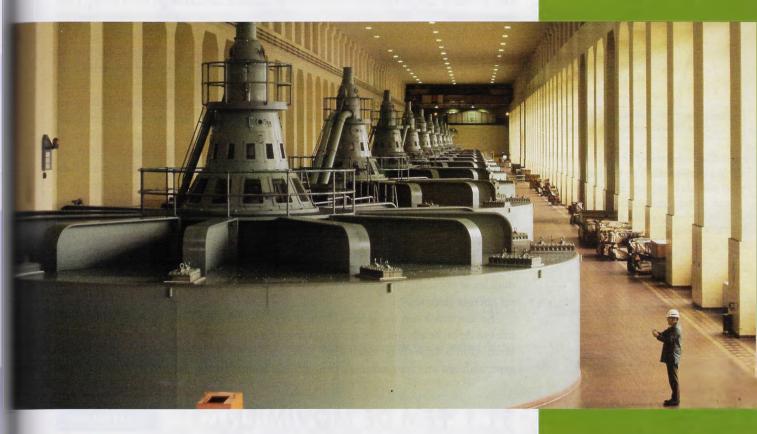
# Inducción electromagnética

CAPÍTULO

31



Conceptos
— en—
contexto

# CONCEPTOS EN CONTEXTO

Las bobinas de este gran generador de energía eléctrica, uno de los 17 generadores que hay en la presa Hoover, rodean un conjunto de electroimanes. Cuando el torrente de agua proporciona una torca mecánica externa, el conjunto constituido por los imanes rota, haciendo que el campo magnético se mueva a través de las bobinas.

En este capítulo se verá que tal movimiento relativo entre los campos magnéticos y las bobinas transforma el trabajo mecánico en trabajo eléctrico al generar un voltaje, o fuerza electromotriz (fem), a través de las bobinas. Se abordarán cuestiones como las siguientes:

- ? ¿Cómo un simple generador produce una fem? (Sección 31.2, página 1000)
- ? ¿Cómo una bobina giratoria produce una fem alterna? (Ejemplo 4, página 1003)
- ? ¿Cómo una bobina giratoria produce una fem estacionaria no alterna? (Sección 31.3 y ejemplo 5, página 1009)

- 31.1 Fem de movimiento
- 31.2 Ley de Faraday
- 31.3 Algunos ejemplos; ley de Lenz
- 31.4 Inductancia
- 31.5 Energía magnética
- 31.6 El circuito RL

? ¿Cuánta energía magnética se almacena en las bobinas de un gran generador como el que se muestra en la fotografía? (Ejemplo 12, página 1015)

En este capítulo se descubrirá que los campos magnéticos pueden generarse no sólo mediante cargas, sino también por medio de campos magnéticos variables o por flujo magnético variable. Por ejemplo, si se aumenta la corriente en los devanados de un electroimán, incrementando así la intensidad del campo magnético, este campo magnético variable genera un campo eléctrico denominado *campo eléctrico inducido*. Este tipo de campo eléctrico ejerce las fuerzas eléctricas de costumbre sobre las cargas: en este sentido el campo eléctrico inducido no es diferente de un campo eléctrico electrostático común.

No obstante, los campos eléctricos electrostático e inducido son diferentes en cuanto que las fuerzas ejercidas por el último son conservativas, mientras que las fuerzas ejercidas por el primero son no conservativas. Se recuerda que, según el requerimiento que se estableció en el capítulo 8, el factor que establece la diferencia entre fuerzas conservativas y fuerzas no conservativas es el trabajo realizado en un recorrido completo (de ida y vuelta). Para las fuerzas conservativas, como las fuerzas ejercidas por campos eléctricos electrostáticos, el trabajo realizado durante un recorrido completo es cero; para las fuerzas no conservativas, como las fuerzas ejercidas por campos eléctricos inducidos, el trabajo realizado durante un recorrido completo es diferente de cero. Esto significa que cuando una carga se mueve por un circuito cerrado, los campos eléctricos inducidos proporcionan trabajo a la carga y constituyen una fuente de fem. Así como la fem de una batería, esta fem inducida es capaz de activar una corriente alrededor del circuito. Como se verá, una famosa ley descubierta por Michael Faraday establece que la magnitud de la fem inducida es directamente proporcional a la razón de cambio del flujo magnético interceptado por el circuito. Una aplicación práctica de estas fems inducidas se encuentra en los generadores electromagnéticos, muy utilizados para generar energía eléctrica.

Se empezará con un análisis de la fem inducida que se obtiene debido al movimiento de un conductor, como un alambre o una barra, en un campo magnético constante. Como se verá, tal conductor móvil se desplaza a través del flujo magnético, generando así una fem inducida, denominada fem de movimiento.

# 31.1 FEM DE MOVIMIENTO

Suponga que una barra metálica se empuja a cierta velocidad v a través de un campo magnético uniforme, como el campo magnético de un gran electroimán. Los electrones libres en el metal tendrán entonces la misma velocidad v y experimentarán una fuerza magnética. Para movimiento perpendicular al campo magnético, la magnitud de la fuerza magnética sobre el electrón es evB [véase la ecuación (29.12)]. Si la barra y la velocidad v de la barra son perpendiculares entre sí y al campo magnético, entonces la dirección de este campo magnético sobre los electrones libres es paralela a la barra, según indica la regla de la mano derecha (véase la figura 31.1). Por consiguiente, los electrones fluyen a lo largo de la barra, acumulando carga negativa en el extremo superior y dejando carga positiva en el extremo inferior. El flujo de carga se detiene una vez que la repulsión eléctrica generada por las cargas acumuladas está en equilibrio con la fuerza magnética evB. No obstante, si los extremos de la barra están en contacto y en deslizamiento con un par de alambres largos que proporcionan una trayectoria de regreso estacionaria, entonces los electrones fluyen de manera continua alrededor del circuito (véase la figura 31.2). Así, la barra móvil actúa como "bomba de electricidad", o fuente de fem, que produce el mismo efecto que una batería conectada a los alambres largos. En la figura 31.2, el extremo superior de la barra es la terminal negativa de esta fuente, y el extremo inferior es la terminal positiva.

fem inducida



FIGURA 31.1 Barra conductora móvil con velocidad  $\mathbf{v}$  a través de un campo magnético uniforme. El campo magnético está dirigido hacia el plano de la página; las cruces indican las colas de los vectores del campo magnético. Según la regla de la mano derecha,  $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$  se dirige hacia abajo. Por consiguiente, la dirección de la fuerza magnética  $-e\mathbf{v} \times \mathbf{B}$  sobre un electrón libre dentro de la barra es hacia arriba.

La fem asociada con la barra se define como el trabajo realizado por la fuerza de excitación por carga positiva unitaria que pasa del extremo negativo al extremo positivo de la barra. Debido a que la magnitud de la fuerza de un electrón es evB, la magnitud de la fuerza por carga unitaria es evB/e = vB. Si la longitud de la barra es l, el trabajo por carga unitaria es igual a la distancia l multiplicada por la fuerza por carga unitaria, y en consecuencia,

$$\mathcal{E} = lvB \tag{31.1}$$

Lo anterior se denomina **fem de movimiento** porque es generada por el movimiento de la barra a través del campo magnético.

Se tiene una barra de aluminio de 1.0 m de longitud y se deja caer desde una ventana en un sitio en que el campo magnético horizontal de la Tierra es  $2.0 \times 10^{-5}$  T. La barra está orientada horizontalmente, formando ángulos rectos con el campo magnético (véase la figura 31.3). ¿Cuál es la fem inducida entre los extremos de la barra cuando su velocidad instantánea hacia abajo llega a 12 m/s?

**SOLUCIÓN:** El campo magnético de la Tierra tiene dos componentes: uno horizontal y otro vertical. En la deducción de la ecuación (31.1) para la fem de movimiento se supuso que el campo magnético  ${\bf B}$  era perpendicular a la barra y a su velocidad. Para una barra que cae verticalmente, como la de la figura 31.3, el componente horizontal  $B_x$  del campo magnético de la Tierra es perpendicular a la barra y a su velocidad, de modo que genera una fem móvil. Por el contrario, el componente vertical del campo magnético de la Tierra no ejerce ninguna fuerza sobre los electrones libres en la barra (recuerde que la fuerza magnética es cero cuando la velocidad es paralela al campo magnético), por lo que no genera ninguna fem de movimiento.

Con 
$$B = B_x = 2.0 \times 10^{-5}$$
 T, se obtiene 
$$\mathcal{E} = lvB_x = 1.0 \text{ m} \times 12 \text{ m/s} \times 2.0 \times 10^{-5} \text{ T} = 2.4 \times 10^{-4} \text{ V}$$

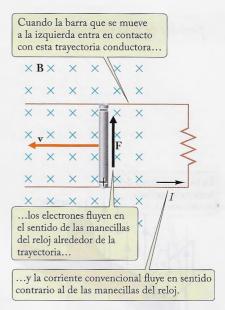


FIGURA 31.2 Si los extremos de la barra están en contacto en deslizamiento con un par de alambres largos, por el circuito fluye una corriente. Esta corriente puede detectarse con un amperímetro.

#### fem de movimiento



FIGURA 31.3 Desde una ventana se deja caer una barra. El componente horizontal del campo magnético de la Tierra está dirigido hacia el plano de la página.

medidor de flujo electromagnético

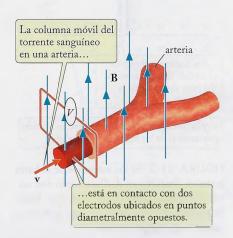


FIGURA 31.4 Técnica para medir la velocidad de flujo del torrente sanguíneo.

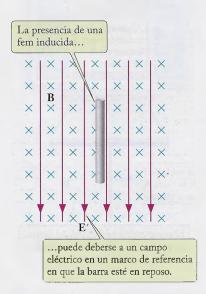


FIGURA 31.5 En el marco de referencia móvil de la barra hay un campo magnético B (cruces azules) y también un campo eléctrico E' (líneas rojas).

Una aplicación práctica de las fems de movimiento es el medidor de flujo electromagnético que se utiliza para medir la velocidad del caudal de un líquido conductor como un detergente, sodio líquido, pulpa de tomate, cerveza, etc. En este dispositivo, se hace que el líquido circule por un tubo no conductor colocado formando ángulos rectos con un campo magnético, y así a través del diámetro de la columna de líquido aparece una fem de movimiento de magnitud dada por la ecuación (31.1), ya que el diámetro actúa como barra conductora. Unos electrodos situados en lados opuestos del tubo detectan la fem, que puede medirse con un voltímetro sensible. Luego, la velocidad del caudal puede medirse a partir de la fem calculada, la intensidad del campo magnético y la dimensión del conducto.

Para medir la velocidad del flujo de sangre en la arteria mesentérica en el abdomen de un perro, un investigador coloca al animal en un campo magnético de  $3.0 \times 10^{-2}$  T, inserta pequeños electrodos a través de la pared de la arteria en cada lado, y mide la fem con un voltímetro (véase la figura 31.4). El diámetro interior de la arteria es de 0.30 cm y la fem es de  $1.8 \times 10^{-6}$  V. ¿Cuál es la velocidad del flujo sanguíneo?

**SOLUCIÓN**: De acuerdo con la ecuación(31.1), con l = 0.30 cm,

$$v = \frac{\mathcal{E}}{lB} = \frac{1.8 \times 10^{-6} \text{ V}}{0.30 \times 10^{-2} \text{ m} \times 3.0 \times 10^{-2} \text{ T}} = 2.0 \times 10^{-2} \text{ m/s}$$

Resulta instructivo analizar nuevamente la generación de la fem inducida desde el punto de vista de un marco de referencia en que la barra está en reposo. En tal marco de referencia que se mueve con la barra, las cargas libres carecen de velocidad (con excepción quizá de una pequeña velocidad de arrastre a lo largo de la barra), y así a lo largo de la barra no hay ninguna fuerza magnética. Entonces, las cargas libres deben experimentar alguna otra fuerza no magnética a lo largo de la barra que no realiza ningún trabajo sobre ésta y suministra una fem. Por tanto, la pregunta es: ¿cuál es esta nueva clase de fuerza en el marco de referencia móvil que produce el mismo efecto que la fuerza magnética en el marco de referencia estacionario? Debido a que las únicas clases de fuerza que actúan sobre cargas eléctricas son la fuerza magnética y la fuerza eléctrica, la "nueva" clase de fuerza debe ser eléctrica. Su causa debe ser un "nuevo" tipo de campo eléctrico, un campo eléctrico que exista en el marco de referencia móvil, pero no en el marco de referencia estacionario (véase la figura 31.5).

El "nuevo" campo eléctrico que existe en el marco de referencia de la barra que se mueve a través de un campo magnético se denomina **campo eléctrico inducido**. La magnitud del campo eléctrico inducido puede determinarse a partir de un requerimiento de consistencia: la "nueva" fuerza eléctrica F'=qE' en el marco de referencia móvil debe coincidir con la fuerza magnética F=qvB en el marco de referencia estacionario. Esto indica que la magnitud del campo eléctrico en el marco de referencia móvil debe ser

$$E' = vB \tag{31.2}$$

Este campo eléctrico no realiza trabajo sobre las cargas libres y por consiguiente constituye una fuente de fem. El trabajo realizado sobre una carga positiva unitaria que pasa por la barra es

$$\mathcal{E} = E'l \tag{31.3}$$

En virtud de la ecuación (31.2), este valor de la fem coincide con el que se obtiene con la ecuación (31.1). Así, la fem de movimiento puede calcularse en un marco de referencia estacionario o en un marco de referencia móvil; en el primer caso surge de un campo magnético y en el segundo, de un campo eléctrico.



## Revisión 31.1

PREGUNTA 1: Si la barra que se observa en la figura 31.2 se mueve hacia la derecha en lugar de hacerlo hacia la izquierda, ¿cuál es la dirección de la corriente generada por la fem móvil?

PREGUNTA 2: Para la barra en el ejemplo 1, ¿cuál extremo es la terminal positiva de la fem de movimiento? Suponga que en lugar de dejar caer la barra se lanza hacia arriba. ¿Cómo modifica este hecho a la fem?

PREGUNTA 3: Cuando una persona corre a través del campo magnético de la Tierra, de un lado a otro del cuerpo de la persona se genera una fem de movimiento. En el hemisferio norte, el campo magnético de la Tierra es principalmente hacia abajo (el componente horizontal es pequeño y puede omitirse para los efectos presentes). Si la persona corre hacia el este, ¿qué lado de su cuerpo es la terminal positiva para la fem inducida? ¿Y si corre hacia el oeste? ¿Y si corre hacia el norte?

PREGUNTA 4: ¿Cuál es la dirección del campo eléctrico inducido en el marco de referencia de la barra que se muestra en la figura 31.3?

A) Hacia arriba

B) Hacia la página

C)Fuera de la página

D) Hacia la izquierda

E) Hacia la derecha

## 31.2 LEY DE FARADAY

La cantidad *lvB* que aparece en el miembro derecho de la ecuación (31.1) puede interpretarse de manera interesante en términos del flujo magnético. Como ya se mencionó en la sección 29.2, el **flujo magnético** se define de la misma manera que el flujo eléctrico. Para cualquier superficie abierta o cerrada de área *A*, el *flujo magnético se define como la integral del componente normal del campo magnético sobre el área*:

$$\Phi_B = \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = \int B_{\perp} dA \tag{31.4}$$

El flujo magnético es simplemente proporcional al número de líneas de campo magnético interceptadas por la superficie, donde las líneas que cruzan la superficie en una dirección se identifican como positivas y las líneas en la dirección opuesta se identifican como negativas. Obsérvese que para una superficie plana en un campo magnético constante, el flujo magnético es simplemente

$$\Phi_R = \mathbf{R} \cdot \mathbf{A} = B_{\perp} A = BA \cos \theta \tag{31.5}$$

donde  $\theta$  es el ángulo entre el campo magnético y la perpendicular trazada sobre la superficie (véase la figura 31.6). La unidad del flujo magnético es el producto de la unidad del flujo magnético y la unidad de área; es decir,  $T \cdot m^2$ . En el sistema SI, esta unidad se denomina weber:

$$1 \text{ weber} = 1 \text{ Wb} = 1 \text{ T} \cdot \text{m}^2$$

Ahora, considérese una barra que se mueve a través de un campo magnético a una velocidad  $\mathbf{v}$ . En un intervalo de tiempo dt, la barra avanza una distancia v dt y por tanto barre un área  $l \times v$  dt, perpendicular al campo magnético (véase la figura 31.7). El producto de esta área y el campo magnético es el flujo magnético barrido por la barra; es decir,

$$lv dt B = d\Phi_R$$

Por tanto,

$$lvB = \frac{d\Phi_B}{dt}$$

flujo magnético

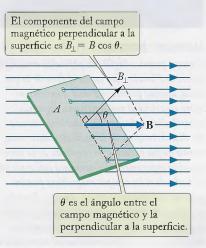
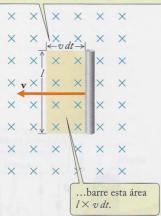
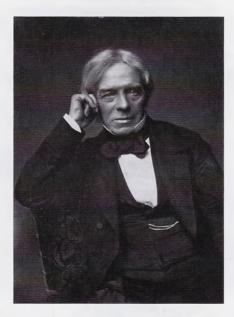


FIGURA 31.6 Superficie plana rectangular en un campo magnético uniforme.

En un tiempo dt, una barra que se mueve perpendicularmente a su longitud...



**FIGURA 31.7** Barra que se mueve a través de un campo magnético con velocidad v.



MICHAEL FARADAY (1791-1867)

Físico y químico inglés, las primeras investigaciones de Faraday fueron en al área de la química, aunque pronto se dedicó a investigar sobre electricidad y magnetismo, logrando contribuciones de fundamental importancia. Su descubrimiento de la inducción electromagnética no fue casual, sino resultado de la investigación experimental sistemática concerniente al hecho de si los campos magnéticos pueden generar corrientes eléctricas. Aunque Faraday era esencialmente un experimentador, carente de formación matemática formal, logró una importante contribución teórica al introducir el concepto de líneas de campo y reconocer que los campos eléctrico y magnético son entes físicos.

Lo anterior indica que la cantidad *lvB* es la razón con que la barra se desplaza a través del campo magnético. Por tanto, es posible volver a escribir la ecuación (31.1) como

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt} \tag{31.6}$$

El signo menos que se ha introducido en la ecuación (31.6) indica cómo está relacionada la polaridad de la fem inducida con el cambio de flujo; la determinación de esta polaridad se analizará en la siguiente sección.

La ventaja de esta interpretación de la fem inducida en términos del flujo magnético es que la ecuación (31.6) posee una validez más general que la ecuación (31.1) como se verá, la ecuación (31.6) es una ley general que relaciona la fem inducida con la razón a la que la barra se desplaza a través del flujo, y es válida sin importar la forma en que se presenta el recorrido del flujo. Por ejemplo, en lugar de mover la barra respecto al imán que produce el campo magnético, es posible mantenerla fija y mover el imán. Así, el flujo recorrerá la barra, y la ecuación (31.6) sugiere que es necesario inducir una fem a lo largo de ésta. De hecho, experimentalmente se ha confirmado que en ambos casos la fem inducida es exactamente la misma.

Sin embargo, hay otra forma en que el flujo magnético recorre la barra: es posible mantener fija la barra y aumentar o disminuir la *intensidad* del campo magnético. Para comprender por qué el flujo recorre la barra en estas condiciones, primero es necesario considerar lo que ocurre a las líneas de campo de una corriente cuando ésta cambia. En la figura 31.8a se muestran las líneas de campo producidas por una corriente a lo largo de un alambre recto y largo. Si se incrementa la corriente, el campo magnético crece; es decir, aumenta el número de líneas de campo. En la figura 31.8b se muestran las líneas de campo de una corriente más fuerte. ¿De dónde provienen las líneas de campo adicionales? Resulta evidente que la corriente debe crearlas. Cuando aumenta la corriente, produce nuevos círculos pequeños de líneas de campo en su entorno; mientras tanto, los círculos ya existentes en la figura 31.8a crecen gradualmente, como ondas en una piscina. Así, el patrón que se muestra en la figura 31.8b. Obsérvese que el patrón se transforma de dentro hacia fuera.

Así, un cambio en la intensidad del campo magnético implica líneas de cambio móviles. Si en el entorno de la corriente variable se coloca una barra *estacionaria*, las líneas de campo móviles se desplazan a través de la barra; es decir, el flujo magnético recorre la barra. La experimentación muestra que este recorrido del flujo magnético a través de una barra estacionaria induce una fem definida por la ecuación (31.6), la misma fórmula que para el caso del recorrido de flujo magnético a través de una barra móvil.

Con base en la fem inducida en una barra es posible inferir la fem inducida en un alambre de forma arbitraria, ya que este alambre puede considerarse como si estuviese constituido por segmentos rectos unidos entre sí. La fem total inducida entre los dos extremos del alambre es entonces la suma de las fems inducidas en todas estas barras



**FIGURA 31.8** *a*) Líneas de campo magnético de una corriente en un alambre muy largo. El alambre es perpendicular al plano de la página. *b*) Líneas de campo magnético de una corriente más fuerte.

cortas, y esta fem total es igual a la razón neta a la cual el flujo magnético recorre el alambre. De manera más general, puede hacerse una aseveración respecto a la fem inducida a lo largo de una trayectoria matemática arbitraria móvil o fija inmersa en un campo magnético constante o variable. Una fem se induce entre los extremos de esta trayectoria sin importar si a lo largo de la trayectoria se coloca una barra o un alambre. Siempre que una carga unitaria positiva se mueve a lo largo de esta trayectoria, de nuevo gana una cantidad  $\mathcal E$  de energía del campo eléctrico inducido, sin importar si la carga se desplaza a través de una barra o en el vacío. La barra o el alambre simplemente sirven como un conducto idóneo para el flujo de la carga. Por supuesto, para efectos prácticos de la fem, suele ser conveniente contar con una barra, un alambre o algún otro conductor a lo largo del cual pueda circular la carga, y entonces también es necesario contar con una trayectoria de regreso para la carga.

El planteamiento general sobre la fem inducida se denomina ley de inducción de Faraday,

La fem inducida a lo largo de cualquier trayectoria móvil o fija en un campo magnético constante o variable es igual a la razón con que el flujo magnético recorre la trayectoria:

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt} \tag{31.7}$$

Para una trayectoria cerrada, o circuito cerrado, la ley de Faraday puede interpretarse en términos del flujo interceptado por la superficie en el interior de la trayectoria. Para este efecto, se supone que la trayectoria es generada (o cerrada) por alguna superficie matemática suave, como la que se muestra en la figura 31.9. Debido a que las líneas de campo magnético son continuas (sin fuentes ni sumideros), la forma exacta de la superficie es irrelevante; es posible usar cualquier superficie plana o curva cuya frontera sea la trayectoria: cualquiera de estas superficies intercepta el mismo flujo. Si se mueve la trayectoria o si cambia el campo magnético, el flujo se desplaza a través de la trayectoria. Pero cualquier flujo que se desplaza a través de la trayectoria representa una ganancia o una pérdida del flujo interceptado por la superficie, ya que cualquier línea de campo que se mueve a través de la trayectoria lo hace hacia dentro o hacia afuera de la superficie. En consecuencia, la razón  $d\Phi_R/dt$  a la cual el flujo recorre la trayectoria cerrada es igual a la razón de cambio del flujo interceptado por la superficie, de modo que la ecuación (31.7) puede interpretarse como una declaración de que la fem inducida es igual a la razón de cambio de este flujo interceptado. Esto significa que para una trayectoria cerrada, la ley de Faraday puede plantearse como sigue:

La fem inducida alrededor de una trayectoria cerrada en un campo magnético es igual a la razón de cambio del flujo magnético interceptado por la superficie en el interior de la trayectoria.

Obsérvese que el flujo magnético interceptado por la superficie en el interior de una trayectoria cerrada, por ejemplo un circuito de alambre, puede modificarse en varias formas (véase la figura 31.10). Este circuito puede moverse hacia dentro o hacia afuera del campo magnético, o deformarlo a fin de aumentar o disminuir su área, o cambiar su orientación, o modificar la intensidad del campo magnético haciendo variar la corriente en el imán que produce el campo; pero en todos estos casos la fem inducida alrededor del circuito está relacionada con el cambio de flujo por la ecuación (31.7). Por ejemplo, para un circuito plano en un campo uniforme, con las ecuaciones (31.7) y (31.5) se obtiene

$$\mathcal{E} = -\frac{d}{dt} \left( BA \cos \theta \right) \tag{31.8}$$

lo cual hace evidente que al cambiar B, A o  $\theta$  se obtiene una fem inducida. En la siguiente sección se proporcionan ejemplos de tales fems inducidas.

ley de inducción de Faraday

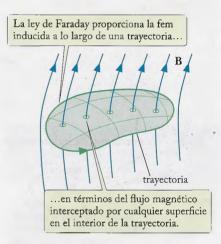


FIGURA 31.9 Una trayectoria cerrada generada por una superficie.

ley de inducción de Faraday para un circuito plano en un campo uniforme

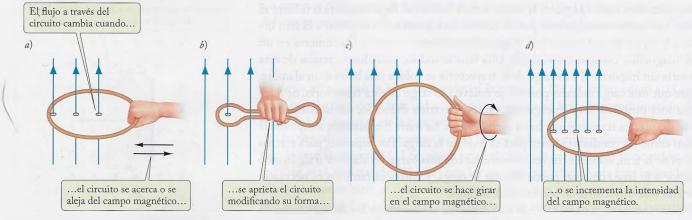


FIGURA 31.10 Varias maneras en que puede cambiar el flujo a través de un circuito.



Conceptos — en contexto

micrófono de inducción

La aplicación práctica más importante de la inducción es el generador electromagnético, de amplio uso en la generación de energía eléctrica para hogares y fábricas. En su forma más simple, el generador electromagnético consta de una bobina de alambre que se hace rotar en el campo magnético de un imán (véase la figura 31.11). Cuando la bobina se coloca frente al campo magnético, el flujo interceptado por la superficie en el interior del circuito es grande; cuando la bobina se coloca a un lado del campo magnético, el flujo es cero. Así, la rotación de la bobina alrededor de su eje produce una razón de cambio del flujo, lo cual induce una fem y lleva una corriente a través de la bobina y a través del circuito externo conectado a los extremos de la bobina.

Esencialmente, el generador es un motor eléctrico que opera en "reversa". En un motor, la potencia eléctrica se convierte en potencia mecánica: se envía una corriente a través de la bobina en un campo magnético y se produce movimiento rotatorio. En un generador, la potencia mecánica se transforma en potencia eléctrica: se hace girar una bobina en un campo magnético y en la bobina y en el circuito externo se producen una fem y una corriente. Los generadores de tamaño mediano o pequeño se activan por medio de motores a gasolina o a diesel; los generadores grandes en plantas de potencia eléctrica se accionan mediante turbinas de vapor o hidráulicas.

Hay muchas aplicaciones a menor escala de la ley de Faraday. Por ejemplo, el micrófono de inducción, o micrófono de bobina móvil, consta de un diagrama flexible con una bobina de alambre fija ubicada cerca de un imán de barra (véase la figura 31.12). Cuando una onda sonora choca contra el diafragma, las fluctuaciones de presión mueven de un lado a otro el diafragma y la bobina, y este movimiento de la bobi-

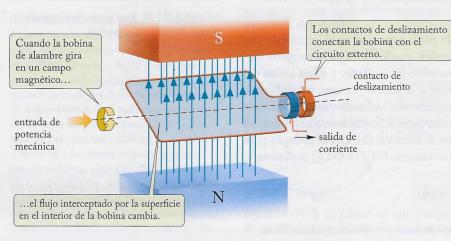
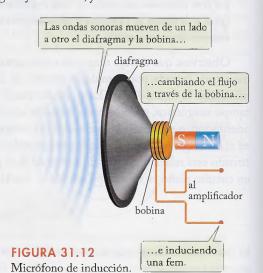


FIGURA 31.11 Generador electromagnético simple.



na produce un flujo variable e induce una fem. Así, el micrófono transforma las fluctuaciones de presión en una señal eléctrica que puede amplificarse y enviarse a un altavoz. Un altavoz es simplemente un micrófono de inducción que opera en reversa: una corriente alimentada hacia la bobina experimenta una fuerza en el campo magnético, que empuja o atrae de un lado a otro a la bobina del imán en barra y al diafragma, produciendo ondas sonoras. Debido a que el mecanismo básico del altavoz es el mismo que el del micrófono de inducción, en realidad es posible utilizar un altavoz como micrófono: basta conectar el altavoz a un amplificador y hablar hacia éste y el altavoz transformará la señal de la voz en una señal eléctrica y se comportará como un micrófono (aunque algo deficiente).



## Revisión 31.2

PREGUNTA 1: El flujo magnético a través de una superficie cerrada siempre es cero. ¿Por qué?

**PREGUNTA 2:** Una trayectoria cerrada está inmersa en un campo magnético. Si repentinamente se invierte el campo magnético (sin modificar su intensidad), ¿alrededor de la trayectoria se induce una fem?

PREGUNTA 3: Se dispara una flecha metálica a través de un campo magnético. Este hecho, ¿genera una fem inducida entre la punta y la cola de la flecha?

**PREGUNTA 4:** En la figura 31.13 se muestran varias superficies en un campo magnético uniforme. ¿Cuál posee el mayor flujo magnético?

(A) a)

(B) b)

(C) c)

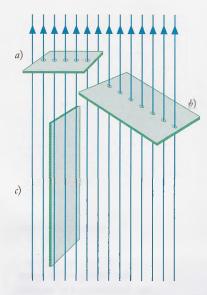
# 31.3 ALGUNOS EJEMPLOS; LEY DE LENZ

En esta sección se considerarán algunos ejemplos sobre el cálculo de fems inducidas. Se empezará con el planteamiento de una regla simple para determinar la polaridad de la fem inducida, una ley conocida como **ley de Lenz**:

La corriente inducida siempre se opone al cambio de flujo (o de movimiento) que la generó.

Por ejemplo, considérese una barra que se mueve en un campo magnético ilustrado en la figura 31.14. La barra se desliza sobre largos alambres paralelos unidos a la derecha, de modo que se forma un circuito cerrado. El movimiento de la barra conduce a un flujo magnético creciente debido al área creciente encerrada por el circuito. Según la ley de Lenz, el flujo extra aportado por la corriente inducida en la barra y los alambres debe oponerse a este incremento en el flujo; así, el campo magnético de esta corriente inducida debe ser opuesto al campo magnético original: en el interior del área encerrada por el circuito, el campo magnético de la corriente en el alambre debe estar dirigido hacia afuera del plano de la página en la figura 31.14, mientras el campo magnético original está dirigido hacia dentro de este plano. Según la regla de la mano derecha, la corriente debe ser en contra del movimiento de las manecillas del reloj alrededor del circuito a fin de producir tal campo magnético, en concordancia con la dirección indicada en la figura 31.2. (La dirección de la corriente también puede deducirse analizando el movimiento de la ba-

FIGURA 31.14 Una barra que se mueve en un campo magnético uniforme está en contacto por deslizamiento con alambres paralelos. La dirección del campo magnético uniforme es perpendicular al plano de la página.



**FIGURA 31.13** Diversas superficies en un campo magnético uniforme.

#### ley de Lenz

Cuando la barra se desplaza

> ...y para oponerse al incremento de flujo, el campo magnético de la corriente inducida debe ser opuesto al campo magnético original.

rra. La barra se mueve hacia la izquierda. Según la ley de Lenz, la fuerza magnética sobre la corriente en la barra debe oponerse a este movimiento; es decir, la fuerza debe ser hacia la derecha. Por la regla de la mano derecha, si la fuerza magnética debe ser hacia la derecha, la corriente en la barra debe ser hacia abajo, lo que significa que la corriente debe ir en sentido contrario al movimiento de las manecillas del reloj alrededor del circuito.)

Resulta importante comprender que la corriente inducida se opone al *cambio* en el flujo, aunque no necesariamente se opone al flujo en sí. Si la barra en la figura 31.14 estuviera moviéndose hacia la derecha en vez de a la izquierda, entonces este movimiento conduciría a un flujo magnético decreciente dentro del área encerrada por el circuito. El flujo adicional aportado por la corriente inducida debe oponerse a esta disminución del flujo; así, el flujo magnético de la corriente inducida debe ir en la misma dirección que el campo magnético original; es decir, hacia el plano de la página en la figura 31.14. Entonces, la corriente debe ir en el sentido del movimiento de las manecillas del reloj alrededor del circuito.

En aplicaciones prácticas, las fems inducidas suelen ser generadas en bobinas que constan de muchas espiras de alambre; es decir, de muchas espiras. En una bobina así, cada espira individual tiene una razón de cambio de flujo y genera su propia fem. Debido a que las espiras individuales están conectadas en serie, sus fems se suman entre sí, y para una bobina con N espiras la fem neta es N veces la fem de una espira:

$$\mathcal{E} = -N \frac{d\Phi_B}{dt} \tag{31.9}$$

El flujo a través de las N espiras también puede interpretarse como si estuviese atravesando un área N veces más grande que una espira simple. Desde este punto de vista, se genera una fem simple, aunque el flujo total es N veces más grande ( $\Phi_{B,\text{total}} = N\Phi_{B}$ ), de modo que se obtiene el mismo resultado (31.9). Algunas veces es de utilidad conocer estos otros puntos de vista.

A continuación se presentan varios ejemplos del cálculo de fems inducidas; se analizarán los cambios de flujo debidos a un campo magnético variable, un ángulo que varía entre el área y el campo magnético, y un área variable.

Una bobina rectangular de 150 espiras que forma un circuito cerrado mide 0.20 m × 0.10 m. La resistencia de la bobina es 5.0 Ω. La bobina está colocada entre los polos de un electroimán, de frente a un campo magnético B (véase la figura 31.15). Suponga que cuando se apaga el electroimán, la intensidad del campo magnético disminuye a razón de 20 teslas por segundo. ¿Cuál es la fem inducida en la bobina? ¿Cuál es la dirección de la corriente inducida?

**SOLUCIÓN**: El flujo interceptado por cada espira en la bobina es  $\Phi_B = BA$ , donde B es el campo magnético y A es el área de la espira. Si sólo varía el campo magnético, la razón de cambio de flujo es

$$\frac{d\Phi_B}{dt} = \frac{dB}{dt}A$$

y la ley de Faraday establece que la fem inducida total para toda la bobina es

$$\mathcal{E} = -N \frac{d\Phi_{B}}{dt} = -N \frac{dB}{dt} A$$
$$= -150 \times (-20 \text{ T/s}) \times (0.20 \text{ m} \times 0.10 \text{ m}) = 60 \text{ V}$$

ley de inducción para una bobina con Nespiras

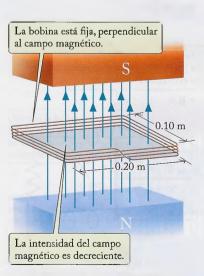


FIGURA 31.15 Una bobina rectangular en un campo magnético uniforme hacia arriba.

Según la ley de Ohm, la magnitud de la corriente inducida es entonces

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R} = \frac{60 \text{ V}}{5.0 \Omega} = 12 \text{ amperes}$$

Para determinar la dirección de la corriente inducida, se emplea la ley de Lenz. El campo magnético que se muestra en la figura 31.15 y su flujo son decrecientes. Por tanto, la corriente en la bobina debe proporcionar un campo magnético que compense (parcialmente) este flujo magnético decreciente. Según la regla de la mano derecha, esto requiere una corriente en sentido contrario al movimiento de las manecillas del reloj alrededor del circuito (visto desde arriba), de modo que el campo magnético de esta corriente sea hacia arriba, en la dirección del campo magnético original.

**COMENTARIOS:** Obsérvese que para que una corriente circule, es necesario que la bobina forme un circuito cerrado. Si la bobina tuviese una interrupción, no formaría un circuito cerrado; aún así se generaría una fem aunque no podría circular ninguna corriente, como ocurre en un circuito abierto normal. Si en lugar de una bobina se hubiera sumergido una placa conductora sólida en el campo magnético variable, las corrientes inducidas circularían en espiras alrededor del conductor. Estas corrientes se denominan **parásitas**, ya que circulan en espiras. Las corrientes parásitas son deseables algunas veces en un dispositivo, ya que eliminan energía de movimiento y proporcionan amortiguamiento, por ejemplo, en dispositivos para aislar vibraciones. Cuando no se desea contar con amortiguamiento y las corrientes parásitas ocasionan calentamiento indeseable debido a pérdidas de  $I^2R$ , es posible eliminarlas segmentando el conductor en piezas separadas, de modo que ninguna corriente pueda circular de una pieza a la otra.

corriente parásita

Un generador electromagnético consta de una bobina rectangular de *N* espiras de alambre que rotan alrededor de un eje perpendicular a un campo magnético constante **B**. Unos contactos de deslizamiento conectan la bobina con un circuito externo (véase la figura 31.16). ¿Qué fem suministra la bobina al circuito externo? El área de la bobina es *A* y gira con una frecuencia angular ω.

**SOLUCIÓN:** El flujo magnético varía a medida que la bobina rota; es máximo cuando la bobina está orientada frontalmente hacia el campo magnético, y es mínimo cuando la bobina está orientada paralela al campo magnético. Instantáneamente, la perpendicular a la bobina forma un ángulo  $\theta = \omega t$  con el campo magnético (véase la figura 31.16), y la componente del campo magnético perpendicular a la bobina es  $B_{\perp} = B$  cos  $\theta = B$  cos  $\omega t$ . Entonces, el flujo magnético instantáneo a través de la bobina es  $\Phi_B = BA$  cos  $\omega t$ . Para encontrar la fem inducida alrededor de



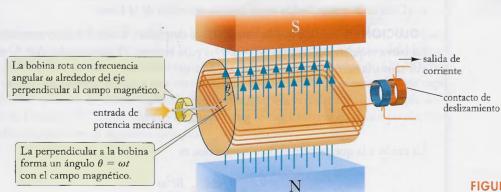
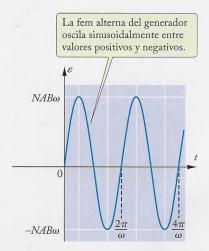


FIGURA 31.16
Generador electromagnético.



**FIGURA 31.17** Fem del generador; es un voltaje alterno (CA).

fem alterna (CA) y fem estacionaria (CD)



cada espira, es necesario evaluar la razón de cambio de este flujo, lo cual significa que se requiere evaluar la razón de cambio de cos  $\omega t$ ,

$$\frac{d}{dt}\cos\omega t = -\omega\sin\omega t$$

Así, para el flujo magnético  $\Phi_B = BA \cos \omega t$ , la razón de cambio es

$$\frac{d\Phi_B}{dt} = -BA\omega \operatorname{sen} \omega t$$

Según la ley de Faraday, la fem inducida total alrededor de todas las N espiras es

$$\mathcal{E} = -N \frac{d\Phi_B}{dt} = NBA\omega \operatorname{sen}\omega t \tag{31.10}$$

En el instante que se muestra en la figura 31.16, el flujo magnético a través de la bobina es creciente; en consecuencia, por la ley de Lenz, la corriente inducida debe circular alrededor de la bobina en dirección del movimiento de las manecillas del reloj (visto desde arriba) de modo que contribuye con un flujo magnético adicional que se opone al incremento del flujo magnético original.

La fem definida por la ecuación (31.10) es una fem alterna, o voltaje CA, que oscila sinusoidalmente entre valores positivos y negativos. En la figura 31.17 se muestra una gráfica de esta fem. Pueden usarse varios métodos para obtener una fem estacionaria, o voltaje CD, que no oscila entre valores positivos y negativos, sino que posee un valor constante. El método más común se basa en un conmutador o un alternador. El conmutador es simplemente un interruptor mecánico que invierte la conexión entre el generador y el circuito externo cada medio ciclo, de modo que la fem suministrada al circuito externo siempre tiene el mismo signo. El alternador es un interruptor electrónico que usa diodos en lugar de dispositivos mecánicos para hacer lo mismo que un conmutador. Otro método se basa en un tipo completamente distinto de generador, denominado generador unipolar. En vez de una bobina giratoria, ese generador utiliza un disco giratorio, que es equivalente a una barra giratoria, como se ilustra en el siguiente ejemplo.

Una barra metálica recta está girando alrededor de un extremo sobre un eje paralelo a un campo magnético uniforme *B* (véase la figura 31.18*a*). La longitud de la barra es *l* y la velocidad angular de rotación es  $\omega$ . ¿Cuál es la fem inducida entre los dos extremos de la barra?

**SOLUCIÓN:** A medida que la barra gira, se desplaza a través del flujo magnético. La barra requiere un tiempo  $\Delta t = 2\pi/\omega$  para recorrer el área circular  $\Delta A = \pi l^2$ . Por tanto, la razón a la que recorre esta área es

$$\frac{dA}{dt} = \frac{\Delta A}{\Delta t} = \frac{\pi l^2}{2\pi/\omega} = \frac{l^2 \omega}{2}$$

La razón a la que recorre el flujo magnético es

$$\frac{d\Phi_B}{dt} = B\frac{dA}{dt} = \frac{Bl^2\omega}{2}$$

Entonces, según la ley de Faraday, la fem inducida es

$$\mathcal{E} = -\frac{Bl^2\omega}{2}$$

Si el extremo móvil de la barra está en contacto por deslizamiento con una vía circular conectada a un circuito externo (véase la figura 31.18b), la fem lleva una corriente alrededor del circuito. Por la ley de Lenz, la corriente inducida en la barra debe ser tal que la fuerza magnética sobre la barra se oponga al movimiento. Por tanto, la fuerza magnética sobre la barra debe oponerse al desplazamiento en sentido contrario al movimiento de las manecillas del reloj de la figura 31.18. Por la regla de la mano derecha, para la fuerza magnética, esto requiere una corriente que circule desde el extremo móvil de la barra hacia el centro. En el circuito externo, entonces la corriente circula desde el centro hacia el extremo móvil: el centro actúa como la terminal positiva de la fuente de la fem y el extremo móvil actúa como la terminal negativa.

**COMENTARIOS:** Para aplicaciones prácticas, los generadores unipolares se construyen con un disco giratorio, más que con una barra giratoria. Esto no afecta la fem del generador, sino que ayuda a reducir su resistencia interna y su esfuerzo mecánico. Los generadores unipolares se utilizan en aplicaciones como la electroplastia, que requieren una gran corriente aunque sólo un bajo voltaje.

Para poder usarla más tarde en el capítulo 32, es necesario replantear la ley de Faraday en términos del campo eléctrico inducido. Como se vio en la sección 31.1 en el ejemplo de la barra que se mueve en un campo magnético, la fem inducida para una trayectoria recta móvil que recorre un campo magnético constante está relacionada con el campo eléctrico según la fórmula

$$\mathcal{E} = E'l$$

En términos más generales, la fem inducida para una trayectoria arbitraria móvil o fija en un campo magnético constante o variable está relacionada con el campo eléctrico inducido (medido en el marco de referencia de la trayectoria) por medio de

$$\mathcal{E} = \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = \oint E_{\parallel} ds \tag{31.11}$$

donde  $E_{\parallel}$  es el componente del campo eléctrico inducido tangente a la trayectoria y ds es un elemento de longitud a lo largo de la trayectoria. Esto permite expresar la ley de Faraday como

$$\oint E_{\parallel} ds = -\frac{d\Phi_B}{dt} \tag{31.12}$$

Esta versión de la ley de Faraday puede usarse para calcular el campo eléctrico inducido. Obsérvese que esta forma de la ley de Faraday para el campo eléctrico debido a un flujo variable es matemáticamente semejante a la ley de Ampère, ecuación (29.18), para el campo magnético debido a una corriente. En casi todos los problemas de este capítulo sólo se habla de la fem inducida, por lo que basta la versión algo más simple de la ley de Faraday (31.7). Sin embargo, algunas veces se tiene interés en el campo eléctrico inducido, como en el siguiente ejemplo.



**FIGURA 31.18** Generador unipolar. *a*) Barra que gira en un campo magnético uniforme. *b*) Barra giratoria conectada a un circuito externo.

ley de Faraday en términos del campo eléctrico inducido

#### TÉCNICAS PARA RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS

Antes de intentar el cálculo de una fem inducida, el lector debe preguntarse ¿dónde hay un cambio de flujo magnético? Debido a que el flujo en campo magnético uniforme puede expresarse como  $\Phi_B = BA \cos \theta$ , el cambio de flujo se obtiene fácilmente a partir de un cambio en el campo eléctrico (ejemplo 3), un cambio de orientación (ejemplo 4) o un cambio en la posición o en la forma de la trayectoria que encierra el flujo (ejemplo 5). A continuación se deben visualizar los cambios en el campo

magnético con respecto al tiempo o visualizar los cambios en la posición, orientación o forma de la trayectoria con

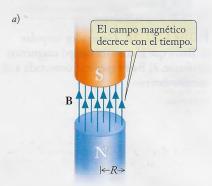
el tiempo, como si se estuviese viendo una película. Lue-

Al calcular la fem en una bobina de N espiras, recuérdese que cada espira en la bobina genera su propia fem, y que entonces la fem neta de la bobina es proporcional a N.

go, se evalúa la razón de cambio del flujo.

#### LEY DE FARADAY; LEY DE LENZ

- da puede calcularse con la ley de Lenz, que puede aplicarse ya sea al flujo magnético o al movimiento de un conductor: el flujo asociado con la corriente inducida se opone al *cambio* original del flujo, o la fuerza magnética sobre la corriente inducida se opone al movimiento original. Obsérvese que si el dispositivo que genera la fem no está realmente conectado a un circuito externo (por ejemplo, la barra en la figura 31.18a), entonces es de utilidad suponer que se conecta a un circuito externo (como en la figura 31.18b), por lo que resulta más fácil imaginar la dirección de la corriente inducida.
- 4 La magnitud de la corriente que circula en un circuito externo conectado con la fem inducida puede calcularse como de costumbre a partir de la fem  $\mathcal{E}$  y la resistencia R, según la ley de Ohm,  $I = \mathcal{E}/R$ .



El campo eléctrico inducido es tangente a los círculos alrededor del eje...

...con una dirección tal que una corriente inducida se opone a la disminución en campo magnético.

**FIGURA 31.19** *a*) Campo magnético **B** entre las caras polares de un electroimán. *b*) Campo eléctrico inducido.

Las caras polares circulares del electroimán que se muestra en la figura 31.19a tienen un radio R=0.10 m. El campo magnético se apaga de repente, y decrece (brevemente) a razón de  $2.0 \times 10^4$  T/s. ¿Cuál es el campo eléctrico inducido para  $r \le R$ ? ¿Y para  $r \ge R$ ? ¿Cuál es el valor numérico de este campo en r = R? Si se supone que entre las caras polares sólo hay un campo magnético.

**SOLUCIÓN:** Por analogía con la ley de Ampère (véanse los ejemplos 4 y 5 del capítulo 29), la simetría axial del flujo determina que la dirección del campo eléctrico inducido es tangente a los círculos alrededor del eje (véase la figura 31.19b). Por tanto, para cualquier valor de r, el miembro izquierdo de la ley de Faraday en la ecuación (31.12) se reduce a

$$\oint E_{\parallel} ds = 2\pi r E_{\parallel}$$

Para el miembro derecho de la ley de Faraday, sólo es necesario considerar el flujo que cruza el área dentro de la trayectoria de radio r donde quiere conocerse el campo eléctrico inducido. Para  $r \le R$ , este flujo es

$$\Phi_B = BA = B\pi r^2$$

y su razón de cambio es

$$\frac{d\Phi_B}{dt} = \frac{dB}{dt} \, \pi r^2$$

Igualando los dos miembros de la ecuación (31.12) se obtiene

$$2\pi r E_{\parallel} = -\frac{dB}{dt} \pi r^2$$

y es posible despejar el campo eléctrico:

$$E_{\parallel} = -\frac{dB}{dt} \frac{r}{2}$$
 para  $r \le R$ 

Fuera de las caras polares, en cualquier valor de  $r \ge R$  donde se quiere conocer el campo eléctrico inducido, el flujo magnético es exactamente el flujo total entre las caras polares de área  $A = \pi R^2$ , de modo que

$$\frac{d\Phi_B}{dt} = \frac{dB}{dt} \, \pi R^2$$

Con lo anterior, para la ecuación (31.12) se obtiene

$$2\pi r E_{\parallel} = -\frac{dB}{dt} \pi R^2$$

o bien,

$$E_{\parallel} = -\frac{dB}{dt} \frac{R^2}{2r}$$
 para  $r \ge R$ 

En r = R, con cualquier resultado se obtiene

$$E_{\parallel} = -\frac{dB}{dt} \frac{R}{2}$$
  
=  $-(-2.0 \times 10^4 \,\text{T/s}) \times \frac{0.10 \,\text{m}}{2} = 1.0 \times 10^3 \,\text{V/m}$ 

**COMENTARIO**: ¡Obsérvese que existe un campo eléctrico inducido incluso en la región en que no hay campo magnético! Este campo eléctrico inducido puede ser suficientemente grande para dañar equipo electrónico delicado próximo al imán. En la práctica, es recomendable aumentar y disminuir lentamente los campos magnéticos.



## Revisión 31.3

PREGUNTA 1: Para cada uno de los casos ilustrados en la figura 31.10, ¿cuál es la dirección de la corriente inducida?

PREGUNTA 2: Si la bobina descrita en el ejemplo 3 tiene 300 espiras en lugar de 150, ¿cómo cambian las respuestas?

PREGUNTA 3: Si el campo magnético en el ejemplo 3 es creciente en lugar de decreciente, ¿cómo cambia este hecho la respuesta?

**PREGUNTA 4:** Si la corriente en un solenoide largo es creciente, ¿cuál es la dirección del campo eléctrico inducido dentro y fuera del solenoide?

PREGUNTA 5: Un resistor está conectado entre dos vías de ferrocarril; una barra metálica a través de las vías se empuja hacia el resistor (véase la figura 31.20). El campo magnético de la Tierra está dirigido hacia la página. ¿Cuál es la dirección de la corriente, en caso de haber alguna, en el resistor?

- (A) Hacia la derecha
- (B) Hacia la izquierda
- (C) No hay dirección; la corriente es cero

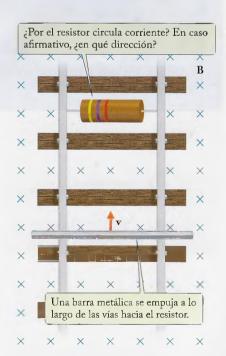


FIGURA 31.20 Barra metálica y resistor en contacto con vías de ferrocarril.

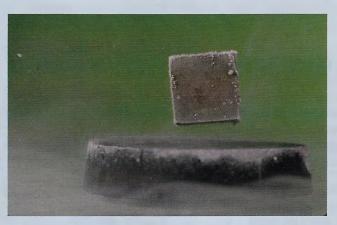
## LA FÍSICA EN LA PRÁCTICA

## LEVITACIÓN MAGNÉTICA

Una conocida demostración científica presenta el fenómeno de la levitación magnética, donde un imán permanente flota en el aire por arriba de un superconductor de alta temperatura (véase la figura 1). Por supuesto, los polos iguales de dos imanes normales se repelen, por lo que uno flota por encima del otro como se muestra en la figura 2, aunque esta configuración generalmente es inestable y se requiere una guía para mantener en su sitio los imanes. En el caso del superconductor, la estabilidad se alcanza fácilmente, incluso si el imán es giratorio; este comportamiento se aprovecha en cojinetes y giroscopios superconductores de alto rendimiento.

El origen de la levitación magnética superconductora depende de la ley de Faraday; esto puede comprenderse con ayuda de la figura 3. A medida que el imán se aproxima al superconductor, intenta aumentar el flujo a través del superconductor. Pero como se analizó en el capítulo 27, un superconductor tiene resistencia eléctrica cero y es capaz de

permitir la circulación de corrientes persistentes. Así, cualquier intento por generar una fem en el material da por resultado una corriente inducida suficiente para cancelar el incremento en el flujo. Este comportamiento bastante simple, característico de la superconductividad tipo I, refleja una propiedad conocida como diamagnetismo perfecto: el material responde con una corriente inducida y un campo interno que cancela exactamente el campo externo; en términos de la susceptibilidad estudiada en el capítulo 30, esto significa  $\chi =$ -1 (como se mencionó en la sección 30.4, los materiales normales pueden exhibir una cantidad mucho menor de diamagnetismo debido a corrientes inducidas atómicamente). Para el superconductor, la levitación ocurre porque las corrientes atómicas en el imán permanente y la corriente eléctrica inducida en el superconductor tienen direcciones opuestas, y tales corrientes se repelen mutuamente.



**FIGURA 1** Un imán permanente que levita por encima de un superconductor de alta temperatura.

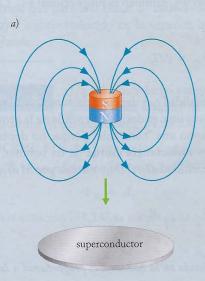


FIGURA 2 Un imán permanente "flota" por encima del otro, debido a su repulsión mutua.

# 31.4 INDUCTANCIA

Si una bobina que transporta una corriente dependiente del tiempo está cerca de otra bobina, entonces el campo magnético variable de la primera puede inducir una fem en la segunda. Así, una corriente dependiente del tiempo en una bobina es capaz de inducir una corriente en otra bobina cercana. Por ejemplo, considérense las dos bobinas en la figura 31.21. La primera está conectada a alguna fuente alterna de fem, como un generador CA, y transporta una corriente dependiente del tiempo. En consecuencia esta bobina produce un campo magnético  ${\bf B}_1$  dependiente del tiempo. El flujo magnético variable  $\Phi_{B1}$  a través de la segunda bobina induce una fem en esta bobina. Según la ley de Faraday, la fem en la segunda bobina es

$$\mathcal{E}_2 = -\frac{d\Phi_{B1}}{dt} \tag{31.13}$$



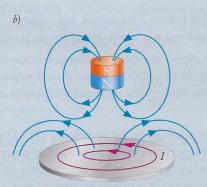
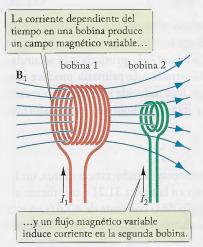


FIGURA 3 a) Un imán se acerca a un superconductor. b) Por la ley de Faraday, en el superconductor se inducen corrientes, que se oponen al cambio de flujo.

Los superconductores comercialmente útiles permiten la penetración de algo de flujo; éstos se denominan superconductores tipo II. Este flujo penetrante puede adherirse o "sujetarse" a defectos presentes en el superconductor, ayudando a la estabilidad de las supercorrientes o la levitación. Aún antes de la superconductividad a alta temperatura, ya se habían aprovechado los fenómenos de levitación usando materiales tipo II convencionales. En la figura 4 se muestra una fotografía de un tren levitado magnéticamente, que utiliza imanes superconductores poderosos elaborados con una aleación de niobio y titanio. Tales trenes son capaces de flotar a alta velocidad, proporcionando un medio de transporte cómodo y mecánicamente eficaz. Sin embargo, hasta la fecha el costo para enfriar el superconductor ha sido prohibitivo, de modo que el uso comercial de estos trenes aún no es común.



**FIGURA 4** Un tren superconductor levitado magnéticamente (maglev).



**FIGURA 31.21** La bobina 1 crea un campo magnético  $\mathbf{B_1}$ . Algunas líneas de campo pasan a través de la bobina 2 y crean un flujo.

El flujo  $\Phi_{B1}$  es proporcional a la intensidad del campo magnético  $\mathbf{B}_1$  en la segunda bobina producido por la corriente  $I_1$  en la primera bobina. Esta intensidad de campo es directamente proporcional a  $I_1$  (un incremento de la corriente de, por ejemplo, un factor de 2 da por resultado un aumento del campo magnético por el mismo factor; consulte la ley de Ampère). Por tanto, el flujo  $\Phi_{B1}$  también es proporcional a  $I_1$ . La relación entre  $\Phi_{B1}$  e  $I_1$  puede escribirse como

inductancia mutua M

$$\Phi_{B1} = MI_1 \tag{31.14}$$

donde M es una constante de proporcionalidad que depende del tamaño de las bobinas, su distancia y el número de vueltas en cada una; es decir, M depende de la geometría de la figura 31.21, pero M se considera como una "constante" porque no depende de la corriente. La constante M se denomina **inductancia mutua** de las bobinas. Si la corriente se modifica en alguna pequeña cantidad  $dI_1$ , el flujo cambia por M  $dI_1$ , y entonces la ecuación (31.13) se convierte en

fem inducida e inductancia

$$\mathcal{E}_2 = -M \frac{dI_1}{dt} \tag{31.15}$$

Esta ecuación establece que la fem inducida en la bobina 2 es proporcional a la razón de cambio de la corriente en la bobina 1.

Lo inverso también es verdadero: si la bobina 2 transporta una corriente, entonces la fem inducida en la bobina 1 es proporcional a la razón de cambio de la corriente en la bobina 2:

$$\mathcal{E}_1 = -M \frac{dI_2}{dt} \tag{31.16}$$

Las constantes de proporcionalidad que aparecen en las ecuaciones (31.15) y (31.16) son las mismas. Aunque esta afirmación se aceptará sin demostración, se observa que el resultado es bastante razonable; la inductancia mutua refleja la geometría de la disposición *relativa* de las bobinas, que por supuesto es la misma en ambos casos.

La unidad SI de la inductancia se denomina henry (H):

henry (H)

Por cierto: la constante de permeabilidad  $\mu_0$  suele expresarse en términos de esta unidad de inductancia, de modo que

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \,\text{H/m} \tag{31.18}$$

transformador

Una aplicación importante de la inductancia mutua se encuentra en la operación de los **transformadores**, usados para aumentar o reducir la fem suministrada por un generador de CA. El transformador consta de dos bobinas —la primaria y la secundaria— dispuestas una junto a la otra. La fem suministrada a la primaria produce una corriente que induce una fem en la secundaria. Esta fem inducida será mayor o menor que la fem original, dependiendo del número de vueltas en las bobinas (los transformadores se analizarán en detalle en la sección 32.6).

Para determinar experimentalmente la inductancia mutua, un físico conecta la primera bobina en la figura 31.21 a una fuente alterna de fem, produciendo así una razón de cambio de la corriente de 40 A/s en esta primera bobina. El físico encuentra que la fem inducida medida a través de la segunda bobina es  $-8.0 \times 10^{-6}$  volts. ¿Cuál es la inductancia mutua de las dos bobinas?

SOLUCIÓN: Al despejar la inductancia mutua en la ecuación (31.15) se obtiene

$$M = -\frac{\mathcal{E}_2}{dI_1/dt} = -\frac{(-8.0 \times 10^{-6} \text{ volt})}{40 \text{ A/s}} = 2.0 \times 10^{-7} \text{ H}$$

Obsérvese que para una razón de cambio de corriente dada en la primera bobina, un mayor voltaje inducido en la segunda bobina implica una inductancia mutua más grande.

Un solenoide largo consta de *n* vueltas por unidad de longitud. **EJEMPLO 8** Un anillo de alambre de radio r se coloca dentro del solenoide, perpendicular al eje (véase la figura 31.22). ¿Cuál es la inductancia mutua?

**SOLUCIÓN:** Si la corriente en los devanados del solenoide es I<sub>1</sub>, el campo magnético es  $B_1 = \mu_0 n I_1$  [véase la ecuación (29.21)], y el flujo a través del anillo es

$$\Phi_{\mathit{B}1} = \mathit{B}_1 \times [\text{área}] = \mu_0 \mathit{n} \mathit{I}_1 \times \pi \mathit{r}^2$$

Según la ecuación (31.14), la inductancia mutua es

$$M = \frac{\Phi_{B1}}{I_1} = \mu_0 n \pi r^2 \tag{31.19}$$

COMENTARIOS: Obsérvese nuevamente que la inductancia mutua depende sólo de la geometría de los dos elementos, no de cualesquiera valores articulares de B<sub>1</sub> o I<sub>1</sub>. Obsérvese también que si la corriente circula por la espira de alambre en lugar de hacerlo por el solenoide, el resultado simple (31.19) para la inductancia mutua también proporciona la razón del flujo a través del solenoide a la corriente  $I_2$ , aun cuando esta disposición invertida sería mucho más difícil de calcular directamente.

Un conductor posee autoinductancia. Considérese una bobina con una corriente dependiente del tiempo. El campo magnético propio de la bobina (véase la figura 31.23) produce entonces un flujo magnético dependiente del tiempo y, por la ley de Faraday, una fem inducida. Esto significa que siempre que la corriente depende del

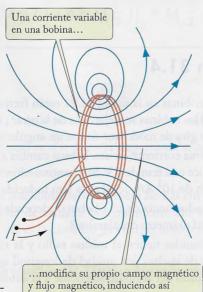


FIGURA 31.23 Una bobina y su campo magnético.

una fem en la bobina.

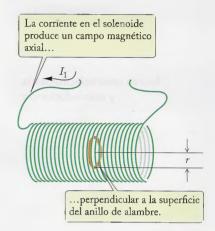
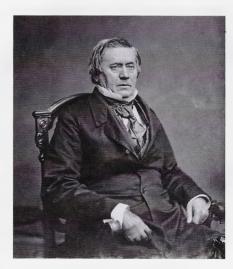


FIGURA 31.22 Un anillo de alambre dentro de un solenoide.



JOSEPH HENRY (1797-1878) Físico experimental estadounidense. Realizó mejoras importantes en electroimanes al enrollar alambre aislado alrededor de piezas de hierro, e inventó un motor electromagnético, así como un nuevo y eficaz telégrafo. Descubrió la autoinducción e investigó cómo las corrientes en un circuito inducen corrientes en otro.

tiempo, la bobina actúa de vuelta sobre la corriente y la modifica (en la sección 32.3 se verá cómo calcular la corriente resultante). Debido a lo anterior, la fem inducida se denomina fuerza contraelectromotriz. Con base en la ley de Lenz, de inmediato se reconoce que la fem autoinducida siempre actúa en una dirección tal que se opone al cambio en la corriente; es decir, intenta mantener constante la corriente.

El símbolo L se usa para distinguir la autoinductancia de la inductancia mutua M. En términos del flujo a través del circuito, la definición de la autoinductancia es de la misma forma que la ecuación (31.14):

autoinductancia I

$$\Phi_B = LI \tag{31.20}$$

y en consecuencia, la fem inducida es

$$\mathcal{E} = -L \frac{dI}{dt} \tag{31.21}$$

## **EJEMPLO 9**

Un solenoide largo tiene n vueltas por unidad de longitud y su radio es R. ¿Cuál es la autoinductancia por unidad de longitud?

**SOLUCIÓN:** El campo magnético en el interior del solenoide es  $B = \mu_0 nI$  [véase la ecuación (29.21)]. El número de espiras en una longitud l es nl; cada una de estas espiras tiene un flujo  $\pi R^2 B$ . Por tanto, el flujo a través de todas las espiras en una longitud les

$$\Phi_R = \pi R^2 B \times [\text{número de vueltas}] = \pi R^2 B n l = \pi R^2 \mu_0 n^2 I l$$

y la autoinductancia para toda la longitud l es

$$L = \Phi_B / I = \mu_0 n^2 \pi R^2 I \tag{31.22}$$

En consecuencia, la autoinductancia por unidad de longitud es

$$L/l = \mu_0 n^2 \pi R^2 \tag{31.23}$$

autoinductancia del solenoide



## Revisión 31.4

PREGUNTA 1: Las dos bobinas en la figura 31.21 están frente a frente. ¿Cómo cambia la inductancia mutua si las bobinas se alejan una de la otra? ¿Y si se acercan entre sí? ¿Y si una de las bobinas se gira de modo que forme un ángulo recto con la otra?

PREGUNTA 2: Cuando una corriente en una bobina cambia a razón de 10<sup>3</sup> A/s, en otra bobina próxima se induce una fem de 6 V. Si a continuación se modifica la corriente en esta otra bobina a razón de 10<sup>3</sup> A/s, ¿cuál es la fem inducida en la primera bobina?

PREGUNTA 3: La autoinductancia de una bobina, ¿depende del tamaño de ésta? ¿Del número de espiras? ¿Del diámetro del alambre?

PREGUNTA 4: Dos solenoides tienen el mismo radio y la misma longitud, aunque el segundo tiene el doble de vueltas por unidad de longitud que el primero. ¿Cuál es la razón de la autoinductancia del segundo solenoide a la autoinductancia del primero?

(B) 
$$\sqrt{2}$$

(C) 2 (D) 
$$2\sqrt{2}$$
 (E) 4

# 31.5 ENERGÍA MAGNÉTICA

Los inductores almacenan energía magnética, como los capacitores almacenan energía eléctrica. Cuando una fuente externa de fem se conecta a un inductor y una corriente empieza a circular a través del inductor, la fuerza contraelectromotriz se opone al incremento de la corriente y la fem externa debe realizar trabajo a fin de superar esta oposición y establecer el flujo de corriente. Este trabajo se almacena en el inductor, y puede recuperarse eliminando del circuito la fuente externa de fem y, al mismo tiempo, cerrando el intervalo resultante en el circuito (lo cual puede efectuarse con un interruptor adecuado). Luego, la corriente continúa circulando durante un instante, a razón gradualmente decreciente, ya que el inductor suministra una fuerza contraelectromotriz que tiende a mantener la corriente (se opone a la disminución). Así, el inductor proporciona energía a la corriente mientras ésta disminuye gradualmente.

Para calcular la cantidad de energía almacenada, se observa que cuando la corriente i en el inductor aumenta a la razón di/dt, la fuerza contraelectromotriz es

$$\mathcal{E} = -L \frac{di}{dt}$$

El inductor realiza trabajo sobre la corriente a la razón dada por la fórmula de costumbre para la potencia eléctrica [véase la ecuación (28.22)]:

$$P = \mathcal{E}i = -L\frac{di}{dt}i \tag{31.24}$$

Aquí el signo negativo implica que la energía es suministrada por la corriente al inductor, más que lo contrario. En un tiempo dt, la energía U almacenada en el conductor cambia entonces por una cantidad

$$dU = -P dt = -\mathcal{E}i dt = Li di$$
 (31.25)

Al integrar lo anterior desde el valor inicial de la corriente (i=0) hasta el valor final (i=I), se encuentra la energía magnética final almacenada en el inductor:

$$U = \int dU = L \int_0^I i \ di = L \left( \frac{i^2}{2} \right) \Big|_0^I = L \left( \frac{I^2}{2} - 0 \right)$$

es decir,

$$U = \frac{1}{2}LI^2 \tag{31.26}$$

Así, la energía total almacenada en el inductor es proporcional al cuadrado de la corriente.

Un solenoide tiene un radio de 2.0 cm; su devanado tiene una vuelta de alambre por milímetro. Por el devanado circula una corriente de 10 A. ¿Cuál es la cantidad de energía almacenada por unidad de longitud de solenoide?

**SOLUCIÓN:** Según la ecuación (31.23), la inductancia por unidad de longitud es

$$L/l = \mu_0 n^2 \pi R^2$$

energía magnética en un inductor

y así por la ecuación (31.26), la energía por unidad de longitud es

$$\frac{U}{l} = \frac{1}{2} \left( \frac{L}{l} \right) I^2 = \frac{1}{2} \mu_0 n^2 \pi R^2 I^2$$
 (31.27)

= 
$$\frac{1}{2}$$
 × 1.26 × 10<sup>-6</sup> H/m × (1.0 × 10<sup>3</sup>/m)<sup>2</sup> ×  $\pi$  × (0.020 m)<sup>2</sup> × (10 A)<sup>2</sup>  
= 7.9 × 10<sup>-2</sup> J/m

La energía almacenada en un solenoide puede expresarse en términos del campo magnético. Considérese una longitud / del solenoide. Con base en la ecuación (31.27), la energía asociada con esta porción es

$$U = \frac{1}{2}\mu_0 n^2 \pi R^2 I^2 l \tag{31.28}$$

Debido a que, para el solenoide,  $B = \mu_0 nI$ , esto puede escribirse como

$$U = \frac{1}{2\mu_0} B^2 \pi R^2 l \tag{31.29}$$

y ya que  $\pi R^2 l$  es el volumen ocupado por el campo magnético, la energía es

$$U = \frac{1}{2\mu_0} B^2 \times [\text{volumen}] \tag{31.30}$$

Según esta ecuación, la cantidad  $(1/2\mu_0)B^2$  puede considerarse como la energía magnética por unidad de volumen. Así, la densidad de energía u en el campo magnético es

[densidad de energía] = 
$$u = \frac{1}{2\mu_0} B^2$$
 (31.31)

Aunque esta ecuación sólo se ha deducido para el caso especial de un solenoide largo, resulta que es válida en general (al vacío y en materiales no magnéticos). El campo magnético, al igual que el campo eléctrico, almacena energía. La densidad de energía magnética es proporcional a  $B^2$ , así como la densidad de energía eléctrica es proporcional a  $E^2$  [compárese con la ecuación (25.58)]. Por consiguiente, la energía magnética está concentrada en las regiones espaciales en que el campo magnético es intenso.

Cerca de la superficie terrestre, la intensidad del campo magnético de la Tierra suele tener una intensidad de  $3.0 \times 10^{-5}\,\mathrm{T}$  y en términos generales, la intensidad del campo eléctrico atmosférico de la Tierra suele ser de  $100\,\mathrm{V/m}$ . ¿Cuál es la densidad de energía en cada campo?

SOLUCIÓN: La densidad de energía magnética es

$$\frac{1}{2\mu_0}B^2 = \frac{(3.0 \times 10^{-5} \,\mathrm{T})^2}{2 \times 1.26 \times 10^{-6} \,\mathrm{H/m}} = 3.6 \times 10^{-4} \,\mathrm{J/m}^3$$

y la densidad de energía eléctrica es [véase la ecuación (25.58)]:

$$\frac{\epsilon_0}{2}E^2 = \frac{8.85 \times 10^{-12} \,\text{F/m}}{2} \times (100 \,\text{V/m})^2 = 4.4 \times 10^{-8} \,\text{J/m}^3$$

Así, la densidad de energía magnética en nuestro entorno inmediato es mucho mayor que la densidad de energía eléctrica.

densidad de energía magnética en un campo magnético

EJEMPLO 12

Las bobinas de este capítul

Las bobinas del generador gigante mostrado en la foto al inicio de este capítulo tienen un volumen aproximado de 45 m<sup>3</sup>. Esas

bobinas estacionarias rodean electroimanes rotatorios, que producen un campo magnético promedio dentro de las bobinas igual a 0.35 T. ¿Cuál es la energía magnética total almacenada en el volumen de las bobinas?

**SOLUCIÓN:** La energía magnética total almacenada es el producto de la densidad de energía magnética y el volumen:

$$U = u \times [\text{volumen}] = \frac{1}{2\mu_0} B^2 \times [\text{volumen}]$$
$$= \frac{(0.35 \text{ T})^2}{2 \times 1.26 \times 10^{-6} \text{ H/m}} \times 45 \text{ m}^3 = 2.2 \times 10^6 \text{ J}$$





### Revisión 31.5

PREGUNTA 1: Si se comprime un solenoide (largo), de modo que sus espiras estén más apretadas, ¿cambia la autoinductancia?

PREGUNTA 2: En el campo magnético de un alambre recto y largo, ¿dónde es mayor la densidad de energía magnética?

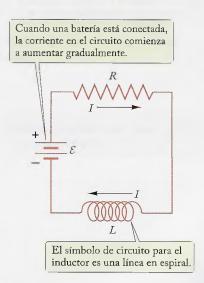
**PREGUNTA 3:** Dos inductores, con  $L=10\times 10^{-6}$  H y  $L=20\times 10^{-6}$  H, respectivamente, transportan corrientes idénticas. ¿Cuál tiene la energía magnética más grande? **PREGUNTA 4:** Considérese la energía almacenada en el campo magnético de un solenoide. Si la corriente en el solenoide se incrementa por un factor de 2, ¿en qué factor

aumenta la energía magnética?
(A)  $\sqrt{2}$  (B) 2 (C)  $2\sqrt{2}$  (D) 4

# 31.6 EL CIRCUITO RL

Este circuito consta de un resistor y un inductor conectados en serie a una batería o alguna otra fuente de fem, y es un buen ejemplo de los efectos de la autoinductancia sobre una corriente. La figura 31.24 es un esquema de este circuito. En el diagrama, el inductor está representado por una línea en espiral, que hace pensar en una bobina de alambre. La inductancia es L, la resistencia es R y la fem de la batería es  $\mathcal{E}$ . Se considera que el inductor no ofrece ninguna resistencia; si el alambre en las bobinas del inductor presentase alguna resistencia, ésta debe incluirse en R.

Se supone que la corriente en el circuito es inicialmente cero, y que la batería se conecta repentinamente en el instante inicial t=0. Luego, la corriente empieza a aumentar. Sin embargo, la autoinductancia genera una fem a través del inductor, misma que, por la ley de Lenz, se opone al incremento de la corriente. Debido a esta fem autoinducida, la corriente en el circuito no puede aumentar repentinamente; sólo puede hacerlo gradualmente. La fem autoinducida continúa oponiéndose a la corriente, restringiendo su crecimiento hasta que esta corriente alcanza su valor estacionario final,  $I=\mathcal{E}/R$ . Este valor estacionario final de la corriente es simplemente  $\mathcal{E}/R$ , como si el inductor no estuviese presente, ya que cuando la corriente se estabiliza, el inductor deja de contribuir a la fem en el circuito; es decir, deja de afectar al circuito. Cualitativamente, el aumento gradual de la corriente en un circuito RL es semejante al incremento en carga en un circuito RC. Como se verá, la gráfica de corriente contra tiempo en el cir-



**FIGURA 31.24** Circuito *RL*, que consta de un resistor y un inductor conectados en serie a una batería.

cuito RL es semejante, desde un punto de vista matemático, a la gráfica de carga contra tiempo en el circuito RC.

Para un tratamiento matemático de la corriente en el circuito, se acude a la ley del voltaje de Kirchhoff: la suma de todas las fems y las diferencias de potencial en el circuito debe ser cero. La fem de la batería es  $\mathcal{E}$ . Si en algún instante la corriente es I, la diferencia de potencial a través del resistor es -IR y la fem autoinducida a través del inductor es -L(dI/dt). Por tanto,

$$\mathcal{E} - IR - L\frac{dI}{dt} = 0 ag{31.32}$$

En el instante inicial, I=0 y la ecuación (31.32) establece que la diferencia de potencial inicial ocurre a través del inductor:  $\mathcal{E}=L(dI/dt)$ . Luego de un lapso largo, la corriente es estable, de modo que dI/dt=0, y toda la diferencia de potencial ocurre a través del resistor:  $\mathcal{E}=IR$ . En instantes intermedios, tanto el resistor como el inductor contribuyen a la diferencia de potencial.

Para calcular la corriente como una función del tiempo, la ecuación (31.32) puede resolverse igual que en la sección 28.7 para el circuito *RC*. Aplicando la técnica utilizada en las ecuaciones (28.28)-(28.33), esta integración directa produce para la corriente

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R} \left[ 1 - e^{-t/(L/R)} \right] \tag{31.33}$$

Las unidades de la cantidad L/R que aparece en la exponencial son de tiempo, esta cantidad se denomina **tiempo característico**  $\tau$  para el proceso de cambio de la corriente en el circuito:

$$\tau = \frac{L}{R} \tag{31.34}$$

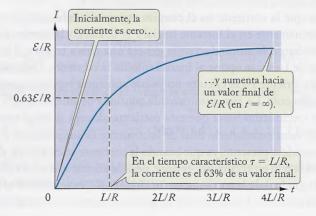
Así, en términos del tiempo característico, la corriente se escribe como

Asi, en terminos del tiempo característico, la corriente se escribe como

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R} \left( 1 - e^{-t/\tau} \right) \tag{31.35}$$

La figura 31.25 es una gráfica de corriente contra tiempo según esta fórmula, que muestra el aumento de la corriente desde su valor inicial de cero hasta su valor final de  $\mathcal{E}/R$ . En el tiempo característico,  $t = \tau = L/R$ , la corriente alcanza

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R} (1 - e^{-1}) = \frac{\mathcal{E}}{R} \left( 1 - \frac{1}{2.718} \right) = \frac{\mathcal{E}}{R} \times 0.6321$$



tiempo característico au

aumento de la corriente en el circuito RL

**FIGURA 31.25** Corriente creciente en el circuito *RL* como una función del tiempo.

Así, en el tiempo característico  $\tau = L/R$ , la corriente alcanza aproximadamente 63% de su valor final.

Aunque en el diagrama de la figura 31.24 se muestran por separado la inductancia y la resistencia, este diagrama puede representar igualmente bien una bobina hecha con alambre resistivo, como la bobina que constituye los devanados de un electroimán, que posee tanto inductancia como resistencia. Para efectos de cálculo, la inductancia y la resistencia de una bobina así pueden considerarse como si estuviesen en serie, ya que cada una produce su propio cambio de potencial en el circuito. En consecuencia, con base en los resultados para el circuito RL, se observa que siempre que un electroimán se enciende repentinamente, la corriente y el campo magnético en el imán requieren un instante para alcanzar los valores de estabilidad.

Los devanados de un gran electroimán poseen una inductancia de 10.0 H y una resistencia de 8.00 Ω. Este electroimán está conectado a una fem externa de 230 V. Después de que se enciende el electroimán, ¿en cuánto tiempo la corriente alcanza 63% de su valor final? ¿Cuál es el valor final, estable, de la corriente que se alcanza después de un lapso razonablemente largo?

SOLUCIÓN: El tiempo característico para este electroimán es

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{10.0 \text{ H}}{8.00 \Omega} = 1.25 \text{ s}$$

Éste es el tiempo necesario para alcanzar 63% del valor final de la corriente.

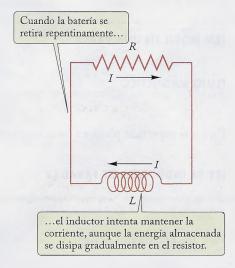
El valor final, estable de la corriente es

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R} = \frac{230 \text{ V}}{8.00 \Omega} = 28.8 \text{ A}$$

Este valor de la corriente se alcanza después de un lapso largo; es decir, un tiempo grande en comparación con 1.25 s.

Una vez que la corriente se ha estabilizado en su valor final  $\mathcal{E}/R$ , seguirá fluyendo sin cambio mientras la batería siga aportando una fem estable  $\mathcal{E}$ . Pero si se retira la batería y, al mismo tiempo, se cierra el espacio en el circuito (véase la figura 31.26), el inductor tratará de mantener la corriente; sin embargo, la energía almacenada se irá disipando gradualmente a  $I^2R$  en el resistor. El resultado es un decremento gradual de la corriente, de  $\mathcal{E}/R$  a 0. La fórmula que describe el decremento de la corriente tiene la misma función exponencial que se muestra en la ecuación (31.33), con el mismo tiempo característico  $\tau = L/R$ :

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R} e^{-t/(L/R)} \tag{31.36}$$



**FIGURA 31.26** Un circuito *RL* sin batería.

disminución de la corriente en un circuito *RL* 



## Revisión 31.6

PREGUNTA 1: Supóngase que el electroimán descrito en el ejemplo 13 se apaga retirando la fem y, al mismo tiempo, cerrando el intervalo resultante con un alambre de resistencia cero. ¿Cuánto tiempo se requiere para que la corriente en los devanados descienda a 37% de su valor inicial?

**PREGUNTA 2:** Un circuito *RL* con una gran inductancia tiene un tiempo de relajación largo. ¿Por qué tiene sentido este hecho?

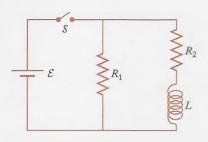


FIGURA 31.27 Un circuito RL con dos resistores.

PREGUNTA 3: Un circuito RL con una resistencia baja posee un tiempo de relajación largo. ¿Por qué tiene sentido este hecho?

PREGUNTA 4: Según la figura 31.25, ; en qué instante la corriente en el circuito RL alcanza la mitad de su valor final?

PREGUNTA 5: El interruptor S en la figura 31.27 permanece abierto durante un tiempo largo. Se cierra en t = 0. ¿Cuál es la corriente que pasa a través del conductor inmediatamente después de que se cierra el interruptor?

(A) 0 (B) 
$$\mathcal{E}/R_1$$
 (C)  $\mathcal{E}/R_2$  (D)  $\mathcal{E}/(R_1 + R_2)$  (E)  $\mathcal{E}(R_1 + R_2)/R_1R_2$ 

## RESUMEN

TÉCNICAS PARA RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS

Ley de Faraday, ley de Lenz

(página 1005)

LA FÍSICA EN LA PRÁCTICA

Levitación magnética

(página 1008)

FEM MÓVIL EN UNA BARRA

$$\mathcal{E} = lvB$$

(31.1)

**FLUJO MAGNETICO** 

$$\Phi_B = \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = \int B_\perp \, dA$$

(31.4)

Para una superficie plana en un campo uniforme

$$\Phi_R = B_{\perp} A = BA \cos \theta$$

(31.5)

LEY DE INDUCCIÓN DE FARADAY

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

(31.7)

Para una bobina con N vueltas:

$$\mathcal{E} = -N \frac{d\Phi_1}{dt}$$

(31.9)

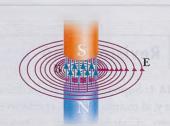
 $d\Phi_R/dt$  puede surgir de un cambio en el campo magnético (ejemplo 3), de un cambio en el área (ejemplo 5) o de un cambio en la orientación del área (ejemplo 4).

LEY DE LENZ La corriente inducida se opone al cambio que la produjo.

#### CAMPO ELÉCTRICO INDUCIDO

$$\mathcal{E} = \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = \oint E_{\parallel} ds = -\frac{d\Phi_{B}}{dt}$$

$$\oint E_{\parallel} ds = E_{\parallel} \times 2\pi r$$



(31.12)

INDUCTANCIA MUTUA M	$\Phi_{B1}=MI_1$	bobina 1 bobina 2	(31.14)
	$\mathcal{E}_2 = -M \frac{dI_1}{dt}$	B <sub>1</sub>	(31.15)
	$\mathcal{E}_1 = -M \frac{dl_2}{dt}$		(31.16)
AUTOINDUCTANCIA L	$\Phi_B = LI$		(31.20)
	$\mathcal{E} = -L \frac{dI}{dt}$		(31.21)
AUTOINDUCTANCIA DE UN SOLENOIDE	$L = \mu_0 n^2 \pi R^2 l$		(31.23)
ENERGÍA MAGNÉTICA EN UN INDUCTOR	$U = \frac{1}{2}LI^2$		(31.26)
DENSIDAD DE ENERGÍA EN UN CAMPO MAGNÉTICO	$u = \frac{1}{2\mu_0}B^2$		(31.31)
TIEMPO CARACTERÍSTICO DE UN CIRCUITO RL	au = L/R		(31.34)
CORRIENTE EN UN CIRCUITO RL	$I = \frac{\bar{\mathcal{E}}}{R} \left( 1 - e^{-t/\tau} \right)$	corriente creciente	(31.35)
	$I = \frac{\mathcal{E}}{R}  e^{-t/\tau}$	corriente decreciente	(31.36)

## PREGUNTAS PARA DISCUSIÓN

- 1. A la latitud de Estados Unidos de América, el campo magnético de la Tierra tiene un componente hacia el sur, más grande que el componente hacia el norte. Si en este campo magnético un avión vuela hacia el oeste, entre las puntas de sus alas, ¿hay una fem? ¿Qué punta de ala es positiva? ¿Hay flujo de corriente?
- 2. ¿Cuál es el flujo magnético producido por el campo magnético de la Tierra a través de la superficie terrestre?
- 3. La ecuación (31.12), ¿es válida para una trayectoria abierta? La ecuación (31.7), ¿es válida para una trayectoria cerrada?
- 4. Un alambre recto y largo transporta una corriente estable. Una bobina cuadrada conductora está en el mismo plano que el alambre. Si la espira se aproxima al alambre, ¿cómo es la dirección de la corriente inducida en la bobina con respecto a la dirección de la corriente en el alambre?
- 5. Una **bobina exploradora** sirve para medir la intensidad de un campo magnético. Consta de una pequeña bobina con muchas

- vueltas conectada a un amperímetro sensible. La bobina está colocada de frente al campo magnético y repentinamente se da vuelta. ¿Cómo indica este hecho la presencia del campo magnético?
- 6. El magneto usado en el sistema de ignición de los motores de automóviles antiguos consta de un imán permanente montado en el volante del motor. A medida que el volante gira, el imán pasa por una bobina estacionaria, que está conectada a la bujía de encendido. ¿Cómo produce una chispa este dispositivo?
- 7. Un alambre recto y largo transporta una corriente que crece como una función del tiempo. Cerca del alambre y en el mismo plano que éste hay una bobina rectangular. ¿Cómo se induce la dirección de la corriente en la bobina con respecto a la dirección de la corriente en el alambre?
- 8. Considérense dos circuitos rectangulares adyacentes que están en el mismo plano. Si la corriente en un circuito se corta repentinamente, ¿cuál es la dirección de la corriente inducida en el otro circuito?

9. En la figura 31.28 se muestran dos bobinas de alambre enrollado alrededor de un cilindro de plástico. Si se incrementa la corriente en la bobina izquierda, ¿cuál es la dirección de la corriente inducida en la bobina de la derecha?

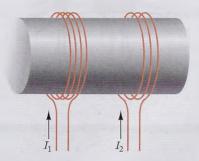
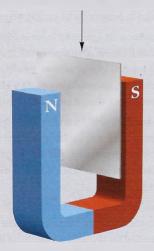


FIGURA 31.28 Dos bobinas de alambre adyacentes.

- Un anillo circular conductor se aproxima hacia el polo norte de un imán de barra. Descríbase la dirección de la corriente inducida en el anillo.
- 11. La obra *Élements de Physique* de Ganot, un libro de texto clásico del siglo XIX, establece las reglas siguientes para la corriente inducida en una espira que está de frente a otra espira:
  - Si la distancia permanece igual, una corriente continua y constante no induce ninguna corriente en un conductor adyacente.
  - II. Una corriente, en el instante en que es interrumpida, produce una corriente inducida en un conductor adyacente.
  - III. Una corriente, en el momento en que cesa, produce una corriente directa.
  - IV. Una corriente que se elimina, o cuya intensidad disminuye, origina una corriente directa inducida.
  - V. Una corriente a la que se acerca, o cuya intensidad aumenta, origina una corriente inversa inducida.

Explíquense estas reglas con base en la ley de Lenz.

12. Una hoja de aluminio se empuja entre los polos de un imán en forma de herradura (véase la figura 31.29). Descríbase la dirección de flujo de las corrientes inducidas, o corrientes parásitas,



**FIGURA 31.29** 

Hoja de aluminio e imán en forma de herradura.

- en la hoja. ¿Por qué hay una poderosa fuerza de fricción que se opone al movimiento de la hoja?
- 13. En algunas balanzas de brazo se utiliza un mecanismo de amortiguamiento para detener el movimiento excesivo del brazo. Este mecanismo consta de una pequeña placa conductora sujeta al brazo y un pequeño imán montado sobre un soporte fijo cerca de esta placa. ¿Cómo amortigua esto el movimiento del brazo? (Sugerencia: Consúltese la pregunta precedente.)
- 14. Un imán de barra, orientado verticalmente, se deja caer hacia una placa horizontal plana de cobre. ¿Por qué entre el imán de barra y la placa de cobre hay una fuerza de repulsión. ¿Se trata de una fuerza elástica?; es decir, ¿el imán de barra rebota si éste es muy poderoso?
- 15. Un anillo conductor cae hacia un imán de barra (véase la figura 31.30). ¿Por qué entre el anillo y el imán hay una fuerza de repulsión? ¿Por qué no hay tal fuerza si el anillo tiene un corte en forma de ranura? (Obsérvense las líneas punteadas en la figura 31.30.)



FIGURA 31.30 Anillo conductor que cae hacia un imán de barra. Las líneas punteadas indican el sitio en que el anillo tiene un corte en forma de ranura.

- 16. Se tienen dos bobinas, una de radio ligeramente más pequeño que la otra. A fin de lograr una inductancia mutua máxima, ¿se colocarían estas bobinas frente a frente o una dentro de la otra!
- 17. Dos bobinas circulares están separadas por cierta distancia. ¿Cómo varía cualitativamente la inductancia mutua como una función de la orientación de las bobinas?
- 18. Si una poderosa corriente circula en un circuito y de pronto se interrumpe el circuito (al abrir un interruptor), es probable que una gran chispa salte a través del circuito. ¿Cómo puede explicarse este hecho?
- 19. ¿Qué argumentos pueden proporcionarse a favor de que la energía magnética de un inductor está almacenada en el campagnético, y no en la corriente?

## **PROBLEMAS**

#### 31.1 Fem de movimiento

- 1. Un automóvil se desplaza a 88 km/h sobre un camino horizontal. El componente vertical hacia abajo del campo magnético de la Tierra es 5.8 × 10<sup>-5</sup> T. ¿Cuál es la fem inducida entre las manijas de las puertas izquierda y derecha, que están separadas entre sí por una distancia de 1.8 m? ¿Cuál lado es positivo y cuál es negativo?
- 2. La envergadura de las alas de un jet DC-10 mide 47 m. Si este avión vuela horizontalmente a 960 km/h en un sitio en que el componente vertical del campo magnético de la Tierra es  $6.0 \times 10^{-5}$  T, ¿cuál es la fem inducida entre las alas?
- 3. Para detectar el movimiento del agua en el océano, los oceanógrafos algunas veces dependen de la fem de movimiento generada por el movimiento del agua a través del campo magnético de la Tierra. Supóngase que, en un sitio en que el campo magnético vertical es  $7.0\times10^{-5}\,\mathrm{T}$ , dos electrodos están inmersos en el agua a una distancia de 200 m entre sí, medida perpendicularmente respecto al movimiento del agua. Si un voltímetro sensible conectado a los electrodos indica una diferencia de potencial de  $7.0\times10^{-3}\,\mathrm{V}$ , ¿cuál es la velocidad del agua?
- 4. Una deportista corre hacia el norte a 9.0 m/s a través del campo magnético de la Tierra que, en la ubicación de la deportista, tiene un componente vertical hacia abajo de 6.0 × 10<sup>-5</sup> T. ¿Cuál es la fem de movimiento entre el hombro izquierdo y el hombro derecho de la deportista, cuya distancia entre sí es de 50 cm?
- 5. La rapidez de flujo de un líquido conductor puede medirse con un medidor de flujo electromagnético que detecta la fem inducida por el movimiento del líquido en un campo magnético. Supóngase que un tubo de plástico de 10 cm de diámetro transporta cerveza a una velocidad de 1.5 m/s. El tubo se encuentra en un campo magnético transversal de 1.5 × 10<sup>-2</sup> T. ¿Qué fem se induce entre los lados opuestos de la columna de líquido?
- 6. En un tubo de rayos X, un electrón se mueve en forma paralela al componente horizontal del campo magnético de la Tierra a una velocidad  $1.2\times10^7$  m/s. El componente vertical del campo magnético de la Tierra en el tubo es igual a  $5.5\times10^{-5}$  T. ¿Cuál es el campo eléctrico inducido en el marco de referencia del electrón?
- \*7. Supóngase que la barra en la figura 31.2 mide 0.86 m de longitud, que el resistor tiene un valor de 2.2  $\Omega$  y que un campo magnético de 8.0 T está dirigido hacia la página. La resistencia de la barra y de las vías es despreciable. La barra es empujada hacia la izquierda con una rapidez constante. ¿Qué rapidez produce una corriente de 1.5 A en el resistor? ¿En qué dirección fluye la corriente? ¿Qué fuerza de atracción debe aplicarse a fin de mantener una corriente estable?
- \*8. Un automóvil con una antena de radio vertical de 75 cm de longitud se dirige hacia el este a 80 km/h. El campo magnético de la Tierra tiene una magnitud de  $0.70 \times 10^{-4} \, \mathrm{T}$  y está dirigido a 52° hacia abajo con respecto a la dirección norte. ¿Cuál es

la fem generada entre la parte inferior y la parte superior de la antena? ¿Qué extremo se encuentra al potencial más alto?

## 31.2 Ley de Faraday

### 31.3 Algunos ejemplos; ley de Lenz

- 9. Un helicóptero tiene aspas de 4.0 m de longitud y están girando a 3.0 rev/s en un plano horizontal. Si el componente vertical del campo magnético de la Tierra es 6.5 × 10<sup>-5</sup> T, ¿cuál es la fem inducida entre la punta de un aspa y el casco?
- 10. El plano de una bobina inicialmente forma ángulos rectos con la dirección de un campo magnético aplicado. ¿A qué ángulo debe girarse la bobina para *invertir* la dirección del flujo y reducir la magnitud del flujo a través de la bobina a 30% de su valor inicial?
- 11. En Idaho, el campo magnético de la Tierra apunta hacia abajo a un ángulo de 69° por abajo de la horizontal. La intensidad del flujo magnético es  $5.9 \times 10^{-5}$  T. ¿Cuál es el flujo magnético a través de 1.0 m² de suelo en Idaho?
- 12. Un generador electromagnético como el descrito en el ejemplo 4 tiene una bobina de  $2.0\times10^{-4}\,\mathrm{T}$  de área, con 300 vueltas de alambre. ¿Cuál es la amplitud de la fem alterna proporcionada por esta bobina cuando gira a razón de 2 000 rev/min en un campo magnético de 0.020 T?
- 13. Un generador unipolar consta de un disco metálico que rota alrededor de un eje horizontal en un campo magnético horizontal uniforme. El circuito externo está conectado a escobillas que tocan el disco en el aro y en el eje. Si el radio del disco mide 1.2 m y la intensidad del campo magnético es 6.0 × 10<sup>-2</sup> T, ¿con qué rapidez (rev/s) es necesario hacer girar el disco para obtener una fem de 6.0 V? (Sugerencia: Cualquier radio del disco puede considerarse como una barra conductora; consúltese el ejemplo 5.)
- 14. Los pulsares, o estrellas de neutrones, rotan a una velocidad muy elevada y están rodeados por intensos campos magnéticos. La materia en las estrellas de neutrones es un conductor aceptable, y por ello entre el centro de la estrella de neutrones y el aro se induce una fem (esto es semejante a la fem inducida en una barra metálica rotatoria; consúltese el ejemplo 5). Suponga que una estrella de neutrones de 10 km de radio gira con una rapidez de 30 rev/s y que la intensidad del campo magnético es igual a 1.0 × 10<sup>8</sup> T. ¿Cuál es la fem inducida entre el centro de la estrella y un punto en su ecuador?
- 15. En los hospitales se utilizan grandes imanes conductores para obtener fotografías del interior del cuerpo por imagenología por resonancia magnética (MRI: magnetic resonance imaging). Para este efecto, el paciente es introducido entre las bobinas del imán, donde el campo magnético es de 1.5 T (véase la figura 31.31). Supóngase que el paciente se introduce al campo magnético durante 10 s. Calcúlese la fem inducida alrededor del tronco del paciente, que mide 0.90 m de circunferencia. ¿El paciente debe introducirse al campo magnético más lentamente?



FIGURA 31.31 Gran imán usado para MRI.

16. El imán de barra que se muestra en la figura 31.32 se empuja a través de la bobina con una rapidez constante. Considérense las etapas siguientes: *a*) cuando el polo norte se aproxima a la bobina; *b*) cuando el imán está en el centro de la bobina, y *c*) cuando el polo sur sale por el lado derecho de la bobina. ¿Cuál es la dirección de la corriente en los resistores en cada una de las etapas?

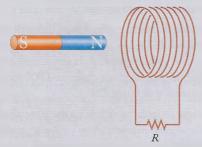


FIGURA 31.32 Imán de barra y bobina.

- 17. Una bobina circular tiene 250 vueltas de alambre de cobre de 1.0 mm de diámetro y su área es de 0.35 m². Un campo magnético dirigido a 30° con respecto al plano de la bobina aumenta de manera uniforme desde cero hasta 5.5 T en 35 s. ¿Cuál es la fem inducida a través de la bobina durante este tiempo? Si los extremos de la bobina están conectados, ¿qué corriente circula? ¿Cuánta energía eléctrica se disipa durante este tiempo?
- \*18. Una espira circular de alambre se coloca en un campo magnético de 0.30 T, mientras los extremos libres del alambre se conectan a un resistor de  $15~\Omega$ , como se muestra en la figura 31.33.

  Cuando se tuerce la espira, su área se reduce a razón constante

área se reduce a razón constante desde 200 hasta 100 cm² en 0.020 s. ¿Cuáles son la magnitud y la dirección de la corriente en el resistor?

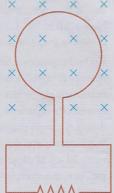


FIGURA 31.33 Bobina circular en un campo magnético.

- \*19. Un disco compacto (CD) se coloca en un campo magnético de 1.5 T y gira a 210 rev/min alrededor de un eje paralelo al campo. ¿Cuál es la fem generada entre un punto en su pista externa (radio 5.8 cm) y un punto en su pista interna (radio 2.3 cm)?
- \*20. Una bobina larga conductora rectangular de 25 cm de ancho se encuentra parcialmente en una región de un campo magnético horizontal de 1.8 T perpendicular a la bobina, como se muestra en a figura 31.34. La masa de la bobina es de 12 g y su resistencia es de 0.17 Ω. Si la bobina se libera, ¿cuál es la velocidad terminal? Supóngase que la parte superior de la bobina permanece en el campo magnético. (Sugerencia: La velocidad terminal ocurre cuando la fuerza magnética sobre la corriente inducida es igual en magnitud a la fuerza gravitacional.)

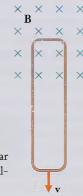


FIGURA 31.34 Bobina rectangular descendente que se encuentra parcialmente en un campo magnético.

\*21. Una bobina rectangular de ancho w = 0.30 m y largo h = 0.50 m es coplanar con un alambre largo que transporta una corriente de 2.5 A. La distancia de la bobina al alambre es d = 0.10 m. como se muestra en la figura 31.35. ¿Cuál es el flujo a través de la bobina? [Sugerencia: Üsese la ecuación (31.4) para sumar los flujos a través de las tiras verticales de área dA = h dr.]

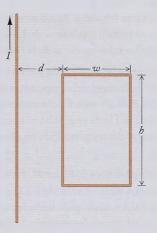
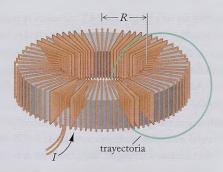


FIGURA 31.35 Alambre recto largo y bobina rectangular.

\*22. Un toroide tiene 150 vueltas en una sección transversal rectangular de altura 4.0 cm y ancho 6.5 cm, como se muestra en la figura 31.36. El radio interno del toroide es R=7.0 cm. La corriente en el alambre del toroide es I=2.0 A. ¿Cuál es el flujo a través de la trayectoria circular que se muestra en la figura [Sugerencia: Úsese la ecuación (31.4) para sumar los flujos a través de las tiras verticales de área dA=h dr.]



**FIGURA 31.36** Un toroide con sección trasversal rectangular y una trayectoria circular.

- \*23. La corriente en un solenoide largo de radio R=3.0 cm aumenta de manera uniforme a razón de 1.5 A/s. El solenoide tiene 350 vueltas por metro. ¿Cuál es el campo magnético inducido a una distancia r del eje del solenoide cuando a) r=2.0 cm y b) r=4.0 cm?
- \*24. El plano de una bobina de alambre circular de radio 3.5 cm inicialmente es perpendicular a un campo magnético de 8.2 T. Luego, la bobina se hace girar 90°, de modo que el campo magnético sea paralelo al plano de la bobina. ¿Cuánta carga circula por cualquier punto de la bobina durante este proceso? La resistencia de la bobina es 25 Ω.
- \*25. Un disco metálico con resistencia despreciabe mide 12 cm de diámetro. El disco se hace girar a 300 rev/s mientras se encuentra en un campo magnético de 5.5 T perpendicular al disco. Un extremo de un resistor de 33 Ω está en contacto con el centro del disco; el otro extremo del resistor está en contacto con el borde del disco. ¿Cuánta corriente circula en el resistor? ¿Qué momento de torsión debe suministrarse al disco para mantener esta corriente?
- \*26. Un tren muy largo cuyas ruedas metálicas están separadas por una distancia de 4 pies 9 pulg se desplaza a 80 mi/h sobre una vía horizontal. El componente vertical del campo magnético de la Tierra es  $6.2 \times 10^{-5}$  T.
  - a) ¿Cuál es la fem inducida entre las ruedas derechas y las ruedas izquierdas?
  - b) Las ruedas están en contacto con los rieles; éstos están conectados por medio de durmientes metálicos transversales que cierran el circuito y permiten el paso de una corriente de un riel al otro. Debido a que el número de durmientes es bastante grande, su resistencia combinada es casi cero; la mayor parte de la resistencia del circuito está dentro del tren. ¿Cuál es la corriente que circula en cada eje del tren? Los ejes son barras cilíndricas de hierro que miden 3 pulg de diámetro y 4 pies 9 pulg de largo.
  - c) Calcúlese la potencia disipada y la fuerza de fricción efectiva sobre el tren.
- \*27. Una bobina cuadrada que mide 8.0 cm × 8.0 cm está hecha de alambre de cobre de 1.0 mm de diámetro. La bobina se coloca de frente a un campo magnético que aumenta a razón constante de 80 T/s. ¿Qué corriente inducida circula a través de la bobina? Elabórese un diagrama que muestre la dirección del campo y la corriente inducida.

- \*28. Un solenoide muy largo de 5.0 cm de radio con 20 vueltas por centímetro está rodeado por una bobina rectangular de alambre de cobre. La bobina rectangular mide 10 cm  $\times$  30 cm, y el radio de su alambre mide 0.050 cm. La resistividad del cobre es  $1.7 \times 10^{-8} \ \Omega \cdot$  m. ¿Cuál es la corriente inducida en la bobina rectangular, si la corriente en el solenoide aumenta con una rapidez de  $5.0 \times 10^4 \ A/s$ ?
- \*29. Una bobina rectangular que mide 20 cm × 80 cm está hecha de alambre de cobre pesado de 0.13 cm de radio. Supóngase que esta bobina se introduce, primero el lado corto, a una rapidez de 0.40 m/s en un campo magnético de 5.0 × 10<sup>-2</sup> T. El rectángulo está de frente al campo magnético, y el lado corto restante permanece fuera del campo magnético (véase la figura 31.37). ¿Qué corriente inducida circula alrededor de la bobina?

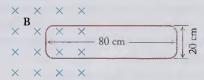


FIGURA 31.37 Bobina rectangular parcialmente inmersa en un campo magnético.

\*30. Una rondana (anillo) de aluminio está en la parte superior de un solenoide vertical (véase la figura 31.38). Cuando la corriente en el solenoide se conecta repentinamente, la rondana salta hacia arriba. Explíquese cuidadosamente por qué en estas circunstancias el extremo del solenoide ejerce una fuerza de repulsión sobre la rondana. (Sugerencia: Considérese que, en el extremo del solenoide, las líneas del campo magnético se separan.)



**FIGURA 31.38** Rondana ubicada en la parte superior de un solenoide.

- \*31. El campo magnético de un betatrón de radio 1.0 m tiene una amplitud de oscilación de 0.90 T y una frecuencia de 60 Hz. ¿Cuál es la amplitud de oscilación del campo eléctrico inducido en un radio de 0.80 m? ¿Y en un radio de 1.5 m? ¿Cuál es la amplitud de oscilación de la fem inducida alrededor de trayectorias circulares de cada uno de estos radios? (Considérese que el betatrón es una región con campo magnético uniforme.)
- \*\*32. Una bobina cuadrada que mide  $l \times l$  se mueve con una rapidez v hacia un alambre recto que transporta una corriente l. El alambre y la bobina están en el mismo plano, y dos de los lados de la bobina son paralelos al alambre. ¿Cuál es la fem inducida de la bobina como una función de la distancia d entre el alambre y el lado más próximo de la bobina?

\*\*33. Una bobina circular de alambre aislado tiene un radio de 9.0 cm y contiene 60 vueltas de alambre. Los extremos del alambre están conectados en serie a un resistor de 15 Ω que cierra el circuito. La normal a la bobina está inicialmente paralela a un campo magnético constante de 5.0 × 10<sup>-2</sup> T. Si se da vuelta a la bobina, de modo que se invierta la dirección de la normal, por el resistor circulará una corriente. ¿Qué cantidad de carga pasa por el resistor? Supóngase que la resistencia del alambre es despreciable en comparación con la del resistor. (Sugerencia: Supóngase que para dar la vuelta se requiere un tiempo Δε. ¿Cuál es la razón de cambio media del flujo magnético? ¿Y la fem inducida media? ¿Y la corriente media?

#### 31.4 Inductancia

34. Dos bobinas están colocadas frente a frente, como en la figura 31.21. Su inductancia mutua es  $2.0 \times 10^{-2}$  H. La corriente en la bobina 1 oscila sinusoidalmente con una frecuencia de 60 Hz y una amplitud de 12 A:

$$I_1 = 12 \operatorname{sen}(120 \pi t)$$

donde la corriente se mide en amperes, y el tiempo, en segundos.

- a) ¿Cuál es el flujo magnético que esta corriente genera en la bobina 2 en el instante t = 0?
- *b*) ¿Cuál es la fem que esta corriente induce en la bobina 2 en el instante t = 0?
- c) ¿Cuál es la dirección de la corriente inducida en la bobina 2 en el instante t=0, según la ley de Lenz? Supóngase que la dirección positiva para la corriente  $I_1$  es la indicada por la flecha en la figura.
- 35. Una corriente de 15 A en una bobina produce un flujo magnético de 0.10 T·m², o 0.10 Wb, a través de cada una de las vueltas de una bobina adyacente de 60 vueltas. ¿Cuál es la inductancia mutua?
- 36. Un solenoide largo tiene 400 vueltas por metro. Una bobina de 1.0 cm de radio con 30 vueltas de alambre aislado se coloca dentro del solenoide, con su eje paralelo al eje del solenoide. ¿Cuál es la inductancia mutua? ¿Qué fem se induce alrededor de la bobina si la corriente en los devanados del solenoide cambia a razón de 200 A/s?
- 37. Una bobina de alambre que transporta una corriente de  $100~\mathrm{A}$  genera un flujo magnético de  $50~\mathrm{T}\cdot\mathrm{m}^2$ , o  $50~\mathrm{Wb}$ , a través del área limitada por la bobina.
  - a) ¿Cuál es la autoinductancia de la bobina?
  - b) Si la corriente decrece a razón de dI/dt = 20 A/s, ¿cuál es la fem inducida?
- 38. Un solenoide largo tiene 2 000 vueltas por metro y 2.0 cm de radio.
  - a) ¿Cuál es la autoinductancia para un segmento de 1.0 m de este solenoide?
  - b) ¿Qué fuerza contraelectromotriz genera este segmento si la corriente en el solenoide cambia a razón de  $3.0 \times 10^2$  A/s?
- 39. Un solenoide con autoinductancia de  $2.2 \times 10^{-3}$  H, en el que inicialmente no hay corriente, se conecta repentinamente en se-

- rie con los polos de una batería de 24 V. ¿Cuál es la razón inicial instantánea de incremento de la corriente en el solenoide?
- 40. Un inductor de 7.5 mH transporta una corriente dependiente del tiempo definida por  $I=C_1t-C_2t^2$ , donde t está en segundos,  $C_1=65$  A/s y  $C_2=25$  A/s $^2$ . ¿Cuál es la fem inducida a través del inductor en t=1.0 s? ¿Y en t=2.0 s?
- 41. Un solenoide superconductor tiene una inductancia de 25 H. Si la corriente en el solenoide aumenta a razón de 0.075 A/s, ¿qué fem debe suministrarse a través de las terminales del solenoide?
- 42. En un circuito digital rápido, la sincronización de las señales a menudo está limitada por la inductancia de los componentes del circuito. Supóngase que repentinamente se aplica una fem de 5.0 V a una inductancia efectiva de 2.5 μH. ¿Cuánto tiempo se requiere para que la corriente en el inductor llegue a 2.0 mA?
- \*43. Un solenoide largo de radio R tiene n vueltas por unidad de longitud. Una bobina circular de radio R' con 200 vueltas rodea al solenoide (véase la figura 31.39). ¿Cuál es la inductancia mutua? ¿Importa la forma de la bobina de alambre?

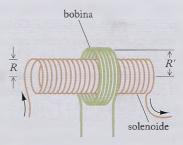


FIGURA 31.39 Solenoide largo rodeado por una bobina circular.

\*44. Dos solenoides concéntricos largos de  $n_1$  y  $n_2$  vueltas por longitud unitaria tienen radios  $R_1$  y  $R_2$ , respectivamente (véase la figura 31.40). ¿Cuál es la inductancia mutua por longitud unitaria de los solenoides? Supóngase que  $R_1 < R_2$ .

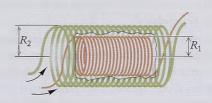


FIGURA 31.40 Dos solenoides concéntricos largos.

- \*45. ¿Cuál es la inductancia mutua entre el alambre largo y la bobina rectangular descritos en el problema 21?
- \*46. Un horno de inducción utiliza las corrientes parásitas para fundir metales y a menudo se usa para producir aleaciones o desarrollar cristales de materiales conductores. Un horno de inducción articular usa un solenoide de 15 vueltas de 25 cm de longitud y 3.0 cm de radio. La corriente en el horno oscila sinusoidalmente según  $I=I_{\text{máx}}$  sen  $\omega t$ , donde  $I_{\text{máx}}=2.5$  A y  $\omega=1.2\times10^7$  rad/s. ¿Cuál es el voltaje máximo inducido a través del solenoide? Ignórese cualquier resistencia.

- \*\*47. Dos inductores de autoinductancia  $L_1$  y  $L_2$  están conectados en paralelo. Los inductores están protegidos magnéticamente entre sí, de modo que ninguno produce flujo en el otro. Demuéstrese que la autoinductancia de la combinación está dada por  $1/L = 1/L_1 + 1/L_2$ .
- \*\*48. Dos inductores de autoinductancia  $L_1$  y  $L_2$  están conectados en serie. Los inductores están protegidos magnéticamente entre sí, de modo que ninguno produce flujo en el otro. Demuéstrese que la autoinductancia de la combinación es  $L = L_1 + L_2$ .

## 31.5 Energía magnética

- 49. Un anillo de alambre grueso tiene una autoinductancia de  $4.0 \times 10^{-8}$  H. ¿Cuánto trabajo es necesario realizar para establecer una corriente de 25 A en este anillo?
- 50. En una región al vacío que contiene un campo magnético de 1.0 T y un campo eléctrico de 1.0 V/m, ¿cuál campo tiene mayor densidad de energía?
- 51. ¿Cuál es la densidad de energía magnética en un punto a 3.0 mm de un alambre largo que transporta una corriente de 24 A?
- 52. El campo magnético más intenso obtenido en un laboratorio es de aproximadamente 1.0 × 10<sup>3</sup> T. Este campo sólo puede ser producido durante un breve instante al comprimir las líneas de campo magnético con un dispositivo explosivo. ¿Cuál es la densidad de energía en este campo?
- 53. Para cada una de las seis primeras entradas en la tabla 29.1, calcúlese la densidad de energía en el campo magnético.
- 54. Para una estimación burda de la energía en el campo magnético de la Tierra, supóngase que la intensidad de este campo es 5.0  $\times$  10<sup>-5</sup> T desde el suelo hasta una altitud de 6.0  $\times$  10<sup>6</sup> m sobre el nivel del suelo. ¿Cuál es la energía magnética total en esta región?
- 55. Un solenoide superconductor transporta una corriente de 55 A, tiene una inductancia de 35 H y produce un campo magnético de 9.0 T. ¿Cuánta energía se almacena en el solenoide? ¿Cuál es el volumen del solenoide?
- 56. Supóngase que la energía magnética almacenada en un inductor es 2.0 × 10<sup>-3</sup> J cuando la corriente en este inductor es de 30 A. ¿Cuál es la energía magnética del mismo inductor si la corriente es de 60 A? ¿Y si es de 90 A?
- 57. La autoinductancia del cable de aluminio de una línea de transmisión de alto voltaje es  $6.6 \times 10^{-4} \, \mathrm{H}$  por kilómetro de longitud. Si el cable transporta una corriente de 800 A, ¿cuál es la energía en el campo magnético del cable, por kilómetro?
- \*58. Según una propuesta, el excedente de energía de una planta generadora puede almacenarse temporalmente en el campo magnético dentro de un toroide muy largo. Si la intensidad del campo magnético es de 10 T, ¿qué volumen del campo magnético se requiere para almacenar  $1.0 \times 10^5 \, \mathrm{kW} \cdot \mathrm{h}$  de energía? Si las proporciones del toroide son aproximadamente las de una dona, ¿cuál es su tamaño aproximado? (Sugerencia: El volumen del toroide es igual al área de la sección transversal multiplicada por  $2\pi$  y el radio medio.)

\*\*59. Dos largos tubos concéntricos hechos de una lámina metálica transportan corrientes iguales en direcciones opuestas. El radio del tubo interior es de 1.5 cm y el del tubo exterior, de 3.0 cm. La corriente en la superficie de cada tubo es de 120 A. ¿Cuál es la energía magnética en un segmento de 1.0 m de estos tubos?

#### 31.6 El circuito RL

- 60. Un inductor con  $L=2.0~{\rm H}$  y un resistor con  $R=100~\Omega$  se conectan repentinamente en serie a una batería con  $\mathcal{E}=6.0~{\rm V}$ .
  - a) ¿Cuál es la corriente en t = 0? ¿Y en t = 0.010 s? ¿Y en t = 0.020 s?
  - b) ¿Cuál es el valor final, estable, de la corriente?
  - c) ¿Cuál es la razón de incremento de la corriente en t = 0?
- 61. Considérese el circuito RL que se muestra en la figura 31.26. En el instante en t = 0, el circuito tiene una corriente inicial  $\mathcal{E}/R$ . Aplicando la regla de Kirchhoff a este circuito, debe encontrarse una ecuación diferencial para dI/dt. Demuéstrese que la ecuación (31.36) es una solución de esta ecuación diferencial.
- 62. Diséñese un circuito *RL* con una disposición de interruptores de modo que sea posible apagar repentinamente del circuito la batería y que la corriente del inductor pueda alimentarse repentinamente hacia el resistor. Si la autoinductancia del resistor es 0.20 H, ¿qué resistencia se requiere para obtener un tiempo característico de 10 s en el circuito?
- 63. Un imán superconductor tiene una inductancia de 45 H y transporta una corriente de 65 A. Las terminales que suministran corriente al imán se retiran inmediatamente después de que a ellas se conecta un resistor. La corriente en el imán cae a cero con un tiempo característico de 12 s.
  - a) ¿Cuál es el valor del resistor?
  - b) ¿Cuál es la razón inicial de disipación de energía en el resistor?
  - c) ¿Cuál es la energía total disipada en el resistor al cabo de un gran lapso?
- 64. Inicialmente, el interruptor que se muestra en la figura 31.41 se abre y por el circuito no circula ninguna corriente. El interruptor se cierra en t = 0.
  - a) Inmediatamente después de que se cierra el interruptor, ¿cuáles son las corrientes en el inductor, en el resistor  $R_1$  y en el resistor  $R_2$ ?
  - b) Después de que el interruptor permanece cerrado durante mucho tiempo, ¿cuáles son las tres corrientes que hay?

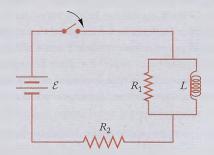


FIGURA 31.41 Un circuito RL con dos resistores.

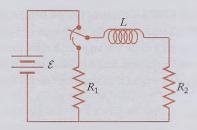


FIGURA 31.42 Un circuito RL con dos resistores.

- 65. Algunas veces, los circuitos RL se utilizan para generar pulsos de alto voltaje. Considérese el circuito que se muestra en la figura 31.42, donde  $\mathcal{E}=12$  V,  $R_1=1.5$  k $\Omega$  y  $R_2=6.0$   $\Omega$ . El interruptor ha estado en la parte superior, conectado durante mucho tiempo a la batería.
  - a) ¿Cuál es la corriente en el inductor?
  - b) Repentinamente, el interruptor se coloca en la parte inferior. ¿Cuál es el voltaje a través del inductor inmediatamente después de que el interruptor se coloca en la parte inferior?
- 66. Supóngase que el interruptor en la figura 31.27 ha estado cerrado durante mucho tiempo. Se abre en t = 0. ¿Cuál es la corriente en el inductor para t ≥ 0? ¿Cuál es el voltaje a través de R₁ para t > 0? ¿Y a través de R₂?
- 67. Encuéntrese la constante de tiempo para el circuito que se muestra en la figura 31.42 *a*) cuando el interruptor está en la parte superior y *b*) cuando el interruptor está en la parte inferior.
- 68. Repentinamente, un inductor se conecta en serie a un resistor con  $R=10~\Omega$ . La corriente inicial en el inductor es de 3.4 A. Al cabo de un instante de  $6.0\times10^{-2}$  s, la corriente ha descendido a 1.7 A. ¿Cuál es la autoinductancia?

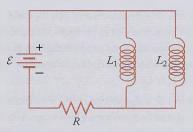


FIGURA 31.43 Un circuito RL con dos inductores.

- \*69. Un circuito RL consta de dos inductores de autoinductancia  $L_1=4.0~{\rm H}~{\rm y}~L_2=2.0~{\rm H}$  conectados en paralelo entre sí, y conectados en serie a un resistor de  $6.0~\Omega$  y a una batería de  $3.0~{\rm V}$  (véase la figura 31.43). Supóngase que los inductores no presentan ninguna inductancia mutua y que carecen de resistencia.
  - a) Una vez que la batería se conecta repentinamente, ¿cuál es la razón de cambio inicial de la corriente en cada inductor?
  - b) ¿Cuál es la corriente final estable en el resistor? ¿Cuáles son las corrientes finales estables en cada inductor? (Sugerencia: Las corrientes en los inductores son inversamente proporcionales a sus inductancias. ¿Por qué?)
- \*70. ¿Cuál es el calor de Joule disipado por la corriente (31.36) en el resistor en el intervalo de tiempo desde t = 0 hasta  $t = \infty$ ?

  Compárese con la energía magnética inicial en el inductor.
- \*71. Para medir la autoinductancia y la resistencia interna de un inductor, un físico conecta primero el inductor a una batería de 3.0 V. En estas condiciones, la corriente final estable en el inductor es de 24 A. Luego, el físico produce repentinamente un cortocircuito en el inductor al colocar un alambre grueso (sin resistencia) entre sus terminales. Luego, la corriente disminuye desde 24 A hasta 12 A en 0.22 s. ¿Cuáles son la autoinductancia y la resistencia interna del inductor?

## PROBLEMAS DE REPASO

- 72. Un experimento que se intentó realizar con el trasbordador espacial y que no fue posible terminar debido a dificultades mecánicas, fue diseñado para obtener potencia eléctrica de la fem de movimiento inducida por el movimiento del trasbordador espacial a través del campo magnético de la Tierra. Mientras estuvo en órbita alrededor de la Tierra a una altitud de 296 km a una rapidez de 7.7 km/h, un alambre largo debía estirarse radialmente hacia afuera entre el trasbordador espacial y un pequeño "satélite dentado". El campo magnético de la Tierra a la altitud del trasbordador espacial es  $2.7 \times 10^{-5}$  T. Calcule la magnitud de la fem de movimiento inducida entre los extremos de tal alambre de 20 km en este campo magnético. Supóngase que el movimiento del alambre es a ángulos rectos con el campo magnético.
- 73. Una chica porta un vestido hecho de alambre flexible. Lleva en sus manos extendidas los extremos del vestido, de modo que éste tiene la forma aproximada de un semicírculo de radio 0.70 m

- y al modelar, la chica gira a razón de 1.0 revoluciones por segundo en un sitio en que el campo magnético de la Tierra es casi vertical, de magnitud  $5.0 \times 10^{-5}$  T. El movimiento del vestido genera una fem alterna entre los extremos del vestido. ¿Cuál es la amplitud de oscilación de esta fem alterna?
- 74. Un generador eléctrico consta de una bobina rectangular de alambre que gira alrededor de su eje longitudinal, que es perpendicular a un campo magnético de 2.00 × 10<sup>-2</sup> T. La bobina mide 10.0 cm × 20.0 cm y tiene 120 vueltas de alambre. Los extremos del alambre están conectados a un circuito externo. ¿A qué rapidez (en rev/s) es necesario girar la bobina para obtener una fem alterna de amplitud igual a 12.0 V entre los extremos del alambre?
- 75. Una bobina circular normal tiene un radio de 1.0 cm y transporta una corriente de 3.0 A. ¿Cuál es la densidad de energía magnética en un punto ubicado en el centro de la bobina?

76. Un gran toroide elaborado en los albores de la investigación sobre plasma en la antigua Unión Soviética tenía un radio mayor de 1.50 m y un radio menor de 0.40 m (véase la figura 31.44). Si el campo magnético medio en el interior de este toroide es de 4.0 T, ¿cuál es la energía magnética? (Sugerencia: El volumen de un toroide es igual al área de la sección transversal multiplicada por 2π veces el radio medio.)

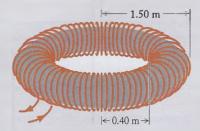


FIGURA 31.44 Toroide gigantesco.

\*77. Los tiburones cuentan con detectores sensibles en su cuerpo, que les permiten identificar pequeñas diferencias de potencial (véase la figura 31.45). También son capaces de detectar perturbaciones eléctricas originadas por otro pez, y detectar el campo magnético terrestre para utilizarlo en su navegación. Supóngase que un tiburón se desplaza horizontalmente a 25 km/h en un sitio en que la intensidad del campo magnético es 4.7 × 10<sup>-5</sup> T y apunta hacia abajo a un ángulo de 40° con la vertical. Considérese que el tiburón es un cilindro de 30 cm de diámetro. ¿Cuál es la mayor fem inducida entre puntos diametralmente opuestos en los lados del tiburón cuando éste se dirige al norte?



FIGURA 31.45 Un tiburón.

\*78. Una barra metálica de longitud / y masa m se desliza libremente, sin fricción, en dos rieles metálicos paralelos. Los rieles están conectados en un extremo de modo que junto con la barra constituyen un circuito cerrado (véase la figura 31.46).

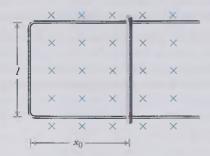


FIGURA 31.46 Barra deslizante en dos rieles paralelos. Las cruces indican las colas de los vectores de campo magnético.

- La barra tiene una resistencia R, y la resistencia de los rieles es despreciable. Un campo magnético uniforme es perpendicular al plano de este circuito. El campo magnético aumenta a una razón constante de dB/dt. Inicialmente, el campo magnético tiene una intensidad  $B_0$  y la barra está en reposo a una distancia  $x_0$  del extremo conectado de los rieles. ¿Cuál es la aceleración de la barra en ese instante en términos de las cantidades proporcionadas?
- \*79. El vagón de un tren mide 2.5 m de ancho, 9.5 m de largo y 3.5 m de alto; está hecho de lámina metálica y está vacío. El vagón se desplaza a 60 km/h sobre una vía horizontal en un sitio en que el componente vertical del campo magnético terrestre es  $6.2 \times 10^{-5}$  T. Supóngase que el vagón no está en contacto eléctrico con la tierra.
  - a) ¿Cuál es la fem inducida entre los lados del vagón?
  - b) Tomando en cuenta el campo eléctrico aportado por las cargas que se acumulan en los lados, ¿cuál es el campo eléctrico neto en el interior del vagón (en el marco de referencia de éste)?
  - c) ¿Cuál es la densidad de carga superficial en cada lado? Considérense ambos lados como dos grandes placas paralelas.
- \*80. Una bobina de alambre con 25 vueltas tiene un área de 4.0 × 10<sup>-3</sup> m², y está orientada perpendicularmente a un campo magnético **B**. La resistencia de la bobina es 15 Ω. ¿A qué razón debe cambiar la magnitud de **B** para que en la bobina aparezca una corriente inducida de 5.0 mA?
- \*81. a) Un solenoide largo tiene 300 vueltas de alambre por metro y tiene un radio de 3.0 cm. Si la corriente en el alambre aumenta a razón de 50 A/s, ¿a qué razón aumenta la intensidad del campo magnético en el solenoide?
  - b) El solenoide está rodeado por una bobina de alambre con 120 vueltas (véase la figura 31.47). El radio de esta bobina mide 6.0 cm. ¿Qué fem inducida se genera en la bobina mientras aumenta la corriente en el solenoide?
  - c) Supóngase que se sustituye la bobina de radio 6.0 cm por una nueva bobina de radio 8.0 cm. ¿Cuál es la fem inducida ahora?

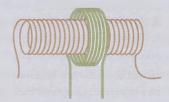
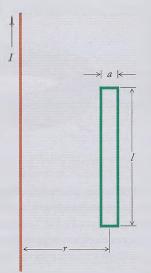


FIGURA 31.47 Gran solenoide y bobina circular.

- \*82. La resistencia de las bobinas de un motor eléctrico es 2.0 Ω cuando el motor no está operando (no gira). Cuando el motor se conecta a 115 V y gira a toda su velocidad, extrae una corriente de 0.10 A. Dedúzcase la fuerza contraelectromotriz producida por las bobinas del motor cuando giran.
- \*83. La corriente en un motor eléctrico de 115 volts salta de 4.0 A a 36 A cuando las bobinas del motor se detienen repentinamente con un freno. ¿Cuál es la fuerza contraelectromotriz cuando el motor gira a toda velocidad?

- \*84. Una corriente de 5.0 A circula por un solenoide cilíndrico de 1 500 vueltas. El solenoide mide 40 cm de longitud y 3.0 cm de diámetro.
  - a) ¿Cuál es el campo magnético en el solenoide? Considérese que el solenoide es muy largo.
  - b) ¿Cuál es la densidad de energía en el campo magnético?, ¿y la energía magnética almacenada en el espacio dentro del solenoide?
- \*85. Un circuito RL con L=0.50 H y R=0.025  $\Omega$  está conectado inicialmente a una batería de 1.2 V. Cuando la corriente alcanza su valor estable máximo, la batería se apaga repentinamente del circuito y la corriente se conecta al resistor.
  - a) ¿Cuál es el valor máximo de la corriente? ¿En qué momento la corriente en el inductor cae a 50% de su valor máximo?
  - b) ¿Cuál es el valor máximo de la energía almacenada en el inductor? ¿Qué porcentaje de la energía permanece cuando la corriente ha bajado a 50% de su valor máximo?
- \*86. Un alambre largo y recto transporta una corriente que aumenta a razón estable *dI/dt*.
  - a) ¿Cuál es la razón de incremento del campo magnético a una distancia radial r?

b) El alambre está en el mismo plano que la bobina rectangular mostrada en la figura 31.48. ¿Cuál es le fem inducida alrededor de la bobina? Supóngase que a ≪ r, es decir, que el ancho de la bobina es tan pequeño que el campo magnético y su razón de cambio son aproximadamente los mismos en todos los puntos de la bobina.



# FIGURA 31.48

Alambre recto largo y bobina rectangular.

## Respuestas a las revisiones

#### Revisión 31.1

- 1. Si se invierte la dirección de movimiento de la barra, se invierte la fuerza sobre los electrones, de modo que la corriente (el flujo de carga positiva) también se invierte y circula en sentido contrario al movimiento de las manecillas del reloj alrededor del circuito.
- 2. Debido a que se está buscando en la dirección del campo magnético horizontal (véase la figura 31.3), v × B apunta hacia la derecha, de modo que éste es el extremo en que se acumula carga positiva. Al invertir la velocidad (hacia arriba) se invierte la fuerza, haciendo positivo el extremo izquierdo.
- 3. No importa en qué dirección horizontal esté la corriente, ya que para un campo magnético que apunta hacia abajo,  $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$  apunta hacia el lado izquierdo del lector; por tanto, las velocidades este, oeste y norte producen una terminal positiva en los lados norte, sur y oeste del lector, respectivamente.
- 4. (E) Hacia la derecha. El campo eléctrico inducido en el marco de referencia que se mueve con la barra apunta en la misma dirección que la fuerza magnética sobre una carga positiva en el marco de referencia estacionario; en la figura 31.3, ésta es hacia la derecha. Para una barra conductora, este campo inducido hace que las cargas se muevan hasta que la suma del campo inducido y el campo debido a las cargas que se acumulan en la barra es igual a cero.

#### Revisión 31.2

- 1. Debido a que las líneas de un campo magnético no empiezan o terminan en cualquier parte, sino que siempre forman circuitos cerrados, cualquier línea de campo que penetre en una superficie cerrada también debe salir a la superficie, produciendo un flujo neto igual a cero.
- 2. Sí. Para invertir el campo magnético se requiere que cambie de dirección; durante el tiempo de este cambio repentino se genera una fem. Debido a que la fem es proporcional a la razón de cambio, para un cambio repentino, durante el cambio se genera una fem muy grande.
- **3.** No. Para una barra que se mueve en un campo magnético, la fem inducida es transversal al movimiento, por lo que sólo puede ser generada entre los lados de la flecha, no entre la punta y la cola.
- **4.** (B) b). La mayor parte de las líneas de campo cruzan el área como se muestra en la figura 31.13b, por lo que esta área intercepta la mayor parte del flujo magnético, aun cuando no sea ni el flujo magnético más perpendicular al campo magnético ni el de mayor área.

#### Revisión 31.3

1. Para el caso *a*), si la bobina se empuja hacia la derecha (fuera de la región del campo), el flujo a través de la bobina disminuye; así,

para oponerse a este cambio, la corriente inducida es en sentido contrario al movimiento de las manecillas del reloj, visto desde arriba (por la regla de la mano derecha). Al revés, si la bobina se empuja hacia el campo, la corriente inducida es en el sentido del movimiento de las manecillas del reloj. Para el caso b), al girar la bobina se disminuye su área y de esta forma el flujo que pasa a través de ella, de modo que la corriente inducida es en sentido contrario al movimiento de las manecillas del reloj, visto desde arriba. Para el caso c), visto desde lo que fue la parte inferior como se muestra, la corriente inducida es en sentido del movimiento de las manecillas del reloj para oponerse a la disminución del flujo debido al hecho de voltear la bobina. Para el campo creciente del caso d), nuevamente la corriente inducida es en sentido contrario al movimiento de las manecillas del reloj, visto desde arriba, para oponerse a este cambio.

- 2. La fem inducida es proporcional al número de espiras, de modo que también se duplica a 120 V. Sin embargo, la resistencia también se duplica para el doble de vueltas, de modo que la corriente inducida es la misma, 12 A.
- 3. La fem inducida y la corriente tienen la misma magnitud, aunque para oponerse al aumento, deben tener dirección opuesta.
- **4.** Como ocurre en el caso para el electroimán circular (ejemplo 6), el campo eléctrico son círculos alrededor del eje. Obsérvese que para un círculo fuera del solenoide, hay un campo eléctrico inducido, aun cuando no haya flujo magnético, ya que el flujo a través de la parte del área limitada por el círculo está cambiando.
- 5. (A) Hacia la derecha. A medida que la barra se mueve, el área de la bobina formada por la barra, las vías y el resistor disminu-ye. La corriente inducida se opone a la disminución de flujo y aporta flujo hacia la página. Así, la corriente circula en sentido del movimiento de las manecillas del reloj alrededor de la bobina. Obsérvese que el flujo de la corriente inducida se opone al cambio de flujo, no al flujo original.

#### Revisión 31.4

- 1. Si las bobinas se alejan entre sí, el campo magnético debido a una es menor en la segunda. Así, el flujo magnético es más pequeño, así como la inductancia mutua M. Si las bobinas se acercan mutuamente, lo opuesto es cierto: el flujo aumenta, así como la inductancia mutua. Si una de las bobinas forma un ángulo recto con la otra, a través de ella no hay flujo neto, y así la inductancia mutua disminuye a cero.
- 2. Debido a que la inductancia mutua es la misma entre un par de bobinas sin importar cuál transporte la corriente, la fem inducida es la misma, 6 V.
- 3. Según el ejemplo 9, la autoinductancia es inversamente proporcional a la longitud de un solenoide y directamente proporcional al número de ciclos cuadrados  $(n^2l=N^2/l)$ . El diámetro del alambre afecta la estrechez del devanado, de modo que la

- autoinductancia puede depender del diámetro del alambre; no obstante, para el mismo número de vueltas por longitud unitaria, el diámetro del alambre no importa.
- **4.** (E) 4. Así como en la pregunta 4 y el ejemplo 9, la autoinductancia es proporcional al cuadrado del número de vueltas, por lo que es 4 veces mayor para el segundo solenoide.

#### Revisión 31.5

- 1. Con base en la ecuación (31.22), la autoinductancia  $L = \Phi_B/I$  =  $\mu_0 n^2 \pi R^2 l$ , es proporcional a  $n^2 l = N^2/l$  por lo que cambia (aumenta) cuando se comprime el solenoide (al disminuir l).
- 2. La densidad de energía magnética es máxima cuando el campo magnético es el más grande; esto ocurre en la superficie del alambre (véase el ejemplo 5 del capítulo 29).
- **3.** Debido a que la energía magnética almacenada es proporcional a la inductancia, como en la ecuación (31.26), el segundo inductor tiene la mayor energía magnética.
- **4.** (D) 4. Ya que la energía almacenada es proporcional al cuadrado de la corriente [ecuación (31.26)], al duplicarse la corriente, la energía magnética almacenada aumenta por un factor de 4.

#### Revisión 31.6

- 1. La disminución de la corriente en el electroimán está regida por el decaimiento exponencial de la ecuación (31.36); este decaimiento alcanza 37% de su valor inicial en un tiempo característico ( $e^{-1} \approx 0.37$ ). Así, con base en el ejemplo 13, el tiempo es  $\tau = 1.25$  s.
- 2. Una gran inductancia implica que la fuerza contraelectromotriz, que se opone al cambio en corriente, es grande. Una gran fuerza contraelectromotriz tiende a mantener constante la corriente, implicando un tiempo de relajación largo.
- 3. Una resistencia baja implica una "fricción" baja, de modo que la corriente tiende a proseguir. Por ejemplo, considérese la corriente decreciente de la pregunta 1, con alguna corriente inicial  $I_0$ . La razón inicial de disipación de energía es  $P=I_0^2R$  de modo que una resistencia más baja significa que la energía almacenada en el inductor requiere más tiempo para disiparse en el resistor.
- **4.** Con base en una estimación a partir de la gráfica 31.25, la corriente alcanza la mitad de su valor final entre  $t \approx 0.6L/R$  y 0.7L/R.
- **5.** (A) 0. Después de que el interruptor permanece abierto durante mucho tiempo, la corriente en el inductor debe ser cero, ya que no hay fem aplicada y cualquier corriente en la bobina derecha decae a cero. Debido a que la corriente en el inductor debe cambiar lentamente, la corriente sigue siendo cero inmediatamente después de que se cierra el interruptor.