, γ	10.64 h
			214	213.999 80	β^-, γ	26.8 min
83	Bismuto	Bi	209	208.980 39	100	
			211	210.987 26	α, β^-, γ	2.15 min
84	Polonio	Po	210	209.982 86	α, γ	138.38 d
			214	213.995 19	α, γ	164 μs
86	Radón	Rn	222	222.017 574	α, β	3.8235 d
87	Francio	Fr	223	223.019 734	α, β^-, γ	21.8 min
88	Radio	Ra	226	226.025 406	α, γ	1.60×10^3 años
			228	228.031 069	β^-	5.76 años
89	Actinio	Ac	227	227.027 751	α, β^-, γ	21.773 años
90	Torio	Th	228	228.028 73	α, γ	1.9131 años
			232	232.038 054	100; α, γ	1.41×10^{10} años
92	Uranio	U	232	232.037 14	α, γ	72 años
			233	233.039 629	α, γ	1.592×10^5 años
			235	235.043 925	0.72; α, γ	7.038×10^8 años
			236	236.045 563	α, γ	2.342×10^7 años
			238	238.050 786	99.275; α, γ	4.468×10^9 años
			239	239.054 291	β^-, γ	23.5 min
93	Neptunio	Np	239	239.052 932	β^-, γ	2.35 d
94	Plutonio	Pu	239	239.052 158	α, γ	2.41×10^4 años
95	Americio	Am	243	243.061 374	α, γ	7.37×10^3 años
96	Curio	Cm	245	245.065 487	α, γ	8.5×10^3 años
97	Berkelio	Bk	247	247.070 03	α, γ	1.4×10^3 años
98	Californio	Cf	249	249.074 849	α, γ	351 años
99	Einstenio	Es	254	254.088 02	α, γ, β^-	276 d
100	Fermio	Fm	253	253.085 18	CE, α, γ	3.0 d

*Las masas en esta tabla corresponden al átomo neutral, incluyendo los electrones Z.

†"CE" significa captura de electrones.

RESPUESTAS A LOS EJERCICIOS DE REFUERZO

Capítulo 1

1.1 L = 10 m.
1.2 Sí, [L] = [L], o sea, m = m.
1.3 *a*) 50 mi/h [(0.447 m/s)/(mi/h)] = 22 m/s.
b) (1 mi/h)(1609 km/mi)(1 h/3600 s) = 0.477 m/s.
1.4 13.3 veces.
1.5 $1\ \text{m}^3 = 10^6\ \text{cm}^3$.
1.6 El europeo. 10 mi/gal ≈ 16 km/4 L = 4 km/L, en comparación con 10 km/L.
1.7 *a*) $7.0 \times 10^5\ \text{kg}^2$ *b*) 3.02×10^2 (sin unidades).
1.8 *a*) 23.70. *b*) 22.09.
1.9 $V = \pi r^2 h = \pi(0.490\ \text{m})^2(1.28\ \text{m}) = 0.965\ \text{m}^3$
1.10 11.6 m.
1.11 Un poco más pronunciado, $\theta = 31.3°$.
1.12 $750\ \text{cm}^3 = 7.50 \times 10^{-4}\ \text{m}^3 \approx 10^{-3}\ \text{m}^3$,
$m = \rho V \approx (10^3\ \text{kg/m}^3)(10^{-3}\ \text{m}^3) = 1\ \text{kg}$.
(Por cálculo directo, $m = 0.79$ kg.)
1.13 $V \approx 10^{-2}\ \text{m}^3$, células/volumen = 10^4 células/mm^3
($10^9\ \text{mm}^3/\text{m}^3$) = 10^{13} células/m^3 y (células/volumen)
(volumen) ≈ 10^{11} glóbulos blancos.

Capítulo 2

2.1 $\Delta t = (8 \times 5.0\ \text{s}) + (7 \times 10\ \text{s}) = 110\ \text{s}$.
2.2 $s_1 = 2.00$ m/s; $s_2 = 1.52$ m/s; $s_3 = 1.72\ \text{m/s} \neq 0$, aunque la velocidad es cero.
2.3 No. Si la velocidad también es en la dirección negativa, el objeto se acelerará.
2.4 9.0 m/s en la dirección del movimiento original.
2.5 Sí, 96 m. (Mucho más rápido, ¿no?)
2.6 No, siempre más que una variable incógnita.
2.7 No, cambia la posición x_o, pero la distancia de separación es la misma.
2.8 $x = v^2/2a$, $x_B = 48.6$ m y $x_c = 39.6$ m; el Blazer no deberá acercarse a menos de 9.0 m.
2.9 1.16 s más.
2.10 Tiempo para que el billete caiga su longitud = 0.179 s. Esto es menor que el tiempo de reacción medio (0.192 s) calculado en el ejemplo, así que la mayoría de la gente no atrapa el billete.
2.11 $y_u = y_d = 5.12$ m, medido desde la referencia $y = 0$ en el punto donde se soltó.
2.12 Ecuación 2.8′, $t = 4.6$ s; ecuación 2.10′, $t = 4.6$ s.

Capítulo 3

3.1 $v_x = -0.40$ m/s, $v_y = +0.30$ m/s; la distancia no cambia.
3.2 $x = 9.00$ m, $y = 12.6$ m.
3.3 $\vec{\mathbf{v}} = (0)\,\hat{\mathbf{x}} + (3.7\ \text{m/s})\,\hat{\mathbf{y}}$.
3.4 $\vec{\mathbf{C}} = (-7.7\ \text{m})\,\hat{\mathbf{x}} + (-4.3\ \text{m})\,\hat{\mathbf{y}}$.
3.5 *a*) $y_o = +25$ m y $y = 0$; la ecuación es la misma. *b*) $\vec{\mathbf{v}} = (8.25\ \text{m/s})\,\hat{\mathbf{x}} + (-22.1\ \text{m/s})\,\hat{\mathbf{y}}$.
3.6 Ambos aumentan seis veces.
3.7 *a*) Si no, la piedra caería a un lado de la tabla. *b*) No puede aplicarse la ecuación 3.11; las alturas inicial y final no son iguales. $R = 15$ m, muy distinta de la respuesta de 27 m.
3.8 La pelota lanzada a 45°, pues tendría mayor velocidad inicial.
3.9 En la cúspide del arco parabólico, el movimiento vertical del jugador es cero y es muy pequeño a ambos lados de esta altura máxima. Aquí, el componente horizontal de velocidad del jugador domina, y él se mueve horizontalmente, con muy poco movimiento en la dirección vertical. Esto produce la ilusión de estar "suspendido" en el aire.
3.10 a 4.15 m de la red.
3.11 $v_{bs}t = (2.33\ \text{m/s})(225\ \text{m}) = 524$ m
3.12 a 14.5° al oeste del norte.

Capítulo 4

4.1 6.0 m/s en la dirección de la fuerza neta.
4.2 *a*) 11 lb. *b*) Peso en libras ≈ 2.2 lb/kg.
4.3 8.3 N
4.4 *a*) 50° por arriba del eje $+x$. *b*) componentes x y y invertidos: $\vec{\mathbf{v}} = (9.8\ \text{m/s})\,\hat{\mathbf{x}} + (4.5\ \text{m/s})\,\hat{\mathbf{y}}$.
4.5 Sí, la atracción gravitacional mutua entre el portafolios y la Tierra.
4.6 *a*) $m_2 > 1.7$ kg. *b*) $\theta < 17.5°$.
4.7 *a*) 7.35 N. *b*) Despreciando la resistencia del aire, 7.35 N, hacia abajo.
4.8 Aumenta. $\tan\theta = \dfrac{T}{mg} = \dfrac{55\ \text{N}}{(5.0\ \text{kg})(9.8\ \text{m/s}^2)} = 1.1$, $\theta = 48°$
4.9 *a*) $F_1 = 3.5w$. Incluso mayor que F_2. *b*) $\Sigma F_y = ma$ y tanto F_1 como F_2 aumentarían.
4.10 $\mu_s = 1.41\mu_k$ (para tres casos de la tabla 4.1).
4.11 No. F varía con el ángulo, siendo el ángulo para la fuerza mínima aplicada aproximadamente de 33° en este caso. (Se requieren fuerzas mayores con 20 y 50°.) En general, el ángulo óptimo depende del coeficiente de fricción.
4.12 La fricción es cinética, y f_k es en la dirección $+x$. La aceleración, en la dirección $-x$.
4.13 La resistencia del aire no sólo depende de la rapidez, sino también del tamaño y la forma. Si la pelota más pesada fuera más grande, tendría una mayor área expuesta para chocar con las moléculas del aire y la fuerza retardadora aumentaría más rápidamente. Dependiendo de la diferencia de tamaño, la pelota más pesada podría alcanzar primero la velocidad terminal, y la más ligera llegaría al suelo antes. O bien, las pelotas podrían alcanzar juntas la velocidad terminal.

Capítulo 5

5.1 −2.0 J
5.2 $d = \dfrac{W}{F\cos\theta} = \dfrac{3.80 \times 10^4\ \text{J}}{(189\ \text{N})(0.866)} = 232$ m
5.3 No, la rapidez disminuiría; dejaría de moverse.
5.4 $W_{x_1} = 0.034$ J, $W_x = 0.64$ J (medido desde x_o)
5.5 No, $W_2/W_1 = 4$, o sea, el cuádruple.
5.6 Aquí tenemos $m_s = m_g/2$, igual que antes. Sin embargo, $v_s/\vec{v}_g = (6.0\ \text{m/s})/(4.0\ \text{m/s}) = \frac{3}{2}$. Si usamos una razón, $K_s/K_g = \frac{9}{8}$, así que el defensivo profundo sigue teniendo más energía cinética que el guardia. (También podría obtenerse la respuesta calculando directamente las energías cinéticas, pero cuando se desea una comparación relativa, es más rápido utilizar razones.)
5.7 $W_3/W_2 = 1.4$, o sea, un 40% mayor. Más trabajo, pero un menor incremento porcentual.
5.8 $\Delta U = mgh = (60\ \text{kg})(9.8\ \text{m/s}^2)(1000\ \text{m})\ \text{sen}\ 10° = 10.2 \times 10^4$ J, sí, se duplica.
5.9 $\Delta K_{total} = 0$, $\Delta U_{total} = 0$
5.10 Sin fricción, el líquido se movería de atrás para adelante entre los contenedores.

5.11 9.9 m/s
5.12 No. $E_o = E$, o sea, $\frac{1}{2}mv_o^2 + mgh = \frac{1}{2}mv^2$. La masa se cancela, y la rapidez es independiente de la masa. (Recordemos que, en caída libre, todos los objetos o proyectiles caen con la misma aceleración vertical g; véase la sección 2.5.)
5.13 0.025 m
5.14 *a*) 59% *b*) $E_{perdida}/t = mg(y/t) = mgv = (60\ mg)$ J/s.
5.15 El bloque se detendrá en el área áspera.
5.16 52%
5.17 *a*) El mismo trabajo en el doble del tiempo. *b*) El mismo trabajo en la mitad del tiempo.
5.18 *a*) No. *b*) Creación de energía.

Capítulo 6

6.1 5.0 m/s. Esto equivale a 18 km/h u 11 mi/h, y un ser humano puede correr con esa rapidez.
6.2 1) El barco tiene la mayor EC 2) La bala tiene la menor EC.
6.3 $(-3.0\ \text{kg}\cdot\text{m/s})\ \hat{\mathbf{x}} + (4.0\ \text{kg}\cdot\text{m/s})\ \hat{\mathbf{y}}$
6.4 Aumentaría a 60 m/s; mayor rapidez, impulso más largo, idealmente. (También hay una consideración direccional.)
6.5 $F_{prom} = \dfrac{\Delta p}{\Delta t} = \dfrac{-310\ \text{kg}\cdot\text{m/s}}{0.600\ \text{s}} = -517\ \text{N}$
6.6 *a*) Para el sistema m_1/m_2, no, porque una fuerza externa actúa sobre el bloque. Si el sistema m_1/m_2 incluye a la Tierra, sí. Sin embargo, con m_2 pegada a la Tierra, la masa de esta parte del sistema sería mucho mayor que la de m_2, así que su cambio de velocidad sería insignificante. *b*) Suponiendo que la pelota se lanza en la dirección +: para quien la lanza, $v_1 = -0.50$ m/s; para quien la atrapa, $v_a = 0.48$ m/s. Para la pelota: $p = 0$, + 25 kg · m/s, +1.2 kg · m/s.
6.7 No. Se invirtió energía en trabajo para romper el tabique, y una parte se perdió como calor y sonido.
6.8 No.
6.9 No; no puede perderse toda la energía cinética para hacer la abolladura. La cantidad de movimiento después del choque no puede ser cero, porque no era cero inicialmente. Por lo tanto, las esferas deben estar en movimiento y tener energía cinética. Esto también se ve con la ecuación 6.11; $K_f/K_i = m_1/(m_1 + m_2)$, y K_f no puede ser cero (a menos que m_1 sea cero, lo cual no es posible).
6.10 $x_1 = v_1t = (-0.80\ \text{m/s})(2.5\ \text{s}) = -2.0$ m, $x_2 = v_2t = (1.2\ \text{m/s})(2.5\ \text{s}) = 3.0$ m
$\Delta x = x_2 - x_1 = 3.0\ \text{m} - (-2.0\ \text{m}) = 5.0$ m. Los objetos están separados 5.0 m.
6.11 *a*) $\Delta p_1 = p_{1_f} - p_{1_o} = 32\ \text{kg}\cdot\text{m/s} - 40\ \text{kg}\cdot\text{m/s} = -8.0\ \text{kg}\cdot\text{m/s}$
$\Delta p_2 = p_{2_f} - p_{2_o} = 13\ \text{kg}\cdot\text{m/s} - 5.0\ \text{kg}\cdot\text{m/s} = +8.0\ \text{kg}\cdot\text{m/s}$
b) $\Delta p_1 = p_{1_f} - p_{1_o} = (-20\ \text{kg}\cdot\text{m/s}) - (12\ \text{kg}\cdot\text{m/s}) = -32\ \text{kg}\cdot\text{m/s}$
$\Delta p_2 = p_{2_f} - p_{2_o} = (8.0\ \text{kg}\cdot\text{m/s}) - (-24\ \text{kg}\cdot\text{m/s}) = +32\ \text{kg}\cdot\text{m/s}$
6.12 $p_{1_o} = mv_{1_o}$, $p_{2_o} = -mv_{2_o}$ y $p_1 = mv_1 = -mv_{2_o}$, $p_2 = mv_2 = mv_{1_o}$, así que se conserva $K_i = \dfrac{m}{2}\left(v_{1_o}^2 + v_{2_o}^2\right)$ y $K_f = \dfrac{m}{2}(v_1^2 + v_2^2) = \dfrac{m}{2}\left[(-v_{2_o})^2 + (v_{1_o})^2\right]$, así que se conserva
6.13 Todas las esferas saldrán empujadas, pero en diferente grado. Con $m_1 > m_2$, la esfera estacionaria (m_2) sale con mayor rapidez después del choque que la de la esfera más pesada (m_1) que llega, y la rapidez de la esfera más pesada se reduce después del choque, según la ecuación 6.16 (véase la figura 6.14b). Por lo tanto, se transfiere un "disparo" de cantidad de movimiento a lo largo de la hilera de esferas de igual masa (véase la figura 6.14a) y la esfera del extremo sale columpiándose con la misma rapidez que se impartió a m_2. Entonces, el proceso se repite: m_1, *que ahora se mueve más lentamente,* choca otra vez con la primera esfera de la fila (m_2) y se transfiere otro disparo de cantidad de movimiento (aunque menor) por la hilera. La nueva esfera final de la hilera recibe menos energía cinética que la que salió columpiándose un instante antes, así que no se columpia a tanta altura. Este proceso se repite instantáneamente para cada esfera, y el resultado observado es que todas las esferas salen columpiándose en distinto grado.
6.14 $X_{CM} = \dfrac{(\text{igual que en el ejemplo}) + (8.0\ \text{kg})x_4}{(\text{igual que en el ejemplo}) + (8.0\ \text{kg})} =$

$$= \frac{0 + (8.0\ \text{kg})x_4}{19\ \text{kg}} = +1.0\ \text{m}$$

$$x_4 = \left(\frac{19}{8}\right)\text{m} = 2.4\ \text{m}$$

6.15 $(X_{CM}, Y_{CM}) = (0.47\ \text{m}, 0.10\ \text{m})$; misma ubicación que en el ejemplo, a dos tercios de la longitud de la barra de m_1. *Nota*: la ubicación del CM no depende del marco de referencia.
6.16 Sí, el CM no se mueve.

Capítulo 7

7.1 1.61×10^3 m = 1.61 km (aproximadamente una milla).
7.2 *a*) 0.35% con 10° *b*) 1.2% con 20°
7.3 *a*) 4.7 rad/s, 0.38 m/s; 4.7 rad/s, 0.24 m/s *b*) Para igualar las distancias recorridas, porque las secciones curvas de la pista tienen diferente radio y, por lo tanto, diferente longitud.
7.4 120 rpm
7.5 *a*) 106 rpm *b*) $a = \sqrt{2}g = 13.9\ \text{m/s}^2$, a 45° bajo el plano de la centrífuga.
7.6 El cordel no puede estar exactamente horizontal; debe formar algún ángulo pequeño con la horizontal, así que habrá un componente hacia arriba de la fuerza de tensión, que equilibre el peso de la pelota.
7.7 No; depende de la masa: $F_c = \mu_s mg$.
7.8 No. Ambas masas tienen la misma frecuencia o rapidez angular ω, y $a_c = r\omega^2$, así que en realidad $a_c \propto r$. Recordemos que, $v = 2\pi r/T$, y que $v_2 > v_1$, con $a_c = v^2/r$.
7.9 $T = 5.2$ N
7.10 *a*) Las direcciones de ω y α serían hacia abajo, perpendiculares al plano del CD. *b*) α negativa, lo que implica que tiene la dirección opuesta a ω.
7.11 $-0.031\ \text{rad/s}^2$
7.12 $2.8 \times 10^{-3}\ \text{m/s}^2$ una fuerza grande, pero una aceleración pequeña).
7.13 $T^2 = \left(\dfrac{4\pi^2}{GM_E}\right)r^3 = \left(\dfrac{4\pi^2}{GM_E}\right)(R_E + h)^3 \approx \left(\dfrac{4\pi^2}{g}\right)R_E \approx 4R_E$

$T = 2\sqrt{R_E} = 2(6.4 \times 10^6\ \text{m})^{\frac{1}{2}} = 5.1 \times 10^3$ s (¿Por qué las unidades no son consistentes?)
7.14 No, no varían linealmente; $\Delta U = 2.4 \times 10^9$ J, un aumento de sólo el 9.1%.
7.15 Ésta es la cantidad de trabajo *negativo* efectuado por una fuerza o agente externo cuando las masas se juntan. Para separar las masas por distancias infinitas, se tendría que efectuar una cantidad igual de trabajo positivo (contra la gravedad).
7.16 $T^2 = \left(\dfrac{4\pi^2}{GM_S}\right)r^3$ y $M_S = \dfrac{4\pi^2 r^3}{GT^2} =$

$$\frac{4\pi^2(1.50 \times 10^{11}\ \text{m})^3}{(6.67 \times 10^{-11}\ \text{N}\cdot\text{m}^2/\text{kg}^2)(3.16 \times 10^7\ \text{s})^2} = 2.00 \times 10^{30}\ \text{kg}$$

Capítulo 8

8.1 $s = r\omega = 5(0.12\text{ m})(1.7) = 0.20\text{ m}$;
$s = v_{CM}t = (0.10\text{ m/s})(2.00\text{ s}) = 0.20\text{ m}$
8.2 El peso de la pelota y el del antebrazo producen momentos de torsión que tienden a producir rotación en la dirección opuesta a la del momento de torsión aplicado.
8.3 Más deformación.
8.4 $T \propto 1/\text{sen}\,\theta$, conforme θ se hace más pequeño, sen θ también, mientras que T aumenta. En el límite, sen sen $\theta \rightarrow 0$ y $T \rightarrow$ infinito (no es realista).
8.5 $\Sigma\tau$: $Nx - m_1gx_1 - m_2gx_2 - m_3gx_3 = (200\text{ g})g(50\text{ cm}) - (25\text{ g})g(0\text{ cm}) - (75\text{ g})g(20\text{ cm}) - (100\text{ g})g(85\text{ cm}) = 0$, donde $N = Mg$.
8.6 No. Con f_{s_1}, la fuerza de reacción N generalmente no será la misma (f_{s_2} y N son componentes perpendiculares de la fuerza ejercida por la pared sobre la escalera). En este caso, seguimos teniendo $N = f_{s_1}$, pero $Ny - (m_1g)x_1 - (m_mg)x_m - f_{s_2}$, y $x_3 = 0$.
8.7 Estar colgado verticalmente.
8.8 Hombre: torso superior más ligero. Mujer: torso inferior más pesado.
8.9 5 tabiques.
8.10 *d*) No (masas iguales) *e*) Sí; como la masa más grande está más lejos del eje de rotación, $I = 360\text{ kg}\cdot\text{m}^2$.
8.11 La pértiga (o los brazos extendidos) aumenta el momento de inercia porque coloca más masa más lejos del eje de rotación (la cuerda o el riel). Cuando la persona se inclina hacia un lado, un momento de fuerza gravitacional tiende a producir una rotación en torno al eje de rotación, que causa una caída. Sin embargo, con una mayor inercia rotacional (mayor I), la persona tiene tiempo de desplazar su cuerpo de forma que el centro de gravedad esté otra vez sobre la cuerda o el riel y así esté de nuevo en equilibrio (inestable). Con pértigas muy flexibles, el CG podría estar abajo de la cuerda, lo que garantizaría la estabilidad.
8.12 $t = 0.63\text{ s}$
8.13 $\alpha = \dfrac{2\,mg - (2\tau_f R)}{(2m + M)R}$; $\dfrac{N}{\text{kg}\cdot\text{m}}$; y $\dfrac{\text{N}}{\text{kg}\cdot\text{m}} = \dfrac{\text{kg}\cdot\text{m/s}^2}{\text{kg}\cdot\text{m}} = \dfrac{1}{\text{s}^2}$
8.14 El yoyo rodaría hacia delante y hacia atrás, oscilando en torno al ángulo crítico.
8.15 *a*) 0.24 m *b*) La fuerza de fricción *estática*, f_s, actúa en el punto de contacto, que siempre está instantáneamente en reposo y, por lo tanto, no efectúa trabajo. Podría realizarse un poco de trabajo de fricción gracias a la fricción rodante, pero éste se considera insignificante en el caso de objetos y superficies duros.
8.16 $v_{CM} = 2.2\text{ m/s}$; utilizando una razón, 1.4 veces mayor; no hay energía rotacional.
8.17 Usted ya sabe la respuesta: 5.6 m/s. (No depende de la masa de la pelota.)
8.18 $M_a = 75\text{ kg}\,(0.75) = 56\text{ kg}$. Entonces, $L_1 = 13\text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}$ y $L_2 = (1.3\text{ kg}\cdot\text{m}^2)\omega$ [matemáticas no mostradas]. $L_2 = L_1$ o $(1.3\text{ kg}\cdot\text{m}^2)\omega = 13\text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}$ y $\omega = 10\text{ rad/s}$

Capítulo 9

9.1 *a*) +0.10% *b*) 39 kg
9.2 2.3×10^{-4} L, o sea, $2.3 \times 10^{-7}\text{ m}^3$
9.3 1) Tener suficientes clavos y 2) que todos tengan la misma altura y no estén muy afilados. Esto podría lograrse limando las puntas de los clavos para tener una superficie "uniforme". Además, esto aumentaría el área eficaz.
9.4 3.03×10^4 N (o 6.82×10^3 lb, ¡unas 3.4 toneladas!) Ésta es aproximadamente la fuerza que actúa en este momento sobre su espalda. Nuestro cuerpo no se aplasta bajo la presión atmosférica porque las células están llenas de fluidos incompresibles (principalmente agua), huesos y músculos, que reaccionan con una presión igual hacia fuera (fuerzas iguales y opuestas). Al igual que lo que sucede con las fuerzas, es una *diferencia* de presión lo que produce efectos dinámicos.
9.5 $d_o = \sqrt{\dfrac{F_o}{F_i}}\,d_i = \sqrt{\dfrac{1}{10}}(8.0\text{ cm}) = 2.5\text{ cm}$
9.6 La presión en las venas es menor que en las arterias (120/80).
9.7 Conforme el globo se eleva, la fuerza de flotabilidad disminuye como resultado de la disminución de temperatura (menor presión de helio, menos volumen) y el aire menos denso ($F_b = m_fg = \rho_f gV_f$). Cuando la fuerza neta es cero, la velocidad es constante. El efecto de enfriamiento continúa con la altitud, y el globo comenzará a hundirse cuando la fuerza neta sea negativa.
9.8 $r \approx 1.0\text{ m}$. $F_b = \rho gV = \rho g\left(\dfrac{4}{3}\pi r^3\right) =$
$$(0.18\text{ kg/m}^3)\left(\frac{4g\pi}{3}\right)(1.0\text{ m})^3 = 7.4\text{ N, mucho más.}$$
9.9 *a*) El objeto se hundiría, así que la fuerza de flotabilidad es menor que el peso del objeto. Por lo tanto, la báscula daría una lectura mayor que 40 N. Con una densidad mayor, el objeto no sería tan grande y se desplazaría menos agua. *b*) 41.8 N.
9.10 11%
9.11 −18%
9.12 $r = 9.00 \times 10^{-3}\text{ m}, v = \dfrac{\text{constante}}{A} = \dfrac{8.33 \times 10^{-5}\text{ m}^3/\text{s}}{\pi(9.00 \times 10^{-3}\text{ m})^2} =$ 0.327 m/s; 23%
9.13 69%
9.14 Al caer el agua, la rapidez (v) aumenta y el área (A) debe disminuir para que Av = constante.
9.15 0.38 m

Capítulo 10

10.1 *a*) 40°C *b*) Seguramente usted sabe la respuesta: es la temperatura a la que las temperaturas Fahrenheit y Celsius son numéricamente iguales.
10.2 *a*) $T_R = T_F + 460$ *b*) $T_R = \frac{9}{5}T_C + 492$ *c*) $T_R = \frac{9}{5}T_K$
10.3 96°C
10.4 273° C; no, no en la Tierra.
10.5 50 C°
10.6 Depende del metal de la barra. Si el coeficiente de expansión térmica (α) de la barra es menor que el del hierro, no se expandirá tanto y no será tan larga como el diámetro del anillo circular después de calentarse. En cambio, si α de la barra es mayor que la del hierro, la barra se expandirá más que el anillo y éste se distorsionará.
10.7 Básicamente, las situaciones se invertirían. Se lograría un enfriamiento más rápido sumergiendo el hielo en el ejemplo 10.7: el agua más fría sería menos densa y subiría, lo que promovería el mezclado. En el caso de un lago con enfriamiento en la superficie, agua más fría y menos densa permanecería en la superficie hasta alcanzarse la densidad mínima. Con un enfriamiento posterior, el agua más densa se hundiría y el congelamiento sería del fondo hacia arriba.
10.8 v_{efectiva}, 1.69%; K, 3.41%.
10.9 La energía cinética rotacional del oxígeno es la diferencia entre las energías totales, 2.44×10^3 J. El oxígeno es menos masivo y, por lo tanto, su v_{efectiva} es mayor.

Capítulo 11

11.1 2.84×10^3 m
11.2 12.5 kg
11.3 *a*) La razón será menor porque el calor específico del aluminio es mayor que el del cobre. *b*) $Q_w/Q_{olla} = 15.2$.
11.4 Cabe esperar que la temperatura final (T_f) sea más alta porque el agua estaba a una temperatura inicial más alta. $T_f = 34.4°C$
11.5 -1.09×10^5 J (negativo porque se pierde calor)
11.6 *a*) 2.64×10^{-2} kg = 26.4 g de hielo se derrite. *b*) La temperatura final sigue siendo 0°C porque el hígado no logra perder suficiente calor para derretir todo el hielo, aunque este último estuviera inicialmente a 0°C. El resultado final es un sistema hielo/agua/hígado a 0°C, pero con más agua que en el ejemplo.
11.7 1.1×10^5 J/s (diferencia que se debe al redondeo)
11.8 No, porque los espacios de aire aíslan mejor, ya que el aire es mal conductor. Las numerosas "bolsas" de aire entre el cuerpo y la prenda exterior forman una capa aislante que reduce la conducción y así se retarda la pérdida de calor corporal. (Hay poca convección porque los espacios son pequeños.)
11.9 *a*) -1.5×10^2 J/s o -1.5×10^2 W *b*) Las enormes orejas tienen una gran área de superficie, así que es posible irradiar más calor.
11.10 Las cortinas reducen la pérdida de calor porque limitan la radiación a través de la ventana y evitan que las corrientes de convección lleguen al vidrio.

Capítulo 12

12.1 0.20 kg
12.2 En ambos casos, el flujo de calor es hacia el gas. Durante la expansión isotérmica, $Q = W = +3.14 \times 10^3$ J. Durante la expansión isobárica, $W = +4.53 \times 10^3$ J y $\Delta U = +6.80 \times 10^3$ J, así que $Q = \Delta U + W = +1.13 \times 10^4$ J.
12.3 753° C
12.4 Cuando el aire llega a menores alturas y mayores presiones, se comprime rápidamente. Este proceso es aproximadamente adiabático, lo que hace que la temperatura del aire aumente.
12.5 *a*) 142 K o −131°C *b*) Para un gas monoatómico, $\Delta U = (3/2)\, nR\Delta T = -3.76 \times 10^3$ J. Esto deberá ser igual a $-W$ porque, para un proceso adiabático, $Q = 0 = \Delta U + W$; por tanto, $\Delta U = -W$. La ligera diferencia se debe al redondeo.
12.6 -1.22×10^3 J/K
12.7 Un cambio total de entropía de cero requiere $|\Delta S_w| = |\Delta S_m|$ o $|Q_w/T_w| = |Q_m/T_m|$. Puesto que el sistema está aislado, las magnitudes de los dos flujos de calor *deben* ser iguales, $|Q_w| = |Q_m|$. Por lo tanto, para que la entropía total no cambie, el agua y el metal deben tener la misma temperatura media, $\overline{T}_w = \overline{T}_m$. Esto no es posible, a menos que inicialmente estén a la *misma* temperatura. Por esa razón, sólo puede suceder si no hay flujo de calor neto.
12.8 Si se conservan las características básicas del ciclo (forma triangular, aumento de volumen al doble), una forma de aumentar el trabajo neto (el área dentro del ciclo) sería bajar la presión aún más al final del segmento isométrico. Si se permite que el volumen aumente a más del doble durante la expansión isobárica, se obtendría el mismo resultado. Cualquier cosa que aumente el área neta (trabajo) funcionaría.
12.9 *a*) 150 J/ciclo *b*) 850 J/ciclo.
12.10 $Q_{34} = 610$ J y $Q_{23} = 730$ J, por lo tanto, $Q_c = Q_{23} + Q_{34} = 1.34 \times 10^3$ J. Esto concuerda con $Q_c = Q_h - W_{neto} = 59 \times 10^3$ J − 245 J = 1.35×10^3 J (dentro del margen de error de redondeo).
12.11 *a*) Los nuevos valores son $CDD_{ref} = 3.3$ y $CDD_{hp} = 4.3$. *b*) El CDD del acondicionador de aire tiene el mayor aumento porcentual.
12.12 Tendría un aumento del 7.5%.

Capítulo 13

13.1 No, su rapidez máxima es $\left(\sqrt{k/m}\right)A = 4.0$ m/s. Por lo tanto, viaja al 75% de su rapidez máxima.
13.2 0.49 J
13.3 1) $y = -0.0881$ m, hacia arriba. $n = 0.90$. 2) $y = 0$, subiendo. $n = 1.5$.
13.4 9.76 m/s^2; no. Puesto que es menor que el valor aceptado al nivel del mar, el parque probablemente está situado a una altitud por encima del nivel del mar.
13.5 *a*) 0.50 m *b*) 0.10 Hz
13.6 440 Hz
13.7 Aumentar la tensión (en 44%, como puede calcularse).

Capítulo 14

14.1 *a*) 2.3 *b*) 10.2
14.2 $v = (331 + 0.6T_C)$ m/s = $[331 + 0.6(38°)] = 354$ m/s
Aumenta.
14.3 Sería máxima en He, porque tiene la mínima masa molecular. (Sería mínima en oxígeno, que tiene la mayor masa molecular.)
14.4 *a*) La escala de dB es logarítmica, no lineal.
b) 3.16×10^{-6} W/m^2
14.5 No, $I_2 = (316)I_1$
14.6 65 dB
14.7 Interferencia destructiva: $\Delta L = 2.5\lambda = 5(\lambda/2)$ y $m = 5$. No se oiría sonido si las ondas procedentes de las bocinas tuvieran igual amplitud. Por supuesto, durante un concierto el sonido no sería de tonos de frecuencia única, sino que tendría una diversidad de frecuencias y amplitudes. Los asistentes ubicados en determinados lugares podrían no oír ciertas partes del espectro audible, pero posiblemente no lo notarían.
14.8 Hacia, 431 Hz; alejándose, 369 Hz.
14.9 Con la fuente y el observador viajando en la misma dirección y con la misma velocidad, su velocidad relativa sería cero. Esto es, el observador consideraría que la fuente es estacionaria. Como la rapidez de la fuente y el observador es subsónica, el sonido de la fuente pasaría al observador sin desplazar su frecuencia. En general, para movimientos que intervienen en un corrimiento de Doppler, la palabra *hacia* se asocia con un *aumento* en la frecuencia, y *alejándose* se asocia con una *disminución* en la frecuencia. En este caso, la fuente y el observador permanecen alejados una distancia constante. (¿Qué sucedería si las velocidades fueran supersónicas?)
14.10 768 Hz; sí.
14.11 $f_1 = \dfrac{v}{4L} = \dfrac{353 \text{ m/s}}{4(0.0130 \text{ m})} = 6790$ Hz

Capítulo 15

15.1 1.52×10^{-20} %
15.2 No; si el peine fuera positivo, polarizaría al papel a la inversa y lo seguiría atrayendo.
15.3 $\vec{F}_1$ tiene una magnitud de 3.8×10^{-7} N a un ángulo de 57° sobre el eje x positivo. El notación vectorial unitaria: $\vec{F}_1 = (-0.22\ \mu\text{N})\,\hat{\mathbf{x}} + (0.32\ \mu\text{N})\,\hat{\mathbf{y}}$.
15.4 0.12 m o 12 cm.

15.5 $\frac{F_e}{F_g} = \frac{ke^2}{Gm_e^2} = 4.2 \times 10^{42}$ o $F_e = 4.2 \times 10^{42} F_g$. La magnitud de la fuerza eléctrica es la misma que la que hay entre un protón y un electrón (en el ejemplo) porque tienen la misma (magnitud) carga en ellos. Sin embargo, la fuerza gravitacional se reduce porque las masas que se atraen son dos electrones más que un electrón y un protón mucho más masivo.
15.6 El campo es cero hacia la izquierda de q_1 en $x = -0.60$ m.
15.7 $\vec{\mathbf{E}} = (-797\ \text{N/C})\,\hat{\mathbf{x}} + (359\ \text{N/C})\,\hat{\mathbf{y}}$ o $E = 874$ N/C a un ángulo de 24.2° por encima del eje x negativo.
15.8 En los tres lugares hay dos campos a considerar que se suman vectorialmente: uno que sale del extremo positivo y el otro del extremo negativo del dipolo. *a*) Aquí, el mayor de los dos campos es el del extremo positivo más cercano y apunta hacia arriba. El campo más pequeño, que se debe al extremo negativo, apunta hacia abajo, así que la dirección del campo es hacia arriba alejándose del extremo positivo. *b*) Aquí el mayor de los dos campos es el del extremo negativo más cercano y apunta hacia arriba. El campo más pequeño, que se debe al extremo positivo, apunta hacia abajo, por lo que la dirección del campo es hacia arriba y hacia el extremo negativo. *c*) Aquí ambos campos apuntan hacia abajo, así que el campo neto es hacia abajo, alejándose del extremo positivo y hacia el extremo negativo.
15.9 *a*) El campo eléctrico apunta hacia arriba, del suelo a la nube. *b*) 2.3×10^3 C.
15.10 La carga positiva estaría por completo en la superficie externa, así que sólo el electroscopio conectado con la superficie exterior mostraría desviación.
15.11 Su signo es negativo, porque las líneas del campo eléctrico apuntan hacia las cargas negativas, y todas están dentro en relación con la superficie gaussiana.

Capítulo 16

16.1 *a*) ΔU_e se duplicaría a $+7.20 \times 10^{-18}$ J porque la carga de la partícula se duplica. *b*) ΔV no cambia porque no está en relación con la partícula. *c*) $v = 4.65 \times 10^4$ m/s.
16.2 6.63×10^7 m/s
16.3 *a*) Se movió más desde una carga positiva (el protón) y, por consiguiente, se movió a una región de menor potencial eléctrico. *b*) $\Delta U_e = +3.27 \times 10^{-18}$ J.
16.4 $U_{CO} = -3.27 \times 10^{-19}$ J. Es menos estable, porque se necesitaría menos trabajo para romperla, que para la molécula de agua.
16.5 *a*) 2.22 m. *b*) La más cercana a la superficie terrestre tiene mayor potencial. *c*) No, sólo es posible conocer la distancia de separación entre las dos superficies, no su ubicación absoluta.
16.6 *a*) La superficie 1 está a mayor potencial que la superficie 2 porque está más cerca de la superficie con carga positiva. *b*) Cuando está muy lejos, el objeto cargado "parece" una carga puntual, por lo que las superficies equipotenciales se vuelven esféricas en forma gradual, conforme aumenta la distancia al objeto.
16.7 $d = 8.9 \times 10^{-16}$ m, que es mucho menor que el diámetro de un átomo (o un núcleo para esa materia). Por consiguiente, este diseño es completamente impráctico.
16.8 7.90×10^3 V
16.9 La capacitancia disminuye conforme la separación d aumenta. Como el voltaje a través del condensador permanece constante, esto significa que la carga en él tendría que disminuir; por lo tanto, la carga fluiría alejándose del condensador. $\Delta Q = -3.30 \times 10^{-12}$ C.
16.10 $U_{\text{paralelo}} = 1.20 \times 10^{-4}$ J y $U_{\text{serie}} = 5.40 \times 10^{-4}$ J, así que el arreglo en paralelo almacena más energía.
16.11 *a*) $Q_1 = 8.0 \times 10^{-7}$ C; $Q_2 = 1.6 \times 10^{-6}$ C; $Q_3 = 2.4 \times 10^{-6}$ C. *b*) $U_1 = 3.2 \times 10^{-6}$ J; $U_2 = 6.4 \times 10^{-6}$ J; $U_3 = 4.8 \times 10^{-6}$ J

Capítulo 17

17.1 El resultado es el mismo; esto es, $V_{AB} = V$.
17.2 Aproximadamente 32 años.
17.3 100 V.
17.4 Nuestra suposición es que $R = \frac{\rho L}{A}$. Por lo tanto, si la resistividad se duplicara y la longitud se redujera a la mitad, el numerador permanecería igual. Si el diámetro se redujera a la mitad, el área disminuiría por un factor de 4. El resultado neto de estos cambios es que la resistencia aumenta por un factor de 4, hasta $3.0 \times 10^3\ \Omega$. De esta forma, $I = \frac{V}{R} = \frac{400\ \text{V}}{3.0 \times 10^3\ \Omega} = 0.133$ A.
17.5 $R = 0.67\ \Omega$. El material con el mayor coeficiente térmico de resistividad permite hacer un termómetro más sensible porque produce un mayor cambio (y, por consiguiente, más preciso de medir) en la resistencia para un cambio de temperatura dado.
17.6 El calor necesario es $Q = mc\Delta T = 1.67 \times 10^5$ J. Así que la salida de potencia del calentador necesita ser $P = \frac{Q}{t} = \frac{1.67 \times 10^5\ \text{J}}{180\ \text{s}} = 930$ W. Como esto lo suministra el calentamiento de joule, tenemos $R = \frac{V^2}{P} = \frac{(120\ \text{V})^2}{1.67 \times 10^5\ \text{J}} = 15.5\ \Omega$.
17.7 *a*) $R_1 = \frac{V^2}{P_1} = \frac{(115\ \text{V})^2}{1200\ \text{W}} = 11.0\ \Omega$ y $R_2 = 0.900R_1 = 9.92\ \Omega$. *b*) $I_1 = \frac{V}{R_1} = \frac{115\ \text{V}}{11.0\ \Omega} = 10.5$ A e $I_2 = 1.11I_1 = 11.6$ A.
17.8 8.3 horas.
17.9 En el mejor de los casos, las centrales producen energía eléctrica con eficiencias de 35% (sin tener en cuenta pérdidas por transmisión). Así, en términos de combustibles primarios, la eficiencia máxima de cualquier electrodoméstico es del 35%. Sin embargo, el gas natural se entrega esencialmente sin pérdidas de energía. En el punto de entrega, se quema y puede entregar, por lo menos teóricamente, hasta el 100% de su contenido calorífico para la tarea en cuestión. Por ejemplo, un calentador de agua bien aislado será capaz de absorber aproximadamente el 95% de la energía calorífica que se le entrega. Por lo tanto, la eficiencia eléctrica global sería de 0.95 (35%) o aproximadamente el 34%. Para la versión de gas, la eficiencia sería del 95%.

Capítulo 18

18.1 *a*) En serie: $P_1 = 4.0$ W, $P_2 = 8.0$ W, $P_3 = 12.0$ W. En paralelo: $P_1 = 14 \times 10^2$ W, $P_2 = 72$ W, $P_3 = 48$ W. *b*) En serie, la mayor parte de la potencia se disipa en la resistencia mayor. En paralelo, la mayor parte de la potencia se disipa en la resistencia menor. *c*) En serie: la potencia total del resistor es 24 W, y $P_b = I_b V_b = (2.0\ \text{A})(12\ \text{V}) = 24$ W, de manera que sí, como se requiere de acuerdo con la conservación de energía. En paralelo: la potencia total del resistor es $P_{tot} = 2.6 \times 10^2$ W, y $P_b = I_b V_b = (22\ \text{A})(12\ \text{V}) = 2.6 \times 10^2$ W (con dos cifras signi-

ficativas), de manera que sí, como se requiere de acuerdo con la conservación de energía.
18.2 *a*) El voltaje a través del receptáculo abierto será 120 V. *b*) El voltaje a través de las demás bombillas será cero.
18.3 $P_1 = I_1^2R_1 = 54.0$ W, $P_2 = I_2^2R_2 = 9.0$ W, $P_3 = I_3^2R_3 = 0.87$ W, $P_4 = I_4^2R_4 = 2.55$ W y $P_5 = I_5^2R_5 = 5.63$ W. Su suma es 72.1 W redondeada a tres cifras significativas. Existe acuerdo sobre la potencia de salida de la batería (diferencia que se debe al redondeo), esto es, $P_b = I_bV_b = (3.00\text{ A})(24.0\text{ V}) = 72.0$ W.
18.4 *a*) Si aumenta R_2, entonces aumenta la resistencia equivalente de R_2 en paralelo y aumenta R_1. Por consiguiente, la resistencia total del circuito aumenta y produce una reducción de la corriente total por el circuito. Como la corriente en R_3 es igual que la corriente total, I_3 debe disminuir. Entonces V_3 debería disminuir. Por consiguiente, V_1 y V_2 deberían aumentar porque son iguales, y $V = V_2 + V_3 =$ constante. Como R_1 no ha cambiado, I_1 debe aumentar a causa del aumento de voltaje. Como I_3 disminuye e I_1 aumenta, se debe cumplir (a partir de $I_3 = I_1 + I_2$) que I_2 disminuye. *b*) Al recalcular se confirman estas predicciones: $I_1 = 0.51$ A (aumenta), $I_2 = 0.38$ A (disminuye) e $I_3 = 0.89$ A (disminuye).
18.5 En el de la unión se sigue cumpliendo $I_1 = I_2 + I_3$ (ecuación 1). Se aplica el teorema de la malla en torno al circuito 3, en sentido de las manecillas del reloj (todos los números son volts, que se eliminaron por conveniencia): $6 - 6I_1 - 9I_2 = 0$ (ecuación 2). Para la malla 1, el resultado es $6 - 6I_1 - 12 - 2I_3 = 0$ (ecuación 3). Se despeja I_2 de la ecuación 1 y se sustituye en la ecuación 2. A continuación se resuelven simultáneamente las ecuaciones 2 y 3, para obtener I_1 e I_3. Todas las respuestas son las mismas del ejemplo, como debe ser.
18.6 *a*) El almacenamiento máximo de energía a 9.00 V es 4.05 J. A 7.20 V, el condensador sólo almacena 2.59 J, el 64% del máximo. Esto se debe a que el almacenamiento de energía varía como el *cuadrado* del voltaje a través del condensador, y $0.8^2 = 0.64$. *b*) 8.64 V, porque el voltaje no aumenta linealmente, sino en forma exponencial.
18.7 10 A.
18.8 0.20 mA.

Capítulo 19

19.1 Al este, porque al cambiar tanto la dirección de la velocidad como el signo de la carga, la dirección permanece igual.
19.2 *a*) Aplicando la regla de fuerza de la mano derecha, el protón se desviaría inicialmente en dirección de x negativa. *b*) 0.10 T.
19.3 0.500 V
19.4 *a*) En los polos, el campo magnético es perpendicular al suelo. Como la corriente es paralela al suelo, de acuerdo con la regla de la mano derecha para la fuerza, la fuerza sobre el alambre estaría en un plano paralelo al suelo. Por esa razón, no podría anular la fuerza de la gravedad, que es hacia abajo. *b*) La masa del alambre es 0.041 g, demasiado baja para ser realista.
19.5 *a*) A 45°, el momento de torsión es 0.269 m· N, o 70.7% del momento de torsión máximo. *b*) 30°.
19.6 *a*) Sur *b*) 75 A.
19.7 1500 vueltas.
19.8 *a*) La fuerza se vuelve repulsiva. Demuestre esto aplicando las reglas de la mano derecha para fuentes y para fuerzas. *b*) 0.027 m o 27 mm.
19.9 La permeabilidad sólo tendría que ser el 40% del valor en el ejemplo, o $\mu \geq 480\mu_o = 6.0 \times 10^{-4}$ T · m/A.

Capítulo 20

20.1 *a*) En sentido de las manecillas del reloj. *b*) 0.335 mA.
20.2 En cualquier forma que aumente el flujo por ejemplo aumentando el área de la espira o la cantidad de vueltas. También ayudaría cambiar a una resistencia menor.
20.3 7.36×10^{-4} T
20.4 1.5 m/s
20.5 0.28 m
20.6 *a*) 6.1×10^3 J *b*) 5.0×10^3 J de manera que se emplea energía unas 12 veces mayor durante el arranque.
20.7 *a*) Se usaría como transformador de subida, porque los electrodomésticos en Europa se diseñan para funcionar a 240 V, que es el doble del voltaje que se usa en Estados Unidos (120 V). *b*) La corriente de salida sería 1500 W/240 V o 6.25 A. Por lo tanto, la corriente de entrada sería de 12.5 A. (El voltaje subiría por un factor de dos, así que la corriente de entrada es el doble de la corriente de salida.)
20.8 *a*) Los mayores voltajes permiten utilizar menores corrientes. Esto, a la vez, reduce las pérdidas en calor de joule en las líneas de transmisión y en los devanados de los motores, y hace que sea mayor la energía disponible para hacer trabajo mecánico, con lo cual aumenta la eficiencia. *b*) Como el voltaje se duplica, la corriente se reduce a la mitad. La pérdida de calor en el conductor es proporcional al *cuadrado* de la corriente. Entonces, las pérdidas se reducen por un factor de 4, al 25% de su valor a 120 V.
20.9 0.38 cm/s.
20.10 *a*) Al aumentar la distancia, la intensidad luminosa del Sol (energía por segundo por unidad de área) baja. Así lo hace la fuerza que se debe a la presión lumínica sobre la vela. A la vez, se reduciría la aceleración de la embarcación. *b*) Se necesitaría aumentar de alguna manera el área de la vela, para captar más luz.

Capítulo 21

21.1 *a*) 0.25 A *b*) 0.35 A *c*) $9.6 \times 10^2\ \Omega$, mayor que los 240 Ω que requiere una bombilla de la misma potencia en Estados Unidos. El voltaje en Gran Bretaña es mayor que en Estados Unidos. Así que para mantener constante la corriente, se debe reducir la corriente empleando una resistencia mayor.
21.2 Si la resistencia del electrodoméstico es constante, la potencia aumentará cuatro veces, porque $P \propto V^2$. Aun cuando se aumente la resistencia, es probable que la potencia sea mucho mayor que aquella para la cual se diseñó el electrodoméstico, por eso es posible que este último se queme o, al menos, queme un fusible.
21.3 *a*) $\sqrt{2}(120\text{ V}) = 170$ V *b*) 120 Hz
21.4 *a*) $\sqrt{2}(2.55\text{ A}) = 3.61$ A *b*) 180 Hz
21.5 *a*) La corriente aumentaría a 0.896 A. *b*) El condensador es responsable; con un aumento en la frecuencia, disminuye X_c. Como la resistencia es independiente de la frecuencia, permanece constante y baja la Z general.
21.6 *a*) En un circuito RLC, el ángulo de fase ϕ depende de la diferencia $X_L - X_c$. Si se aumenta la frecuencia, X_L aumenta y X_c disminuye, por lo que aumenta su diferencia, al igual que ϕ. *b*) $\phi = 84.0°$, el aumento que se esperaba.
21.7 6.98 W
21.8 *a*) Si un receptor está sintonizado a una frecuencia comprendida *entre* las frecuencias de las dos estaciones, no se recibe la señal de intensidad máxima de ninguna de las estaciones, pero podría haber la potencia suficiente como para oír las dos en forma simultánea. *b*) 651 kHz.

Capítulo 22

22.1 La luz viaja en línea recta y es reversible. Si uno puede ver a alguien en un espejo, esa persona lo puede ver a uno. A la inversa, si no se puede ver en el espejo del camión, el conductor no puede ver la imagen de uno en el espejo, y no sabe que su automóvil está detrás del camión.
22.2 $n = 1.25$ y $\lambda_m = 400$ nm
22.3 De acuerdo con la ley de Snell, $n_2 = 1.24$, así que $v = c/n_2 = 2.42 \times 10^8$ m/s.
22.4 Con una n mayor, θ_2 es menor, por lo que la luz refractada dentro del vidrio se acerca a la parte izquierda inferior. Entonces, el desplazamiento lateral es mayor. 0.72 cm.
22.5 *a*) La frecuencia de la luz no cambia en los distintos medios, por lo que la luz que sale tiene la misma frecuencia que la de la fuente. *b*) La longitud de onda en el aire es independiente de los medios agua y vidrio, como se puede demostrar agregando otra etapa (oro medio) a la solución del ejemplo. Según el análisis inverso, $\lambda_{aire} = n_{agua}\lambda_{agua} = (c/v_{agua})\lambda_{agua} = c/f$. Por consiguiente, la longitud de onda en el aire es c/f.
22.6 A causa de las reflexiones totales internas, el clavadista no puede ver lo que esté por encima del agua. En lugar de ello vería la reflexión de algo en los lados y/o el fondo de la piscina. (Haga el seguimiento inverso de los rayos.)
22.7 $n = 1.4574$. La luz verde se refracta más que la roja, porque el verde tiene menor longitud de onda, por lo que su n es mayor que el de la luz roja. De acuerdo con la ley de Snell, el verde tiene menor ángulo de refracción, por lo que se refracta más.

Capítulo 23

23.1 No tiene efecto. Observe que la solución del ejemplo no incluye la distancia. La geometría de esta situación es igual, independientemente de la distancia al espejo.
23.2 $d_i \approx 60$ cm; real, invertida y aumentada.
23.3 $d_i = d_o$ y $M = -1$; real, invertida y del mismo tamaño
23.4 La imagen siempre es derecha y de menor tamaño que el objeto.
23.5 $d_i = -20$ cm (frente a la lente); virtual, derecha y aumentada.
23.6 $d_o = 2f = 24$ cm
23.7 Al bloquear la mitad de la lente, llega la mitad de la *cantidad* de luz al plano de la imagen, así que la imagen resultante será menos brillante, pero será completa.
23.8 La imagen siempre es derecha y de menor tamaño que el objeto.
23.9 A 3 cm detrás de L_2; real, invertida y de menor tamaño que el objeto ($M_{total} = -0.75$)
23.10 Si la lente se sumergiera en agua, la ecuación 23.8 debería modificarse a $\frac{1}{f} = (n/n_m - 1)\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)$, donde $n_m = 1.33$ (agua). Como $n = 1.52 > n_m = 1.33$, la lente sigue siendo convergente. $P = \frac{1}{f} = (1.52/1.33 - 1)\left(\frac{1}{0.15\text{ m}} + \frac{1}{-0.20\text{ m}}\right)$

$= 0.238\ 1/\text{m} = 0.238$ D. $f = \frac{1}{0.238\ 1/\text{m}} = 4.20$ m.

Capítulo 24

24.1 $\Delta y = y_r - y_b = 1.2 \times 10^{-2} = 1.2$ cm
24.2 doble espesor, $t = 199$ nm
24.3 En los instrumentos de metal, el sonido sale de una abertura relativamente grande y abocinada. Por consiguiente, hay poca difracción y entonces la mayor parte de la energía se irradia hacia delante. En los de viento, gran parte del sonido sale de agujeros de tono a lo largo de la columna del instrumento. Esos agujeros son pequeños en comparación con la longitud de onda del sonido, por lo que la difracción es apreciable. El resultado es que el sonido se irradia casi en todas direcciones, incluso hacia atrás.
24.4 Aumentaría el ancho por un factor de $700/550 = 1.27$.
24.5 $\Delta\theta_2 = \theta_2(700\text{ nm}) - \theta_2(400\text{ nm}) = 44.4° - 23.6° = 20.8°$.
24.6 45°
24.7 $\theta_2 = 41.2°$
24.8 589 nm; amarillo.

Capítulo 25

25.1 No funcionaría; se formaría una imagen real en el lado de la lente que da hacia la persona ($d_i = +0.75$ m).
25.2 Para un objeto a $d_o = 25$ cm, la imagen se formaría a 1.0 m para el ojo 1, más allá del punto cercano de ese ojo, por lo que el objeto se podría ver con claridad. La imagen para el ojo 2 se formaría a 0.77 m, es decir, dentro del punto cercano para ese ojo, por lo que el objeto no se vería con claridad.
25.3 La lupa para ver en el punto cercano, 2.0 cm mayor.
25.4 La longitud aumenta al doble.
25.5 $f_i = 8.0$ cm
25.6 La lente erectora (de distancia focal f_e) debería estar entre el objetivo y el ocular, a una distancia $2f_e$ de la imagen que forma el objetivo, la cual a su vez hace las veces de objeto. La lente erectora produce entonces una imagen invertida del mismo tamaño a la distancia $2f_e$ del lado opuesto de ella, y esa imagen constituye el objeto para el ocular. El uso de la lente erectora alarga el telescopio la longitud $4f_e$.
25.7 3.4×10^{-7} rad, un orden de magnitud mejor que los 10^{-6} rad característicos.
25.8 2.9 cm

RESPUESTAS A LOS EJERCICIOS CON NÚMERO IMPAR

Capítulo 1

1. ***c)***
3. ***b)***
5. Porque no hay cantidades fundamentales y todas las demás cantidades se obtienen a partir de las fundamentales.
7. El día solar medio reemplazó la definición original de segundo. No, ahora se utilizan los relojes atómicos.
9. ***b)***
11. ***a)***
13. no, sí
15. La tonelada métrica se define como la masa de 1 m^3 de agua. 1 m^3 = 1000 L y 1 L de agua tiene una masa de 1 kg. Así que una tonelada métrica equivale a 1000 kg.
17. ***a)*** Se utilizan diferentes onzas para hacer mediciones de volumen y de peso. 16 oz = 1 pt es una medida de volumen y 16 oz = 1 lb es una medida de peso. ***b)*** Se emplean dos diferentes unidades de libra. Libra avoirdupois = 16 oz, lb troy = 12 oz.
19. ***d)***
21. ***a)***
23. No, el análisis unitario sólo indica si las dimensiones son correctas.
25. (Longitud)
= (Longitud) + (Longitud)/(Tiempo)×(Tiempo)
= (Longitud) + (Longitud)
27. $m^2 = (m)^2 = m^2$
29. no, $V = \pi d^3/6$
31. *a*: 1/m; *b*: adimensional; *c*: m
33. kg/m^3
35. El primer estudiante, porque
$m/s = \sqrt{(m/s^2)(m)} = \sqrt{m^2/s^2} = m/s$.
37. ***a)*** $kg \cdot m^2/s$ ***b)*** La unidad de $L^2/(2mr^2)$ es $(kg \cdot m^2/s)^2/(kg \cdot m^2) = kg \cdot m^2/s^2$, que es la unidad de energía cinética, *K*. ***c)*** $kg \cdot m^2$
39. ***c)***
41. ***c)***
43. Sí, al multiplicar o dividir debe haber consistencia con las unidades.
45. 39.6 m
47. 37 000 000 de veces
49. ***a)*** 91.5 m por 48.8 m ***b)*** 27.9 cm a 28.6 cm
51. 0.78 mi
53. ***a)*** (1) 1 m/s ***b)*** 33.6 mi/h
55. ***a)*** 77.3 kg ***b)*** 0.0773 m^3 o aproximadamente 77.3 L
57. 6.5×10^3 L/día
59. ***a)*** 59.1 mL ***b)*** 3.53 oz
61. 6.1 cm
63. ***a)*** 1.5×10^5 m^3 ***b)*** 1.5×10^8 kg ***c)*** 3.3×10^8 lb
65. ***a)***
67. ***b)***
69. No, siempre hay un dígito dudoso, el último.
71. 5.05 cm; 5.05×10^{-1} dm; 5.05×10^{-2} m.
73. ***a)*** 4 ***b)*** 3 ***c)*** 5 ***d)*** 2
75. ***b)*** y ***d)***. ***a)*** tiene cuatro y ***c)*** tiene seis.
77. 32 ft^3
79. ***a)*** (2) tres, puesto que la altura sólo tiene tres cifras significativas. ***b)*** 469 cm^2
81. ***a)*** (1) cero, porque 38 m carece de lugares decimales. ***b)*** 15 m
83. ***a)***
85. ***d)***
87. todos los seis pasos, como están listados en el capítulo.
89. Se espera que la precisión de la respuesta esté dentro de un orden de 10.
91. 100 kg
93. ***a)*** 8.72×10^{-3} cm ***b)*** aproximadamente 10^{-2} cm
95. 0.87 m
97. la misma área para ambos, 1.3 cm^2
99. 3.5×10^{10} glóbulos blancos, 1.3×10^{12} plaquetas
101. 4.7×10^2 lb
103. aproximadamente 10^{12} m^3
105. 17 m
107. ***a)*** 283 mi ***b)*** 45° al norte del este
109. 3.0×10^8 km
111. ***a)*** (3) menor que 190 mi/h por el mayor tiempo invertido a menores velocidades, así que se afecta la velocidad promedio, que queda por debajo del promedio de todas las velocidades. ***b)*** 187 mi/h

Capítulo 2

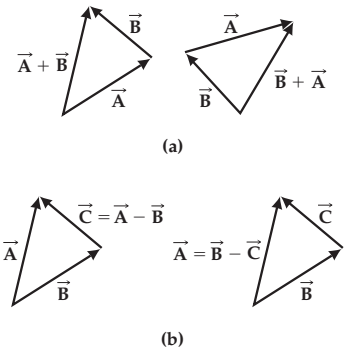
1. ***a)***
3. ***c)***
5. Sí, para un viaje de ida y vuelta. No; la distancia siempre es mayor o igual que la magnitud del desplazamiento.
7. La distancia recorrida es mayor que o igual a 300 m. El objeto podría recorrer una variedad de caminos siempre que termine a 300 m al norte. Si el objeto viaja en línea recta hacia el norte, entonces la distancia mínima es de 300 m.
9. Sí, es posible. El corredor puede desplazarse en la dirección opuesta durante su recorrido (velocidad instantánea negativa) siempre que la carrera total sea en la dirección hacia delante (velocidad promedio positiva).
11. 1.65 m hacia abajo
13. ***a)*** 0.50 m/s ***b)*** 8.3 min
15. 0.17 m/s
17. ***a)*** (2) mayor que *R* pero menor que 2*R* ***b)*** 71 m
19. ***a)*** (3) entre 40 y 60 m ***b)*** 45 m a 27° al oeste del norte
21. ***a)*** 2.7 cm/s ***b)*** 1.9 cm/s
23. ***a)*** 90.6 ft a 6.3° por encima de la horizontal ***b)*** 36.2 ft/s a 6.3°. ***c)*** La rapidez promedio depende de la longitud de la trayectoria total, que no se da. La pelota tomará una trayectoria curva.
25. ***a)*** $\bar{s}_{0-2.0\,s} = 1.0$ m/s; $\bar{s}_{2.0\,s-3.0\,s} = 0$; $\bar{s}_{3.0\,s-4.5\,s} = 1.3$ m/s; $\bar{s}_{4.5\,s-6.5\,s} = 2.8$ m/s; $\bar{s}_{6.5\,s-7.5\,s} = 0$; $\bar{s}_{7.5\,s-9.0\,s} = 1.0$ m/s
b) $\bar{v}_{0-2.0\,s} = 1.0$ m/s; $\bar{v}_{2.0\,s-3.0\,s} = 0$; $\bar{v}_{3.0\,s-4.5\,s} = 1.3$ m/s; $\bar{v}_{4.5\,s-6.5\,s} = -2.8$ m/s; $\bar{v}_{6.5\,s-7.5\,s} = 0$; $\bar{v}_{7.5\,s-9.0\,s} = 1.0$ m/s
c) $v_{1.0\,s} = \bar{s}_{0-2.0\,s} = 1.0$ m/s; $v_{2.5\,s} = \bar{s}_{2.0\,s-3.0\,s} = 0$; $v_{4.5\,s} = 0$; $v_{6.0\,s} = \bar{s}_{4.5\,s-6.5\,s} = -2.8$ m/s
d) $v_{4.5\,s-9.0\,s} = -0.89$ m/s
27. 1 mes
29. ***a)*** 500 km a 37° al este del norte ***b)*** 400 km/h a 37° al este del norte ***c)*** 560 km/h ***d)*** Como la rapidez implica la distancia total, que es mayor que la magnitud del desplazamiento, la rapidez promedio no iguala la magnitud de la velocidad promedio.
31. ***d)***
33. ***c)***
35. Sí, aunque la rapidez del automóvil es constante, su velocidad no lo es por el cambio en la dirección. Un cambio en la velocidad significa una aceleración.
37. No necesariamente. Una aceleración negativa puede acelerar objetos si la velocidad también es negativa (esto es, en la misma dirección que la aceleración).
39. v_o. Puesto que una cantidad igual de tiempo se invierte en la aceleración y desaceleración de la misma magnitud.
41. 6.9 m/s^2
43. ***a)*** (2) en dirección opuesta a la velocidad conforme el objeto frena ***b)*** −2.2 m/s cada segundo, en dirección contraria a la velocidad
45. -2.0 m/s^2
47. −70.0 km/h o −19.4 m/s, +2.78 m/s^2 (desaceleración porque la velocidad es negativa)
49. 4.8×10^2 m/s^2, ésta es una gran aceleración que se debe al cambio en la dirección de la velocidad y al breve tiempo de contacto.
51. ***a)*** $\bar{a}_{0-1.0\,s} = 0$; $\bar{a}_{1.0-s\text{-}3.0\,s} = 4.0$ m/s^2; $\bar{a}_{3.0\,s-8.0\,s} = -4.0$ m/s^2; $\bar{a}_{8.0\,s-9.0\,s} = 8.0$ m/s^2; $\bar{a}_{9.0\,s-13.0\,s} = 0$ ***b)*** Velocidad constante de −4.0 m/s
53. 150 s
55. ***d)***
57. Es cero porque la velocidad es una constante.
59. El desplazamiento $(x - x_o)$ se considera como una cantidad; hay cuatro cantidades implicadas en cada ecuación cinemática (ecuaciones 2.8, 2.10, 2.11 y 2.12). Así que tres deben conocerse antes de poder despejar cualquier incógnita. O, de manera equivalente, todas a excepción de una deben conocerse.
61. no, la aceleración debe ser 9.9 m/s^2
63. ***a)*** 1.8 m/s^2 ***b)*** 6.3 s
65. ***a)*** 81.4 km/h ***b)*** 0.794 s
67. 3.09 s y 13.7 s. La respuesta de 13.7 s es físicamente posible, pero no es probable en la realidad. Después de 3.09 s, está a 175 m de donde se aplicó el empuje en reversa, pero el carro cohete se mantiene viajando hacia delante mientras frena. Finalmente, se detiene. Sin embargo, si el empuje en reversa se aplica continuamente (lo que es posible, pero no probable), invertirá su dirección y regresará a 175 m del punto donde se aplicó el empuje en reversa inicial; un proceso que tardaría 13.7 s.
69. no, $a = 3.33$ $m/s^2 < 4.90$ m/s^2

71. 2.2×10^5 m/s^2
73. no, 13.3 m > 13 m
75. ***b)*** 96 m
77. ***a)*** (3) $v_1 > \frac{1}{2}v_2$ ***b)*** 9.22 m/s, 13.0 m/s
79. ***a)*** −12 m/s; −4.0 m/s ***b)*** −18 m ***c)*** 50 m
81. ***a)*** 12.2 m/s, 16.4 m/s ***b)*** 24.8 m ***c)*** 4.07 s
83. ***d)***
85. ***c)***
87. ***c)***
89. La pelota se mueve con velocidad constante porque no hay aceleración gravitacional en el espacio profundo. Si la aceleración gravitacional es cero, $g = 0$, entonces v = constante.
91. Primero que nada, la aceleración gravitacional en la Luna es apenas 1/6 de la que existe en la Tierra. O $g_M = g_E/6$. En segundo término, no hay resistencia del aire en la Luna.
93. ***a)*** (3) cuatro veces, la altura es proporcional al tiempo al cuadrado. ***b)*** 15.9 m, 3.97 m
95. no, no es un buen negocio (0.18 < 0.20 s)
97. 67 m
99. $\Delta t = 0.096$ s
101. ***a)*** (1) menos del 95%, en tanto que la altura depende de la velocidad inicial al cuadrado
103. ***a)*** 1.64 m/s^2 ***b)*** 2.07 m/s
105. ***a)*** 5.00 s ***b)*** 36.5 m/s
107. 1.49 m por encima del borde superior de la ventana.
109. ***a)*** 155 m/s ***b)*** 2.22×10^3 m ***c)*** 28.7 s
111. ***a)*** 8.45 s ***b)*** $x_M = 157$ m; $x_C = 132$ m ***c)*** 13 m
113. ***a)*** 38.7 m/s ***b)*** 15.5 s ***c)*** 19.2 m/s
115. ***a)*** 119 m ***b)*** 4.92 s ***c)*** Lois: 48.2 m/s; Superman: 73.8 m/s

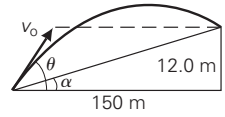
117. ***a)*** −297 m/s ***b)*** 3.66 m/s^2 ***c)*** 108 s

Capítulo 3

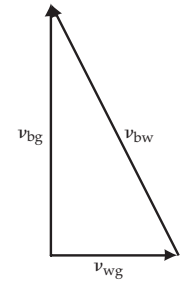
1. ***a)***
3. ***c)***
5. Sí, es posible. Por ejemplo, si un objeto registra movimiento circular, la velocidad (a lo largo de la tangente) es perpendicular a la aceleración (hacia el centro del círculo).
7. ***a)*** (1) mayor porque para $\theta < 45°$, $\cos\theta > \operatorname{sen}\theta$ y $v_x = v\cos\theta$ y $v_y = v\operatorname{sen}\theta$. ***b)*** 28 m/s, 21 m/s
9. ±6.3 m/s, hay dos posibles respuestas porque el vector podría estar en el primero o en el cuarto cuadrante.
11. ***a)*** (2) al norte del este ***b)*** 1.1×10^2 m, 27° al norte del este
13. $x = 1.75$ m, $y = -1.75$ m
15. ***a)*** 75.2 m ***b)*** 99.8 m
17. ***a)*** $\theta = 56.3°$ por debajo de la horizontal ***b)*** 18.0 m/s
19. ***a)*** 1.2 m/s ***b)*** 49 m
21. ***c)***
23. ***d)***
25. Sí cuando el vector está en la dirección y, tiene un componente x.
27. Sí, si son iguales y opuestos
29.



31. 4.9 m, 59° por encima del eje x
33. 113 mi/h
35. ***a)*** $(-3.4\text{ cm})\,\hat{\mathbf{x}} + (-2.9\text{ cm})\,\hat{\mathbf{y}}$ ***b)*** 4.5 cm, 63° por encima del eje x ***c)*** $(4.0\text{ cm})\,\hat{\mathbf{x}} + (-6.9\text{ cm})\,\hat{\mathbf{y}}$
37. ***a)*** $(14.4\text{ N})\,\hat{\mathbf{y}}$ ***b)*** 12.7 N a 85.0° por encima del eje $+x$
39. ***a)*** $\vec{\mathbf{v}}_2 = (-4.0\text{ m/s})\,\hat{\mathbf{x}} + (8.0\text{ m/s})\,\hat{\mathbf{y}}$ ***b)*** 8.9 m/s
41. 21 m/s a 51° por debajo del eje $+x$
43. ***a)*** $(-9.0\text{ cm})\,\hat{\mathbf{x}} + (6.0\text{ cm})\,\hat{\mathbf{y}}$ ***b)*** 33.7°, con respecto al eje $-x$
45. 8.5 N a 21° por debajo del eje $-x$
47. paralelo, 30 N; perpendicular, 40 N
49. Las fuerzas actúan sobre diferentes objetos (una sobre el caballo y la otra sobre el carro), por lo tanto, no se anulan.
51. ***a)*** (2) al norte del oeste ***b)*** 102 mi/h a 61.1° al norte del oeste
53. ***a)*** 42.8° al sur del oeste ***b)*** 0.91 m ***c)*** La razón se debe al hecho de que la pelota sigue una trayectoria curva.
55. ***b)***
57. ***b)***
59. El movimiento horizontal no afecta el movimiento vertical. El movimiento vertical de la pelota proyectada horizontalmente es idéntico al de la pelota arrojada.
61. ***a)*** 0.64 s ***b)*** 0.64 m
63. 6.4 m
65. 40 m
67. ***a)*** (2) La pelota B choca con la pelota A porque tienen la misma velocidad horizontal. ***b)*** 0.11 m, 0.11 m
69. ***a)*** a 0.77 m ***b)*** la esfera no caería de regreso.
71. 35° o 55°
73. 3.65 m/s^2
75. ***a)*** 26 m ***b)*** 23 m/s a 68° por debajo de la horizontal
77. 1.4°
79. sí, a $x = 15$ m, $y = 0.87$ m < 1.2 m
81. 8.7 m/s
83. El pase es corto.
85. ***a)***



b) 66.0 m/s ***c)*** El tiro es demasiado largo para el hoyo.
87. ***d)***
89. No, la Tierra experimenta varios movimientos como el de traslación alrededor del Sol y el de rotación sobre sí misma.
91. Como la lluvia cae a un ángulo con respecto a usted, debería sostener el paraguas de manera que quede inclinado hacia delante.
93. Debe arrojar la pelota en línea recta hacia arriba. De esta forma, tanto usted como la pelota tendrán la misma velocidad horizontal con respecto al piso o tendrán velocidad horizontal cero entre sí, de manera que el objeto regresará a su mano.
95. 6.7 s
97. ***a)*** +85 km/h ***b)*** −5 km/h
99. 146 s = 2.43 min
101. ***a)*** Igual en ambos trayectos, 4.25° corriente arriba ***b)*** 44.6 s
103.



Utilice los siguientes subíndices b = bote, w = agua y g = suelo. Para que la lancha realice su trayecto directamente a través del río, v_{bw} debe ser la hipotenusa del triángulo rectángulo. Así que debe ser mayor en magnitud que v_{wg}. Si lo contrario es cierto, esto es, si $v_{wg} > v_{bw}$, la lancha no podrá viajar directamente a través del río.
105. 1.21 m/s
107. ***a)*** 24° al este del sur ***b)*** 1.5 h
111. ***a)*** 47.8 s ***b)*** 5.32×10^3 m ***c)*** 310 m/s

Capítulo 4

1. ***d)***
3. ***c)***
5. ***d)***
7. De acuerdo con la primera ley de Newton, su tendencia es a permanecer en reposo o en movimiento con velocidad constante. Sin embargo, el avión está acelerando más rápidamente que usted por lo que usted se queda "atrás" y se siente "empujado" contra el asiento. El asiento en realidad suministra una fuerza hacia delante para acelerarlo a la misma velocidad que el avión.
9. ***a)*** La burbuja se mueve hacia delante en la dirección de la velocidad o de la aceleración, porque la inercia del líquido resistirá la aceleración hacia delante. De manera que la burbuja de masa o inercia insignificante se mueve hacia delante con respecto al líquido. Luego se mueve hacia atrás al contrario de la

velocidad (o en la dirección de la aceleración) por la misma razón. ***b)*** El principio se basa en la inercia del líquido.

11. De acuerdo con la primera ley de Newton, o la ley de la inercia, la vajilla en reposo tiende a permanecer en reposo. El rápido jalón del mantel requiere una fuerza que excede la fricción estática máxima (como se explicó en la sección 4.6), de manera que el mantel pueda moverse con respecto a la vajilla.

13. 0.40 kg

15. 0.64 m/s^2

17. ***a)*** (3) La fuerza hacia arriba es la misma en las dos situaciones. En ambas situaciones no hay aceleración en la dirección vertical, de manera que la fuerza neta en la dirección vertical es cero o la fuerza normal es igual al peso. ***b)*** 0.50 lb

19. ***a)*** (3) tanto (1) como (2) son posibles porque el estado "en reposo" y la "velocidad constante" tienen aceleración cero. ***b)*** sí, 2.5 N a 36° por encima del eje $+x$

21. ***a)*** no ***b)*** $F_5 = 4.1$ N a 13° por encima del eje $-x$

23. ***b)***

25. ***d)***

27. Habrá aceleración extra. Una camioneta pickup en la nieve (con masa incrementada) tendrá menos aceleración a causa de la masa adicional y el cohete lanzado (con masa disminuida) tendrá mayor aceleración.

29. Las "manos suaves" aquí dan por resultado un tiempo de contacto más prolongado entre la pelota y las manos. El aumento en el tiempo de contacto disminuye la magnitud de la aceleración. De acuerdo con la segunda ley de Newton, esto, a la vez, disminuye la fuerza requerida para detener la pelota y su fuerza de reacción, la fuerza sobre las manos.

31. 1.7 kg

33. ***a)*** (3) 6.0 kg, porque la masa es una medida de la inercia, y no cambia. ***b)*** 9.8 N

35. ***a)*** (1) en la Tierra. 1 lb es equivalente a 454 g, o 454 g tienen un peso de 1 lb.
b) 5.4 kg (2.0 lb)

37. ***a)*** (4) una cuarta parte. ***b)*** 4.0 m/s^2

39. 2.40 m/s^2

41. ***a)*** 30 N ***b)*** -4.60 m/s^2

43. 8.9×10^4 N

45. Louise está a salvo.

47. ***c)***

49. Las fuerzas actúan sobre diferentes objetos (una sobre el caballo y la otra sobre el carro) y, por lo tanto, no se anulan.

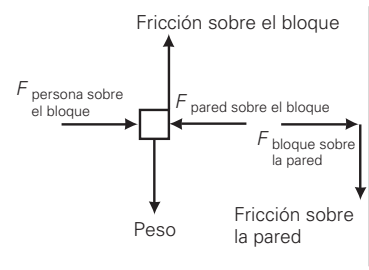
51. ***a)*** (2) dos fuerzas actúan sobre el libro: la fuerza gravitacional (peso, w) y la fuerza normal ejercida sobre la superficie, N.
b) La reacción de w es una fuerza hacia arriba que ejerce el libro sobre la Tierra, y la fuerza de reacción de N es una fuerza hacia abajo que ejerce el libro sobre la superficie horizontal.

53. ***a)*** la fuerza que ejercieron los tacos sobre él. ***b)*** 3.08 m/s^2

55. ***a)*** (4) el tirón de la cuerda sobre la niña. El tirón de la cuerda sobre ella es la reacción del tirón de la niña sobre la cuerda. ***b)*** 264 N

57. ***d)***

59.



La fuerza que ejerce la pared sobre el bloque $F_{\text{pared sobre el bloque}}$ y la fuerza que ejerce el bloque sobre la pared $F_{\text{bloque sobre la pared}}$ constituyen un par acción-reacción.

61. ***a)*** (1) menor que el peso del objeto, $N = w \cos\theta < w$ (para cualquier $\theta \neq 0$).
b) 98 N y 85 N

63. 585 N

65. ***a)*** 1.7 m/s^2 a 19° al norte del este
b) 1.2 m/s^2 a 30° al sur del este

67. ***a)*** 0.96 m/s^2 ***b)*** 2.6×10^2 N

69. 123 N hacia arriba de la superficie inclinada

71. 64 m

73. ***a)*** (3) tanto la separación de los árboles como del combado. ***b)*** 6.1×10^2 N

75. 2.63 m/s^2

77. 6.25×10^5 N

79. 2.0 m/s^2

81. 1.1 m/s^2 hacia arriba

83. ***a)*** (1) $T > w_2$ y $T < F$
b) 1.70×10^3 N ***c)*** 1.13×10^3 N

85. ***a)*** 1.2 m/s^2, m_1 hacia arriba m_2 hacia abajo ***b)*** 21 N

87. ***c)***

89. ***b)***

91. Esto es porque la fricción cinética (de deslizamiento) es menor que la fricción estática (de rodamiento). Una mayor fuerza de fricción podría disminuir la distancia para detenerse.

93. ***a)*** No, no hay inconsistencia. Aquí la fuerza de fricción SE OPONE al deslizamiento.
b) El viento puede aumentar o disminuir la fricción del aire dependiendo de las direcciones del viento. Si este último lleva la dirección del movimiento, la fricción disminuye y viceversa.

95. ***a)*** (3) aumenta, pero más del doble. Hay fricción constante implicada en este ejercicio, de manera que la fuerza neta es mayor del doble. Así que la aceleración es mayor del doble,
b) 7.0 m/s^2

97. 2.7×10^2 N

99. ***a)*** $\theta_{\text{mín}} = \tan^{-1} 0.65 = 33° > 20°$, de manera que no se moverá.

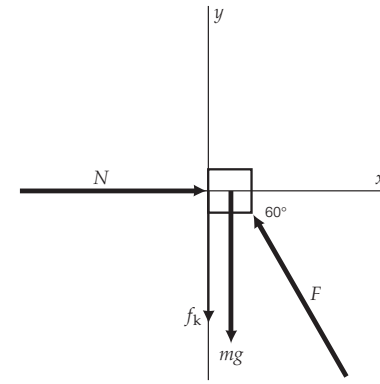
101. 0.064

103. ***a)*** (2) jalando al mismo ángulo.
b) 296 N; 748 N
b) 296 N; 748 N

105. ***a)*** 30° ***b)*** 22°

107. ***a)*** 6.0 kg ***b)*** 1.2 m/s^2

109. ***a)***



b) 30 N ***c)*** 23 N

111. ***a)*** 0.179 kg ***b)*** 0.862 m/s^2

113. ***a)*** (4) la fuerza de fricción estática sobre A que se debe a la superficie superior de B.
b) 5.00 N, 17.5N

115. ***a)*** 5.5 m/s^2 ***b)*** 173 N

117. ***a)*** 10.3 N ***b)*** 0.954 kg

Capítulo 5

1. ***d)***

3. ***b)***

5. ***a)*** No, el peso no se mueve, así que no hay desplazamiento y, por lo tanto, no hay trabajo. ***b)*** Sí, se realiza trabajo positivo mediante la fuerza ejercida por el montacargas.
c) Sí, pero el trabajo positivo lo realiza la gravedad, no el montacargas.

7. Positivo hacia abajo y negativo hacia arriba. No, no es constante.

9. -98 J

11. 8.31 m

13. 3.7 J

15. 2.3×10^3 J

17. ***a)*** (2) una, la única fuerza que realiza trabajo no cero es la fuerza de fricción cinética.
b) -62.5 J

19. ***a)*** 1.48×10^5 J ***b)*** -1.23×10^5 J
c) 2.50×10^4 J.

21. ***a)*** El hecho de jalar requiere que el estudiante realice (1) menos trabajo. En comparación con el acto de empujar, jalar disminuye la fuerza normal sobre el cajón. Esto, a la vez, disminuye la fuerza de fricción cinética. ***b)*** jalar: 1.3×10^3 J; empujar: 1.7×10^3 J

23. No, implica más trabajo. Esto se debe a que la fuerza aumenta conforme el resorte se estira, de acuerdo con la ley de Hooke. Además, el desplazamiento es mayor.

25. 80 N/m

27. 1.25×10^5 N/m

29. ***a)*** (1) $\sqrt{2}$, porque cuando W se duplica, x se convierte en $\sqrt{2}$. Por lo tanto, se estirará por un factor de $\sqrt{2}$. ***b)*** 900 J

31. ***a)*** (1) más que, porque la fuerza requerida es mayor (mientras que el desplazamiento es igual) para estirarlo de 10 a 20 cm, de acuerdo con la ley de Hooke.
b) 0–10 cm: 0.25 J; 10–20 cm: 0.75 J

33. ***a)*** 4.5 J ***b)*** 3.5 J
35. 6.0 J
37. ***d)***
39. ***c)***
41. Reducir la rapidez a la mitad reducirá la energía cinética por $\frac{3}{4}$, mientras que reducir la masa a la mitad sólo reducirá la energía cinética a la mitad.
43. $\sqrt{2}\,v$
45. -1.3×10^3 N
47. ***a)*** 45 J ***b)*** 21 m/s
49. 200 m
51. 2.0×10^3 m
53. ***d)***
55. ***d)***
57. Tendrán la misma energía potencial en la parte superior porque tienen la misma altura.
59. ***a)*** (4) sólo la diferencia entre las dos alturas, porque el cambio en la energía potencial depende sólo de la diferencia de altura, no de las posiciones. ***b)*** la posición baja 0.51 m
61. ***a)*** (4) igual para todos, porque el cambio en la energía potencia es independiente del nivel de referencia.
b) $U_b = -44$ J, $U_a = 66$ J ***c)*** -1.1×10^2 J
63. 1/25
65. ***a)*** 0.154 J ***b)*** -0.309 J
67. ***d)***
69. La energía potencial inicial es igual a la energía potencial final, de manera que la altura final es igual a la altura inicial.
71. Sí. Cuando la pelota lanzada hacia arriba está a su máxima altura, su velocidad es cero, así que tiene la misma energía que la pelota que se deja caer. Como la energía total de cada pelota se conserva, ambas pelotas tendrán la misma energía mecánica a la mitad de la altura de la ventana. De hecho, ambas pelotas tendrán la misma energía cinética y potencial cuando estén a la mitad de la altura.
73. 5.10 m
75. ***a)*** (3) en el punto más bajo de la oscilación del columpio, porque cuanto menor es la energía potencial (en la parte inferior es mínima), más alta es la energía cinética y, por lo tanto, la rapidez. ***b)*** 5.42 m/s
77. 0.176 m
79. ***a)*** 1.03 m ***b)*** 0.841 m ***c)*** 2.32 m/s
81. ***a)*** 11 m/s ***b)*** no ***c)*** 7.7 m/s
83. ***a)*** 2.7 m/s ***b)*** 0.38 m ***c)*** 29°
85. -7.4×10^2 J
87. 12 m/s
89. ***b)***
91. No, se paga por la energía porque kWh es la unidad de potencia × tiempo = energía. 9.0×10^6 J
93. Efectúan la misma cantidad de trabajo (igual masa, igual altura). Así que el que llega primero habrá gastado más potencia a causa del intervalo de tiempo más corto.
95. 97 W
97. 5.7×10^{-5} W
99. 6.0×10^2 J
101. ***a)*** 5.5×10^2 W ***b)*** 0.74 hp
103. 48.7%
105. 5.0×10^2 W
107. 0.536
109. 10 m

Capítulo 6

1. ***b)***
3. ***d)***
5. No necesariamente. Incluso si la cantidad de movimiento es la misma, masas diferentes podrán tener energías cinéticas distintas.
7. ***a)*** 1.5×10^3 kg · m/s ***b)*** cero
9. ***a)*** 85 kg · m/s ***b)*** 3.0×10^4 kg · m/s
11. 31 m/s
13. 4.05 kg·m/s en la dirección contraria a v_o
15. ***a)*** 13 kg · m/s ***b)*** 43 kg · m/s
17. $\Delta\vec{\mathbf{p}} = (-3.0\ \text{kg} \cdot \text{m/s})\,\hat{\mathbf{y}}$
19. 16 N
21. 68 N
23. ***a)*** 10.6 kg · m/s en dirección contraria a v_o ***b)*** 2.26×10^3 N
25. ***a)*** 2.09 kg · m/s ***b)*** 24.0 N hacia arriba
27. ***c)***
29. Deteniéndose, el tiempo de contacto es menor. De acuerdo con el teorema de la cantidad de movimiento del impulso ($F_{prom}\Delta t = \Delta p = mv - mv_o$), un menor tiempo de contacto dará por resultado una mayor fuerza si todos los demás factores (m, v_o, v) permanecen constantes.
31. En ***a)***, ***b)*** y ***c)***, al haber mayor tiempo de contacto, hay menor fuerza promedio. Esto se debe a que ($F_{prom}\Delta t = \Delta p = mv - mv_o$) de manera que cuanto mayor es Δt, menor es F. También disminuye la presión sobre el cuerpo porque la fuerza se distribuye sobre una mayor área.
33. 6.0×10^3 N
35. ***a)*** 1.2×10^3 N ***b)*** 1.2×10^4 N
37. ***a)*** (2) el conductor aplicando los frenos, porque reduce la rapidez. ***b)*** 28.7 m/s
39. ***a)*** Golpearlo requiere una mayor fuerza. La fuerza es proporcional al cambio en la cantidad de movimiento. Cuando una pelota cambia su dirección, el cambio en la cantidad de movimiento es mayor. ***b)*** 1.2×10^2 N en la dirección contraria a v_o
41. 1.1×10^3 N, 4.7×10^2 N
43. 15 N hacia arriba
45. ***a)*** 36 km/h, a 56° al norte del este ***b)*** se pierde el 49%
47. 8.06 kg · m/s, 29.7° por arriba del eje $-x$
49. ***d)***
51. El aire se mueve hacia atrás y la lancha se mueve hacia delante de acuerdo con la conservación de la cantidad de movimiento. Si la vela se colocara detrás del ventilador en la lancha, ésta no iría hacia delante porque las fuerzas entre el ventilador y la vela son fuerzas internas del sistema.
53. No, es imposible. Antes del golpe, hay algo de cantidad de movimiento inicial del sistema de dos objetos que se debe al que está en movimiento. De acuerdo con la conservación de la cantidad de movimiento, el sistema también debería tener cantidad de movimiento después del golpe. Por lo tanto, no es posible que ambos estén en reposo (cantidad de movimiento total del sistema igual a cero).
55. se mueve 0.083 m/s en dirección contraria
57. 1.08×10^3 s = 18.1 min
59. 7.6 m/s, 12° por encima del eje $+x$
61. ***a)*** 45 km/h ***b)*** 15 km/h ***c)*** 105 km/h
63. 0.33 m/s
65. 0.78 m/s
67. ***a)*** 4.0 m/s ***b)*** 4.0 m/s
69. 82.8 m
71. ***a)*** 9.7° ***b)*** 0.10 m/s
73. ***c)***
75. ***a)***
77. Esto se debe al hecho de que la cantidad de movimiento es un vector y la energía cinética un escalar. Por ejemplo, dos objetos de igual masa que viajan con la misma rapidez, pero en direcciones opuestas tienen la energía cinética total positiva, pero cero cantidad de movimiento total. Después de su choque inelástico, ambos se detienen, lo que da por resultado energía cinética total igual a cero y cantidad de movimiento total igual a cero. Por lo tanto, la energía cinética se pierde y la cantidad de movimiento se conserva.
79. Sí, es posible. Por ejemplo, cuando dos objetos de igual masa se aproximan uno al otro con igual rapidez, la cantidad de movimiento inicial total es cero. Después de que chocan, si ambos permanecen estacionarios, la cantidad de movimiento total sigue siendo cero. Sin embargo, después del choque, el sistema de dos objetos se queda sin energía cinética.
81. $v_p = -1.8 \times 10^6$ m/s; $v_a = 1.2 \times 10^6$ m/s
83. $v_1 = -0.48$ m/s; $v_2 = +0.020$ m/s
85. $v_p = 38.2$ m/s, $v_c = 40.2$ m/s
87. 0.94 m
89. 1.1×10^2 J
91. ***a)*** (1) Al sur del este de acuerdo con la conservación de la cantidad de movimiento. La cantidad de movimiento inicial de la minivagoneta es hacia el sur, y la del automóvil es hacia el este, de manera que el sistema de los dos vehículos tienen una cantidad de movimiento hacia el sureste después del choque.
b) 13.9 m/s, 53.1° al sureste
93. no, 1.1 kg · m/s, 249°
95. ***a)*** 28% ***b)*** 1.3×10^7 m/s
97. $\theta_1 = 9.94°$, $\theta_2 = 19.8°$
99. ***d)***
101. El centro de masa del flamingo se ubica directamente por encima de la extremidad sobre el suelo para que esté en equilibrio.
103. ***a)*** (0, −045 m) ***b)*** no, sólo que están equidistantes del CM, por las masas iguales de las partículas.
105. ***a)*** a 4.6×10^6 m del centro de la Tierra ***b)*** 1.8×10^6 m por debajo de la superficie de la Tierra
107. 82.8 m
109. El CM tanto de la lámina como del círculo están en el centro del cuadrado. Así que a partir de la simetría, el CM de la porción restante sigue estando en el centro de la lámina.
111. 0.175 m
113. ***a)*** el de 65 kg recorre 3.3 m y el de 45 kg recorre 4.7 m ***b)*** iguales distancias como en el inciso ***a)***
115. extremo pesado : 5.59 m; extremo ligero: 6.19 m
117. ***a)*** 0.222° ***b)*** 199 m/s
119. ***a)*** 4.65 m/s, $\theta = 2.13°$ ***b)*** $K < K_o$, inelástico

Capítulo 7

1. ***c)***
3. 2π rad = 360°, así que 1 rad = 57.3°
5. (2.5 m, 53°)
7. 1.4×10^9 m
9. ***a)*** 30° ***b)*** 75° ***c)*** 135° ***d)*** 180°
11. ***a)*** 4.00 rad ***b)*** 229°
13. 10.7 rad
15. ***a)*** 129°
b) aproximadamente 1.4×10^4 km
17. 28.3 m
19. ***a)*** 3.0×10^2 rad ***b)*** 91 m
21. ***b)***
23. ***d)***
25. Observar desde lados opuestos daría sentidos circulares diferentes, esto es, el sentido en el movimiento de las manecillas del reloj sería al contrario y viceversa.
27. 21 a 47 rad/s
29. 1.8 s
31. la partícula B
33. ***a)*** 0.84 rad/s ***b)*** 3.4 m/s, 4.2 m/s
35. ***a)*** La rapidez angular de rotación es mayor porque el tiempo es menor (el desplazamiento angular es igual).
b) 7.27×10^{-5} rad/s para rotación, 1.99×10^{-7} rad/s para revolución
37. ***a)*** 60 rad ***b)*** 3.6×10^3 m
39. ***d)***
41. ***d)***
43. Los flotadores de la pequeña masa se moverán en la dirección de la aceleración, hacia dentro. Funciona de la misma forma que el acelerómetro de la figura 4.24. No, no hay diferencia, puesto que la aceleración centrípeta siempre es hacia dentro.
45. Se requiere la fuerza centrípeta para que un automóvil conserve su trayectoria circular. Cuando un vehículo va por una curva peraltada, el componente horizontal de la fuerza normal sobre el automóvil apunta hacia el centro de la trayectoria circular. Este componente permitirá al automóvil que tome la curva incluso cuando no hay fricción.
47. 1.3 m/s
49. 2.69×10^{-3} m/s^2
51. 11.3°
53. ***a)*** el peso suministra la fuerza centrípeta
b) 3.1 m/s
55. 29.5 N, la cuerda servirá
57. ***a)*** $v = \sqrt{rg}$ ***b)*** $h = (5/2)r$
61. ***d)***
63. Sí, un automóvil en movimiento circular siempre tiene aceleración centrípeta. Sí, también tiene aceleración angular conforme aumenta su rapidez.
65. La respuesta es no. Cuando la aceleración angular aumenta, la rapidez tangencial se incrementa, lo que da por resultado un aumento en la aceleración centrípeta.
67. 1.1×10^{-3} rad/s^2
69. ***a)*** (3) la aceleración angular y la centrípeta. Siempre hay aceleración centrípeta para cualquier vehículo en movimiento circular. Cuando el automóvil aumenta su rapidez en una pista circular, también hay aceleración angular. ***b)*** 53 s
c) $\vec{\mathbf{a}} = -(8.5\ \text{m/s}^2)\,\hat{\mathbf{r}} + (1.4\ \text{m/s}^2)\,\hat{\mathbf{t}}$
71. 6.69 rad/s^2
73. ***a)*** 2.45 rad/s^2 ***b)*** 17.0 m/s^2 ***c)*** 38.2 N
75. ***d)***
77. No, estos términos no son correctos. La gravedad actúa sobre los astronautas y sobre la nave espacial, suministrando la fuerza centrípeta necesaria para estar en órbita, así que g no es cero y, por definición, hay peso ($w = mg$). La "flotación" ocurre porque la nave espacial y los astronautas están "cayendo" ("acelerando" hacia la Tierra a la misma tasa).
79. Sí, si también se conoce el radio de la Tierra. La aceleración de la gravedad cerca de la superficie de la Tierra se escribe como $a_g = GM_E/R_E^2$. Con tan sólo medir a_g, es posible determinar $M_E = a_g R_E^2/G$.
81. 2.0×10^{20} N
83. 8.0×10^{-10} N, hacia la esquina opuesta
85. 3.4×10^5 m
87. 1.5 m/s^2
89. ***a)*** -2.5×10^{-10} J ***b)*** 0
91. ***c)***
93. ***d)***
95. ***a)*** Los cohetes se lanzan hacia el este para adquirir más velocidad en relación con el espacio porque la Tierra gira hacia el este.
b) La rapidez tangencial de la Tierra es mayor en Florida porque ahí se está más cerca del ecuador que en California y, por lo tanto, hay una mayor distancia con respecto al eje de rotación. Además, el lanzamiento se hace cerca del océano por seguridad.
97. ***a)*** 3.7×10^3 m/s ***b)*** 34%
99. 4.4×10^{11} m
101. 1.53×10^9 m
103. ***a)*** 8.91 m/s^2, hacia el centro
b) 1.40×10^4 N, hacia el automóvil
c) 2.27 m/s^2, velocidad contraria
d) 9.19 m/s^2, $\theta = 75.7°$
105. 31 s ***b)*** 19 rev
107. 2.97×10^{30} kg

Capítulo 8

1. ***a)***
3. ***b)***
5. ***b)***
7. Si v es menor que $R\omega$, el objeto se está deslizando. Si, es posible que v sea mayor que $R\omega$ cuando el objeto se desliza.
9. En la posición de las nueve en punto, la velocidad es en línea recta hacia arriba. Así que se trata de una "caída libre" con una velocidad inicial hacia arriba. Se elevará, alcanzará una altura máxima y luego caerá.
11. 0.10 m
13. 1.7 rad/s
15. ***a)*** 0.0331 rad/s^2 ***b)*** 1.99×10^{-3} m/s^2
17. ***b)***
19. ***a)***
21. Esto es para bajar el centro de gravedad de manera que el peso tenga un brazo de palanca más corto y, por lo tanto, un menor momento de torsión.
23. El momento de torsión de la fricción provoca que la motocicleta gire hacia arriba hasta equilibrarse con el momento de torsión del peso.
25. 5.6×10^2 N
27. 3.3×10^2 N
29. ***a)*** Sí, el sube y baja se equilibra si los brazos de palanca son adecuados para los pesos de los niños porque el momento de torsión es igual a la fuerza multiplicada por el brazo de palanca. ***b)*** 2.3 m
33. 1.6×10^2 N
35. ***a)*** en sentido de las manecillas del reloj.
b) 466 m · N
37. 0, 9.80 m · N, 17.0 m · N, 19.6 m · N
39. ***a)*** (2) hacia la báscula situada debajo de la cabeza de la persona, porque la distribución de la masa del cuerpo humano tiende más hacia la parte superior que hacia la parte inferior. **(b)** a 0.87 m de los pies
41. Sí, el centro de gravedad de cada regla está sobre o a la izquierda del borde de la mesa.
43. a 1.2 m del extremo izquierdo de la tabla
45. $T_1 = 21$ N, $T_2 = 15$ N
47. ***a)*** (2) la tabla con el payaso encima. A primera vista, parece haber dos factores que dan por resultado una mayor tensión en la cuerda. Uno es el peso extra del payaso. El otro es el brazo de palanca acortado de la tensión en la cuerda cuando está en ángulo. Sin embargo, el peso de la tabla y el payaso también habrá acortado sus brazos de palanca por el mismo factor, así que los efectos se anulan.
b) 172 N, 539 N
49. ***d)***
51. ***a)***
53. ***a)*** Sí. El momento de inercia tiene un valor mínimo que se calcula alrededor del centro de masa. ***b)*** No, la masa tendría que ser negativa.
55. El huevo duro es un cuerpo rígido, mientras que el huevo crudo no lo es.
57. Esto es para aumentar el momento de inercia. Si el equilibrista comienza a girar (caerse), la aceleración angular será menor y, por lo tanto, habrá mayor tiempo para recuperarse.
59. 0.64 m · N
61. ***a)*** 2.4 kg · m^2 ***b)*** 0.27 kg · m^2
c) 2.4 kg · m^2 (igual)
63. 1.1 rad
65. 1.2 m/s^2
67. ***a)*** 2.93 m · N ***b)*** 58.7 N
69. ***a)*** $1.5g$ ***b)*** posición de 67 cm
71. 6.5 m/s^2
73. ***a)*** (3) $7\mu_s/2$ ***b)*** 63.8°
75. ***c)***
77. Sí. La energía cinética de rotación depende del momento de inercia, que depende tanto de la masa como la de distribución de ésta. La energía cinética de traslación depende sólo de la masa.
79. De acuerdo con el teorema de trabajo-energía, se requiere trabajo de rotación para producir un cambio en la energía cinética de rotación. El trabajo de rotación (W) se realiza mediante un momento de torsión (τ) que actúa a través de un desplazamiento angular (θ).
81. ***a)*** 28 J ***b)*** 14 W
83. 0.47 m · N
85. 0.16 m
87. 78.5 N
89. el cilindro llega más alto por 7.1%

91. ***a)*** 1.31×10^8 J ***b)*** 1.46×10^6 W
93. ***a)*** 29% ***b)*** 40% ***c)*** 50%
95. ***a)*** $v = \sqrt{gR}$ ***b)*** $h = 2.7R$ ***c)*** ingravidez
97. ***d)***
99. Caminar hacia el centro disminuye el momento de inercia y aumenta la rapidez de rotación.
101. En cada caso, el cambio en el vector de cantidad de movimiento angular de la rueda se compensa mediante la rotación de la persona para conservar la cantidad de movimiento total, así que la cantidad de movimiento angular vertical permanece constante.
103. ***a)*** cero ***b)*** La energía cinética lineal se convierte en energía cinética de rotación.
105. 1.4 rad/s
107. $L_{rot} = 2.4 \times 10^{29}$ kg · m²/s; $L_{rev} = 2.8 \times 10^{34}$ kg · m²/s
109. 1.18 rad/s
111. ***a)*** 4.3 rad/s ***b)*** $K = 1.1K_o$ ***c)*** el trabajo que efectúa el patinador
113. $d = b(v_o/v)$
115. ***a)*** (2) gira en dirección opuesta a la que el gato camina, porque de acuerdo con la conservación de la cantidad de movimiento angular, la perezosa Susan girará en dirección opuesta. ***b)*** 0.56 rad/s ***c)*** no, 2.1 rad
117. ***a)*** 33.1 rad/s ***b)*** 5.29 m/s ***c)*** 28.6 rad/s, 4.58 m/s
119. 0.104 m/s

Capítulo 9

1. ***c)***
3. ***d)***
5. El alambre de acero tiene un mayor módulo de Young. El módulo de Young es una medida de la relación entre el esfuerzo y la deformación. Para un esfuerzo dado, un mayor módulo de Young tendrá una menor deformación. El acero sufrirá una menor deformación aquí.
7. A través de la acción capilar, la clavija de madera absorbe el agua y hace que la roca se hinche y se divida.
9. 3.1×10^4 N/m²
11. ***a)*** 9.4×10^4 N/m² ***b)*** 1.2×10^5 N/m²
13. 47 N
15. ***a)*** (1) un día frío, porque las vías se expanden cuando la temperatura aumenta. ***b)*** 1.9×10^5 N
17. ***a)*** se dobla hacia el latón, porque las tensiones son las mismas para ambos, y el latón tiene un menor módulo de Young. El latón tendrá una mayor deformación $\Delta L/L_o$, así que se comprimirá más. Por consiguiente, el latón será más corto que el cobre. ***b)*** latón: $\Delta L / L_o = 2.8 \times 10^{-3}$, cobre: $\Delta L / L_o = 2.3 \times 10^{-3}$
19. 4.2×10^{-7} m
21. ***a)*** El alcohol etílico tiene la mayor compresibilidad, porque tiene el menor módulo de volumen B. Cuanto menor es B, mayor es la compresibilidad. ***b)*** $\Delta p_w/\Delta p_{ea} = 2.2$
23. 7.28×10^5 N/m²
25. ***d)***
27. ***a)***
29. Las llantas de la bicicleta tienen una área de contacto mucho menor con el piso, así que necesitan una presión más alta para equilibrar el peso de la bicicleta y del ciclista.
31. ***a)*** La presión se determina sólo por la profundidad, así que no hay efecto (igual profundidad, igual presión). ***b)*** Por lo general, las presas son más anchas en el fondo porque la presión aumenta a mayor profundidad.
33. ***a)*** La presión dentro de la lata es igual a la presión atmosférica que hay afuera. Cuando el líquido se vierte de una lata sin ventila, se forma un vacío parcial adentro, y la diferencia de presión hace que sea difícil verter el líquido. ***b)*** Cuando se presiona un cuentagotas antes de insertarlo en un líquido, se está forzando al aire a salir y se reduce la presión dentro del gotero. Cuando se retira la tapa y el gotero se introduce en un líquido, éste sube en el gotero por la presión atmosférica. ***c)*** Al inhalar, los pulmones se expanden físicamente, la presión interna disminuye, y el aire fluye hacia los pulmones. Al exhalar, los pulmones se contraen, la presión interna aumenta y el aire se ve forzado a salir.
35. ***a)*** (1) una mayor altura que el barómetro de mercurio, a causa de su menor densidad. ***b)*** 10 m
37. ***a)*** (1) una columna más alta porque tiene menor densidad. ***b)*** 22 cm
39. 6.39×10^{-4} m²
41. ***a)*** (3) Una menor presión dentro de la lata conforme el vapor se condensa. Como hay un vacío parcial dentro de la lata, la fuerza neta que ejerce la presión atmosférica sobre el exterior aplasta la lata. ***b)*** 1.6×10^4 N = 3600 lb
43. $p = -1.1 \times 10^4$ Pa. Obviamente, la presión no puede ser negativa, así que este cálculo demuestra que la densidad del aire no es una constante, pero la densidad del aire disminuye rápidamente con la altitud.
45. 0.51 N
47. 2.2×10^5 N (aproximadamente 50000 lb)
49. 1.9×10^2 m/s
51. ***a)*** 1.1×10^8 Pa ***b)*** 1.9×10^6 N
53. 549 N, 1.37×10^6 Pa
55. 0.173 N
57. ***c)***
59. ***a)***
61. El hielo tiene un mayor volumen que el agua con igual masa. El nivel no cambia. Conforme el hielo se derrite, el volumen del agua recién convertida disminuye; sin embargo, el hielo, que inicialmente estaba arriba de la superficie del agua, ahora está bajo el agua. Esto compensa la disminución en el volumen. No importa si el hielo está hueco o no.
63. La misma fuerza de flotabilidad, porque ésta depende sólo del volumen de los fluidos desplazados y es independiente de la masa del objeto.
65. ***a)*** (3) permanece a cualquier altura en el fluido, porque el peso se equilibra exactamente por la fuerza de flotación. Donde quiera que se coloque el objeto, permanecerá ahí. ***b)*** se hunde, $W > F_b$
67. 2.6×10^3 kg
69. no, 14.5×10^3 kg/m³ $< \rho_g = 19.3 \times 10^3$ kg/m³
71. ***a)*** 0.09 m ***b)*** 8.1 kg
73. 1.00×10^3 kg/m³ (probablemente H_2O)
75. 17.7 m
77. 8.1×10^2 N
79. ***a)***
81. ***d)***
83. Hay muchos vasos capilares y sólo unas cuantas arterias. El área total de los capilares es mayor que la de las arterias. Así que si A aumenta, v disminuye.
85. ***a)*** La concavidad hace que el aire viaje más rápidamente debajo del automóvil. Este aumento en la rapidez reducirá la presión bajo el vehículo. La diferencia de presión fuerza al automóvil hacia el suelo para suministrar una mayor fuerza normal y fricción para la tracción. ***b)*** El deflector produce una fuerza hacia abajo para una mejor tracción y una mayor fricción.
87. 0.98 m/s
89. ***a)*** 3.5 cm³/s ***b)*** 0.031% ***c)*** Es una necesidad fisiológica. La menor rapidez se necesita para dar tiempo al intercambio de sustancias, como el oxígeno, entre la sangre y los tejidos.
91. 53.6 Pa
93. ***a)*** 0.13 m³/s ***b)*** 1.8 m/s
95. 2.2 Pa
99. ***c)***
101. El 10 y el 40 son mediciones de la viscosidad y la "W" significa invierno (*winter*).
103. 3.5×10^2 Pa
105. 13.5 s
107. 8.0×10^2 kg/m³
109. ***a)*** 3.83 m/s ***b)*** 399

Capítulo 10

1. ***b)***
3. ***a)***
5. el filamento de la lámpara incandescente, hasta 3000°C
7. Celsius
9. ***a)*** 302°F ***b)*** 90°F ***c)*** −13°F ***d)*** −459°F
11. ***a)*** 245°F ***b)*** 375°F
13. 56.7°C y −62°C
15. ***a)*** (3) $T_F = T_C$, porque se desea encontrar la temperatura a la que las escalas Celsius y Fahrenheit arrojan la misma lectura. ***b)*** −40°C = −40°F
17. ***a)*** −101 F° ***b)*** 558 F°
19. ***a)*** (2) $T_C = 0$, porque $T_F = 9/5\ T_C + 32$, en comparación con $y = ax + b$. Para encontrar la intersección en y, hacemos que $x(T_C) = 0$. ***c)*** 5/9; −18°C
21. ***a)***
23. El volumen del gas se mantiene constante. Así que si la temperatura aumenta, también lo hace la presión, y viceversa, de acuerdo con la ley del gas ideal. Por consiguiente, la temperatura se determina midiendo la presión.
25. El cero absoluto implica presión o volumen cero. La temperatura absoluta negativa implica presión o volumen negativo.
27. Igual, porque un mol se define en función del número de moléculas.
29. ***a)*** −273°C ***b)*** −23°C ***c)*** 0°C ***d)*** 52°C
31. ***a)*** 53541°F; 29727°C ***b)*** 0.910%

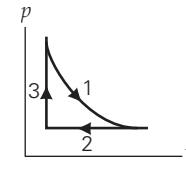
33. ***a)*** (2) disminuye, porque $p_1V_1/T_1 = p_2V_2/T_2$. Con $V_1 = V_2$, $T_2/T_1 = p_2/p_1$ o la temperatura es proporcional a la presión. ***b)*** 167°C
35. 1.7×10^{23}
37. 0.0370 m^3
39. 0.16 L
41. 33.4 lb/in^2
43. 2.31 atm
45. ***a)*** (1) aumenta, porque con $p = p_o$, $p_oV_o/T_o = pV/T$ se vuelve $V/V_o = Tp_o/(T_op) = T/T_o$ o el volumen es proporcional a la temperatura. ***b)*** 10.6%
47. 5.1 cm^3
49. ***c)***
51. ***a)*** el hielo se mueve hacia arriba ***b)*** el hielo se mueve hacia abajo ***c)*** el cobre
53. Cuando sólo la pelota se calienta, se expande y no pasa por el anillo. Cuando este último se calienta, se expande y el hoyo es más grande, así que la pelota pasa por él de nuevo.
55. El metal tiene un coeficiente de expansión térmica más alto que el vidrio. La tapa se expande más que el vidrio, así que es más fácil aflojarla.
57. ***a)*** (1) mayor, porque la cinta se encoge. Una división en la cinta (ahora es menos de una división por el encogimiento) todavía lee una división. ***b)*** 0.060%
59. 0.0027 cm
61. ***a)*** 60.1 cm ***b)*** 3.91×10^{-3} cm^2, sí
63. ***a)*** (1) el anillo, así que se expande, entonces la pelota pasa a través de él. ***b)*** 353°C
65. 5.52×10^{-4}/C°
67. ***a)*** más grande, porque se expande ***b)*** 5.5×10^{-6} m^3
69. ***a)*** 116°C ***b)*** no
71. sí, 79°C
73. ***a)***
75. Los gases se difunden a través de la membrana porosa, pero el gas helio se difunde más rápidamente porque sus átomos tienen menor masa. Al final, habrá iguales concentraciones de gases en ambos lados del contenedor.
77. ***a)*** 6.07×10^{-21} J ***b)*** 7.72×10^{-21} J
79. ***a)*** 6.21×10^{-21} J ***b)*** 1.37×10^3 m/s
81. aumenta por un factor de $\sqrt{2}$
83. ***a)*** 1.82×10^7 J ***b)*** 1.55×10^3 m
85. 273°C
87. 899°C
89. ***a)*** (1) $^{235}UF_6$, porque a la misma temperatura, cuanto menor es la masa, mayor es la rapidez rms promedio. ***b)*** 1.00429
91. ***b)***
93. nRT
95. 6.1×10^3 J
97. ***a)*** 1.21×10^7 J ***b)*** 3.03×10^7 J
99. 0.272%
101. ***a)*** (3) el helio, porque a la misma temperatura, el helio tiene la menor masa y la rapidez rms más alta. ***b)*** 425 m/s < 1100 m/s

Capítulo 11

1. ***d)***
3. 1 Cal = 1000 cal
5. 6.279×10^6 J
7. 4
9. ***a)***
11. ***b)***
13. Como $Q = cm\Delta T = cm(T_f - T_i)$, el calor y la masa específicos provocan que la temperatura final de los dos objetos sea diferente, si Q y T_i son iguales.
15. ***a)*** (1) más calor, porque el cobre tiene un calor específico más elevado. **(b)** el cobre requiere 2.1×10^4 J más
17. 1.7×10^6 J
19. ***a)*** (3) menor que, porque el aluminio tiene un calor específico más elevado que el cobre. De acuerdo con $Q = mc\Delta T$, si Q y ΔT son iguales, un calor específico más elevado da por resultado una menor masa. ***b)*** 1.27 kg
21. 84°C
23. 0.13 kg
25. ***a)*** (1) más calor que el hierro, porque el aluminio tiene un calor específico más elevado, cuando todos los demás factores (m y ΔT) son iguales. ***b)*** El Al por 1.8×10^4 J más
27. ***a)*** mayor, porque si hay agua salpicada, habrá menos agua para absorber el calor. La temperatura final será más elevada y el valor del calor específico medido será erróneo y aparecerá como más elevado que el valor calculado para el caso en el que el agua no se salpique. ***b)*** 3.1×10^2 J/(kg · C°)
29. ***a)*** 7.0×10^2 W ***b)*** 9.4×10^2 W
31. 20.0°C
33. ***d)***
35. ***c)***
37. Esto se debe al valor más alto del calor latente de vaporización. Cuando el vapor se condensa, libera 2.26×10^6 J de calor. Cuando el agua a 100°C baja su temperatura por 1°C, libera sólo 4186 J/kg.
39. 1.13×10^6 J
41. 2.5×10^6 J y 2.5×10^5 J; sí
43. 1.2×10^6 J
45. ***a)*** (2) sólo el calor latente, porque el punto de ebullición del mercurio es 357°C = 630 K, así que ya está en la temperatura de ebullición. ***b)*** 4.1×10^3 J
47. 11°C
49. 1.8×10^{-2} kg
51. 2.1×10^5 J
53. ***a)*** (2) parte del hielo se derretirá. La respuesta (3) se elimina porque el agua a 10°C emitirá suficiente calor para elevar la temperatura del hielo y derretir parte de él porque el hielo tiene un calor específico menor que el agua. La respuesta (1) también se elimina por el valor alto del calor latente de fusión para el hielo (3.3×10^5 J/kg).
La disminución de 10 C° en la temperatura del agua no libera suficiente calor para derretir el hielo por completo. **(b)** 0.5032 kg
55. 0.17 L
57. ***c)***
59. El metal presenta una conductividad de calor más alta, así que el metal conduce el calor lejos de su mano más rápidamente.
61. El aire es un deficiente conductor de calor, así que el pelaje hueco reduce al mínimo la pérdida de calor.
63. 4.54×10^6 J
65. 13 J
67. ***a)*** (1) más larga, porque el cobre tiene una conductividad térmica más alta ***b)*** 1.63
69. ***a)*** 5.5×10^5 J/s ***b)*** 73 kg; sí, véase ISM
71. 411°C
73. ***a)*** (3) menor, porque la lana de vidrio tiene una conductividad térmica más baja. ***b)*** 4.9 in
75. 1.0×10^8 J
77. ***a)*** 1.5×10^3 J/s ***b)*** 46 J/s
79. 2.3 cm
81. 23°C
83. 7.8 h
85. 4.0×10^2 m/s
87. 0.49 kg

Capítulo 12

1. ***a)***
3. ***d)***
5. No. Todo lo que significa es que los pasos intermedios no son estados de equilibrio, así que no es posible repasar el proceso exactamente.
7. ***c)***
9. 1: expansión isotérmica; 2: compresión isobárica; 3: la presión isométrica aumenta



11. Al jugar básquetbol, usted perdió calor, realizó trabajo y su energía interna disminuyó.
13. Trabajo: 1, 2, 3. El trabajo es igual al área bajo la curva en el diagrama p-V. El área bajo 1 es la mayor y el área bajo 3 es la menor. Temperatura final: 1, 2, 3. De acuerdo con al ley del gas ideal, la temperatura de un gas es proporcional al producto de la presión y el volumen, $pV = nRT$. Como el volumen final es igual para los tres procesos, cuanto mayor es la presión, más elevada es la temperatura final.
15. ***a)*** (2) igual, porque $\Delta U = 0$ para un proceso cíclico. ***b)*** se añade, 400 J
17. ***a)*** (3) disminuye, conforme $Q = 0$ y W es positivo ***b)*** –500 J
19. ***a)*** 3.3×10^3 J ***b)*** sí, 5.1×10^3 J
21. ***a)*** (2) cero, porque $\Delta T = 0$. ***b)*** $-p_1V_1$ (en el gas) ***c)*** $-p_1V_1$ (fuera del gas)
23. 3.6×10^4 J
25. ***a)*** (2) isobárico, porque la presión se mantiene a 1.00 atm. ***b)*** 146 J
27. ***a)*** (2) el proceso 2, porque se agrega más calor y el cambio en la energía interna es el mismo (las temperaturas inicial y final son iguales). ***b)*** $\Delta U = 2.5 \times 10^3$ J para ambos; ***b)*** $\Delta U = 2.5 \times 10^3$ J para ambos; $W_1 = 0$, $W_2 = 5.0 \times 10^2$ J
29. ***a)*** Proceso AB, -1.66×10^3 J; proceso BC, 0; proceso CD, 3.31×10^3 J; proceso DA, 0 ***b)*** $\Delta U = 0$, $Q = W = 1.65 \times 10^3$ J ***c)*** 800 K
31. ***c)***
33. ***a)*** aumenta porque se añade calor. ***b)*** disminuye porque se elimina calor. ***c)*** au-

menta porque se agrega calor. ***d)*** disminuye porque se elimina calor.

35. No, éste no es un desafío válido porque el hielo o el agua, por sí solos, no constituyen un sistema aislado. Cuando el agua se congela para convertirse en hielo, emite calor y eso provoca que la entropía de los alrededores aumente. Este aumento en realidad es más que la disminución que ocurrió en el cambio de fase de agua a hielo. Así que el cambio neto en la entropía del sistema (hielo más agua) aún aumenta.

37. ***a)*** (1) positivo, porque se agrega calor en el proceso (calor positivo).
b) $+1.2 \times 10^3$ J/K

39. -2.1×10^2 J/K

41. 126°C

43. ***a)*** (1) se incrementa, porque $Q > 0$.
b) +11 J/K

45. ***a)*** (1) positivo, de acuerdo con la segunda ley de la termodinámica. ***b)*** +1.33 J/K

47. ***a)*** (2) cero, $\Delta S = 0$ ***b)*** 2.73×10^4 J

49. ***a)*** 61.0 J/K ***b)*** −57.8 J/K ***c)*** 3.2 J/K

51. ***b)***

53. Permanece sin cambios, porque vuelve a su valor original para un proceso cíclico. Esto es verdad para muchas cantidades como la temperatura, la presión y el volumen.

55. Esto es importante porque el calor puede convertirse por completo en trabajo para un proceso individual (no un ciclo), como un proceso de expansión isotérmica de un gas ideal.

57. No, conforme el aire caliente se eleva a la mayor altitud, tanto la gravedad como las fuerzas de flotabilidad actúan. Como es un proceso natural con entrada de trabajo, la entropía aumenta y la segunda ley no se viola.

59. 25%

61. 1.47×10^5 J

63. ***a)*** 6.6×10^8 J ***b)*** 27%

65. ***a)*** (1) aumenta, porque $\varepsilon = 1 - Q_c/Q_h$. Cuando ε aumenta, la relación de Q_c/Q_h disminuye o la relación Q_h/Q_c aumenta.
b) +0.024

67. ***a)*** 6.1×10^5 J ***b)*** 1.9×10^6 J

69. 3.0 kW

71. 6.0 h

73. ***a)*** 1800 ***b)*** 3.4×10^7 J ***c)*** 2.7×10^7 J

75. ***a)***

77. El más eficiente es el agua enfriada, porque la eficiencia del enfriamiento depende de ΔT, y el agua puede mantener un gran ΔT. Además, el agua tiene un calor específico más elevado, así que es capaz de absorber más calor.

79. Los motores de diesel se calientan más porque el combustible diesel tiene una temperatura de combustión espontánea más elevada. De acuerdo con la eficiencia de Carnot, cuanto más alta es la temperatura del reservorio, mayor es la eficiencia, para un reservorio de temperatura baja fija.

81. 0°C

83. ***a)*** 6.7% ***b)*** Probablemente no en el momento, a causa de la baja eficiencia y porque aún existen combustibles fósiles relativamente baratos.

85. 9.1×10^3 J

87. ***a)*** (3) más alta que 327°C. De acuerdo con $\varepsilon_C = 1 - T_c/T_h$, podemos ver que T_h debe ser más alta para que ε_C aumente mientras que T_c se mantiene constante. ***b)*** 427°C

89. ***a)*** no, $\varepsilon_C = 57\%$ mientras $\varepsilon = 67\%$
b) 17.5 kW

91. ***a)*** 42% ***b)*** 39 kW

93. 53%

95. ***a)*** (2) cero, porque muchas cantidades como la temperatura, la presión, el volumen, la energía interna y la entropía vuelven a su valor original después de cada ciclo. ***b)*** 3750 J

97. ***a)*** 64% ***b)*** ε_C es el límite superior de la eficiencia. En realidad, se pierde mucha más energía que en la situación ideal.

99. ***a)*** 13 ***b)*** no, $COP_C = 11$

101. 20 mi/gal

103. 2.7 kg

105. 0.157

Capítulo 13

1. ***b)***

3. ***b)***

5. ***a)*** cuatro veces más grande ***b)*** el doble de grande

7. $T/4$, $T/2$

9. $4A$

11. 0.025 s

13. 41 N/m

15. ***a)*** 10^{-12} s ***b)*** 63 m/s

17. ***a)*** (1) $x = 0$, porque a $x = 0$ no hay energía potencial elástica, así que toda la energía del sistema es cinética, por lo tanto, la rapidez es máxima. ***b)*** 2.0 m/s

19. ***a)*** 0.77 m/s ***b)*** 1.2 N

21. 1.08 m/s

23. ***a)*** 2.5 m/s ***b)*** 2.5 m/s ***c)*** 2.7 m/s, posición de equilibrio

25. ***a)*** 17.6 N/m ***b)*** 1.04 m/s

27. ***d)***

29. ***b)***

31. Esto se podría hacer dibujando la trayectoria del objeto en un papel horizontal que se desenrolle.

33. En un elevador que acelere hacia arriba, la aceleración gravitacional efectiva aumenta. De acuerdo con $T = 2\pi\sqrt{L/g}$, el periodo disminuiría.

35. 10 kg

37. ***a)*** 1.7 s ***b)*** 0.57 Hz

39. ***a)*** $x = A \operatorname{sen} \omega t$ ***b)*** $x = A \cos \omega t$

41. ***a)*** 5.0 cm ***b)*** 10 Hz ***c)*** 0.10 s

43. ***a)*** (3) menos, porque $E \propto 1/T^2$ y el sistema A tiene un periodo más prolongado.
b) 1.8×10^2

45. ***a)*** 0.188 m ***b)*** 3.00 m/s^2

47. ***a)*** (3) $1/\sqrt{3}$, porque $T = 2\pi\sqrt{m/k}$ así que $T_2/T_1 = \sqrt{k_1/k_2} = \sqrt{1/3}$ ***b)*** 2.8 s

49. ***a)*** utilizando el periodo de vibración
b) 76 kg

51. 2.70 J

53. 0.279 m/s, 0.897 m/s^2 $= (0.0915)g$

55. ***a)*** (1) aumentaría, porque $T = 2\pi\sqrt{L/g}$, una menor g dará un T más prolongado.
b) 4.9 s

57. ***a)*** $y = (-0.10 \text{ m}) \operatorname{sen}(10\pi/3)t$
b) $k = 27$ N/m

59. ***a)*** 1.21 m ***b)*** 0.301 m/s ***c)*** 0.248 rad/s

61. ***d)***

63. ***c)***

65. La de la parte superior es transversal y la de la parte inferior es longitudinal.

67. 0.340 m

69. 0.47 m/s

71. 1.7 cm a 17 m

73. No, no está en vacío.
$v = \lambda f = (500 \times 10^{-9} \text{ m})(4.00 \times 10^{14} \text{ Hz})$
$= 2.00 \times 10^8 \text{ m/s} < 3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$.

75. 6.00 km

77. ***a)*** 3.8×10^2 s ***b)*** sí,
$1.9 \times 10^3 \text{ km} > 30 \text{ km}$ ***c)*** 1.6×10^3 s

79. ***a)*** 0.20 s ***b)*** 0.40 s

81. ***d)***

83. ***d)***

85. La reflexión (esto se llama ecolocalización), porque el sonido se refleja en la presa.

87. ***d)***

89. ***c)***

91. ***a)*** Esto se debe a que el vidrio vibra en modo de resonancia. ***b)*** La frecuencia aumentará porque la longitud de onda disminuirá a causa de la columna de aire que se acorta. Esto da por resultado un aumento en la frecuencia como $v = \lambda f$ y v es una constante.

93. Una cuerda más delgada tendrá una frecuencia más alta. Como $v = \sqrt{F_T/\mu}$, y una cuerda más delgada tiene menor μ, la rapidez es mayor, al igual que la frecuencia ($v = \lambda f$).

95. 150 Hz

97. ***a)*** (1) aumenta por $\sqrt{2}$, porque $v = \sqrt{F_T/\mu}$, así $v_2/v_1 = \sqrt{F_{T2}/F_{T1}} = \sqrt{2/1} = \sqrt{2}$.
b) 8.49 m/s ***c)*** $f_n = (0.425)n$ Hz;
$n = 1, 2, 3, \ldots$

99. $n = 5$

101. 16.5 N

103. 1/4

105. 0.016 kg

107. ***a)*** al liberarse desde el reposo, hacia abajo ***b)*** 1.05 s ***c)*** $y = (0.100 \text{ m}) \cos(6t)$
d) 3.6 m/s^2

109. ***a)*** 5.00 N ***b)*** 12.5 Hz ***c)*** a 0.40 m de un extremo

111. 3.0 s

Capítulo 14

1. ***b)***

3. ***a)***

5. Algunos insectos producen sonidos con frecuencias que no están en nuestro intervalo de audición.

7. Llegan al mismo tiempo porque el sonido no es dispersivo, esto es, la rapidez no depende de la frecuencia.

9. ***a)*** 1.0 km ***b)*** 0.60 mi

11. 32°C

13. La unidad de v en un líquido es

$$\sqrt{\frac{\text{N/m}^2}{\text{kg/m}^3}} = \sqrt{\frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{kg}}} = \sqrt{\frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2}{\text{kg}}}$$

$= \sqrt{\dfrac{\text{m}^2}{\text{s}^2}} = \text{m/s}$. Y tiene la misma unidad que B, así que la unidad de v en un sólido también es m/s.

15. ***a)*** (1) aumenta, porque la rapidez del sonido se incrementa con la temperatura y $v = \lambda f$.

Así que si v se incrementa y f permanece igual, λ aumenta. ***b)*** $+0.047$ m

17. ***a)*** 7.5×10^{-5} m ***b)*** 1.5×10^{-2} m

19. ***a)*** 1.08 s ***b)*** 1.04 s

21. 90 m

23. ***a)*** 0.107 m ***b)*** 1.43×10^{-4} s ***c)*** 4.29×10^{-4} m

25. ***a)*** (1) menor que el doble, porque el tiempo total es la suma del tiempo que tarda la piedra en golpear el piso (movimiento de caída libre) y el tiempo que tarda el sonido en recorrer de regreso esa distancia. Mientras que el tiempo para el sonido es directamente proporcional a la distancia, el tiempo para la caída libre no lo es. Como $d = \frac{1}{2}gt^2$ o $t = \sqrt{2d/g}$ (véase el capítulo 2), duplicar la distancia d sólo aumentará el tiempo de caída por un factor de $\sqrt{2}$. ***b)*** 1.0×10^2 m ***c)*** 8.7 s

27. 4.5%

29. ***b)***

31. (1) por un factor de 2

33. Sí. Puesto que $\beta = 10 \log I/I_o$ y $\log x < 0$ para $x < 1$, si $I < I_o$. Así que para una intensidad por debajo de la intensidad del umbral de audición, β es negativa.

35. ***a)*** (4) 1/9, porque I es inversamente proporcional al cuadrado de R. Al triplicar R se reduce I a $1/3^2 = 1/9$. ***b)*** 1.4 veces

37. ***a)*** 3.0 Hz ***b)*** no se da suficiente información

39. ***a)*** 100 dB ***b)*** 60 dB ***c)*** -30 dB

41. ***a)*** 1.1×10^{-5} W/m^2

43. ***a)*** 3.72×10^{-4} W/m^2; 1.00×10^{-1} W/m^2 ***b)*** 9.55×10^{-3} W/m^2; 6.03×10^{-2} W/m^2

45. ***a)*** 2.82 m ***b)*** 2.82×10^3 m, no razonable

47. cinco

49. 10 bandas

51. $I_B = 0.563I_A$, $I_C = 0.250I_A$, $I_D = 0.173I_A$

53. ***a)*** 2.5×10^2 m ***b)*** a 2.5×10^5 m de la carga

55. 10^5 abejas

57. ***a)***

59. No. El compás de la música tiene que ver con el tiempo. Los pulsos son fenómenos físicos relacionados con la diferencia de frecuencia entre dos tonos.

61. La intensidad variable del sonido es resultado del efecto de interferencia. En ciertos lugares hay interferencia constructiva y en otros, interferencia destructiva.

63. 0.172 m

65. ***a)*** (4) tanto (1) como (3), porque la frecuencia del pulso mide sólo la diferencia de frecuencia entre los dos, y no especifica cuál frecuencia es más alta. Así que la frecuencia del violín puede ser más alta o más baja que la del instrumento. ***b)*** 267 o 261 Hz

67. ***a)*** (1) moviéndose hacia la sirena, porque la frecuencia escuchada es más alta que la de la sirena. ***b)*** 14 m/s

69. 3.3 Hz

71. ***a)*** (2) menor que 300 Hz, porque el observador y la fuente se están acercando entre sí y la frecuencia escuchada es mayor que la frecuencia de la fuente. ***b)*** 251 Hz

73. 30°, sí

75. ***a)*** 2.0 ***b)*** 638 m/s

77. ***a)*** 103 Hz aproximándose, 97.0 Hz retirándose ***b)*** 6 Hz

79. ***a)*** 36.3 kHz ***b)*** 37.6 kHz ***c)*** yes

81. ***b)***

83. ***d)***

85. ***a)*** La nieve absorbe el sonido, así que hay poca reflexión. ***b)*** En una habitación vacía, hay menos absorción. Así que los reflejos se extinguen más lentamente; por eso, el sonido parece hueco y con eco. ***c)*** El sonido se refleja en las paredes de la regadera, y se forman ondas estacionarias, dando origen a más armónicos y, por consiguiente, a una calidad del sonido más rica.

87. Para un tubo abierto, $f_n = nv/(2L)$ para $n = 1, 2, 3, \ldots$ Para un tubo cerrado, $f_m = mv/(4L)$ para $m = 1, 3, 5, \ldots$ Así que $f_n/f_m = (n/2)/(m/4) = 2n/m$. Para $f_n = f_m$, $2n = m$. No, no es posible porque $2n$ es un entero par y m, un entero impar.

89. Para un tubo cerrado en un extremo, el extremo cerrado debe ser un nodo. Así que sólo los armónicos impares son posibles.

91. 510 Hz

93. ***a)*** f_2 no existe, sólo los armónicos impares ***b)*** 0.30 m

95. ***a)*** 0.635 m ***b)*** 265 Hz

97. 0°C

99. **99.** $f_{aire} = 552$ Hz, $f_{He} = 1600$ Hz

101. 0.249 m y 0.251 m

103. 5.55×10^4 Hz

105. ***a)*** (1) sí, porque el observador escuchará las pulsaciones entre la fuente y el reflejo. **(b)** 1.03×10^3 Hz **(c)** 12 Hz

Capítulo 15

1. ***c)***

3. ***c)***

5. No. Las cargas simplemente se mueven de un objeto a otro.

7. Acercar el objeto cargado al electroscopio y observar cómo se mueven las hojas. Si la repulsión entre las hojas aumenta, la carga en el objeto tiene el mismo signo que la del electroscopio; si la repulsión entre las hojas disminuye, entonces la carga en el objeto tiene signo contrario que la del electroscopio.

9. -1.6×10^{-13} C

11. $+6.40 \times 10^{-19}$ C

13. ***a)*** (1) positiva, a causa de la conservación de la carga. Cuando un objeto adquiere carga negativa, gana electrones. Otro objeto pierde esos mismos electrones y adquiere carga positiva. ***b)*** $+4.8 \times 10^{-9}$ C, 2.7×10^{-20} kg ***c)*** 2.7×10^{-20} kg

15. ***d)***

17. Es para eliminar el exceso de carga que se debe a la fricción del caucho en la carretera. Si no se elimina la carga en exceso, esto podría generar un chispazo, que provocaría una explosión de la gasolina.

19. Si usted acerca un objeto con carga negativa al electroscopio, el proceso de inducción cargará el electroscopio positivamente. Es posible probar que las cargas son positivas acercando el objeto con carga negativa a las hojas y viendo si éstas son atraídas por el objeto.

21. ***a)***

23. Aunque la fuerza eléctrica es fundamentalmente mucho más intensa que la fuerza gravitacional, tanto la Tierra, como nuestros cuerpos y otros objetos son eléctricamente neutros, así que no hay fuerzas eléctricas notorias.

25. 9

27. ***a)*** 1 ***b)*** 1/4 ***c)*** 1/2

29. ***a)*** 5.8×10^{-11} N ***b)*** cero

31. 2.24 m

33. ***a)*** 50 cm ***b)*** 50 cm

35. ***a)*** $x = 0.25$ m ***b)*** en ningún lado ***c)*** $x = -0.94$ m para $\pm q_3$

37. ***a)*** 8.2×10^{-8} N ***b)*** 2.2×10^6 m/s ***c)*** $9.2 \times 10^{21}\,g$

39. ***a)*** 96 N, 39° por debajo del eje x positivo ***b)*** 61 N, 84° por encima del eje x negativo

41. ***c)***

43. ***a)***

45. Se determina mediante la densidad relativa o la separación de las líneas de campo. Cuanto más cercanas estén las líneas, mayor es la magnitud.

47. Si una carga positiva está en el centro de una estructura esférica, el campo eléctrico adentro *no* es cero. Las líneas de campo corren en forma radial hacia fuera a la superficie interior de la estructura, donde se detienen en las cargas negativas inducidas en la superficie. Las líneas de campo reaparecen en la superficie externa de la estructura (con carga positiva) y continúan en forma radial hacia fuera como si emanaran de la carga puntual en el centro. Si la carga fuera negativa, las líneas de campo invertirían sus direcciones.

49. ***a)*** Sí, es posible. Por ejemplo, cuando los campos eléctricos que generan dos cargas son iguales en magnitud y contrarias en dirección en algunos lugares. En el punto medio a lo largo de la línea que une dos cargas del mismo tipo y magnitud, el campo eléctrico es cero. ***b)*** No, no es posible.

51. 2.0×10^5 N/C

53. a 1.2×10^{-7} m de la carga

55. 1.0×10^{-7} N/C hacia arriba 5.6×10^{-11} N/C hacia abajo

57. $\vec{\mathbf{E}} = (2.2 \times 10^5\,\text{N/C})\hat{\mathbf{x}} + (-4.1 \times 10^5\,\text{N/C})\hat{\mathbf{y}}$

59. 5.4×10^6 N/C hacia la carga de $-4.0\ \mu$C

61. 3.8×10^7 N/C en la dirección $+y$

63. $15\ \mu$C/m^2

65. $\vec{\mathbf{E}} = (-4.4 \times 10^6\,\text{N/C})\hat{\mathbf{x}} + (7.3 \times 10^7\,\text{N/C})\hat{\mathbf{y}}$

67. ***b)***

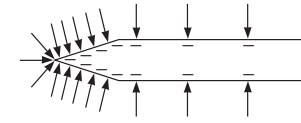
69. ***b)***

71. La superficie debe ser esférica.

73. ***a)*** (1) negativa a causa de la inducción ***b)*** cero ***c)*** $+Q$ ***d)*** $-Q$ ***e)*** $+Q$

75. ***a)*** cero ***b)*** kQ/r^2 ***c)*** cero ***d)*** kQ/r^2

77.



79. ***c)***

81. Como el número de líneas es proporcional a la carga, las cargas netas son iguales pero con signo contrario.

83. –6 líneas, o un número neto de 6 líneas que pasan a través de ella

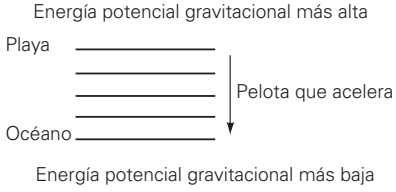
85. 10 líneas de campo entrando (negativo)

87. ***a)*** la inferior ***b)*** 4.90×10^{-4} kg

89. ***a)*** positiva en la placa derecha y negativa en la placa izquierda ***b)*** de derecha a izquierda ***c)*** 1.13×10^{-13} C
91. 5.5×10^3 N/C a 66° por debajo del eje positivo x
93. ***a)*** 2.02×10^4 N/C ***b)*** 1.79×10^{-7} C/m^2

Capítulo 16

1. ***d)***
3. ***b)***
5. ***a)*** La energía cinética del protón que se acerca disminuye conforme su energía potencial eléctrica aumenta, puesto que su energía total es constante. ***b)*** La energía potencial eléctrica del sistema aumenta porque la distancia entre las cargas disminuye. ***c)*** La energía total del sistema permanece igual a causa de la conservación de la energía.
7. Se moverá hacia la derecha o hacia la región de mayor potencial porque el electrón tiene carga negativa. Cuanto más elevado es el potencial de la región, para el electrón, menor es la energía potencial.
9. Requiere de cero trabajo. Puesto que $W = q_o\Delta V$, si $\Delta V = 0$, $W = 0$.
11. ***a)*** 2.7 μC ***b)*** de la negativa a la positiva
13. 1.6×10^{-15} J
15. ***a)*** 5.9×10^5 m/s, hacia abajo ***b)*** pierde energía potencial
17. ***a)*** (2) 3, porque el potencial eléctrico es inversamente proporcional a la distancia. ***b)*** 0.90 m ***c)*** −6.7 kV
19. ***a)*** gana 6.2×10^{-19} J ***b)*** pierde 6.2×10^{-19} J ***c)*** gana 4.8×10^{-19} J
21. 1.1 J
23. ***a)*** +0.27 J ***b)*** no
25. −0.72 J
27. ***a)*** 3.1×10^5 V ***b)*** 2.1×10^5 V
29. ***a)*** (3) menor, porque los electrones tienen carga negativa. Se mueven hacia las regiones de potencial más alto, donde tienen energía potencial más baja. ***b)*** 4.2×10^7 m/s ***c)*** 6.0×10^{-9} s
31. ***b)***
33. La pelota aceleraría en la dirección que va de la playa al océano (de energía potencial más alta a energía potencial más baja).



35. Requiere de cero trabajo, porque no hay cambio en la energía cinética o potencial. El trabajo neto es cero.
37. ***a)*** cilíndrica ***b)*** cerca de la superficie externa ***c)*** cerca de la superficie interna
39. ***a)*** 1.60×10^{-13} J ***b)*** se duplicaría
41. 12.6 m
43. 70 cm
45. a 1.7 mm de la placa positiva, hacia la placa negativa
47. ***a)*** (1) esferas concéntricas, porque el potencial eléctrico depende sólo de la distancia con respecto a la carga. ***b)*** +298 eV
49. ***a)*** 2.0×10^7 eV ***b)*** 2.0×10^4 keV ***c)*** 20 MeV ***d)*** 2.0×10^{-2} GeV ***e)*** 3.2×10^{-12} J
51. 6.2×10^7 m/s (protón) 4.4×10^7 m/s (alfa)
53. ***a)*** 3.5 V, 1.1×10^6 m/s ***b)*** 4.1 kV, 3.8×10^7 m/s ***c)*** 5.0 kV, 4.2×10^7 m/s
55. ***a)*** +0.40 V ***b)*** −0.40 V ***c)*** cero
57. ***c)***
59. ***a)***
61. ***b)***
63. ***a)*** Como $Q = CV$, se duplica. ***b)*** Como $U_C = \frac{1}{2}CV^2$, se cuadruplica.
65. 2.4×10^{-5} C
67. 0.71 mm
69. ***a)*** 4.2×10^{-9} C ***b)*** 2.5×10^{-8} J
71. 2.2 V
73. ***a)*** 2.2×10^4 V/m ***b)*** 1.1×10^{-5} C ***c)*** 5.7×10^{-4} J ***d)*** $E = 6.7 \times 10^4$ V/m, $\Delta Q = 0$, $\Delta U_C = -1.7 \times 10^{-3}$ J
75. ***d)***
77. No es posible mantener un voltaje no cero en un conductor; las cargas se moverán del positivo al negativo inmediatamente, de manera que no se podrían almacenar.
79. Cuando el suministro de potencia no está conectado, la carga permanece igual, pero la capacitancia aumenta una vez que se inserta el material dieléctrico. Por lo tanto, la diferencia de potencial disminuye ($V = Q/C$), al igual que el campo eléctrico ($E = V/d$). Cuando el suministro de potencia permanece conectado, la diferencia de potencial se conserva constante, al igual que el campo eléctrico
81. 3.1×10^{-9} C; 3.7×10^{-8} J
83. ***a)*** $\kappa = 2.4$ ***b)*** disminuyó ***c)*** -6.3×10^{-5} J
85. ***b)***
87. ***b)***
89. Tienen la misma carga cuando tienen igual capacitancia.
91. ***a)*** C/N ***b)*** NC ***c)*** $4C/N$
93. ***a)*** (1) más, porque la capacitancia equivalente es más alta y la energía almacenada (extraída) es proporcional a la capacitancia. ***b)*** 6.0 μF
95. ***a)*** (3) $Q/3$, porque $Q_{total} = Q_1 + Q_2 + Q_3$. Además, $Q_1 = Q_2 = Q_3$ porque los condensadores tienen la misma capacitancia. Por consiguiente, cada condensador tiene sólo 1/3 de la carga total. ***b)*** 3.0 μC ***c)*** 9.0 μC
97. máx. 6.5 μF; mín. 0.67 μF
99. C_1: 2.4 μC, 6.0 V; C_2: 2.4 μC, 6.0 V; C_3: 1.2 μC, 6.0 V; C_4: 3.6 μC, 6.0 V
101. ***a)*** $K_o = 29.2$ eV, ΔU total = 75 eV, así que no puede ***b)*** a 30.6 cm de la superficie inferior
103. ***a)*** -1.7×10^{-17} J ***b)*** 6.9×10^{23} m/s^2 ***c)*** -8.5×10^{-18} J ***d)*** 8.5×10^{-18} J
105. ***a)*** (1) estará a un potencial más alto, porque el electrón tiene carga negativa. Experimentará una fuerza hacia arriba si el potencial es mayor en la placa superior. ***b)*** 8.37×10^{-13} V ***c)*** cualquier lugar
107. ***a)*** 2.9 pF ***b)*** 0.20 pC

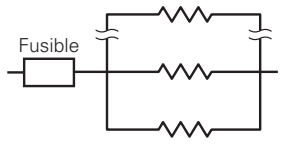
Capítulo 17

1. ***b)***
3. ***b)***
5. ***c)***
7. No. Cualquier batería tiene resistencia interna, y habrá un voltaje a través de la resistencia interna cuando la batería se utilice. El voltaje terminal es más bajo que la fem de la batería cuando está en uso.
9. ***a)*** 4.5 V ***b)*** 1.5 V
11. ***a)*** 24 V ***b)*** dos de 6.0 V en serie, juntas en paralelo con la de 12 V.
13. ***a)*** (2) igual, porque el voltaje total de baterías idénticas en paralelo es igual al voltaje de cada batería individual, y el voltaje total de las baterías en serie es la suma de los voltajes de cada batería individual. Cada configuración tiene un paralelo y una serie, así que tienen el mismo voltaje total. ***b)*** 3.0 V, 3.0 V
15. ***a)***
17. ***a)*** hacia arriba ***b)*** hacia abajo ***c)*** hacia arriba
19. 0.25 A
21. ***a)*** 0.30 C ***b)*** 0.90 J
23. 56 s
25. ***a)*** (2) a la izquierda, porque la corriente que se debe a los protones estará a la izquierda, y la corriente que se debe a los electrones también estará a la izquierda porque éstos tienen carga negativa. ***b)*** 3.3 A
27. ***a)***
29. ***a)***
31. A partir de $V = (R)I$ ($y = mx$ es la ecuación para una línea recta donde m es la pendiente), concluimos que el que tiene la pendiente menos pronunciada es menos resistivo.
33. ***a)*** igual ***b)*** un cuarto de la corriente
35. ***a)*** 11.4 V ***b)*** 0.32 Ω
37. ***a)*** (1) un mayor diámetro, porque el aluminio tiene una mayor resistividad. Su área (diámetro) debe ser mayor, si la longitud del alambre es la misma, para tener igual resistencia que el cobre de acuerdo con $R = pL/A$. ***b)*** 1.29
39. 1.0 V
41. 1.3×10^{-2} Ω
43. ***a)*** 4 ***b)*** 4
45. ***a)*** 0.13 Ω ***b)*** 0.038 Ω
47. ***a)*** 4.6 mΩ ***b)*** 8.5 mA
49. 5.4×10^{-2} m
51. ***a)*** (1) mayor, porque después del estiramiento, la longitud L aumenta y el área transversal A disminuye, así que R aumenta de acuerdo con $R = pL/A$. ***b)*** 1.6
53. ***a)*** 7.8 Ω ***b)*** 0.77 A ***c)*** 16.4°C
55. ***d)***
57. ***d)***
59. Como $P = V^2/R$, la bombilla de mayor potencia tiene menor resistencia o filamento más grueso. Así que el filamento en la bombilla de 60 W sería más grueso.
61. 144 Ω
63. 2.0×10^3 W
65. 1.2 Ω
67. ***a)*** (4) 1/4, porque si el voltaje se reduce a la mitad, la corriente también. La potencia es igual al voltaje por la corriente, así que la potencia se vuelve 1/4 de su valor original.

69. ***a)*** 4.3×10^3 W ***b)*** 13 Ω
71. ***a)*** 58 Ω ***b)*** 86 Ω
73. ***a)*** 0.60 kWh ***b)*** $0.09
75. ***a)*** 0.15 A ***b)*** 1.4×10^{-4} Ω · m ***c)*** 2.3 W
77. ***a)*** 1.1×10^2 J ***b)*** 6.8 J
79. 21 Ω
81. $R_{120}/R_{60} = 4/3$
83. $152
85. 117°C para el cobre o −72.6°C para el aluminio
87. sí, R es una constante ($R + r = 6.00$ Ω)
89. aproximadamente la mitad (una planta de potencia entrega unos 1000 MW)
91. 6.6×10^{-6} m/s
93. 1.6×10^3 Ω
95. ***a)*** 400 A ***b)*** 4.5×10^{-3} Ω ***c)*** 1.8 V ***d)*** 250 kV

Capítulo 18

1. ***b)***
3. ***b)***
5. ***a)***
7. No, no generalmente. Si embargo, si todos los resistores son iguales, los voltajes a través de ellos son iguales.
9. Si están en serie, la resistencia efectiva estará más cercana en valor al de la resistencia grande porque $R_s = R_1 + R_2$. Si $R_1 \gg R_2$, entonces $R_s \approx R_1$. Si están en paralelo, la resistencia efectiva estará más cercana en valor al de la resistencia pequeña porque $R_p = R_1R_2/(R_1 + R_2)$. Si $R_1 \gg R_2$, entonces $R_p \approx R_1R_2/R_1 = R_2$.
11. ***a)*** El tercer resistor tiene la mayor corriente, porque la corriente total a través de los otros dos resistores es igual a la corriente a través del tercer resistor. ***b)*** El tercer resistor también tiene el mayor voltaje, porque la corriente a través de él es la mayor y todos los resistores tienen el mismo valor de resistencia ($V = IR$). ***c)*** El tercer resistor también tiene la mayor salida de potencia, porque tiene el voltaje y la corriente mayores, y la potencia es igual al producto de la corriente y el voltaje.
13. ***a)*** en serie, 60 Ω ***b)*** en paralelo, 5.5 Ω
15. 30 Ω
17. ***a)*** 30 Ω ***b)*** 0.30 A ***c)*** 1.4 W
19. ***a)*** 0.57 Ω ***b)*** 6.0 V ***c)*** 9.0 W
21. ***a)*** (1) $R/4$. Cada segmento acortado tiene una resistencia de $R/2$ porque la resistencia es proporcional a la longitud (capítulo 17). Entonces, dos resistores $R/2$ en paralelo dan $R/4$. ***b)*** 3.0 μΩ
23. ***a)*** 1.0 A ***b)*** 1.0 A ***c)*** 2.0 W, 4.0 W, 6.0 W ***d)*** $P_{\text{suma}} = P_{\text{total}} = 12$ W
25. 1.0 A (para todos); $V_{8.0} = 8.0$ V; $V_{4.0} = 4.0$ V
27. 2.7 Ω
29. ***a)***



b) 31
31. ***a)*** 1.0 A; 0.50 A; 0.50 A ***b)*** 20 V; 10 V; 10 V ***c)*** 30 W
33. no, puesto que $I = 14.6$ A < 15 A
35. 100 s = 1.7 min
37. ***a)*** 0.085 A ***b)*** 7.0 W, 2.6 W, 0.24 W, 0.41 W
39. ***a)*** 0.67 A, 0.67 A, 1.0 A, 0.40 A, 0.40 A ***b)*** 6.7 V, 3.3 V, 10 V, 2.0 V, 8.0 V
41. 8.1 Ω
43. ***a)***
45. ***d)***
47. No, no tiene que ser. Un ejemplo es el hecho de cargar una batería. Cuando una batería está conectada a un cargador (con una fuerza electromotriz más alta), la corriente es forzada a través de la batería.
49. La bombilla de 60 W tiene una resistencia mayor que la bombilla de 100 W. Cuando éstas están en serie, tienen la misma corriente. Por consiguiente, la bombilla de 60 W tendrá un mayor voltaje. Así que la bombilla de 60 W tiene más potencia porque $P = IV$.
51. Alrededor de la malla 1 (reversa), $-V_1 + I_3R_3 + V_2 + I_1R_1 = 0$. Si multiplicamos por −1 ambos lados, es lo mismo que la ecuación para la malla 1 (hacia delante). Alrededor de la malla 2 (reversa), $I_2R_2 - V_2 - I_3R_3 = 0$. De nuevo, si multiplicamos por −1 ambos lados, es lo mismo que la ecuación para la malla 2 (hacia delante).
53. $I_1 = 1.0$ A; $I_2 = I_3 = 0.50$ A
55. $I_1 = 0.33$ A (izquierda); $I_2 = 0.33$ A (derecha)
57. $I_1 = 3.75$ A (arriba); $I_2 = 1.25$ A (izquierda); $I_3 = 1.25$ A (derecha)
59. $I_1 = 0.664$ A (izquierda); $I_2 = 0.786$ A (derecha); $I_3 = 1.450$ A (arriba); $I_4 = 0.770$ A (abajo); $I_5 = 0.016$ A (abajo); $I_6 = 0.664$ A (derecha)
61. ***c)***
63. ***b)***
65. Tardará menos que una constante de tiempo porque esta última se define como el tiempo que se necesita para cargar el condensador al 63% de su carga máxima.
67. ***a)*** $V_C = 0$; $V_R = V_o$ ***b)*** $V_C = 0.86V_o$; $V_R = 0.14V_o$ ***c)*** $V_C = V_o$; $V_R = 0$
69. ***a)*** (1) aumenta la capacitancia, porque $\tau = RC$ ***b)*** 2.0 MΩ
71. ***a)*** 1.50 MΩ ***b)*** 11.4 V
73. ***a)*** 9.4×10^{-4} C ***b)*** $V_C = 24$ V; $V_R = 0$
75. ***a)*** 2.0×10^{-3} A a $t = 0$ ***b)*** 0.080% ***c)*** 1.7×10^{-6} C un tiempo muy largo después de la conexión
77. ***b)***
79. ***a)*** Un amperímetro tiene muy baja resistencia, así que si se conectara en paralelo en un circuito, la corriente del circuito sería muy alta y el galvanómetro podría quemarse. ***b)*** Un voltímetro tiene muy alta resistencia, así que si se conectara en serie en un circuito, leería el voltaje de la fuente porque tiene la resistencia más alta (muy probablemente) y, por lo tanto, la mayor parte del voltaje se caería entre los elementos del circuito.
81. Un amperímetro se utiliza para medir la corriente cuando se conecta en serie a un elemento de circuito. Si tiene muy poca resistencia, habrá escaso voltaje a través de él, así que no afectará el voltaje a través del elemento de circuito, ni su corriente.
83. ***a)*** (3) un resistor multiplicador, porque un galvanómetro no puede tener un gran voltaje a través de él, el gran voltaje tiene que estar a través de un resistor en serie (multiplicador). ***b)*** 7.4 kΩ
85. 50 kΩ
87. 0.20 mA
89. ***a)*** (1) cero, porque un amperímetro está conectado en serie con un elemento de circuito. Si su resistencia es cero, no afectará la corriente a través del elemento de circuito. ***b)*** La medición de corriente I es la corriente a través de R, y la medición del voltaje es el voltaje total a través de R y R_a, así que V/I da la resistencia de la combinación en serie. ***c)*** La medición de voltaje es $V = I(R + R_a)$, así que $R = V/I - R_a$. ***d)*** Un amperímetro ideal tiene R_a cercana a 0, entonces $R = V/I$, esto es, la medición es "perfecta".
91. ***c)***
93. No, un alto voltaje puede producir una elevada corriente dañina, incluso si la resistencia es alta, porque la corriente es provocada por el voltaje (diferencia de potencial).
95. Es más seguro saltar. Si usted sale del automóvil con un pie, habrá un alto voltaje entre sus pies. Si usted salta, el voltaje entre sus pies será cero porque éstos tendrán el mismo potencial todo el tiempo.
97. $I_1 = 2.6$ A (derecha); $I_2 = 1.7$ A (izquierda); $I_3 = 0.86$ A (abajo)
99. ***a)*** $I_1 = 1.0$ A; $I_2 = 0.40$ A; $I_3 = 0.20$ A; $I_4 = 0.40$ A ***b)*** $P_1 = 100$ W; $P_2 = 4.0$ W; $P_3 = 2.0$ W; $P_4 = 4.0$ W
101. 6.0 Ω
103. 10 mΩ, 2.0 mΩ y 1.0 mΩ
105. dos en paralelo entre sí y uno en serie con el otro resistor
107. ***a)*** 12.1 ms ***b)*** 1.21 kΩ ***c)*** 13.0 ms

Capítulo 19

1. ***a)***
3. ***c)***
5. Cerca del polo norte de un imán recto permanente, el polo norte de una brújula apuntará alejándose del imán de manera que las líneas de campo abandonen el polo norte. Cerca del polo sur de un imán recto permanente, el polo sur de una brújula apuntará hacia el imán de manera que la líneas de campo entren al polo sur.
7. ***a)***
9. ***d)***
11. No necesariamente, porque aún podría haber un campo magnético. Si el campo magnético y la velocidad de la partícula cargada forman un ángulo de 0 o de 180°, no habrá fuerza magnética porque $F = qvB$ sen θ.
13. ***a)*** La mitad inferior tendría un campo magnético dirigido hacia la página y la mitad superior tendría un campo magnético dirigido hacia fuera de la página. ***b)*** Son iguales, puesto que la fuerza centrípeta no cambia la rapidez de la partícula.

15. 3.5×10^3 m/s
17. 2.0×10^{-14} T, a la izquierda, en dirección de la velocidad
19. ***a)*** 3.8×10^{-18} N ***b)*** 2.7×10^{-18} N ***c)*** cero ***d)*** cero
21. ***a)*** 8.6×10^{12} m/s^2, horizontal y sur ***b)*** 8.6×10^{12} m/s^2, horizontal y norte ***c)*** igual magnitud pero la dirección es horizontal y norte
23. ***b)***
25. La fuerza magnética en el haz de electrones, que "imprime" imágenes, provoca la desviación de los electrones.
27. La fuerza eléctrica es $F_e = qE$ y la fuerza magnética es $F_B = qvB$. El propósito del selector de velocidad es para que la fuerza eléctrica iguale la fuerza magnética. Como $qE = qvB$, $v = E/B$, independiente de la carga.
29. ***a)*** 1.8×10^3 V ***b)*** igual voltaje, independiente de la carga
31. 5.3×10^{-4} T
33. ***a)*** 4.8×10^{-26} kg ***b)*** 2.4×10^{-18} J ***c)*** el trabajo es igual a cero
35. ***d)***
37. ***b)***
39. Se acorta porque las bobinas del resorte se atraen entre sí a causa de los campos magnéticos que se generan en ellas. (Conductores paralelos con corriente en la misma dirección se atraerán entre sí.)
41. Apretar el botón en ambos casos completa el circuito. La corriente en los alambres activa el electroimán, provocando que el badajo sea atraído y suene el timbre. Sin embargo, esto rompe el contacto de la armadura y abre el circuito. Sostener el botón provoca que esto se repita, y entonces el timbre suena continuamente. Para las campanillas, cuando se completa el circuito, el electroimán atrae el núcleo y comprime el resorte. La inercia hace que toque una barra de tono y la fuerza del resorte entonces envía el núcleo en la dirección opuesta para golpear la otra barra.
43. 1.2 N perpendicular al plano de $\vec{\mathbf{B}}$ e I.
45. 5.0×10^{-3} T de norte a sur
47. ***a)*** cero ***b)*** 4.0 N/m en $+z$ ***c)*** 4.0 N/m en $-y$ ***d)*** 4.0 N/m en $-z$ ***e)*** 4.0 N/m en $+y$
49. 0.40 N/m; $+z$
51. ***a)*** (1) de atracción ***b)*** 6.7×10^{-6} N/m
53. 0.53 N hacia el norte a un ángulo de 45° por encima de la horizontal
55. 2.7×10^{-5} N/m hacia el conductor 1
57. 7.5 N hacia arriba en el plano del papel
59. cero, sí
61. ***a)***
63. ***b)***
65. Porque $B = \mu_o I/(2\pi d)$, se necesita duplicar la corriente e invertir la dirección.
67. Hay dos alambres que portan la corriente hacia dentro y hacia fuera de los aparatos. Estas dos corrientes tienen direcciones opuestas. Cuando los dos alambres están muy cerca entre sí, los campos magnéticos creados por las dos corrientes opuestas, en esencia, se anulan.
69. 3.8 A
71. 0.25 m
73. ***a)*** 2.0×10^{-5} T ***b)*** a 9.6 cm del conductor 1
75. ambos 2.9×10^{-6} T
77. 3.3×10^{-5} T
79. a 1.0×10^{-4} T, del observador
81. 4.0 A
83. ***a)*** 8.8×10^{-2} T ***b)*** a la derecha
85. $\sqrt{2}\,\mu_o I/(\pi a)$ a 45° hacia el conductor izquierdo inferior
87. ***b)***
89. La dirección del campo magnético se aleja de usted, de acuerdo con la regla de la mano derecha para fuentes (el electrón tiene carga negativa).
91. Es posible destruir o reducir el campo magnético de un imán permanente golpeándolo o calentándolo.
93. 12 T
95. ***b)***
97. ***a)***
99. Será el polo magnético norte. Ahora mismo, el polo cerca del polo norte geográfico de la Tierra es el polo magnético sur.
101. 0.44 T
103. ***a)*** 5.9×10^{-21} kg · m/s ***b)*** 1.0×10^{-14} J
105. 0.682 V
107. ***a)*** (2) hacia la página ***b)*** a 0.030 m del conductor izquierdo
109. ***a)*** 3.74×10^{-3} T · m/A ***b)*** 3.0×10^3

Capítulo 20

1. ***d)***
3. ***d)***
5. ***d)***
7. El sentido sería contrario al movimiento de las manecillas del reloj (en una vista de frente).
9. No, no depende del flujo magnético. Depende de la tasa del cambio de flujo con el tiempo.
11. Las ondas sonoras provocan que la resistencia del botón cambie como se describe. Esto da por resultado un cambio en la corriente, así que las ondas sonoras producen pulsos eléctricos. Estos pulsos viajan a través de las líneas telefónicas y al receptor. El receptor tiene una bobina que envuelve un imán, y los pulsos crean un campo magnético variable conforme pasan a través de la bobina, provocando que el diafragma vibre y, así, se producen ondas sonoras cuando el diafragma vibra en el aire.
13. 42° o 138°
15. 3.3×10^{-2} T · m^2
17. 1.3×10^{-6} T · m^2
19. 1.6 V
21. 0.30 s
23. ***a)*** (1) en sentido contrario al de las manecillas del reloj ***b)*** 0.35 V
25. ***a)*** (1) en el ecuador, porque la velocidad de la varilla metálica es paralela al campo magnético en el ecuador. ***b)*** 0.50 mV en el polo, cero en el ecuador.
27. ***a)*** 0.60 V ***b)*** 0 A
29. 4.0 V
31. ***a)*** 0.037 T · m^2 (superficie inclinada inferior); 0.034 T · m^2 (superficie inclinada superior) ***b)*** -0.071 T · m^2 ***c)*** cero ***d)*** cero; esto significa que el flujo neto es igual a cero o que hay tanto flujo abandonando el bloque como entrando.
33. ***c)***
35. El imán que se mueve a través de la bobina produce una corriente. Conforme el imán sube y baja en la bobina, inducirá una corriente en ésta para encender la bombilla. Sin embargo, el imán produce la corriente (ley de Faraday de la inducción) a expensas de su energía cinética y potencial. El movimiento del imán, por consiguiente, cesará.
37. $\mathscr{E} = \mathscr{E}_o = \text{sen}\,\omega t$, donde $\mathscr{E}_o = NBA\omega$. ($N$ es el número de vueltas, B es la intensidad del campo magnético y ω es la rapidez angular). Podría incrementarse N, B o ω.
39. ***a)*** 0.057 V ***b)*** 0.57 V
41. ***a)*** (2) dos, porque la dirección del voltaje inicial no se especificó, por lo tanto, hay dos posibles direcciones.
b) ± 104 V
43. ***a)*** 100 V ***b)*** 0 V
45. 16 Hz
47. ***a)*** menor que 44 A (110 V/2.50 Ω = 44 A), por la contra fem inducida cuando el motor enciende. La contra fem disminuye el voltaje efectivo del motor, por lo tanto, la corriente es menor que 44 A. ***b)*** 4.00 A
49. ***a)*** 216 V ***b)*** 160 A ***c)*** 8.1 Ω
51. ***b)***
53. Sí, un transformador de subida puede utilizarse como un transformador de bajada. Sólo se necesita invertir las funciones de las bobinas primaria y secundaria, así que hay más vueltas en el lado de alto voltaje.
55. ***a)*** 16 ***b)*** 5.0×10^2 A
57. 24 : 1
59. ***a)*** 17.5 A ***b)*** 15.7 V
61. ***a)*** (2) no ideal, porque $P_s < P_p$ (la potencia en la secundaria es menor que la de la primaria). ***b)*** 45%
63. ***a)*** N_s/N_p es 1 : 20 ***b)*** 2.5×10^{-2} A
65. ***a)*** 128 kWh ***b)*** \$1840
67. ***a)*** 1 : 2, 1 : 14, 1 : 30 ***b)*** 2.0, 14, 30 ***c)*** 833
69. ***a)*** 53 W ***b)*** $N_p/N_s = 200$
71. ***d)***
73. ***d)***
75. La radiación UV provoca quemaduras y puede traspasar las nubes. Se siente frío porque la radiación infrarroja (calor) es absorbida por las nubes (moléculas de agua).
77. De acuerdo con $c = \lambda f$, la longitud de onda y la frecuencia son inversamente proporcionales entre sí. Por lo tanto, las frecuencias de radar son mucho más altas, porque las longitudes de onda son mucho más cortas, las rapideces son iguales.
79. 326 m y 234 m
81. 2.6 s
83. AM: 67 m; FM: 0.77 m
85. ***a)*** (1) arriba, de acuerdo con la ley de Lenz. ***b)*** 25 mA
87. ***a)*** no, la potencia de entrada es mayor que la potencia de salida ***b)*** 90.9%
89. ***a)*** (1) en sentido de las manecillas del reloj ***b)*** 5.00×10^{-3} V ***c)*** 0.0879 s
91. 3.79 m, no
93. 0.159 Ω

Capítulo 21

1. ***a)***
3. ***a)***
5. Eso significa que el voltaje y la corriente alcanzan su máximo o mínimo al mismo tiempo.
7. No, el elemento de circuito no puede ser un resistor. El voltaje y la corriente deberían estar en fase para un resistor. Sí, la frecuencia es 60 Hz, porque $\omega = 2\pi f = 120\pi$.
9. 7.1 A
11. 1.2 A
13. ***a)*** 10.0 A ***b)*** 14.1 A ***c)*** 12.0 Ω
15. ***a)*** 4.47 A, 6.32 A ***b)*** 112 V, 158 V
17. $V = (170\text{ V})\,\text{sen}(119\pi t)$
19. 0.33 A; 0.47 A
21. ***a)*** 20 Hz, 0.050 s ***b)*** 2.4×10^2 W
23. ***a)*** 60 Hz ***b)*** 1.4 A ***c)*** 1.2×10^2 W
d) $V = (120\text{ V})\,\text{sen}\,380t$
e) $P = (240\text{ W})\,\text{sen}^2\,380t$
f) $P = (240\text{ W})[1 - \cos 2(380t)]/2$
$= 120\text{ W} - (120\text{ W})\cos 2(380t)$. El promedio de una función seno o coseno es cero. Así que $\overline{P} = 120$ W, al igual que en ***c)***.
25. ***b)***
27. Para un condensador, cuanto *menor es la frecuencia*, más prolongado es el tiempo de carga en cada ciclo. Si la frecuencia es muy baja (cd), entonces el tiempo de carga es muy largo, así que actúa como un circuito abierto de ca. Para un inductor, cuanto *menor es la frecuencia*, más lentamente cambia la corriente en el inductor. Cuanto más lentamente cambia la corriente, menor contra fem se induce en el inductor, lo que da por resultado una menor impedancia.
29. A $t = 0$, $I = 120$ A, o al máximo. Entonces, el voltaje es cero, porque la corriente se adelanta al voltaje por 90° en un condensador. Cuando la corriente es máxima, el voltaje está 1/4 de periodo detrás, o en cero. Están fuera de fase.
31. 1.3×10^3 Ω
33. ***a)*** 19 Ω ***b)*** 6.4 A ***c)*** El voltaje se adelanta a la corriente por 90°
35. un incremento del 60%
37. 255 Hz
39. ***a)*** 90 V ***b)*** el voltaje se adelanta a la corriente por 90°
41. 4.4 μF
43. ***d)***
45. ***d)***
47. No, no hay potencia entregada a condensadores o inductores en un circuito ca. Ya sea para un circuito puramente capacitivo o inductivo, el ángulo de fase $\phi = 90°$, así que el factor de potencia es $\cos\phi = 0$.
49. ***a)*** 1.7×10^2 Ω ***b)*** 2.0×10^2 Ω
51. ***a)*** 38 Ω; 1.1×10^2 Ω ***b)*** 1.1 A
53. ***a)*** (3) negativo, porque éste es un circuito capacitivo. ***b)*** −27°
55. ***a)*** (3) en resonancia, porque $X_L = X_C$, por lo que $Z = R$. ***b)*** 72 Ω
57. 50 W
59. 5.3×10^{-11} F
61. ab: 1.3 A; ac: 1.2 A; bc: 4.0 A; cd: 1.8 A; bd: 1.6 A; ad: 2.9 A
63. 13 A
65. $(V_{rms})_R = 12$ V; $(V_{rms})_L = 2.7 \times 10^2$ V; $(V_{rms})_C = 2.7 \times 10^2$ V
67. ***a)*** (2) igual a 25 Ω. En resonancia, $X_L = X_C$, por lo que $Z = R$. ***b)*** 362 Ω
69. 30%
71. ***a)*** 38 Ω ***b)*** 63 Ω ***c)*** 1.8 A ***d)*** cero ***e)*** 37°
73. ***a)*** (2) cero, en tanto que $X_L = X_C$, de acuerdo con $\phi = \tan^{-1}[(X_L - X_C)/R]$. ***b)*** 9.4 μF

Capítulo 22

1. ***c)***
3. ***d)***
5. Esto es reflexión irregular o difusa, porque el papel es microscópicamente rugoso.
7. 70°
9. ***a)*** (2) $90° - \alpha$, porque $\theta_i = \theta_r$ y $\alpha + \theta_i = 90°$, $\theta_r = \theta_i = 90° - \alpha$ ***b)*** 47°
11. ***a)*** (3) $\tan^{-1}(w/d)$ ***b)*** 27°
13. Cuando el espejo gira a través de un ángulo de θ, la normal girará a través de un ángulo de θ y el ángulo de incidencia será $35° + \theta$. El ángulo de reflexión también es $35° + \theta$. Como el ángulo de reflexión original es de 35°, el rayo reflejado girará a través de un ángulo de 2θ. Si el espejo gira en dirección opuesta, el ángulo de reflexión será $35° - \theta$. Si embargo, la normal girará de nuevo a través de un ángulo θ, pero también en dirección contraria. Por lo tanto, el rayo reflejado aún gira a través de un ángulo de 2θ.
15. 90°, cualquier θ_{i_1}
17. ***d)***
19. Es porque la rapidez de la luz depende del medio. Por ejemplo, la rapidez de la luz es diferente en el aire que en el agua. A causa de la diferencia de rapidez, la luz cambia de dirección cuando entra en un medio diferente a un ángulo de incidencia diferente de cero.
21. Esta imagen cortada se debe a que el ángulo de refracción es diferente para la interfase aire-vidrio que para la interfase agua-vidrio. La porción superior refracta del aire al vidrio, y la porción inferior refracta del agua al vidrio. Esto es distinto de lo que sucede en la figura 22.13b, en la que se observa la parte superior en aire directamente y la porción inferior en agua a través de la refracción del agua al aire. El ángulo de refracción provoca que el lápiz parezca doblado.
23. El rayo láser tiene una mejor oportunidad de tocar al pez. Este último aparece al pescador en un lugar diferente de su verdadera ubicación a causa de la refracción. El rayo láser obedece la misma ley de refracción y vuelve sobre la luz que el pescador ve del pez. La flecha se dirige al agua en una trayectoria casi recta y, por ende, pasa por encima del pez.
25. ***a)*** (1) mayor, porque su índice de refracción es menor. ***b)*** 1.26
27. ***a)*** (1) mayor, porque el agua tiene un menor índice de refracción. ***b)*** 17°
29. ***a)*** (2) de un diamante al aire, porque el diamante tiene un índice de refracción más elevado. ***b)*** 24.4°
31. 47°
33. 6.5×10^{14} Hz, 2.8×10^{-7} m
35. ***a)*** (3) menor, porque su índice de refracción es más alto. ***b)*** 15/16
37. ***a)*** Esto se debe a la refracción de la luz en la interfase agua-aire. El ángulo de refracción en el aire es mayor que el ángulo de incidencia en el agua, así que el objeto inmerso en agua aparece más cercano a la superficie.
39. 75.2%
41. ***a)*** (3) menor, porque es igual a $90° - \theta_1$. $\theta_1 > 45° = \theta_2$ y $n_1 < n_2$. ***b)*** 20°
43. podrá ver el de 40°, pero no el de 50°, $\theta_c = 49°$
45. ***a)*** sí, $\theta_c = 32° < 45°$ ***b)*** no, $\theta_c = 46° > 45°$
47. Podemos medir los ángulos de incidencia y refracción a partir de la fotografía y calcular el índice de refracción del fluido de acuerdo con la ley de refracción. Es aproximadamente 1.3.
49. 1.64
51. ***a)*** (3) reflexión interna total ***b)*** $\theta_c = 39° < 45°$, no ***c)*** $\theta_c = 56° < 71°$, aún no se trasmite
53. 2.0 m
55. ***a)*** 12.5° ***b)*** 26.2°
57. ***b)***
59. En un prisma, hay dos refracciones y dos dispersiones porque ambas refracciones provocan que la luz refractada se doble hacia abajo, por consiguiente, se duplica el efecto o dispersión.
61. Para ver un arco iris, la luz tiene que estar detrás de usted. En realidad, no verá un arco iris primario si el ángulo del Sol por encima del horizonte es mayor de 42°. Por consiguiente, no podrá ver hacia arriba para encontrar un arco iris, así que no podrá caminar por debajo de uno.
63. ***a)*** Por lo general, $\theta \approx 0°$, de manera que no hay dispersión porque el ángulo de refracción para todos los colores también es cero. ***b)*** Se explicó en ***a)***. Con $\theta \approx 0°$, la luz de cualquier longitud de onda no experimentará refracción. (No, en realidad, las rapideces son diferentes.)
65. 1.498
67. ***a)*** 21.7° ***b)*** 0.22° ***c)*** 0.37°
69. ***a)*** 49° ***b)*** 1.5 ***c)*** 1 ***d)*** 42°
71. ***a)*** (1) más, porque la luz roja tendrá un menor índice de refracción y, por lo tanto, una mayor rapidez que la luz azul. ***b)*** 1.3 mm
73. 1.41 a 2.00

Capítulo 23

1. ***b)***
3. ***c)***
5. Durante el día, la reflexión se realiza principalmente en la superficie posterior plateada. Durante la noche, cuando el espejo está en la posición correspondiente, la reflexión proviene del lado frontal. Así que hay una reducción de intensidad y resplandor porque el lado frontal refleja sólo el 5% de la luz, que es más que suficiente para ver en el fondo oscuro.
7. Cuando un conductor lo ve a través del espejo retrovisor, la propiedad de inversión derecha-izquierda de la imagen que forma

un espejo plano le permitirá leer "AMBULANCIA".

9. ***a)*** 4.0 m ***b)*** derecha, virtual y del mismo tamaño

11. 5.0 m

13. ***a)*** 1.5 m detrás del espejo ***b)*** 1.0 m/s

15. ***a)*** Usted ve múltiples imágenes por las reflexiones de los dos espejos. ***b)*** 3.0 m detrás del espejo *norte*, 11 m detrás del espejo *sur*, 5.0 m detrás del espejo *sur*, 13 m detrás del espejo *norte*

17. Los dos triángulos (con d_o y d_i como base, respectivamente) son similares entre sí porque los tres ángulos de cada uno son iguales que los del otro por la ley de la reflexión. Además, los dos triángulos comparten la misma altura, el lado vertical común. Por consiguiente, los dos triángulos son idénticos. Por eso, $d_o = d_i$.

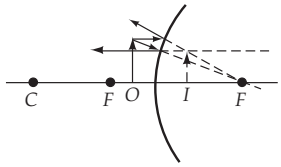
19. ***d)***

21. ***a)***

23. ***a)*** Una cuchara puede comportarse como un espejo cóncavo o convexo dependiendo de qué lado se utilice para reflejar. Si se utiliza el lado cóncavo, normalmente se observa una imagen invertida. Si se utiliza el lado convexo, siempre se ve una imagen derecha. ***b)*** En teoría, la respuesta es sí. Si usted está muy cerca (dentro del foco), la cuchara en el lado cóncavo producirá una imagen derecha. Sin embargo, sería difícil para usted ver la imagen en la práctica, porque sus ojos tendrían que estar muy cerca de la imagen. Los ojos no pueden ver objetos que están más cerca que el punto cercano (capítulo 25).

25. La imagen de un objeto lejano (en el infinito) se forma en una pantalla en el plano focal. La distancia del vértice del espejo al plano es la distancia focal. No sucede lo mismo con un espejo convexo porque la imagen es virtual y no puede formarse en una pantalla.

27. ***a)*** A partir del diagrama de rayos se ve que la imagen es virtual, derecha y reducida.



b) $d_i = -20$ cm; $h_i = +0.67h_o$

29. $d_i = -30$ cm; $h_i = 9.0$ cm; la imagen es virtual, derecha y amplificada

31. De acuerdo con la ecuación del espejo, $1/(2f) + 1/d_i = 1/f$. Entonces, $1/d_i = 1/f - 1/(2f) = 1/(2f)$, o $d_i = 2f$. $M = -d_i/d_o = -(2f)/(2f) = -1$. Por consiguiente, la imagen es invertida ($M < 0$), y del mismo tamaño que el objeto ($|M| = 1$).

33. ***a)*** convexo, porque un espejo cóncavo sólo forma imágenes virtuales amplificadas. ***b)*** 14 cm

35. ***a)*** cóncavo, porque sólo un espejo cóncavo forma imágenes amplificadas. ***b)*** 13.3 cm

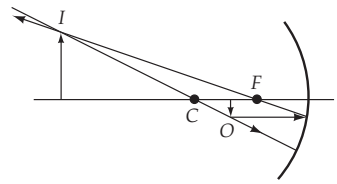
37. f es negativa para un espejo convexo. Así que $d_i = d_o f/(d_o - f) = d_o(-|f|)/(d_o + |f|) < 0$. Además $M = -d_i/d_o = -d_o(-|f|)/[d_o(d_o + |f|)] = |f|/(d_o + |f|) < +1$. Por lo tanto, la imagen es virtual (negativa d_i), derecha (M positiva) y reducida ($|M| < 1$)

39. ***a)*** cóncavo, porque sólo un espejo cóncavo forma imágenes reales (en una pantalla). ***b)*** 24 cm

41. ***a)*** virtual y derecha ***b)*** 1.5 m

43. 2.3 cm

45. ***a)***



b) $d_i = 60$ cm, $M = -3.0$, real e invertida

47. 10 m

49. ***a)*** Superficie frontal: 60 cm, real , invertida y amplificada; superficie posterior: 46.7 cm, real, invertida y amplificada ***b)*** no, la imagen del cubo ya no es más la de un cubo porque diferentes partes de la figura tienen distintas amplificaciones.

51. ***a)*** dos, uno para la imagen real y otro para la imagen virtual. ***b)*** 5.0 cm, 15 cm

53. Sí, es posible. Una es una imagen real y la otra virtual. 13 cm; 27 cm

55. ***d)***

57. Cuando el pez está dentro del foco, la imagen es derecha, virtual y amplificada.

59. Es posible ubicar la imagen de un objeto lejano. La distancia de la lente convergente a la imagen es la distancia focal. No, el mismo método no funciona para lentes divergentes porque una lente divergente no forma imágenes reales de objetos reales.

61. $d_i = 12.5$ cm; $M = -0.250$

63. 22 cm

65. ***a)*** $f = 5.9$ cm ***b)*** 67 cm, invertida

67. ***a)*** 18 cm ***b)*** 6.0 cm

69. 14 cm

71. 0.55 mm

73. ***a)*** 20 cm ***b)*** $M = -1.0$

75. ***a)*** $d = 4f$ ***b)*** se aproxima a 0

77. ***a)*** −18 cm ***b)*** −63 cm

79. 4.2 cm

81. 18 cm a la izquierda del ocular; imagen virtual

83. $M_1 = -h_{i1}/h_{o1}$, $M_2 = -h_{i2}/h_{o2}$, y $M = h_{i2}/h_{o1}$. Como $h_{o2} = h_{i1}$ (la imagen formada por la primera lente es el objeto para la segunda), $M_1M_2 = (h_{i1}/h_{o1})(h_{i2}/h_{o2}) = h_{i2}/h_{o1} = M_{total}$.

85. ***b)***

87. ***b)***

89. Nuestros ojos están "diseñados" o se utilizan para ver objetos claramente cuando nuestro entorno está constituido por aire. Cuando se está bajo el agua, el índice de refracción del entorno (agua) cambia. De acuerdo con el ejercicio 23.80(a), la distancia focal de los ojos cambia, así que todo aparece borroso. Cuando se utilizan *goggles*, el entorno de los ojos de nuevo es aire, de manera que es posible ver los objetos con claridad.

91. ***a)*** sí, aumenta ***b)*** la lente divergente se vuelve convergente y viceversa

93. +4.0 D

95. −0.70 D

97. 85 cm

99. La imagen que forma la lente convergente está en el espejo. Esta imagen es el objeto para la lente divergente. Si el espejo está en el foco de la lente divergente, los rayos refractados después de la lente divergente serán paralelos al eje. Estos rayos se reflejarán en el espejo paralelos al eje y formarán otra imagen en el espejo. Esta segunda imagen ahora es el objeto para la lente convergente. Al invertir los rayos, una imagen definida se forma en la pantalla localizada donde está el objeto original. Por consiguiente, la distancia de la lente divergente al espejo es la distancia focal de la lente divergente.

101. 20 cm en el lado del objeto de la primera lente, invertida, $M_{total} = -1.0$

103. 60 cm a la derecha de la segunda lente; real y derecha, $M_{total} = 4.0$

Capítulo 24

1. ***b)***

3. ***b)***

5. Como $\Delta y = L\lambda/d \propto \lambda$, la separación entre las franjas brillantes aumentaría si la longitud de onda se incrementa.

7. 3.4%

9. 0.37°

11. 489 nm

13. ***a)*** 440 nm ***b)*** 4.40 cm

15. ***a)*** (1) aumenta, porque $\Delta y = L\lambda/d \propto 1/d$, la distancia entre las franjas brillantes disminuiría si la distancia entre las rendijas aumentara. ***b)*** 1.9 mm ***c)*** 2.4 mm

17. ***a)*** $\lambda = 402$ nm, violeta ***b)*** 3.45 cm

19. 450 nm

21. ***a)***

23. Las longitudes de onda que no son visibles en la luz reflejada son todas las longitudes de onda excepto el púrpura azulado.

25. Siempre es oscura por la interferencia destructiva que se debe al cambio de fase de 180°. Si no hubiera cambio de fase de 180°, el grosor cero correspondería a la interferencia constructiva.

27. ***a)*** 30λ ***b)*** destructivamente

29. 54.3 nm

31. ***a)*** (2) 600 nm, porque $t_{mín} = \lambda/(4n_1)$ o $t \propto \lambda$. ***b)*** 160 nm; 200 nm

33. ***a)*** 158.2 nm ***b)*** 316.4 nm

35. 1.51×10^{-6} m

37. ***a)***

39. no, sí (apenas, a $\theta = 90°$)

41. De acuerdo con d sen $\theta = n\lambda$, la ventaja es una figura de difracción más ancha, conforme d es menor.

43. ***a)*** 5.4 cm ***b)*** 2.7 cm

45. ***a)*** 4.3 mm ***b)*** microonda

47. 1.24×10^3 líneas/cm

49. azul: 18.4°, 39.2°; rojo, 30.7°, no es posible
51. ***a)*** 2.44×10^3 líneas/cm ***b)*** 11 (n de franjas brillantes es 5)
53. ***a)*** (1) azul, porque tiene una longitud de onda más corta. De acuerdo con d sen $\theta = n\lambda$, podemos ver que cuanto menor es la longitud de onda, menor es sen θ o θ. ***b)*** azul: 18.7°, rojo: 34.1°
55. De acuerdo con d sen $\theta = n\lambda$, $\theta = \text{sen}^{-1} n\lambda/d$. Para el violeta, $\theta_{3v} = \text{sen}^{-1}(3)(400\text{ nm})/d = \text{sen}^{-1}(1200\text{ nm})/d$. Para el amarillo-naranja, $\theta_{2y} = \text{sen}^{-1}(2)(600\text{ nm})/d = \text{sen}^{-1}(1200\text{ nm})/d$. Así que $\theta_{3v} = \theta_{2y}$, esto es, se traslapan.
57. ***d)***
59. ***c)***
61. ***a)*** dos veces ***b)*** cuatro veces ***c)*** ninguna ***d)*** seis veces
63. Los números aparecen y desaparecen conforme los lentes para sol giran porque la luz de los números en la calculadora es polarizada.
65. ***a)*** (1) también aumenta, porque $\tan\theta_p = n_2/n_1 = n_2\,(n_1 = 1)$. Si n_2 aumenta, también θ_p. ***b)*** 58°, 61°
67. ***a)*** (2) disminuye, porque la intensidad de la luz transmitida depende de $\cos^2\theta$. Conforme θ aumenta de 0 a 90°, cos θ disminuye. ***b)*** $0.500I_o$, $0.375I_o$ ***c)*** $0.500I_o$, $0.125I_o$
69. 55°
71. 57.2°
73. En el agua, $\theta_p = \tan^{-1}(n_2/n_1)$. El ángulo de incidencia en la interfase agua-vidrio debe ser $\theta_p = \tan^{-1}(1.52/1.33) = 48.8°$. Para la interfase aire-agua, n_1 sen $\theta_1 = n_2$ sen θ_2, así sen $\theta_1 = n_2$ sen $\theta_2/n_1 = (1.33)$ sen $48.8° > 1$. Como el máximo de sen θ_1 la respuesta es no.
75. ***c)***
77. ***a)*** Esto se debe a la densidad variable de moléculas de aire. ***b)*** No hay aire en la superficie de la Luna, así que un astronauta vería el cielo negro.
79. no, porque $n_2 = 1$ (aire), $\tan\theta_p = n_2/n_1 = 1/n_1$. Para la reflexión total interna, sen $\theta_c = n_2/n_1 = 1/n_1$. Esto significa que tan θ = sen θ. Eso no es posible para cualquier ángulo que no sea igual a cero. ***b)*** 29.8°
81. $\Delta y = 0.25\Delta y_o$
83. $n = 1$ para el rojo; $n = 2$ para el violeta

Capítulo 25

1. ***b)***
3. ***a)***
5. El destello rápido ocurre antes de que el obturador se abra y la película se exponga. La luz brillante hace que el iris se reduzca (lo que da una pupila pequeña), de manera que cuando el segundo destello se produce momentáneamente, no hay una abertura grande a través de la cual se produzca la reflexión del ojo rojo desde la retina.
7. ***a)*** El ojo es miope porque el punto lejano no está en el infinito. ***b)*** El ojo es hipermétrope porque el punto cercano no está a 25 cm. ***c)*** ***a***, divergente; para ***b***, convergente
9. ***a)*** +5.0 D ***b)*** −2.0 D
11. ***a)*** (1) convergente, porque la persona es hipermétrope. ***b)*** +2.0 D
13. divergente, −0.500 D
15. ***a)*** se los tendrá que quitar ***b)*** +3.0 D
17. ***a)*** (1) convergentes, porque es hipermétrope. ***b)*** +3.3 D
19. ***a)*** –0.505 D ***b)*** –0.500 D
21. 6.7 m
23. ***a)*** –0.67 D ***b)*** sí, 21, cm ***c)*** entre 30 y 40 años
25. derecho: +1.42 D, −0.46 D; izquierdo: +2.16 D, −0.46 D
27. ***d)***
29. El objeto debería estar dentro de la distancia focal. Cuando se encuentra dentro de esta última, la imagen es virtual, derecha y amplificada.
31. ***a)*** 2.3× ***b)*** 2.5×
33. 2.5×
35. ***a)*** (1) de alta potencia, porque una lente de alta potencia tiene distancia focal corta y la amplificación es $1 + (25\text{ cm})/f$. ***b)*** 1.9× y 1.6×
37. −375×
39. ***a)*** (2) La de menor distancia focal, porque el aumento total es inversamente proporcional a la distancia focal del objetivo. ***b)*** −280× y −360×
41. ***a)*** −340× ***b)*** 3900%
43. 25×
45. ***a)*** máximo: 1.6 mm/10×; mínimo: 16 mm/5× ***b)*** $M_{máx} = -930\times$; $M_{mín} = -42\times$;
47. ***b)***
49. No, se seguiría viendo la estrella completa. La obstrucción reduciría la intensidad o brillantez de la imagen.
51. La que tiene menor distancia focal debería usarse como el ocular para un telescopio. El aumento del telescopio es inversamente proporcional a la distancia focal del ocular ($m = -f_o/f_e$).
53. ***a)*** −4.0× ***b)*** 75 cm
55. 1.00 m y 2.0 cm
57. 5.0 cm
59. ***a)*** 60.0 cm y 80.0 cm; 40.0 cm y 90.0 cm ***b)*** −75×; −44×
61. ***a)***
63. El ángulo mínimo de resolución más pequeño corresponde a la mayor resolución porque un ángulo de resolución más pequeño significa que es posible resolver más detalles.
65. Desde el punto de vista de la resolución, la cámara (lente) más pequeña tiene resolución más baja. Cuanto más pequeña es la lente, mayor es el ángulo mínimo de resolución, y menor el poder de resolución.
67. 550 nm
69. 1.32×10^{-7} rad; $\theta_{mín}$ de Hale es 1.6 veces más grande
71. ***a)*** (3) azul, porque el ángulo mínimo de resolución es proporcional a la longitud de onda y el azul tiene la longitud de onda más corta. ***b)*** 9.6×10^{-5} rad y 1.1×10^{-4} rad
73. 17 km
75. 4.1×10^{16} km
77. ***a)*** 5.55×10^{-5} rad ***b)*** azul ***c)*** 33.3%
79. ***d)***
81. Con luz roja, el rojo y el blanco aparecen como rojo; el azul parece negro. Con luz verde, sólo el blanco aparece como verde; tanto el rojo como el azul parecen negro. Con luz azul, el rojo aparece como negro; el blanco y el azul aparecen como azul.
83. El líquido es oscuro o coloreado porque absorbe toda la luz, excepto ese color. La cantidad de luz que absorbe un objeto siempre depende de cuánto material absorbe la luz. La espuma tiene una densidad de material muy baja y sólo absorbe muy poca luz, o casi toda la luz se refleja; por eso, la espuma generalmente es blanca.
85. De acuerdo con la ecuación de lentes delgadas: $d_o = d_i f/(d_i - f)$, se tiene $d_i/d_o = (d_i - f)/f = [-(D - d) - f]/f$. Por medio de la aproximación de ángulo pequeño: $m = \theta_i/\theta_o = (y_i/D)/[y_o/(25\text{ cm})] = (y_i/y_o) \times [(25\text{ cm})/D]$. Mediante triángulos similares: $y_i/y_o = -d_i/d_o$, el signo negativo se introduce porque d_i es negativa (imagen virtual). Así que $m = \{[(D - d) + f]/f\} \times [(25\text{ cm})/D] = (25/f) \times (1 - d/D) + 25/D$.
87. ***a)*** (1) B, (2) A ***b)*** −110×, 8.95×10^{-7} rad
89. ***a)*** 6.3 y 0.25 ***b)*** 1/120 s

ÍNDICE

Nota: Las entradas que tienen números de página con n, f o t se refieren a material contenido en una nota al pie de página, una figura o una tabla, respectivamente.

A

Abera, Gezahgne, 367
Aberración
astigmatismo, 753, 797, 798
cromática, 752
en espejos esféricos, 733, 740, 752
en prismas de reflexión, 806
lentes, 752-53
Absorciometría de los rayos X de energía dual (DXA), 305
Absorción
emisor y, 387
resonancia y, 385
selectiva
dicroísmo, polarización por, 776-78
filtros de color y, 812
Aceites para motor, y viscosidad, 327
Aceleración, 40-44
angular, 228-31
angular promedio, 228-29
aparente, 245
centrípeta (radial), 223-25, 230
constante, 42-44
caída libre, 49-56, 108-9
ecuaciones cinéticas, 45-49
segunda ley de Newton sobre la, 116
debida a la gravedad, 49-56, 233-34
de carga, 539
del electrón, 540
en movimiento armónico simple, 444-45
fuerza y, 104
instantánea, 41, 116
promedio, 40-42, 44
proyecciones horizontales y, 81-82
rotacional, 260
segunda ley de Newton sobre la, 106-11
signos de, 42
tangencial, 229-30
velocidad y energía cinética, 152
Acetilcolina, 576
Acomodamiento, 794
Acondicionadores de aire, 421, 422
Acróbatas, y centro de gravedad, 268
Actividad óptica, 781-82
Adaptadores (tomacorrientes), 689
Adherencia, local, 122
Adiabata, 406, 423
Aerofrenado, de una nave espacial, 129
Afelio, 236, 239
Agotamiento de la capa de ozono, 677
Agua. *Véase también* Hielo
analogía de la ley de Gauss, 528
calor específico del, 371-72
densidad del, 305
energía electrostática potencial de la molécula de, 542-43
equilibrio térmico, 374-75
evaporación del, 374, 379, 380, 411
expansión térmica del, 353
flujo de líneas de corriente, 320, 323, 324
masa y peso del, 1, 9
ondas en el, 761, 768
ósmosis inversa y purificación del, 357
polarización eléctrica del, 512f
punto
de hielo, 341
de vapor, 341
triple, 348
temperaturas de cambios de fase y presión en el, 378
Agudeza, visual, 798-99
Air Canada, 16
Aire. *Véase también* Atmósfera (atm)
composición del, 358
velocidad del sonido en el, 471-74
Aislamiento
de espuma, 381, 385
valores R (valores de resistencia térmica), 384, 395
y conductividad térmica, 382-83
Aislantes
conductividades térmicas de sustancias, 381
de carga eléctrica, 508-9
dieléctricos, 552
espuma con funciones, 367, 381, 385
resistividades y coeficientes de temperatura, 577t
térmicos, 367, 379, 382
Alcance del proyectil, 83-85
máximo, 87-88
Alcohol, termómetros de líquido en vidrio, 340-41
Alternador fem, 665
Alternadores, 663-65, 667, 668
Altitud, punto de ebullición y, 378
Aluminio
calorimetría y, 372-73
resistividad y coeficientes de temperatura, 577t
American Journal of Physics, 326n
Amortiguadores, 307, 446
Ampère, André, 568, 572
Ampere, amp (A), 7, 568
definición de, 572, 623, 641
para aparatos eléctricos, 582
Amperímetros, 607-9, 611f, 635
Amplitud, 434-35, 441, 447, 483
Análisis
de gráficas
de ecuaciones cinemáticas, 49
de movimiento con aceleración constante, 43-44
de movimiento y velocidad, 38-40
de la impedancia bioeléctrica (AIB), 578
de unidades, 10-12, 13
óptico de tensión, 782
Analizadores, luz polarizada, 777
Analogías gravitacionales con la electricidad
campo eléctrico entre placas paralelas, 537
energía potencial *vs.* potencial, 540
resistores en serie y en paralelo, 593, 594
superficie equipotencial eléctrica, 544-45
Anguilas eléctricas, 505, 524, 536, 568, 575-76, 577-78
Ángulo(s)
crítico, 717-18
de corte, 301
de fase, 694-96
de incidencia, 707, 711, 717
de reflexión, 707
de refracción, 709, 711, 712, 717
de resolución, mínimo, 808-9
movimiento del proyectil en, 82-89
polarizante (de Brewster), 779
Anillos de Newton, 767-68
Ánodos, 569, 629, 678
Anteojos
para sol de vidrio fotogris, 677-78
correctivos, 795-98
polarizados, 777, 779
potencia de las lentes de los, 751
Antinodos, 454, 468, 492
Antiterrorismo, 664
Aplicaciones médicas. *Véase también* Cuerpo humano; Cirugía
análisis de la impedancia bioeléctrica (AIB), 578
biopsia óptica, 785
centrífuga, 224-25
circuitos RC y marcapasos cardiacos, 608-9
cirugía láser, 792, 797
Doppler y flujo sanguíneo, 490
EEG (electroencefalógrafo) y ondas cerebrales, 433
efectos de la ingravidez, 245
fibras ópticas, 720
fuerza magnética y, 642
masaje neumático, 108
rayos X, 304-5, 540, 775
temperatura corporal y cirugía, 343
termómetros infrarrojos que detectan SARS, 386
trasplantes de órganos, 378
ultrasonido, 305, 470-71, 490
Aproximación de ángulo pequeño, 219f
Aproximación planetaria, 238
Aproximaciones, 23-24
Arco iris, 722
Arcos, parabólicos, 83-84
Área(s)
conversión de unidades de, 15
de un contenedor cilíndrico, 21
de un rectángulo, 22
ley de Kepler, 239-40, 282-83
Aristóteles, 32, 50, 51, 105
Armadura, 636, 663-65, 667-68
Arquímedes, 297, 314
Arteriografía, 490

Asperezas, 123
Astigmatismo, 753, 797, 798
Astronautas, y gravedad, 108, 245
Atenuación del sonido en el aire, 474
Atmósfera (atm), 306
estándar, 310
Átomo
modelo del sistema solar del, 506
Átomo de helio
expansión, adiabática *vs.* isotérmica, 408
velocidad molecular, 355
Átomo de hidrógeno
diferencia del potencial eléctrico y el, 541-42
modelo de sistema solar del, 506
Aumento o amplificación
angular, 799-801, 802
del telescopio refractor, 803
factor de, 737, 745, 749
lateral, 730, 731f, 737
total, 801-2
Auroras australes y boreales, 647
Autoinducción, 670, 691
Automóviles. *Véase* Vehículos
Aviones
cizalladuras del viento, 491
dinámica de un vuelo, 94, 322-23
onda de choque y, 488-90
velocidad relativa de los, 94

B

Bacterias, magnetotácticas, 645
Balance, electrónico, 636-37
Banda
de amplitud modulada (AM), 676, 700, 760, 770-71
de frecuencia ultra-alta (UHF), 676
de onda corta, 676
frecuencias de radio, 700
Baloncesto. *Véase* Deportes
Bar, 311n
Barómetro(s), 309f, 310, 311
aneroide, 311
Batería(s), 569-71
acción de las, 569
capacitancia y, 549
corriente directa y, 569-71
dieléctricas, 553-55
en paralelo, 570-71
en serie, 570
fem y voltaje terminal, 570-71
inducida, 667
voltaje terminal de, 545, 570-71, 572f
Bel (B), 476-79
Bell, Alexander Graham, 477
Bernoulli, Daniel, 322
Bifurcación (en un circuito eléctrico), 599
"Big Bertha", arma, 67
Binoculares prismáticos, 804
Biogeneración de alto voltaje, 575-76
Biopsia óptica, 785
Birrefringencia, 780-82
Blakemore, R. P., 645n
Bobina(s)
bimetálicas, 340
de entrada (primaria), 669
de salida (secundaria), 669
tesla, 656
Bolsas de aire, 186
Bomba(s)
corazón humano como, 312-13
de calor, 420-22
térmicas, 414, 421
Bombeo molecular Na/K ATPasa, 553
Bombillas de luz
eficiencia de, 581, 584
en un circuito completo, 569, 573
filamentos y resistencia de las, 574
valores rms y máximo, 688-89
Boyle, Robert, 343
Bragg, W. L., 774
Brahe, Tycho, 239
Braseros, y transferencia de calor, 389
Brazo de palanca (brazo de momento), 259
Brewster, David, 779
Brillo de los diamantes, 718, 721
Brújula, 625, 637
Burbuja de jabón/película de una, 765

C

ca (corriente alterna), 663, 687-88. *Véase también* Circuitos, ca
Cables conductores de corriente
resistencia eléctrica de, 574-75, 577, 579
tierra (neutral), 611f, 612-13
alto potencial (cables calientes), 611-14
campo magnético, y aplicaciones de, 635-37
campo magnético cerca, 637-38
fuerzas magnéticas entre dos paralelas, 640-41
fuerzas magnéticas sobre, 632-35
solenoide contra, 640
Caída libre, 49-56, 108-9
distancia *vs.* tiempo, 105
Calcita, 781
Cálculos de orden de magnitud, 23-24, 179
Calentamiento global, 388
Calidad de tono, 495-96
Calor, 367-96
calorimetría, 372-73
cambios de fase y, 374-79
corporal, 367, 380, 385, 387
de fusión, 375, 376
de sublimación, 375
de vaporización, 375, 376, 411
definición de, 368
equivalente mecánico del, 369
específico, 370-74
de joule, 580-83,
corriente ca y, 687
electroimanes y, 643
en circuitos domésticos, 612
pérdidas de transmisión de poder, 668, 670, 671
latente, 374-78
temperatura distinguida del, 338, 339-40
unidades de, 368-69
Caloría,
gramo (Cal), 368
kilogramo (Cal), 368
Calórico, 338
Calorímetro, 372
Cámara
circuitos RC en, 606
funcionamiento de una, 793
lentes de, 705, 729, 768
resolución de, 808
Cambio(s)
fraccional, 299, 350
de fase, 374-79
calor latente, 374-78
evaporación, 374, 379, 380, 411
Caminos peraltados, 226-27, 250
Campo de vectores, 517, 625
Campo(s) magnético(s), 624-25, 657. *Véase también* Electromagnetismo
de la Tierra, 624, 644-47
de variación de tiempo, eléctrico y magnético, 661, 673
dirección de, 624-25
ecuaciones de Maxwell, 673
eléctrico "inverso", 554
electromagnetismo y corriente, 637-41
fuerza de, 626-28
geomagnético, 644
inductores y, 691
líneas de, 625
partículas cargadas y, 629-32
relación con los campos eléctricos, 673
variación de tiempo, 661, 673
Cancelación activa del ruido, 452
Cáncer
peligros de la radiación UV, 677
Candelas (cd), 7
Cantidad(es),
unidades de, 12
de energía, 149
de trabajo, 141-42, 149
escalares, 33-34. *Véase también* Distancia; Longitud; Velocidad
vectoriales, 35-40. *Véase también* Desplazamiento; Velocidad
direcciones de, 52-55
fuerza y aceleración, 104
Cantidad de movimiento, 177-215. *Véase también* Colisiones
angular, 280-86
conservación del, 281-83,
del cuerpo rígido, 281
en la vida real, 283-86
cambios en la, 181
centro de masa y, 198-99
conservación de la, lineal, 185-91
conservación de la, y energía cinética, 196
definición de, 178
en colisiones
elásticas, 195-98
inelásticas, 192-95
energía cinética *vs.*, 185
fuerza y, 182
impulso y, 182-85
lineal total, 178
propulsión a chorro y, 114, 204-6
total, 178, 180-81
Capacidad de calor, específica, 370
Capacitancia, 549-52
definición de, 550, 690
paralela equivalente, 558-59
series equivalentes y, 558
Capacitor. *Véase* Condensador
Capas iónicas en la atmósfera, 676
Carbono
resistividad y coeficiente de temperatura, 577t
como semiconductor, 579
Cardioscopio, 720
Carga(s)
conservación de, 507-8, 907
cuantizada, 507, 508
de prueba, 517
eléctrica, 505-8
electrostática, 508-12
por contacto o conducción, 510-11
por fricción, 510
por inducción, 511
por polarización, 511-12
fuerza eléctrica por unidad de, 538

fuerza normal y, 122
negativas, 540
neta, 507, 572
nubes de tormenta y, 523, 524-25
positivas, 540
puntuales, 540-42
Carnot, Sadi, 423
Carruseles, 221
Cassini, G. D., 238
Cátodos, 569, 629, 678
Cavendish, Henry, 232, 233, 513
cd (corriente directa), 569-71, 572, 604-7
cd (discos compactos), 222, 229, 772-73
Celdas solares, 768
Celsius, Anders, 338
Celuloide, transparente, 776
Centipoise (cP), 326
Centrífugo, 224-25
Centro
de curvatura, 732, 741
de gravedad (CG)
centro de masa y, 203-4
en el cuerpo humano, 204, 261, 268
equilibrio estable y, 266-69
localización del, 272
de masa (CM), 198, 204
centro de fuerza gravitacional y, 232n
centro de gravedad y, 203-4
proceso de sumatorias para determinar el, 200
Cero absoluto, 338, 346-49, 355, 425
CFC (clorofluorocarbonos), 677
Charles, Jacques, 344
Chimeneas, 322
China
diseño solar pasivo de una casa, 390
Gran Muralla, vista desde el espacio, 810
Choque eléctrico, 591, 613, 614
Ciclo(s)
de Carnot, 422-24
de convección térmica, 384
de cuatro golpes, 417-18
de Otto, 417-18
de un objeto en movimiento circular, 221-22
día-noche de convección atmosférica, 384
por segundo (ciclo/s), 434-35
térmicos, 410, 415
Cielo, color del, 782, 784
Cifras significativas, 17-20
Cinemática, 32-66. *Véase también* Desplazamiento; Distancia; Movimiento; Velocidad
aceleración, 40-44. (*Véase también* Aceleración)
constante, 45-49
caída libre, 49-56, 108-9
rotacional, 230
cantidades escalares, distancia y velocidad, 33-34
cantidades vectoriales, desplazamiento y velocidad, 35-40
Cinta magnética, 656
Cinturones Van Allen, 647
Circuito(s)
abiertos, 593, 596, 612
amperímetros y voltímetros, 591, 607-10, 611f
analogía con el sistema masa-resorte, 686
básicos, 591-622
cd comparados con ca, 686
completos, 569n, 571
de múltiples mallas, 599-604
destellante, 606-7
domésticos, 611-14
impedancia y, 693-97
LC oscilante, 699
puente de Wheatstone, 618
puramente capacitivos, 689-90, 692
RC, 604-7, 608-9, 693-94
reactancia capacitiva, 689-91
reactancia inductiva, 691-92
rectificador, 664
resistencia en, 687-89, 592-99
resonancia en, 697-700
RL, 694
RLC, 693-97
factor de potencia para, 696-97
resonancia en, 697, 698f
R en serie, 693-94
RL en serie, 694
RLC en serie, 694-96
seguridad y, 611-14
totalmente
capacitivos, 696
inductivos, 696
resistivos, 696
Círculo de referencia, 439-41
Clausius, Rudolf, 411
Clima
"cielo rojo" y, 784
globos, 314-15
y el radar Doppler, 491
Clorofluorocarbonos (CFC), 677
Cobalto, como material ferromagnético, 641
Cocinar, 378, 381
Coeficiente(s),
de desempeño (CDD), 421-22
de fricción, 122-27, 124f, 227
cinética, 123, 124f
estática, 122-23, 124f
de viscosidad, 326
temperatura, de resistividad, 577t, 578-79
térmica, 350-51
Cohetes, 204-6
Colágeno, 301
Colector(es)
parabólico (plato), 808
solares, 414
Colesterol, 321
Colisión
conservación de la cantidad de movimiento y, 196
definición de, 177, 185
elástica, 191-92, 195-98
inelástica, 191, 192-94, 836
Colonias espaciales, 245-46
Colores, 811-12
Cometa Halley, 103
Cometas, 675
Comité Internacional de Pesos y Medidas, 4
Componentes
de fuerza, 111-12, 118
de movimiento, 68-73
ecuaciones cinemáticas para, 70-73
segunda ley de Newton sobre, 111-12
velocidad relativa y, 92-93
de vectores
con unidades, 75-76
dibujo de, 80
rectangulares de vectores, 75
trayectoria curva, 72
Compresibilidad, 302
Computadora
microchips de, 509
monitores de, 629
pantallas de, 783
teclado de, 556
Comunicaciones globales, 676-77
Condensador, 802-3
Condensador(es) o capacitor(es), 522, 549
almacenamiento de energía en, 549-51
carga a través de resistores, 604-5
circuitos osciladores y, 699
comparados en circuitos ca y cd, 686, 689
de placas paralelas, 549-51
descarga a través de resistores, 605-7
en circuitos RLC, 693-94
en combinación en serie o en paralelo, 560
en desfibriladores cardiacos, 522, 551
en material dieléctrico, 552-56
en paralelo, 557, 558-60
en serie, 557, 558, 559
en teclados de computadora, 556
pérdida de potencia y, 696
variable de aire, 698
Condensación de las ondas sonoras, 468, 482
Condiciones de frontera, 454
Condiciones para
equilibrio
estable, 267
rotacional, 261-62
traslacional, 119, 261
interferencia
constructiva, 762, 766, 767, 774
destructiva, 763, 766, 767
máximos de la interferencia, 763, 773
rodar sin resbalar, 258
Conducción
carga electrostática por, 510-11
de la luz, 718-19
del calor en escala atómica, 400
transferencia de calor por, 379-83, 384, 386
Conductividad, térmica, 380-81, 382f
Conductores, 508-9
cargados, superficies equipotenciales en el exterior, 548
campos eléctricos y, 526-27
corrientes inducidas y fem, 662
ley de Gauss y, 529
resistividades y coeficientes de temperatura, 577t
térmicos, 367, 379
Conexiones en paralelo
baterías, 570-71
condensadores, 557, 558-60
resistores, 593-97
resistores, y combinaciones en serie, 595-96, 597-99
Configuraciones
de cargas, 517, 518, 526
energía de, 152
energía potencial eléctrica de varias, 542-43
de masas, 237
Confinamiento magnético, 647
Conmutador, sonido separado, 636
Conos, del ojo, 793f, 794, 811
Conservación
de carga (eléctrica), 507-8, 600
de energía, 141, 155-64, 319, 400, 660
de la cantidad de movimiento angular, 281-83
de la cantidad de movimiento lineal, 185, 91
de la cantidad de movimiento y la energía cinética, colisiones elásticas, 196

de la energía mecánica total, 158-61
de la energía total, ley de la, 156
de la masa, y el flujo de fluido, 319
Constante(s)
de Boltzmann, 345
de tiempo, para circuitos RC, 605, 608
del gas universal (R), 345
dieléctrica, 552, 553, 554
gravitacional, universal, 231-37
Contacto
carga electrostática por, 510-11
Continuidad, ecuación de, 320-21
Contracción, térmica, 340
Contra fem, 667-68
circuitos osciladores y, 699
en transformadores, 669
inductores y, 691
Convección, 383-85, 386
Conversión
de grados Celsius a Farenheit, 341-42
de grados Celsius a Kelvin, 347
de grados Farenheit a Celsius, 341-42
de unidades, 12-16
Convertidores, 689
Coordenadas
cartesianas, 35, 36
polares, 217
(*p, V,* T) en la ley ideal del gas, 398-99
Corazón humano
células marcapasos y señales eléctricas, 591, 608-9
como bomba, 312-13
desfibriladores para el, 522, 551
Córnea del ojo, 793f, 794, 797
Corriente(s)
alterna (ca), 663, 687-88
convencional, 571-72, 632
directa (cd), 569-71, 572, 604-7
de chorro, 384-85
efectiva (corriente rms), 688
en ramas, 603-04
pico, 687
Corrimiento
al azul, Doppler, 488
al rojo, Doppler, 488
Costo de la electricidad, 583
Coulomb (C), 506-7
Coulomb, Charles Augustin de, 505, 506, 512
Criaturas
de sangre caliente, 344
de sangre fría, 344
Cristales
anisotrópicos y birrefringencia, 781
difracción de rayos X, 774-75
polarización por absorción selectiva, 776
Criterio de Rayleigh, 807, 809
Crum, Lawrence A., 471n
Cubiertas en lentes, antirreflectante, 766-67, 768
Cuerpo
humano. *Véase también* Aplicaciones médicas
análisis de la impedancia bioeléctrica del, 578
calor corporal, 367, 380, 385, 387
centro de gravedad del, 204, 261, 268
difusión en los procesos vitales, 357
g de fuerza y efectos sobre el, 108
efectos de la corriente eléctrica sobre el, 591, 614
efectos de la ingravidez, 245
eficiencia del, 397, 420
ejercicio, 367, 369, 401
fuerza de impulso y heridas, 184
huesos, 300-1, 304-5
músculos y torsión, 260-61
necesidades de energía del, 140
ondas cerebrales, 433
presión del aire y dolores de oído, 311
pulmones, 325, 357, 407
recolección de energía, 156
resistencia eléctrica del, 574, 577
temperatura del, 343, 380
termodinámica y, 420
transmisión de la señal nerviosa, 552-53
negro, 387
rígido
cantidad de movimiento angular de un, 281
definición de, 257
en equilibrio, 262, 266, 268
energía cinética rotacional, 277-80
momento de inercia y, 270
movimientos de un, 257-59
Curie, Pierre, 623, 644
Curva(s)
de proceso, 402
Fletcher-Munson, 494-95
Curvatura
centro de, 732, 741
radio de la, 732, 733, 736, 741

D

D'Alibard, Thomas François, 523
Daltonismo, 811
Decibel (dB), 476-80
Declaración de equivalencia, 13
Declinación magnética, 646
Deformación, 105
Delta (Δ), 33, 35-36
Densidad
cálculo de la densidad de la sangre, 23-24
de sustancias comunes, 304
definición de, 303
determinación de, 12
flotabilidad y, 316-18
lineal de vueltas, 639
óptica, 711
temperatura y, 354
Deportes
baloncesto, salto de, 88
béisbol, 177
buceo, 305-7
carreras, 42-43, 122
ejercicio, 367, 369, 401
estabilidad de un auto de carreras, 268
estabilidad de una bicicleta, 271
esquí, 162-63
gimnasia, posición de la cruz de hierro, 266
globos de aire caliente, 338
golf, 83-84, 183, 185
hockey, 89
juego de tejo, 150
lancha de motor, 44, 92-93, 115
lanzamiento de disco, 67
lanzamiento de jabalina, 88
navegación, 115
paracaidismo, 128-29, 163
patinaje sobre hielo, 190-91 256, 283-84
salto de altura, 204
salto de longitud, 88-89
tiempos de contacto en los, 183
Deposición, 374
Derivación, 596
Desaceleración, 42
Descartes, René, 32
Descomposición
de vectores en componentes rectangulares, 75-76
del movimiento curvo, 67
Desempeño, coeficiente del, 421-22
Desfibriladores cardiacos, 522, 551
Desorden, medición del, 411, 413-14
Desplazamiento, 35-36, 47
angular, 217, 277
ondas y, 434-36, 443-45, 449, 451, 454
resolución en componentes de movimiento, 68-69, 70-72
trabajo y, 141-42
Detectores
de metal, 664, 666
de movimiento, 556
Diagrama(s)
de circuito
amperímetros y voltímetros, 607, 610, 611
bases para el dibujo, 571
básico, 572, 574
campo electromagnético y, 637, 643
como circuitos, 687, 689, 690, 692
contra fem, 667
de múltiples mallas, 599, 601, 603
inducción electromagnética, 657, 658
oscilante LC, 699
RC, 604, 606, 693, 694, 695
resistores, 592, 593, 596, 597
de cuerpo libre, 116-18
espaciales, 116
p-T, 399
p-V, 398f, 399, 402
T-S, ciclo del calor ideal, 423
T-V, 399
de rayos
para espejos, 734-40
para lentes, 741, 743, 744, 747
Diamantes, 718, 721
Diapasón, 468, 484
Dicroísmo, 776-78
Dieléctrica, 552-56
Diferencia de potencial, eléctrico, 538-40, 570-71
Diferencia en la longitud de la trayectoria, 482, 762-63, 774, 775f
Difracción, 453, 768-75
de la luz visible, 769
definición de, 768
del sonido, 481, 769
en instrumentos ópticos, 807-10
en una sola rendija, 769-71, 807-9
rayos X y, 774-75
recepción de radio y, 770-71
rejillas de, 772-74

Difusión
gaseosa, 356-57
fisiológica, 357
Dimensiones, 10
Dinámica. *Véase también* Termodinámica
de fluidos, 319-23
estudio de la, 32, 103
rotacional, 270-76
aplicaciones de la, 274-76
momento de inercia y, 270-73
teorema del eje paralelo y, 273-74
Dinamómetro, 420
Dinamos, ca, 656
Diodos emisores de luz (LED), 664, 783
Dioptrías, 751, 794
Dióxido de carbono (CO_2), 356, 357, 388
Dipolos
eléctricos, 511, 521, 522f
magnéticos, 624, 645
Dirección, 35-36
aceleración y, 40
de cantidades vectoriales, 52-55
de la polarización, 776-78
Disco compacto (CD), 229, 772-73
Diseño arquitectónico, diseño solar pasivo, 390
Diseño de una casa solar pasiva, 390
Dispersión, 453, 721-23
atmosférica, de la luz, 782, 784
biomédica, 785
de Rayleigh, 782, 784
Dispositivos
de desconexión, disyuntores de circuito, 612f
de estado sólido, en radios, 698
piezoeléctricos, 156, 470
Distancia, 33
angular, 218
de la imagen, 730, 736, 745
del objeto, 730, 736, 745
Distribución de la masa, e inercia rotacional, 270-71
División y cifras significativas, 18, 19
Doble refracción, 780-82
Doblete acromático, 752
Dolor, umbral del, 476, 494
Dominios magnéticos, 641, 642f, 643, 644
Doppler, Christian, 484
Duración equivalente, 13
DVD (video discos digitales), 772-73

E

***e* (número irracional, logaritmo natural),** 605
Eco magnético, 664
Ecuaciones
cinemáticas, 45-49, 52
cinemáticas, componentes de movimiento, 70-73
de Bernoulli, 319, 322-23
de continuidad, 320-21
de estado, 398
de lentes delgadas, 745, 749
de Maxwell, 656, 673
de movimiento, 439-46
del fabricante de lentes, 750-51
del espejo esférico, 736, 737-38
para nivel de intensidad del sonido, 477
para procesos termodinámicos, 409
para tasa de flujo, 320-21
traslacionales y rotacionales, 278
Ecuador y fuerzas del campo magnético, 633-34, 646
Efecto
catapulta, 238
Doppler, 484-88
aplicaciones del, 490-91, 677
para ondas de luz, 488
Hall, 649
invernadero, 386, 388, 677
Eficiencia, 166-67
de Carnot, 423, 25
del cuerpo humano, 397, 420
eléctrica, 583-84
mecánica, 166-67
térmica, 416-22, 424
Efusión, 356
Einstein, Albert, 271
Eje(s)
coordenadas cartesianas, 35
de rotación
de la Tierra, 285
inercia rotacional, 270-71, 286
instantáneo, 257, 258
movimientos rotacionales y, 263
teorema del eje paralelo, 273-74, 278
de simetría, 273-74
de transmisión, 776-78
óptico, 732, 781
Ejercicio, y calor y trabajo, 367, 369, 401
Electricidad, 505-35
capacitancia, 549
carga electrostática, 508-12
dieléctrica, 552-56
diferencia potencial eléctrica, 538-40
energía potencial eléctrica, 537, 542-43
recolección de la energía en el cuerpo humano, 156
seguridad y, 611-14
superficies equipotenciales, 543-48
Electrocardiograma, 490
Electrocomunicación, 524
Electrodomésticos
clasificación de potencia de los, 611-12
límites de eficiencia de los, 583-84
potencia y requerimientos de los, 581, 582
refrigeradores, 421, 583
seguridad eléctrica y, 611-14
Electrodos, 569
Electrolitos, 569
Electrolocalización, 524-25, 536
Electromagnetismo, 623, 626
ley de Ampère, 568
fuente de campos magnéticos, 637-41
Electrones
carga eléctrica de los, 506, 507
corriente y carga, 572
rayos X y, 678
velocidad de los, 549
valencia y, 508
Electroplacas, en las anguilas, 575-76
Electroscopio, 509
Electrostática, 506-526
Elevador
de un avión, 322-23
hidráulico, 307-8
peso aparente y, 244-45
Embolia pulmonar, 325
Emisión
fluorescencia, 629
de luz (auroras), 647
Emisividad, 387
Empuje de frenado (empuje en reversa), 206, 243
Enchufes
eléctricos, 613-14
de tierra, 613-14
***Endeavor*, nave espacial,** 807f
Endoscopio, 720
Energía, 140-41
almacenamiento en condensadores, 549-51
aislamiento térmico para la, 382-83, 384
cinética
definición de, 149
colisiones elásticas y, 196
electrón-volt, 548
energía de potencial gravitacional y, 154
movimiento contra, 185
de satélite orbitante, 243
teorema de trabajo-energía y, 148-52, 277-80
total en un cuerpo rígido que gira, 278
trabajo rotacional y, 277-80
traslacional, 278-79, 339, 354, 356, 358, 359
conservación de la, 141, 155-64, 319, 400, 660
de configuración, 237
de posición (o configuración), 152
de un sistema masa-resorte en movimiento armónico simple, 435-38
eléctrica, 568, 572-73, 583, 688
en colisiones
elásticas, 195-98
inelásticas, 195-96
en el teorema de trabajo-energía, 148-52, 277-79
hidroeléctrica, 665, 667, 672
interna, 339
de gases diatómicos, 358-59
de gases monoatómicos, 355
en termodinámica, 399-402
ley de la conservación de la, total, 156
mecánica, 158-61, 162-63
total, 158-61
potencial, 152-55
de un resorte, 152
del sistema masa-resorte en MAS, 435-38
eléctrica, 537, 542-43
fuerzas conservativas y, 157
gravitacional, 152-54, 235-37, 569
pozo y, 155
punto de referencia cero y, 155
punto cero, 355
radiante, 385
relación con el radio, la velocidad, y el movimiento circular, 243
total, 155-56
transferencia, propagación de la perturbación, 446
transferencia del calor y, 368
transportada por ondas, 447
Enfermedad pulmonar, 325
Enfisema, 325
Enrique I, y la longitud de la yarda, 1
Entropía, 411-14
Epicentro, de un sismo, 450
Equilibrio, 256, 261-66
estable, 266-69
estático, 262-66
rotacional, 264-65

traslacional, 119-21
inestable, 266-69
mecánico, 262
rotacional, 261-62
térmico, 340, 374
traslacional, 119-21, 261-63
Equivalente mecánico del calor, 369
Escala
de temperatura Celsius, 340-42
conversión a Fahrenheit, 341-42
conversión a Kelvin, 347
de temperatura Kelvin, 343, 346-49
conversión a Celsius, 347
Escala Rankine, 348
Escalofríos, 343
Escalpelo ultrasónico, 471
Escarcha, 374
Escuchar
anatomía del oído, 475
cómo proteger nuestros oídos, 480
región audible del sonido, 468
umbral de audición, 476, 494-95
Esferas homogéneas, 232-33
Esfuerzo
cortante, 301
de tensión, 301
Espacio libre
permeabilidad magnética del, 638
permitividad del, 550
Espectro
de colores, 721, 763
de luz, en rejillas de difracción, 773-74
electromagnético, 676
frecuencia de sonido, 468
visible, 723
visión a color, 811-13
masa, 631
Espectrómetro, 774
de masas, 629-31
Espectroscopia, 773-74
Espectroscopio, 599n
Espejismos, 714-16
Espejos, 729-40
esféricos, 730, 732-40
aberraciones de los, 740, 752
cóncavos (convergentes), 732, 734, 735-36, 738
convenciones de signos para, 736
convexos (divergentes), 732, 739-40
diagramas de rayos y, 734-40
ecuación de, 736, 737-38
parabólicos, 740, 806
planos, 730-32
Espiras, conductoras de corriente
campo magnético en el centro de las, 638-39
de alambre, fem inducida, 657-61, 663
torsión sobre, 634-35
Estación espacial *Mir*, 243
Estampido sónico, 488-91
Estrella del Norte, 256, 285
Evaporación, 374, 379, 380, 411
Expansión
de volumen, 350, 351, 353
isobárica, 405
isotrópica, 350
lineal (térmica), 350
térmica, 338, 340, 350-53
coeficientes para algunos materiales, 351
Experimento(s)
de Galileo con las pelotas giratorias, 105
de la cubeta de hielo, 527
de la doble rendija de Young, 761-64
criogénicos, 425
Explosiones nucleares, 469
Exploración espacial, y ayuda de la gravedad, 238
Exposición World's Columbian, en Chicago, 656
Extremo
azul del espectro visible, 782
rojo del espectro visible, 784

F

Factor(es)
de aumento lateral (A), 730, 731f, 737
de conversión, 13-15
de potencia, 696-97
Falla de San Andrés, 450
Farad (F), 536, 550
Faraday, Michael, 536, 658
Faraday (F), 536
Farenheit, Daniel Gabriel, 338
Fase(s)
de la materia, 374
gaseosa (vapor), 374
líquida, 374
sólida, 374
de plasma de la materia, 374
en circuitos ca
ángulo de fase, 694-96
diagramas de fase, 693-95
en la corriente y el voltaje, 687, 690, 697
en el movimiento de ondas
condiciones iniciales, 443-44
diferencias de fase, 443, 482
oscilaciones en y fuera de, 444-45
en la óptica de ondas
interferencia de doble rendija, 761
interferencia de la película delgada, 764-65
Fasores, 693
Fem inducida, 657-63, 659, 664-65, 669-71
Fibras ópticas, 705, 718-20
Física, razones para estudiar, 2
Flotabilidad, 313-18
densidad y, 316-18
en el aire, 315
fuerza de, 313-16
principio de Arquímedes, 314-16
Fluido(s), 297-98, 302-37. *Véase también* Flujo de fluidos; Gas(es); Líquido(s)
difusión de, 355-57
dinámica de, 319-23
ecuación de Bernoulli, 319, 322-23
flotabilidad y, 313-18
ideales, 319
ley de Poiseuille, 327-28
medición de la presión en, 309-13
presión y, 302-7
principio
de Arquímedes, 314-16
de Pascal, 307-9
tensión de la superficie y, 324-25
viscosidad de, 319, 325-27
Flujo
de fluidos, 319-21
estable, 319
incompresible, 319
laminar, 326
no rotacional, 319
no viscoso, 319
sangre, 321, 490
turbulento, 326
magnético, 658-59
en generadores eléctricos, 664-65
en la ley de Lenz, 660-61
fugas de, 669-71
inductores y, 691, 692
Fluorescencia, 584, 629
FM (frecuencia modulada), banda de radio, 676, 700, 760, 770
Foco
de un sismo, 450
newtoniano, 806
Forma
macroscópica de la ley del gas ideal, 345-46
de magnitud-ángulo (para vectores), 75, 76
microscópica de la ley del gas ideal, 345
Fosbury flop, técnica, 204
Fotografía. *Véase* Cámara
Fotosíntesis, 357
Frankel, R. B., 645n
Franklin, Benjamin, 523, 796
Frecuencia(s), 221-22
angular, de la masa oscilante sobre el resorte, 441
características, 454
color de la luz y, 811-12
de clasificaciones de ondas electromagnéticas, 676
de onda, 434-35, 447
de un péndulo, 443
del pulso, 483-84
fundamental, 455, 456, 493-96
para instrumentos musicales, 494-96
resonancia y, 697
resonante (natural), 454-59, 493
transmisión de, 698-99, 700
Frenos antibloqueo, 256, 281
Frente de onda plano, 706
Freón, 677
Fresnel, Augustin, 748
Fricción, 121-29
al caminar, 121
carga electrostática por, 510
cinética (deslizante), 122-125
coeficientes de, 122-23, 124f, 227
como fuerza no conservativa, 157-58
fuerza centrípeta y, 225-27
fuerzas de, 122-27
ejemplo de la nieve y la llanta de un auto, 103
energía total y, 162
estática, 122, 125, 127
resistencia al aire, 127-29
rodamiento, 122
Fuente(s)
coherentes, 761
puntual, intensidad de la, 475-76
Fuerza(s)
acción a distancia, 105
acción-reacción, 113-14
apareadas, 113-14
aplicada contra fuerza de fricción, 123
atractiva, 506, 542
balanceada, 104, 261
cantidad de movimiento y, 182
centrípeta, 216, 225-28, 232
como función de la posición, 146
componentes de, 111-12, 118
concurrente, 117, 261, 262f
conservativa, 157-58, 160-61
constante, 116, 141-45
de contacto, 105
de fricción, 121, 122-27, 124f
cinética (o deslizante), 122, 124f

estática, 122, 124f
de reacción, 113-14
de van der Waals, 324
del resorte ideal, 146-48, 434
eléctrica, 512-16
electromagnética, 505
electromotriz (fem), 570-71
alternador, 665
autoinducida, 691
contra, 667-68, 669
de movimiento, 662
inducida, 657-63, 659, 664-65, 669-71
externa, 199
flotante, 313-16
g de, 108
gravitacional
conservativa, 158
en atracción de la Tierra y la Luna, 105, 206, 232
fuerzas eléctricas *vs.*, 506, 516
péndulos y, 442, 443
trabajo contra, 144, 154
igual y opuesta, 113
instantánea, 116
interna neta del sistema cerrado, 187
magnética, 626-28
aplicaciones de, en partículas cargadas, 629-32
del campo magnético y, 626-28
en cables conductores de corriente, 632-35
en medicina, 642
entre dos cables paralelos, 640-41
movimiento y, 103-39, 182
concepto de, 104-5
definición de, 104
diagramas del cuerpo libre, 116-18
equilibrio traslacional, 119-21
inercia y, 105-6
primera ley de Newton, 105-6
segunda ley de Newton, 106-12
tercera ley de Newton, 112-15
multiplicada a costa de la distancia, 309
neta, 104
cambio en el movimiento, 182
definición de, 104
en la segunda ley del movimiento, 106-9
equilibrio y, 261
neta hacia dentro, 225
no conservativa, 157-58, 162-64
normal, 113-14, 122, 126-27
policiacas, y campos magnéticos, 524
por unidad de área (presión), 302-3
por unidad de masa, 108
presión de radiación y, 674
presión y, 303, 306-7
repulsiva, 506, 515-16, 542
restauradora, 433, 434
movimiento de la onda, 446, 448
propagación de la onda sonora, 472
torsión sobre la espira, 634
sobre el tendón de Aquiles, 120
variable, y el trabajo hecho por la, 145-47
Fugas de gas, 365
Funciones
senoidales, 440, 447, 449
trigonométricas
cómputo de radianes y, 219
solución de problemas utilizando, 22
Fusibles, 612-13
de base Edison, 612
tipo S, 612
Fusión, calor latente de, 375, 376
Fútbol americano, 151, 284-85

G

***g* (aceleración debida a la gravedad),** 49
Gadolinio, como material ferromagnético, 641
Galileo Galilei, 32, 50, 51, 105, 310, 792
Galvanómetro, 607-10, 635, 636f, 657
Gas(es), 297. *Véase también* Fluido(s)
calor específico de los, 373-74
como conductores térmicos, 380
compresibilidad para, 302
de invernadero, 367, 388
diatómicos, 354, 357-59
en la primera ley de termodinámica, 400
monoatómicos, 354, 355, 357, 359, 419
nobles (inertes), 357
teoría cinética de los, 354-57
velocidad del sonido en, 471-74
Gasolina, densidad de la, 305
Gatos, 469
Gauss, Karl Friedrich, 528
Generación de energía eléctrica, trabajo mecánico en la corriente eléctrica, 662-63
Generadores
ca, 663-65, 667, 668
eléctricos, 663-65, 667, 668
ultrasónicos (transductores), 470
Geomagnetismo, 644-47
Gigaelectrón volts (GeV), 548
Giga- prefijo, 8
Gilbert, William, 644
"Gimli Glider", 16
Giro del electrón, 641
Giroscopio, 284-85
Glaciares, movimiento de los, 179-80
Globos
de aire caliente, 338
meteorológico, 314-15
Golden Gate, 338, 352
Golf. *Véase* Deportes
Golpe de calor, 380
GPS (sistema de posicionamiento global), 646
Grad (unidad angular), 219
Grado de libertad, 358
Grados, y radianes, 217-19
Gráficas
posición *vs.* tiempo, 39
velocidad *vs.* tiempo, 43, 49
Gran Muralla China, vista desde el espacio, 810
Granos (peso), 179
Gravedad. *Véase también* Centro de gravedad (CG); Movimiento circular
aceleración debida a la, 49-56
artificial, 246
cero, 243, 245
específica, 318
ley de Newton sobre la, 231-37, 242
proyecciones horizontales, 81-82
***g* de fuerza,** 108
Guía de energía para los consumidores, 584

H

Halley, Edmond, 103
Henry (H), 691
Henry, Joseph, 658, 691
Herapath, W., 776
Hertz, Heinrich, 222, 434
Hertz (Hz), 222, 434
Hibernación y temperatura corporal, 344
Hielo
anisotrópico y birrefringencia, 781
como conductor térmico, 389
seco (bióxido de carbono sólido), 374
Hierro
como material ferromagnético, 641, 646
duro, 644
limaduras de, 624-25
núcleo de, y electroimanes, 642-44
núcleo de, y transformadores, 669, 670
resistividad y coeficiente de temperatura del, 577t
suave, 643
***Hindenburg*, teledirigible,** 297, 334
Hipermetropía, 795, 797-98
Hipotermia, 343, 380
Hojas polarizantes, 777
Hooke, Robert, 146, 299
Hornos de microondas, 230
Huesos
densidad del tejido óseo, 304
densidad mineral ósea (DMO), 304-5
tensión sobre los, 300-301
Humedad, 474
Huracanes, 283
Huygens, Christian, 238

I

Iceberg, 318
Imagen
de espejo, 730
invertida, 794
no resuelta, 807
por resonancia magnética (MRI), 626, 642
real, 730, 734, 736, 744, 804
virtual, 730, 734, 736, 744
Imanes
de barra, 624
de herradura, 626
electroimanes, 642-44
permanentes, 624, 625, 626, 641, 644
superconductores, 579, 626, 631, 643-44
Impedancia
análisis bioeléctrico, 578
en circuitos RLC, 693-97
Impulso, 182-85
Incidencia
ángulo de, 707, 711, 717
plano de, 707
Independencia de la trayectoria, 155, 157
Indicador, presión, 310
Índice de refracción, 710-11
interferencia de la película delgada, 764-66
negativo, 715
Inducción
mutua, 657n, 658f
pulsada (IP), 664
Inducción electromagnética, 656-85. *Véase también* Ondas electromagnéticas
aplicaciones de la, 664, 666
carga por, 511
contra fem, 667-68, 669, 691
definición de, 657

fem inducida, 657-63, 659, 664-65, 669-71
generadores e, 663-65, 667, 668
ley de Faraday de, 659-63, 669, 691
ley de Lenz, 659-63, 670, 671
riesgo para el equipo eléctrico, 661-62
transformadores y, 662-72
transmisión de potencia y, 671-72
Inductancia, 691
Inductor(es), 691, 694, 696
Industria de la construcción y conservación de la energía, 384
Inercia
electromagnética, 659, 660
en la primera ley del movimiento de Newton, 106
momento de, 270-73, 273-74, 283-84
polea, 275
rotacional, 270-71, 286
Infrasonido, 468-69
Ingravidez aparente, 243-44
efectos sobre el cuerpo humano, 245
Inspección en los aeropuertos, 664
Instituto Nacional de Normas y Tecnología (NIST), 5f, 6f, 641
Instrumentos
musicales, 455-58, 484, 491-96
de metal, 493
de viento, 492-93
ópticos, 792-818
color, 810-13
difracción y resolución en, 807-10
microscopios, 799-803 (*Véase también* Microscopios)
ojo humano, 793-99 (*Véase también* Ojo, humano)
telescopios, 803-7 (*Véase también* Telescopios)
Intensidad del sonido, 474-80
Intercambiador de calor, 385
Interfase aceite-agua, 765
Interferencia
constructiva, 451
condición para, 762, 766, 767, 774
con doble rendija, 761-63
ondas sonoras e, 482, 488
película delgada, 765-67
de la película delgada, 764-68
anillos de Newton, 767-68
planos ópticos, 767
recubrimientos antirreflectantes, 766, 768
destructiva, 451-52
con doble rendija, 761-63
condición para, 763, 766, 767
difracción de una sola rendija, 769
ondas sonoras e, 482
película delgada, 765-67
franjas
brillantes (máximos), 762-63, 769-71, 807-8
oscuras (mínimos), 762, 769-71
Interruptores de circuito, 612-13
Intervalo de tiempo, 39
Inversión
de polaridad de los polos de la Tierra, 644, 646
derecha-izquierda, 731
Inyección intravenosa, 312-13, 328
Iones
espectrómetro de masa, 630-31
positivos, 507
Ionización, 524
Islandia, manantiales de aguas termales, 397
Isobaras, 404-5, 415
Isometa, 406, 415
Isoterma(s), 403, 405, 408, 409, 423

J

Jansky, Carl, 808
Jefferson, Thomas, y el estándar de longitud, 1
Joule, James, 142, 369
Joule (J), 142
contenido energético de los alimentos, 368-69
conversión a electrón volt, 548
por kelvin (J/K), 411
por segundo (J/s), 580
Júpiter, 240-41, 646

K

Kelvin (K), 7, 347
Kelvin, Lord, 347, 417
Kepler, Johannes, 216, 238
Kilocaloría (kcal), 368
Kiloelectrón-volt (keV), 548
Kilogramo (kg), 4-5, 7, 8-9
-metro cuadrado (kg • m^2), 270
-metro cuadrado por segundo (kg • m^2/s), 280
por metro cúbico (kg/m^3), 303
Kilohms (Ω), 573
Kilómetros por hora (km/h), 33
Kilowatt (kW), 165
-hora (kWh), 583
Kirchhoff, Gustav, 599n
Klistrones, 677

L

Lado
de la imagen de los lentes, 741
del objeto, 741
Land, Edwin H., 776, 811
Láser
en la cirugía de ojos, 792, 797
para corregir miopía, 797
Latas de aerosol, eliminación de, 406
Leibniz, Gottfried, 103
Lente(s)
aberraciones en, 752-53
anteojos correctivos, 795-97
antirreflectantes, 766-67, 768
bicóncavos, 740, 741, 747
biconvexos, 740, 741, 744, 745-46, 748
bifocales, 796
combinaciones de, 748-50
convenciones de signos en lentes delgadas, 745
cristalino, 793f, 794
de aumento, 799-801
de contacto, 796
de Fresnel, 748
de inmersión en aceite, 810
diagramas de rayos para, 741, 743, 744, 747
dioptrías, 751, 794
erectoras (inversoras), 804
interferencia y simetría en películas delgadas, 767-68
lado de la imagen, 741
lado del objeto, 741
media imagen, 746
menisco, 741, 751
microscopio
compuesto, 801, 802
simple, 799
negativa, 745
objetivo, 801, 803, 808
óptica, 740
para faros, 748
para ojos. *Véase* Anteojos
perfecta, 715
polarizados, 777, 779
positiva, 745
trifocales, 796
Lenz, Heinrich, 659
Ley(es)
de Boyle, 343
de Bragg, 774
de Charles, 344, 345f
de conservación de la cantidad de movimiento lineal, 186
de conservación de la energía mecánica, 158
de conservación de la energía total, 156
de Coulomb, 513-14, 517
de Gauss, 528-29
de gravitación (Newton), 231-37, 242
de Hooke, 146, 299, 434, 441
de inducción de Faraday, 659-63, 669, 691
de la inercia, 106 (*Véase también* Primera ley de movimiento de Newton)
de Laplace, 325
de las áreas (segunda ley de Kepler), 239-40, 282-83
de las cargas (ley de carga-fuerza), 506
de las órbitas (primera ley de Kepler), 239
de Lenz
circuitos ca y, 691, 692, 699
fem autoinducida, 670, 671
ley de inducción de Faraday y, 659-63
de los periodos (tercera ley de Kepler), 240
de los polos (ley polo-fuerza), 624
de Malus, 777
de movimiento (*Véase* Leyes de Newton para el movimiento)
de Newton para el movimiento, 103, 105-14
diagramas de cuerpo libre y, 116-18
en la forma de los componentes, 11-12
peso en, 107-11
primera, 105-6
segunda, 106-12
tercera, 112-15
de Ohm, 574, 687, 693
de Poiseuille, 327-28
de reflexión, 707, 708, 734
de Snell, 709, 711, 712, 717
de Stefan, 386-87
del cuadrado inverso, 231, 242
del gas, 343-49
del gas ideal, 344-45, 398
forma macroscópica del, 345-46
proceso adiabático para, 406-7
proceso isobárico para, 404-5
proceso isométrico para, 405-6
proceso isotérmico para, 403, 408, 409
temperatura absoluta y, 347, 348-49
termodinámica (*Véase* Termodinámica)
Libra por pulgada cuadrada (lb/in^2), 303

Limitantes de expansión, 351-52
Límite(s)
de difracción, 715
elástico, 141, 297, 299
proporcional, 299
y ondas, 452-53
Línea(s)
de tierra, 611f, 612-13
de transmisión eléctrica, 661
eléctricas de fuerza (líneas de campo eléctrico), 520-22
isogónicas, 646
Linternas, 664
Líquido(s), 297. *Véase también* Fluido(s); Expansión térmica
calor específico de, 370-72
como conductores térmicos, 380
difusión de, 355-57
esfuerzo de volumen, módulo de volumen y, 302
velocidad del sonido en, 471-72
Litotripsia, 470
Litro (L), 8-9
Llamaradas solares, 647
Localización por eco, 469-70
Logaritmos, 404
comunes, 404, 476-79
naturales, 404, 605
e intensidades de sonido, 476-79
Longitud
cambio en, y módulo de Young, 299-301
del arco, 217-19
del espejo, 731
de onda
clasificaciones de ondas electromagnéticas, 676
color de la luz y, 811-12
de luz, experimento de la doble rendija, 763-64
de luz, medición de, 773-74
definición de, 447
efecto Doppler y, 485
poder de resolución de los instrumentos ópticos y, 810
refracción en el ojo humano, 713-14
equivalente, 13
focal, 733, 736, 741
cambio fraccional en, 299, 350
unidades SI de, 3-4, 10
unidades inglesas, 10
Lubricación, 123
Luna
atracción gravitacional entre la Tierra y la, 105, 206, 232
experimento sobre la aceleración debida a la gravedad, 50
masa sobre la, 5
movimiento angular de la, 286
peso sobre la, 108
Luz. *Véase también* Óptica física (óptica de ondas); Reflexión; Refracción
blanca, 721, 723, 812
del árbol de Navidad, 596-97
del cielo, polarización de la, 760
determinación del color de la, 811-13
dispersión de la, 453, 721-23
dispersión atmosférica de la, 782, 784
linealmente polarizada (luz plano polarizada), 776
longitud de la onda de, 763-64, 773-74
monocromática, 721
no polarizada, 775
origen de la onda electromagnética, 673
velocidad de la (*Véase* Velocidad de la luz)
visible, 677, 705, 769

M

Mach, Ernst, 490
Magnetismo, 623-55. *Véase también* Electromagnetismo
campos magnéticos [*Véase* Campo(s) magnético(s)]
fuerza magnética (*Véase* Fuerza magnética)
geomagnetismo, 644-47
ley de fuerza entre polos (ley de los polos), 624
materiales magnéticos, 641-44
polos magnéticos, 624, 646
Magnetita, 642, 644, 645
Magnetohidrodinámica, 631-32
Magnetrones, 677
Magnitud, 36
Malus, E. L., 777
Manómetros, 309-10
Mapas topográficos, 544-45
Máquina(s)
de calor
biológica, 420
cíclica, 417, 422, 424
eficiencia térmica y, 416-22
ideal, 422-24
de Atwood, 136, 292
de movimiento perpetuo, 410, 414
de vapor, 397-415
Marca de Plimsoll, 334
Marco de referencia, 90
Mareas, 433
Mariana, Fosa, 297
Mars Climate Orbiter, conversiones de unidades y fallas de, 16
Mars Exploration, vehículos de exploración de la expedición, 34, 186-87
Marte
caída libre y el Mars Polar Lander, 56
cielo rojo de, 760, 784
distancia y las sondas espaciales *Viking*, 674
MAS. *Véase* Movimiento armónico simple (MAS)
Masa
centro de, 198-204
como propiedad fundamental, 108
fórmula de, 345
inercia y, 106
molecular, 346, 631
movimiento y, 178
segunda ley de Newton sobre la, 106-10
unidades SI para, 4-5, 10
unidades inglesas, 9
Masas y medidas, como frase, 5
Materiales
calor específico de los, 370
calores latentes y temperaturas de cambio de fase de, 375
coeficientes
de expansión térmica de, 351
de temperatura de la resistividad, 577
conductividad térmica de, 381
constantes dieléctricas para, 553
densidades de, 304
magnéticos, 641-44
módulos elásticos para, 300
resistividades de, 577
termoeléctricos, 156
velocidad del sonido y, 472
viscosidades de, 327
voltajes y, 546
Maxwell, James Clerk, 656, 673
Mecánica. *Véase también* Dinámica; Cinemática
estudio del movimiento, 32
celestial, 32
Medición, 1-20. *Véase también* Unidades inglesas; Unidad(es) SI
análisis de unidades, 10-12, 13
angular, 217-19
cifras significativas y, 17-20
conversiones de unidades, 12-16
de presión, 309-13
sistema métrico, 3, 7-10
unidades SI, 3-7
unidades estándar, 3
Medida del desorden, 411, 413
Megaelectrón volts (MeV), 548
Megaohms (MΩ), 573
Mercurio
barómetro, 309f, 310, 311
campos magnéticos, 646
densidad del, 305
en los termómetros de líquido en vidrio, 340-41
resistividad y coeficiente de temperatura, 577t
Metales, como conductores térmicos, 379
Metano, 388, 536
Método
aditivo de producción de color, 811
analítico de componentes (vectores), 73, 75-80
científico, 51
componente de la suma de vectores, 75-80
de mezclas, 372-73
de punta a cola (método del triángulo), 73-74, 77
del polígono, 74
geométrico de la suma de vectores, 73-74
Metro (m), 3-4, 7
cúbico (m), 8
por segundo (m^3/s), 327
-newton (m • N), 259
por segundo (m/s), 33
cuadrado (m/s^2), 40
Mho, 568
Microamperes (μA), 572
Microchips, computadora, 509
Microcoulomb (μC), 507
Microfarad (μF), 550
Microgravedad, 244n
Microondas, 677
Microscopios, 799-803
compuestos, 801-3
poder de resolución de, 808-9
simples (lente de aumento), 799-801
sistema de lentes compuestas de los, 748
Microteslas (μT), 626
Miliamperes (mA), 572
Milibar (mb), 311n
Milihenry (mH), 691
Mililitro (mL), 9
Militeslas (mT), 626
Millas por hora (mi/h), 33
Miopía, 795-96, 797
Modelo del sistema solar del átomo, 506
Modern Magic, 733
Modos de vibración normales (modos resonantes), 454
Módulos
elástico, 298-302
de corte, 301
de volumen, 301-2, 471

de Young, 299-301, 471
Mole (mol), 7, 345
Moléculas
masa de las, y espectrómetro de masa, 631
Momento
de inercia, 270-73
de objetos de densidad uniforme, 273
eje paralelo y, 273-74
para la molécula diatómica simétrica, 358
patines de hielo y, 283-84
de torsión o par de fuerza, 259-61
abrir puertas y, 274
cantidad de movimiento angular y, 281-83, 285, 286
contrario, 668
definición de, 259
en el motor cd, 636
magnético, en la malla conductora, 634-35
neto, 270, 280, 281
trabajo rotacional y, 277
yoyo y, 276
Moneda, Estados Unidos, 8
Monopolo magnético, 624
Motor(es), 656
contra fem de los, 667-68
cd, 636
de combustión interna, 415, 418
de gasolina, 417
diesel, 397
eléctrico, 636
Movimiento. *Véase también* Componentes del movimiento; Fuerza y movimiento; Fricción; Cinemática; Leyes del movimiento de Newton; Movimiento de un proyectil; Movimiento rotacional
armónico simple (MAS), 434-38
amortiguado, 445-46
condiciones iniciales y fase, 443-44
ecuaciones de movimiento para, 439-46
energía y velocidad del sistema masa-resorte en el, 435-38
movimiento circular y, 439, 441
velocidad y aceleración en, 444-45
circular, 216-55. *Véase también* Gravedad; Leyes del movimiento planetario de Kepler
aceleración angular, 228-31
aceleración centrípeta, 223-25, 230
fuerza centrípeta, 225-28
medición angular, 217-19
satélites geosincrónicos y, 234, 236
uniforme, 223-28, 439, 441
velocidad angular, 217, 219-22
curvilíneo, 67, 71-72, 223
de ondas, 433, 446-49
de rodamiento, 257-59, 276, 279-80, 281
de rotación, 256-96. *Véase también* Dinámica rotacional
cuerpos rígidos, traslaciones y rotaciones, 257-59
definición de, 257
ecuaciones para, 278
equilibrio y, 261-64
estabilidad, centro de gravedad y, 266-69
movimiento angular y, 280-86
movimiento de traslación *vs.*, 257-58
torsión, 259-61
de un proyectil, 81-89
cambio en el, 182
en ángulos arbitrarios, 82-89
horizontal, 81-82
vertical, 52-55
deslizante, 279-80, 281
en dos dimensiones, 67-102
componentes de, 68-73
curvilíneo, 67, 71-72, 223
de un proyectil, 81-89
suma y resta de vectores, 73-80
velocidad relativa, 90-94
interno, 202
lineal, 38-40, 46
orbital, 234, 236, 243. *Véase también* Movimiento circular
periódico, 434
planetario, leyes de Kepler del, 232, 238-46
rectilíneo no uniforme, 39-40
total, 178, 180-81
traslacional, 257-59, 278
uniforme, 38-39
Multímetros, 610, 611f
Multiplicación, y cifras significativas, 18, 19
Murciélagos, localización por eco, 469-70
Músculos, y torsión, 260-61

N

Nano- prefijo, 8
amperes (nA), 572
coulombs (nC), 507
farad (nF), 550
Nanómetro (nm), 8, 710n
Nanotecnología, 8, 156
Naturaleza ondulatoria de la luz, 760
Navegación, y componentes de fuerza, 115
Naves espaciales. *Véase también* Satélites
Cassini-Huygens, 238
Mars Climate Orbiter, 16
Mars Exploration, 34, 186-87
Mars Polar Lander, 56
Odissey, 129
sondas espaciales *Viking*, 674
transbordador espacial, 177
transbordador espacial *Endeavor*, 807f
Neodimio, como material ferromagnético, 641
Neuronas, 552-53
Neutrón
carga eléctrica del, 506, 507
Newton (N), 107
-metro (N • m), 142. *Véase también* Joule (J)
por ampere-metro (N/m), 146
por metro cuadrado (N/m^2), 298, 299, 301, 302-3
-segundo (N • s), 182-83
Newton, Isaac, 32, 103, 104, 178, 231, 232, 721, 767. *Véase también* Leyes de Newton para el movimiento
Níquel
como material ferromagnético, 641 646
resistividad y coeficiente de temperatura del, 577f
Nitrógeno
moléculas de, en el aire, 358, 359
Nivel
de decibel, 477
de intensidad del sonido, 476-79
daño al oído, 480
ecuación para el, 477
No metales, como conductores térmicos, 379
Notación científica (potencias de 10), 23
Nubes, 129, 523, 524-25
Número(s)
de Avogadro, 345-46
exactos, 17
Mach, 490-91
medidos, 17

O

Objeto
del círculo de referencia, 440
virtual, 736n, 748, 804
Observatorio(s)
Hale, 806
Herschel, 729
Yerkes, 806
Ocular, 801, 803
Oersted, Hans Christian, 637
Oficina Internacional de Pesos y Medidas, 4
Ohm (Ω), 568, 573, 690, 692, 693
Ohm, Georg, 568, 573
Oído humano. *Véase también* Escuchar
anatomía del, 475
dolores de oído y presión atmosférica, 311
ondas estacionarias y, 311
región audible del sonido, 468
tiempos de exposición dañinos, 480
Ojo, humano, 792, 793-99. *Véase también* Anteojos
ajustes de enfoque, 794
defectos de visión, 795-99
estructura del, 793-94
luz polarizada *vs.* no polarizada, 777
protección ultravioleta, 677-78
refracción y longitud de onda, 713-14
resolución del, y criterios Rayleigh
visión de color, 810-11
Ollas de presión, 378
Onda(s), 433, 447
características de las, 447-48
comparadas con las oscilaciones, 447
cuerpo y, 450
de agua, 448, 449, 761, 768
de choque, 488-90
de luz, 488
de potencia, 675-76
de proa, 488, 489f
de sonido, 448, 468-71
definición de, 447
difracción de (*Véase* Difracción)
ecuaciones de movimiento de, 439-46
electromagnéticas, 672-78
circuitos osciladores y, 699
clasificación de onda y frecuencias y longitudes de, 676
de potencia, 675-76
de radio, 676-77
de televisión, 676-77
fuente de, 673f
luz visible, 677
microondas, 677
presión de radiación, 674-75

radiación infrarroja, 385-86, 677
radiación ultravioleta, 677-78
rayos X, 678
tipos de, 433, 675-78
velocidad en el vacío, 674
estacionarias, 454-59, 492
longitudinales (compresibles), 448-49, 450, 475
movimiento de las, 446-49
no dispersivas, 453
P (primaria), 450
periódica, 447
planas, 673
propiedades de las, 449-53
S (secundaria), 450
sísmicas, 450
sonido y, 448, 468-71
superficie de, 450
tipos de, 448-49
transversales (de corte), 448-49, 450
ultrasónica, 469-71
Onnes, Heike Kamerlingh, 579
Óptica física (óptica de ondas), 760-91
anillos de Newton, 767-68
difracción, 768-75 (*Véase también* Difracción)
dispersión atmosférica de la luz, 782, 784
efecto Doppler, 488
experimento de Young de la doble rendija, 761-64
geométrica, 705-6
interferencia de la película delgada, 764-68
naturaleza ondulatoria de la luz, 760
planos ópticos, 767
polarización, 775-82 (*Véase también* Polarización)
Órbita(s)
elípticas, 239
ley de Kepler sobre, 239
satelital geosincrónica, 234, 236
satélites y, 241-43
Orden, y entropía del sistema, 411, 413
Órgano de tubos, 492, 494
Ortoqueratología (Ortho-K), 797
Oscilación, 433
amortiguación y, 445
cambios de fase y, 443-44
comparada con las ondas, 447
de los electrones y las ondas electromagnéticas, 673
ecuación del movimiento y, 439-42
en fase y desfasada, 443-44
en un pozo parabólico de potencia, 437
y la energía, 435-36
Oscilador de tubo neón (circuito destellante), 606-7
Ósmosis, 357
Osteoporosis, 304-5
Otto, Nickolaus, 417
Oxígeno
disfunción del, 356, 357
moléculas diatómicas en el aire, 358, 359

P

Paneles solares, 389
Pantallas
de osciloscopio, 629
LCD (de cristal líquido), 374, 629n, 783
Parábola, 83
Pararrayos, 523, 527
Par (par de fuerzas iguales u opuestas), 261
Pares de fuerza, 113-14
Partícula(s)
cargadas
aplicaciones en campos magnéticos, 629-32
auroras en los cinturones de Van Allen, 647
movimiento en los campos magnéticos, 646-47
regla del movimiento y la mano derecha, 627-28
dispersión de la luz y, 782, 784, 785
sistema de, 198-200
Pascal (Pa), 303
-segundo (Pa • s), 326
Pascal, Blas, 303
Peces y flotabilidad, 317
Película(s)
de aceite, 765
3D, 777
Pelotas
colisión completamente inelástica, 194
colisiones y, 196, 197-98
energía cinética y, 154
intercambios de energía, 161
momento de inercia, golpear pelotas de béisbol, 273
velocidad angular, sujeta a una cuerda, 282
velocidad y conservación de la energía, 160
Péndulo, 441-42, 443, 459
balístico, 212
Percepción del sonido, 467, 494-95
Pérdida
de peso, primera ley de termodinámica aplicada a la, 401
del conocimiento, 108
I^2R, 580, 612, 643, 668, 670, 671, 687
Perihelio, 236, 239
Periodo(s), 221-22
de onda periódica, 448
de un objeto o masa que oscila en un resorte, 441
de un péndulo, 441, 443
en movimiento armónico simple, 434-35
ley de Kepler de, 240
Permeabilidad
del espacio libre, 638
material del núcleo, 643
relativa, 643
Permisividad
del espacio libre, 550
dieléctrica, 555
Peso
aparente, 245
en la segunda ley de movimiento de Newton, 107-11
fuerza de flotabilidad y, 316
gravedad artificial y, 245-46
masa *vs.*, 5, 107-8
Pez eléctrico, 505, 524-25, 536. *Véase* Anguilas eléctricas
Picocoulomb (pC), 507
Picofarad (pF), 550
Pie
-libra (ft-lb), 142
por segundo (ft-lb/s), 165
por segundo (ft/s), 33
cuadrado (ft/s^2), 40
Pieza ocular, 801, 803
Pigmentos, 812-13
Pilotos de aviones de combate y *g* de fuerza, 108
Pintura, y mezcla de pigmentos, 812-13
Pistola paralizante Taser, 505, 524
Pistón cilíndrico, 401
Placa(s)
colesterol y, 321
paralelas
campo eléctrico entre, 522
carga en las nubes de tormenta, 524-25
como condensador, 549-51
energía potencial eléctrica, 537
energía potencial eléctrica *vs.* potencial, 539
superficies equipotenciales y, 544
Plano(s)
de incidencia, 707
inclinado, 117
ópticos, 767
Plantas eléctricas, 584, 665, 667, 686
Plasma, 569
Plásticos, ópticamente activos, 782
Poder de resolución del microscopio, 809-10
Poise (P), 326
Poiseuille (Pl), 326
Poiseuille, Jean, 326, 327
Polaridad inversa
de las anguilas eléctricas, 576
en los circuitos ca, 690, 692, 697, 699
generadores ca y, 663
motores cd y, 636, 667
Polaris (Estrella del Norte), 256, 285
Polarización de la luz, 775-82
LCD y, 783
por absorción selectiva (dicroísmo), 776-78
por reflexión, 778-70
por refracción doble, 780-82
separación de cargas electrostáticas y, 511-12
Polarizadores cruzados, 777f, 781f, 782, 783
Polaroid, 775, 776, 811
Poleas e inercia, 275
Polímeros, 385, 698, 776
Polos
eléctricos, 521
geográficos *vs.* magnéticos, 646
magnéticos, 624, 646
Posición
de equilibrio, 147
energía de la, 152
gimnástica de la cruz de hierro, 266
vs. gráficas de tiempo, 39
Potencia, 164-67
aparatos domésticos, 611-12
caballo de, 165
corriente ca y, 687-88
de aumento, 799-801, 802
de las lentes (P), 751, 794
de resolución de un microscopio, 808-10
definición de, 164
eléctrica, 580-84
instantánea, 687
promedio, 687-88, 696
rotacional, 277
Potencial eléctrico, 539, 552-53
Potencias de 10
en el sistema métrico, 7-8
notación (notación científica), 23
Potenciómetro, 622
Pozo
energía potencial, 155, 235
parabólico de potencia, 437
Precesión, 285
Prefijos para las unidades métricas, 7f
Presbiopía, 795
Presión, 302-13
absoluta, 310
atmosférica, 306-7, 309-13

definición de, 302
diastólica, 312-13
fuerza y, 303, 306-7
manométrica, 310
principio de Pascal y, 307-9
profundidad y, 305-7
radiación, 674-75
sanguínea, 312-13
tasa de flujo y, 322f
temperatura *vs.*, 346, 378
Primera ley de movimiento de Newton, 105-6, 107n. *Véase también* Leyes de Newton para el movimiento
conservación del movimiento lineal, 186
equilibrio traslacional, 261
Primera ley de termodinámica, 399-402
bombas de calor y, 421
ciclo de la máquina de calor, 417
proceso
adiabático, 406-7, 408
isobárico, 404
isométrico, 405-6
isotérmico, 403, 408, 409
resumen de procesos, 409
Principio(s)
de Arquímedes, 314-16
de Pascal, 307-9
de superposición,
campos eléctricos, 518-20
interferencia de ondas, 449, 451f, 454
Prismas, 760
dispersión por, 721, 723
en fibras ópticas, 720
reflexión
interna en, 717
y refracción, 709
rejilla de difracción *vs.*, 773-74
Proceso(s)
adiabático, 406-7, 408, 413, 423
de presión constante, 404
del volumen constante, 405
dirección de los, 410-11
irreversible, 399
isocórico, 405
isométrico, 405-6
isotérmico, 403, 408-9, 423
isovolumétrico, 405
para el gas ideal, 403-9
reversible, 399, 423
termodinámicos, 399
Propagación
de errores, 17
de ondas, 433, 446, 449, 472
Propiedad óptica
anisotrópica, 781
isotrópica, 780
Propulsión
a chorro, 114, 204-6
vía magnetohidrodinámica, 631-32
Protones
carga eléctrica de los, 506-7
potencial eléctrico de los, 539-40, 541-42
Proyectiles, 67
Puente(s)
Tacoma Narrows, 458
vibración resonante en los, 458
Pulmones, 325, 357, 407
Pulsación de onda, 433, 447
Pulso(s), 483-84
del cuerpo humano, 313
Punto(s)
cercano, 794, 795-96, 798, 799, 800
de agua triple, 348
de condensación, 374
de congelación, 374, 375, 378
de cruce, 736
de ebullición, 375, 378
de equilibrio, 199
de fusión, 374
de hielo, 341
de referencia, 155
focal, 732, 735-36, 741
lejano, 794, 795-96
Purificadores de aire, y energía eléctrica, 505, 512

Q

Químicos forenses, 630

R

Radar, 469, 488. *Véase también* Efecto Doppler
Doppler, 491
Radiación
cuerpo negro, 387
electromagnética, 672-78 (*Véase* Ondas electromagnéticas)
infrarroja, 385-86, 388, 677, 808
no visible, para telescopios, 808
transferencia de calor por, 385-90
ultravioleta, 677-78, 808
Radián (rad), 217-19
Radio
de curvatura, 732, 733, 736, 741
frecuencia de la resonancia y, 698-99, 700
ondas de, 676-77, 771
recepción de, 760, 770-71
circuitos osciladores y, 699
Radiotelescopio VLA, 808
Radón (Ra), 359
Raíz cuadrática media (rms)
corriente, 688
velocidad de las moléculas de gas, 354, 356
voltaje, 688
Rapidez, 33-34
aceleración y, 40
angular, 217, 219-21
conservación de la energía y, 160
de animales varios, 32
de escape, 241
de flujo de fluido, 319-21
de la luz, 4
e índice de refracción, 710, 721
y los campos eléctricos y magnéticos, 673
de las ondas electromagnéticas en el vacío, 673-74
de onda, 448
del electrón, acelerado, 549
del sistema masa-resorte en MAS, 435-38
del sonido, 471-74
energía cinética y, 150-52
instantánea, 34
masa *vs.*, 151
molecular, 355, 356
promedio, 33-34
raíz cuadrática media (rms), 354, 356
relación con radio, energía, y movimiento circular, 243
tangencial, 220-21, 241-43, 258
tierra, 94
Rarefacciones de las ondas sonoras, 448-49, 468, 482
Rayleigh, Lord, 782, 807
Rayo(s)
de luz, 706, 708, 711
extraordinario, 781
focal, 734, 742, 743
gamma
definición de, 678
observación telescópica de los, 808
láser, 761, 773
ordinario, 781
paralelo, 734, 741, 743
principal, 734
X
absorciometría de energía dual de rayos X (DXA), 305
aceleración de electrones, 540
como un tipo de onda electromagnética, 678
TC, 928
difracción de, 774-75
dispersión de, 858-60
efectos biológicos de los, 924
en el Sol, 851
fuente en la constelación Cygnus, 842
observación telescópica de, 808
radiación de, 902
Reactancia
capacitiva, 689-91, 693, 697
inductiva, 691-92, 697
Rectángulo, cómo encontrar el área de, 22
Recubrimiento no reflectante para lentes, 766-67, 768
Recursos naturales y eficiencia eléctrica, 583-84
Redondeo, 18-20
Reducción
de circuitos, 560f, 597-98
de masa y propulsión a chorro, 205
de resplandor, 779, 780f
Referencia, desplazamiento, 148
Reflexión, 707-8
ángulo de, 707
cambios de fase y, 764
del sonido, 481
difusa (irregular), 707-8, 709
especular (regular), 707, 709
interferencia de película delgada, 764-65
interna total, 717-18, 719
ley de, 707, 708, 734
onda de, 452-53
polarización por, 778-80
Refracción, 708-17
ángulo de, 709, 711, 712, 717
atmosférica, 716-17
de onda, 453
definición de, 708
del sonido, 481
índice de, 710-11, 714-15, 723
negativa, 715
polarización por doble, 780-82
y longitud de onda en el ojo humano, 713-14
Refrigeradores, 421, 583
Región
audible, 468
infrasónica, 468
ultrasónica, 469
Regla de la mano derecha, 220, 260
corriente inducida y, 659
para cables conductores, 632-33
para cargas en movimiento, 627-28
para fuentes, 638, 639
presión de radiación y, 674
Reglas de Kirchhoff, 599-604, 608-9, 610
aplicación de las, 603
primera regla (teorema de la unión), 600, 608
segunda regla (teorema de las mallas), 600-602, 604, 693-94
Regulación fisiológica de la temperatura corporal, 380
Rejillas
de difracción, 772-74
de precisión, 772-73
de reflexión, 772-73

de transmisión, 772
réplica, 773
Relámpago, 505, 523, 524
Reloj(es)
atómicos, 5, 6f
totalmente ópticos, 5n
solar, 5
Resbalamiento, 258-59
Resistencia, 571. *Véase también* Resistencia del aire; Resistencia eléctrica
análisis de la impedancia bioeléctrica, 578
de un cable, 574-75, 577, 579
definición de, 573
del aire, 127-29
alcance de un proyectil y la, 87-88
caída libre y la, 50-51, 163
en circuitos ca, 687-89
en el cuerpo humano, 574, 577
en paralelo, 593-97
en serie, 592-93
factores influyentes, 574-75
óhmica, 574
resistividad, 576-79
temperatura y, 574, 577-79
térmica, 384
Resistividad, 576-79
Resistor(es), 592-604. *Véase también* Resistencia eléctrica
carga de un condensador a través de, 604-5
definición de, 573
descarga de un condensador a través de, 605-7
en circuitos RLC, 693-94, 696
en combinaciones serie-paralelo, 595-96, 597-99
en derivación, 607-9
en paralelo, 593-97
en serie, 592-93
multiplicador, 610
Resolución
de apertura circular, 808-9
de problemas, 20-24
en instrumentos ópticos, 792, 807-10
Resonancia
absorción de, 385
de circuitos ca, 697-700
de ondas, 458-59
frecuencia de, 697
mecánica, 458-59
Resta de vectores, 74
Retina, 793, 794, 795, 811
Revolución, 216, 221-22, 257
Industrial, 397
Revoluciones por minuto (rpm), 219-20
Rodamiento acelerado sin resbalar, 258
Roentgen, Wilhelm, 678
Rotación, 216, 257, 258. *Véase también* Eje de rotación
Ruido, 467
reducción del, 452, 482-83
Rumford, Conde de (Benjamin Thompson), 369

S

Sangre. *Véase también* Corazón, humano
acumulación de, en la parte inferior del cuerpo, 108
cálculo de la densidad de la, 23-24
difusión de la, 357
efectos de ingravidez en la, 245
presión de la, 312-13
separación de componentes de la, 224-25
sistema capilar y, 14-15, 357
tasa de flujo de la, 321, 490
transfusiones de, 312-13, 328
Satélites. *Véase también* Nave espacial
de la Tierra, 241-46
energía cinética orbital, 243
navegación en el sistema solar, 675
observatorios de radiación no visible, 808
órbita geosincrónica de los, 234, 236
Sedimentación, 225
Segunda ley de movimiento de Newton, 106-12, 118, 149. *Véase también* Leyes de Newton para el movimiento
forma rotacional de la, 270, 274
fuerza centrípeta y, 227-28
ley de gravitación y, 233
movimiento en la, 182, 185-86
sustentación de un avión y, 323
Segunda ley de termodinámica, 410-14, 417, 420, 422
Segundo(s), 5, 6, 7
Seguridad
aviones, y radar Doppler, 491
cinturones de seguridad y bolsas de aire, 112-13, 186
conducir en una noche lluviosa, 709
eléctrica, 611-14
Selector de velocidad, 630
Semiconductores, 508-9, 577t, 579
Separación angular, 807
Serie
baterías en, 570
conexión de condensadores, 557, 558, 559, 560
resistores en, 592-93
Silenciadores e interferencia destructiva, 452
Síndrome
de la cara hinchada, 245
de patas de ave, 245
respiratorio agudo severo (SARS), 386
Sirenas de niebla, 474
Sismógrafo, 450, 556f
Sismología, 450
Sistema(s)
aislados (cerrados), 156, 187, 192, 413
cgs, 7
de calefacción por aire forzado, 385
de distribución de energía eléctrica, 671-72
de tres cables, 611-12
decimal, 7-8
eléctrico estadounidense, 689
eléctrico inglés, 689
Internacional de Unidades (SI), 3-10
masa-resorte, 435-38
térmicamente aislados, 398
métrico, 3, 7-10. *Véase también* Unidad(es) SI múltiplos y prefijos para las unidades métricas, 7
Snell, Willebord, 709
Sobretonos, 496
Solenoides, 639-41, 643, 664
Sólidos, 297-302
calor específico de, 370-71
como conductores térmicos, 380
expansión térmica de, 340, 350-52
módulos elásticos y, 298-302
velocidad del sonido en, 471-72
Sonar, 469, 488
Sonido, 467-504. *Véase también* Efecto Doppler
de instrumentos musicales, 491-96
difracción del, 481, 769
fenómenos del, 481-84
intensidad del, 474-80
interferencia en el, 482-84
límite superior del, 471
ondas de, 448, 468-71
rapidez del, 471-74
Sonoridad o intensidad sonora, 476, 494-95
Sugerencias y estrategias para resolver problemas
cambios de fase, 376, 377, 379
componentes de movimiento, 70
convención de las señales de voltaje, 600
conversiones entre grados Celsius y Farenheit, 342
corriente en uniones, 600
cuartos poderes de la temperatura, 388
diagramas de cuerpo libre, 118
ecuación de simplificación a través de la cancelación, 145
ecuación del espejo esférico, 739
ecuaciones cinemáticas, 46, 73
ecuaciones para movimiento armónico simple, 442
efecto Doppler, 487
equilibrio estático, 266
fuerza del resorte, 147
funciones trigonométricas, 219
ley de fuerza de cargas en la suma de vectores, 515
logaritmos naturales, 404
movimiento de un proyectil, 87
movimiento vertical de un proyectil, 55
movimientos de rotación y traslación apareados, 276
niveles de aceleración de la gravedad, 234
resistores en paralelo, 595
respuestas "correctas", 19-20
segunda ley de Newton, 118
temperaturas Kelvin y la ley del gas ideal, 348
teorema de trabajo-energía, 151
velocidad relativa, 92
Sulfato de iodoquinina (herapatita), 776
Suma
con cifras significativas, 19
de vectores, 73-80
en tres dimensiones, 79
ley de Coulomb, 514-15
método analítico de los componentes, 75-80
métodos geométricos para la, 73-74
movimiento rectilíneo y, 180-81, 187
Superficies aerodinámicas, 128
Superficies
equipotenciales, 543-48
campo eléctrico de la tierra y las, 546
conductor de carga externa, 548
gravitacionales, 544-45
líneas del campo eléctrico y las, 547
gaussianas, 528

T

Tasa
de flujo, 320f
presión y, 322f
promedio, 327
del tanque, 323
del volumen, 320
de lapso atmosférico, 362
de sedimentación de eritrocitos, 225
de tiempo
del cambio de la cantidad de movimiento angular, 280
del flujo de calor, 380
para efectuar el trabajo (potencia), 164
TC (tomografía computarizada), 678
Teclados de computadora, 556
Teléfonos celulares, 676
Telescopio(s)
astronómicos, 803-5
constructivo, 805
galileano, 804
Hubble Space, 807, 807
Keck, 807
radio, 808
reflectores, 805-7
refractores, 803-5
resolución y, 807-10
sistema de lente compuesta, 748
terrestres, 804-5
usado para la radiación no visible, 808
VLT (Very large telescope), 807
Televisión
cinescopios de, 629, 678
circuitos osciladores y, 699
ondas de, 676-77
Temperatura, 338-66. *Véase también* Teoría cinética de gases
absoluta, 343-49, 355
calor distinguido de, 339-40
calor específico y, 370-71
cambios de fase, 374-78
curie, 623, 644, 646
definición de, 339
del cuerpo humano, 343, 380
densidad y, 354
diferencia y transferencia de calor, 410-11
escala de,
Celsius, 340-42
Farenheit, 340-42, 348
Kelvin, 343, 346-49
expansión térmica, 340, 350-53
leyes de gas, 343-49
presión *vs.*, 346, 378
resistencia eléctrica y, 574, 577-79
velocidad del sonido y, 472, 474
Tensión
de la cuerda, 110-11
de superficie, 324-25
Teorema
de ejes paralelos, 273-74, 278
de equipartición, 358
de la unión, 600, 608
de las mallas (Kirchhoff), 600-602, 604, 693-94
de Pitágoras, 22
trabajo-energía, 148-52, 185, 277-79
Teoría cinética de los gases, 354-59. *Véase también* Temperatura
difusión en la, 355-57
energía interna de los gases
diatómicos, 358-59
monoatómicos, 355
evaporación y, 379
temperatura absoluta en, 355
teorema de equipartición en, 358
Tera, prefijo, 8
Tercera ley de movimiento de Newton, 112-15. *Véase también* Leyes de Newton para el movimiento
carga eléctrica, 506
movimiento y, 187
propulsión
a chorro, 204-5
silenciosa, 632
sustentación de un avión y, 323
Termodinámica, 397-432
ciclo de Carnot, 422-24
de las máquinas de calor, 414-22, 422-24
eficiencia térmica de la máquina de calor, 416-22
entropía, 411-14
estado de un sistema, 398-99
primera ley de la, 399-402, 403-9, 417, 421
procesos de, 399
procesos para el gas ideal, 403-9
segunda ley de la, 410-14, 417, 420, 422
sistemas de, 398
tercera ley de la, 425
Termogramas, 382, 386, 387f
Termografía, 386, 387f
Termómetro(s), 340
de gas, 342
de volumen constante, 346
eléctrico, 579
historia del, 338
líquido en vidrio, 340-42
Termos, 389
Termostatos, 340
Tesla (T), 626
Tesla, Nikola, 623, 626, 656
Thompson, Benjamin (Conde de Rumford), 369
Thompson, William (Lord Kelvin), 347n
Tiempo
componentes de movimiento y, 83-85
de carga, 605, 608
de reacción, 53
de trabajo y, 166
unidad SI de, 5-6
Tinnitus, 467, 475
Tobin, Thomas William, 733
Tomacorrientes
eléctricos, 613-14
polarizados, 613f, 614
Tonelada métrica, 9
Tono (sonido), 468, 484, 494-96
Tornados, 468, 469, 491
Torr, 311
Torre Inclinada de Pisa, 50, 51, 269
Torricelli, Evangelista, 310-311
Trabajo, 140-52
como medida de transferencia de energía cinética, 149
eficiencia mecánica y, 166-67
en termodinámica, 399-402
mecánico, 141, 142-43
en el ciclo térmico, 410
en la corriente eléctrica, 662-63, 663-65, 667
neto, 415, 416
por una fuerza constante, 141-45
por una fuerza variable, 145-47
potencia eléctrica y, 583
potencia y, 164-67
rotacional, 277-80
tiempo y, 166
total (neto), 144-45
Tracción, 119
Russell, 289
Transductores, 470
Transferencia
de calor, 379-90
por conducción, 379-83, 384, 386
por convección, 83-85, 386
por radiación, 385-90
de energía y calor, 368
macroscópica del calor, 400
microscópica del calor, 400
Transformadores, 656, 668-72
Transmisión
de energía eléctrica, 572-73
de señales nerviosas, 552-53
Transpiración, evaporación de la, 380, 411
Trasplantes de órganos, preservación de órganos para, 378-79
Tratado para la Prohibición de las Pruebas Nucleares, 469
Tsunami, 256, 433
Tubos
de luz, 719
de rayos catódicos (CRT), 629
de rayos X, 678
de vacío, 629
Túnel Venturi, 335
Turbinas, 414, 667
Tyndall, John, 718

U

Ultrasonido, 467, 469-71
aplicaciones del, 470-71
cuantitativo, 305
en aplicaciones médicas, 470, 490
Umbral de audición, 476, 494-95
Unidades
cgs
de viscosidad, 326
gravedad y densidad específicas, 318
derivadas, 3
inglesas, 3, 5, 7, 9, 10. *Véase también* Medición
de potencia, 165
de presión, 303
de rapidez, 33
de trabajo, 142
térmicas (Btu), 368-69
mixtas, 12
SI, 3-10. *Véase también* Medición
básicas, 3, 6-7
comparadas con unidades inglesas, 10
de aceleración, 40
de calor, 368-69
de campo eléctrico, 517
de campo magnético, 623, 626
de cantidad de movimiento angular, 280
de cantidades, 10, 12
de capacitancia, 550
de carga, 506-7
de constante de resorte, 146
de corriente, 568, 572, 623
de densidad, 303
de diferencia de potencial eléctrico, 538
de energía, 152, 153
de entropía, 411
de flujo magnético, 658
de frecuencia, 434
de fuerza, 107
de impulso y movimiento, 182
de intensidad, 474
de longitud, 3-4
de masa, 4-5, 10

de masa atómica (u), 345
de módulo de corte, 301
de módulo de Young, 299
de módulo elástico, 299
de módulos de volumen, 302
de momento de inercia, 270
de momento magnético, 634
de potencia, 165
de potencia eléctrica, 580
de presión, 302-3
de presión atmosférica, 311n
de reactancia capacitiva, 690
de reactancia inductiva, 692
de resistencia eléctrica, 568, 573
de resistividad, 576
de tasa de flujo, 327
de tensión, 298
de tiempo, 5-6
de torsión, 259
de trabajo, 142
de velocidad, 33, 36
de velocidad angular, 219
de viscosidad, 326
de volumen, 8-10
derivadas, 3
sistema de, 3
Uniones (nódulos)
eléctricas, 594, 599
en ondas estacionarias, 454
Universo
entropía del, 413, 414

V

Vacío, velocidad de las ondas electromagnéticas en el, 674
Valencia de los electrones, 508
Valor absoluto, 78
Valores R, 384, 395
Vaporización, calor latente de, 375, 376, 411
Variables, estado, 398
Vector(es)
área de, 658
de momento magnético, 634
de velocidad, descomposición en componentes de movimiento, 68-69, 70-72
Vehículos
aceleración de, 42-43, 47, 152
amortiguadores de los, 446
autos híbridos, 164, 666
baterías, 570-71
bolsas de aire, 186
de motor diesel, 397
distancia de frenado de, 48-49, 127
eficiencia
del automóvil, 167
termodinámica, 397
estabilidad de los autos de carreras, 268
frenado de, 112-13
frenos antibloqueo, 256, 281
fricción y fuerza centrípeta, 226-27
intercambio del calor en el motor, 385
motores a gasolina, 417
motores de combustión interna, 415, 418
silenciadores, e interferencia destructiva, 452
velocidad relativa, 90-91
Velocidad, 36-38
análisis gráfico de la, 38-40
angular, 217, 219-21
cantidad de movimiento y, 178
constante, 38
de movimiento de un proyectil, 86-87
de un objeto en movimiento armónico simple, 436
en movimiento armónico simple, 444-45
instantánea, 37-38, 40
promedio, 36-37, 39, 44
proyecciones horizontales de, 81-82
relativa, 90-94
en una dimensión, 90-92
en dos dimensiones, 92-94
signos de, 42
tangencial, 220
terminal, 128-29
Vértices, 458n
de espejos esféricos, 732
Vía Láctea, y corrimientos Doppler de luz, 488
Vibraciones, 433, 468. *Véase también* Oscilación; Onda(s)
Vida, y la segunda ley de la termodinámica, 414
Videocinta, 656
Vidrio
índice de refracción, 710, 712
ópticamente activo, 782
resistividad y coeficiente de temperatura, 577f
viscosidad del, 326n
Viscosidad, 319, 325-27
coeficiente de, 326
de fluidos varios, 327
Visión, 792. *Véase también* Ojo, humano
color, 810-13
defectos de la, 795-99
20/20, 798-99
Viviani, Vincenzo, 51
Volt (V), 538
electrón-, 548
Volta, Allessandro, 536, 538, 569
Voltaje, 538, 545-46, 569. *Véase también* Diferencia de potencial eléctrico
a través de un condensador, 690
a través de un inductor, 692
a través de un resistor, 696
alterno, 688-89
ca, 688-89
convención de signos en circuitos de malla, 600
de mantenimiento, 607
de operación de una batería, 570
de ruptura, 607
en el cableado doméstico, 611-12
en el cristal líquido, 783
fem, en el diseño de transformadores, 669
inverso, 691
pico, 687
resistores y, 592, 598-99
rms (efectivo), 688
terminal, 570-71, 572f
Voltímetros, 591, 607, 610, 611f, 635
volts por metro (V/m), 545
Volumen(es)
módulo de volumen y, 301-2
unidad(es) SI, 8-10
Von Laue, Max, 774

W

Watt (W), 165, 580, 582
por metro cuadrado (W/m^2), 474
Watt, James, 165
Weber (Wb), 658
Weber, Wilhelm Eduard, 658n
Wheatstone, Sir Charles, 618

Y

Young, Thomas, 299n, 760, 761, 763

Z

Zanotto, E. D., 326n
Zonas de sombra, 450