

Inducción electromagnética



Jean Curtis pregunta a la clase por qué levita el anillo de cobre que rodea al núcleo de hierro del electroimán.

A principios del siglo XIX, los únicos dispositivos para producir corriente eran las baterías voltaicas, que producían corrientes pequeñas al disolver metales en ácidos. Fueron precursoras de las baterías actuales. Oersted, en 1820, encontró que los conductores con corriente eléctrica producían magnetismo. Entonces surgió la pregunta de si era posible generar la electricidad a partir del magnetismo. En 1831 dos físicos contestaron la pregunta, Michael Faraday en Inglaterra y Joseph Henry en Estados Unidos, cada uno trabajando de forma independiente sin tener noticia del otro. Este descubrimiento cambió el mundo, al hacer que la electricidad fuera común, suministrando energía a las industrias en el día y alumbrando ciudades por la noche.

Inducción electromagnética

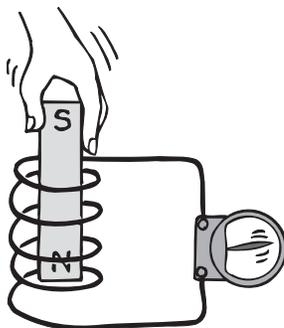


FIGURA 25.1

Cuando se sumerge el imán en la bobina, se induce voltaje y se ponen en movimiento cargas en ella.

Faraday y Henry descubrieron que se puede producir corriente eléctrica en un conductor, tan sólo con introducir o sacar un imán en una parte del conductor en forma de bobina (figura 25.1). No se necesita batería ni algún otro voltaje, únicamente el movimiento de un imán en una espira de alambre. Descubrieron que el movimiento relativo entre un conductor y un campo magnético causa, o *induce*, un voltaje. Se induce el voltaje cuando el campo magnético de un imán se mueve cerca de un conductor estacionario, o el conductor se mueve en un campo magnético estacionario (figura 25.2). Los resultados son los mismos cuando el movimiento *relativo* es igual.

Cuanto mayor sea el número de vueltas del alambre en la espira que se mueven en un campo magnético, mayor será el voltaje inducido (figura 25.3). Al introducir un imán en doble cantidad de vueltas se induce el doble de voltaje; introduciéndolo en diez veces más vueltas se inducirá diez veces más voltaje, y así sucesivamente.¹ Parece que se obtiene algo sin costo, sólo con aumentar la cantidad de vueltas en una bobina de alambre. Pero, suponiendo que la bobina está conectada con un resistor u otro disipador de energía, no sucede así; se verá que es más difícil empujar un imán en una bobina con más vueltas.

¹ Cuando son varias vueltas de alambre se deben aislar, porque las espiras de alambre desnudo que se tocan entre sí forman un corto circuito. Es interesante que la esposa de Joseph Henry sacrificó, con pesadumbre, parte de la seda de su traje de novia para cubrir los primeros electroimanes de Henry.

FIGURA 25.2

Se induce voltaje en la espira de alambre cuando el campo magnético se mueve respecto al alambre, y también cuando el alambre se mueve por el campo magnético.

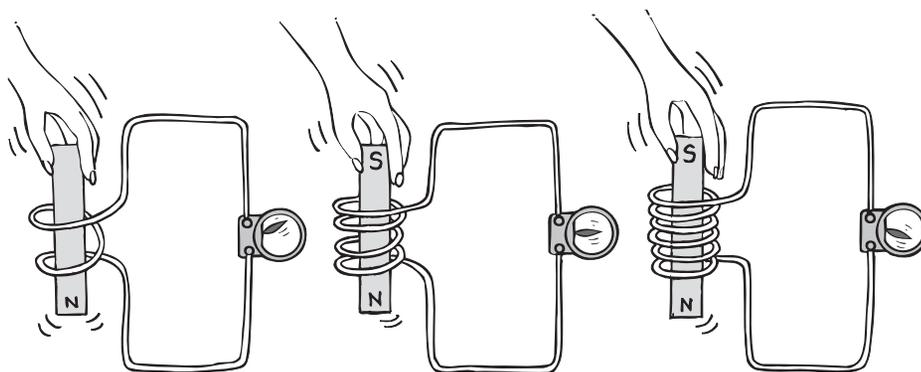
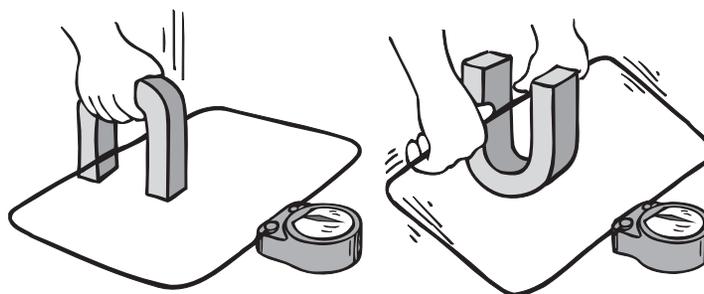


FIGURA 25.3

Figura interactiva

Cuando se sumerge un imán en una bobina con el doble de vueltas que la otra, se induce el doble de voltaje. Si el imán se introduce en una bobina con el triple de vueltas, se induce el triple de voltaje.



FIGURA 25.4

Es más difícil empujar un imán dentro de una bobina con más vueltas, porque el campo magnético de cada espira de corriente se resiste al movimiento del imán.

Esto se debe a que el voltaje inducido forma una corriente, que a la vez forma un electroimán, que a la vez repele el imán en la mano. Cuando hay más vueltas, hay más voltaje, lo que equivale a efectuar más trabajo para inducirlo (figura 25.4). La cantidad de voltaje inducido depende de la rapidez con que las líneas del campo magnético entren o salgan de la bobina. El movimiento muy lento casi no produce voltaje. El movimiento rápido induce un voltaje mayor. Este fenómeno de inducir voltaje al cambiar el campo magnético de una bobina de alambre se llama **inducción electromagnética**.

Ley de Faraday



La inducción electromagnética se resume en la ley de Faraday, que establece que:

El voltaje inducido en una bobina es proporcional al producto del número de vueltas de la bobina por la rapidez con la que el campo magnético cambia dentro de esas vueltas.

La cantidad de *corriente* producida por la inducción electromagnética no sólo depende del voltaje inducido, sino también de la resistencia de la bobina y del cir-



Cambiar un campo magnético en una espira cerrada induce voltaje. Si la espira es un conductor eléctrico, entonces se induce corriente.

¡EUREKA!

cuito con el que está conectada.² Por ejemplo, podemos introducir y sacar un imán en una espira cerrada de caucho, e introducirlo y sacarlo en una espira cerrada de cobre. El voltaje inducido en cada caso es igual, siempre que las espiras tengan el mismo tamaño y el imán se mueva con la misma rapidez. Pero la corriente en cada caso es muy distinta. Los electrones en el caucho sienten el mismo campo eléctrico que los del cobre, pero su enlace con los átomos fijos evitan el movimiento de cargas que sucede con tanta libertad en el cobre.

EXAMÍNATE

1. ¿Qué sucede cuando un bit de información almacenado magnéticamente en un disco de computadora pasa bajo una cabeza de lectura que contiene una pequeña bobina?
2. Si empujas un imán dentro de una bobina conectada a un resistor, como se ve en la figura 25.4, sentirás cierta resistencia. ¿Por qué esta resistencia es mayor cuando la bobina tiene más vueltas?

Hemos descrito dos formas en las que se puede inducir voltaje en una espira de alambre: moviendo la espira cerca de un imán, o moviendo un imán cerca de la espira. Hay una tercera forma: cambiar la corriente en una espira cercana. En los tres casos se da el mismo ingrediente esencial: cambiar el campo magnético en la espira.

La inducción electromagnética nos rodea por todas partes. En la calle la vemos encender los semáforos cuando un auto pasa sobre un aparato y cambia el campo magnético en una bobina de alambre bajo la superficie del asfalto. Los automóviles híbridos la utilizan para convertir la energía de frenado en energía eléctrica para las baterías. La vemos en los sistemas de seguridad de los aeropuertos, cuando un viajero lleva artículos de acero al pasar entre bobinas verticales, cambian el campo magnético de las bobinas y activan una alarma. La usamos en las tarjetas de cajero automático, cuando la banda magnética se hace pasar por un sensor. Escuchamos sus efectos cada vez que funciona un tocacintas. La inducción electromagnética está en todas partes. Como veremos al final de este capítulo y al principio del siguiente, está hasta en las ondas electromagnéticas que llamamos luz.

COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. El campo magnético que cambia en la bobina induce voltaje. De esta forma, la información que se guarda magnéticamente en el disco se convierte en señales eléctricas.
2. Planteado en forma sencilla, se requiere más trabajo para suministrar más energía que sea disipada con más corriente en el resistor. También lo puedes considerar como sigue: cuando empujas un imán dentro de una bobina, haces que la bobina se transforme en un imán (un electroimán). Cuanto más vueltas tenga la bobina, más poderoso será el imán que produces, y repele con más fuerza el imán que estás moviendo. (Si el electroimán de la bobina atrajera a tu imán en vez de repelerlo, se crearía energía de la nada, y se infringiría la ley de la conservación de la energía. Entonces, la bobina tiene que repeler tu imán.)



Las linternas recargables con movimiento no necesitan baterías. Agitar la linterna durante 30 segundos le permite generar iluminación brillante durante 5 minutos. Al moverla, se produce una inducción electromagnética, pues un imán en el interior se desliza hacia un lado y otro entre las bobinas que cargan un condensador. Cuando disminuye el brillo, hay que agitarla de nuevo. Así, se suministra la energía necesaria para cargar el condensador.

¡EUREKA!

² También la corriente depende de la “inductancia” de la bobina. La inductancia mide la tendencia de una bobina a resistir un cambio de corriente debido a que magnetismo producido por una parte de ella que se opone al cambio de corriente en las demás partes. En los circuitos de ca se parece a la resistencia, y depende de la frecuencia de la fuente de ca y de la cantidad de vueltas en la bobina. No trataremos aquí este tema.

Generadores y corriente alterna



FIGURA 25.5

El sensor de la guitarra son diminutas bobinas que tienen imanes integrados. Los imanes magnetizan las cuerdas de acero. Cuando vibran las cuerdas, el voltaje se induce en las bobinas y se aumenta con un amplificador, y se produce sonido en una bocina.

Cuando el extremo de un imán se introduce y se saca en forma repetitiva de una bobina de alambre, la dirección del voltaje inducido cambia en forma alternativa. Al aumentar la intensidad del campo magnético dentro de la bobina (cuando entra el imán), el voltaje inducido en la bobina tiene una dirección. Cuando disminuye la intensidad del campo magnético (cuando sale el imán), el voltaje se induce en la dirección contraria. La frecuencia del voltaje alternante que se induce es igual a la frecuencia del cambio del campo magnético dentro de la bobina.

Resulta más práctico inducir voltaje moviendo una bobina que moviendo un imán. Se puede hacer girando la bobina en un campo magnético estacionario (figura 25.6). A este arreglo se le llama **generador**. La construcción de un generador es, en principio, idéntica a la de un motor. Se ven iguales. Sólo se invierten los papeles de la entrada y la salida. En un motor, la energía eléctrica es la entrada y la energía mecánica es la salida; en un generador, la energía mecánica es la entrada y la energía eléctrica es la salida. Ambos dispositivos transforman la energía de una clase en otra.

Es interesante comparar los fenómenos físicos de un motor y de un generador, y encontrar que ambos funcionan bajo el mismo principio: que los electrones en movimiento experimentan una fuerza que es perpendicular tanto a su velocidad como al campo magnético por el que atraviesan (figura 25.7). A la deflexión del alambre la llamaremos *efecto motor*, y a lo que sucede como resultado de la ley

FIGURA 25.6

Figura interactiva

Un generador simple. Se induce voltaje en la espira cuando gira en el campo magnético.

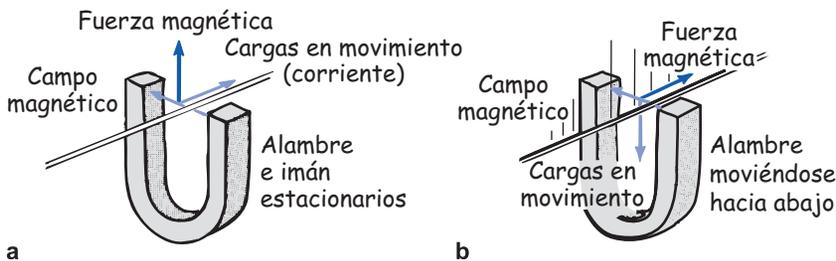
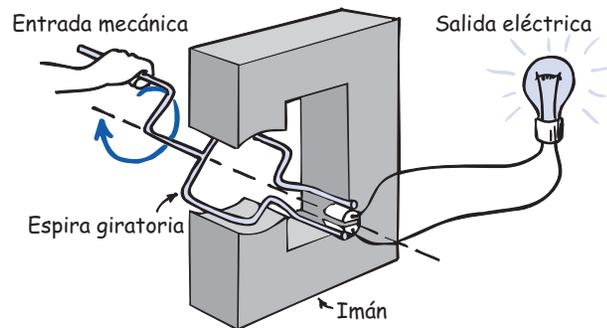


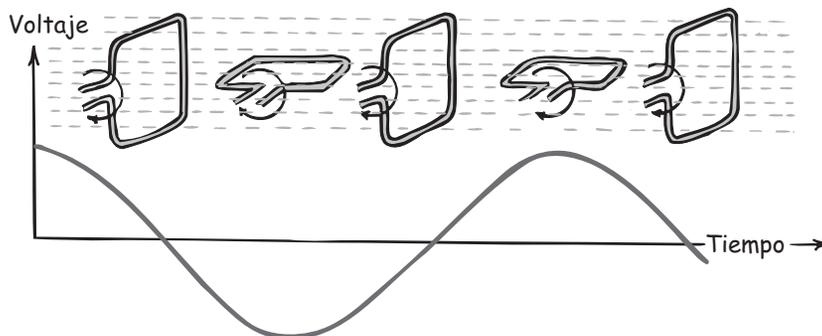
FIGURA 25.7

Figura interactiva

a) Efecto motor: cuando una corriente pasa por el alambre, hay una fuerza perpendicular hacia arriba sobre los electrones. Como no hay trayectoria conductora hacia arriba, el alambre es jalado hacia arriba, junto con los electrones. b) Efecto generador: cuando un conductor por el que no pasa corriente inicial se mueve hacia abajo, los electrones en el alambre sienten una fuerza desviadora perpendicular a su movimiento. Como sí hay trayectoria conductora en la dirección que siguen los electrones, sí forman una corriente.

FIGURA 25.8

A medida que gira la espira, el voltaje inducido (y la corriente) cambia de magnitud y dirección. Una rotación completa de la espira produce un ciclo completo de voltaje (y de corriente).



Cuando pisas el pedal de freno en un automóvil híbrido, el motor eléctrico se convierte en un generador y carga la batería.

¡EUREKA!



Aplicación de la inducción E & M

de inducción llamaremos *efecto generador*. Esos efectos se resumen en los incisos a) y b) de la figura. Estúdialos. ¿Puedes ver que los dos efectos se relacionan?

En la figura 25.8 se observa el ciclo de inducción electromagnética. Cuando la espira de alambre gira en el campo magnético hay un cambio de la cantidad de líneas magnéticas dentro de la espira. Cuando el plano de la espira es perpendicular a las líneas de campo, hay encerrado un máximo de líneas. Al girar la espira, de hecho, corta las líneas, y cada vez quedan menos encerradas. Cuando el plano de la espira es paralelo a las líneas de campo, no queda ninguna encerrada. La rotación continua aumenta y disminuye la cantidad de líneas encerradas en forma cíclica, y la tasa de cambio máxima de líneas de campo sucede cuando el número de esas líneas de cambio encerradas son cero. Por lo tanto, el voltaje inducido es máximo cuando la espira pasa por su orientación paralela a las líneas. Como este voltaje inducido por el generador alterna la dirección, la corriente que se produce es alterna, es ca.³ La corriente alterna de nuestros hogares se produce en generadores estandarizados de tal modo que la corriente pasa por 60 ciclos de cambio cada segundo: es de 60 hertz.

Producción de energía eléctrica



Nikola Tesla (1857–1943)

Cincuenta años después de que Michael Faraday y Joseph Henry descubrieron la inducción electromagnética, Nikola Tesla y George Westinghouse encontraron aplicaciones prácticas de esos hallazgos, y demostraron al mundo que se podía generar electricidad en forma confiable y en cantidades suficientes para iluminar ciudades enteras.

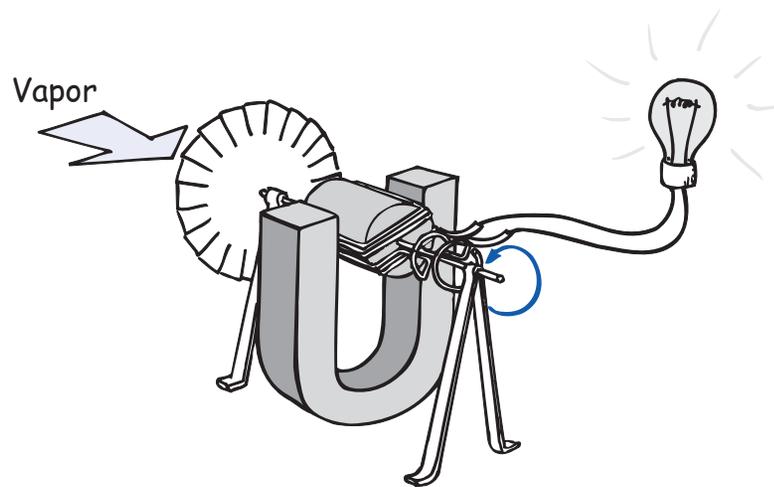
Energía de un turbogenerador

Tesla construyó generadores muy parecidos a los que todavía se continúan usando; pero bastante más complicados que el modelo sencillo que hemos descrito. Los generadores de Tesla tenían armaduras, es decir, núcleos de hierro envueltos con espiras de alambres de cobre, que se hacían girar dentro de fuertes campos magnéticos mediante una turbina, que a la vez se hacía girar con la energía generada por caídas de agua o vapor. Las espiras giratorias de alambre en la arma-

³ Con las escobillas adecuadas y con otros medios, la ca en las espiras se puede convertir en cd y el generador es de corriente directa.

FIGURA 25.9

El vapor impulsa a la turbina, que está conectada con la armadura del generador.



Estar en el lugar correcto y en el momento preciso no es suficiente para hacer un gran descubrimiento: también la curiosidad y el trabajo arduo son muy importantes.

¡EUREKA!

dura cortaban el campo magnético de los electroimanes vecinos, e inducían así un voltaje y una corriente alternos.

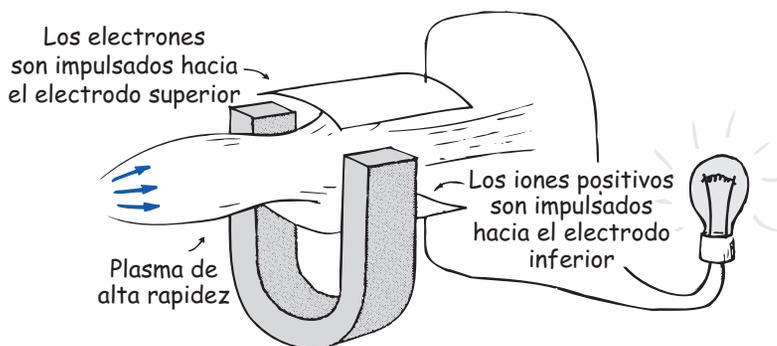
Podemos examinar este proceso desde un punto de vista atómico. Cuando los conductores de la armadura giratoria cortan el campo magnético, fuerzas electromagnéticas de dirección opuesta actúan sobre las cargas negativas y positivas. Los electrones responden a esa fuerza pasando momentáneamente con libertad en una dirección, por la red cristalina del cobre. Los átomos de cobre, que en realidad son iones positivos, son impulsados hacia la dirección contraria. Sin embargo, como los iones están anclados en la red, apenas si se mueven. Sólo se mueven los electrones, de aquí para allá, en dirección alternada con cada rotación de la armadura. La energía de este ir y venir electrónico se reúne en las terminales de electrodos del generador.

Energía magnetohidrodinámica (opcional)

Un aparato interesante, parecido al turbogenerador, es el generador magnetohidrodinámico (MHD), que no requiere turbina ni armadura giratoria. En vez de hacer que las cargas se muevan en un campo magnético mediante una armadura giratoria, un plasma de electrones y de iones positivos se expande por una boquilla y se mueve a rapidez supersónica por un campo magnético. Al igual que la armadura de un turbogenerador, el movimiento de las cargas a través de un campo magnético origina un voltaje y un flujo de corriente de acuerdo con la ley de inducción de Faraday. Mientras que las “escobillas” de un generador convencional sacan la corriente y la llevan al circuito de carga externo, en el generador MHD hay unas placas conductoras o *electrodos* (figura 25.10) que realizan dicha función. A diferencia del turbogenerador, el generador MHD puede funcionar a cualquier temperatura a la que se pueda calentar el plasma, ya sea por combustión o por procesos nucleares. La alta temperatura da como resultado una alta eficiencia termodinámica, que equivale a más energía por la misma cantidad de combustible, y menos calor de desecho. La eficiencia se aumenta aún más cuando el calor “de desecho” se utiliza para convertir el agua en vapor que hace funcionar un turbogenerador convencional.

FIGURA 25.10

Esquema de un generador MHD simplificado. Sobre las partículas positivas y negativas del plasma de alta rapidez, que pasa por el campo magnético, actúan fuerzas con dirección opuesta. El resultado es una diferencia de voltaje entre los dos electrodos. Entonces, la corriente va de un electrodo al otro pasando por un circuito externo. No hay partes que se muevan, salvo el plasma. En la práctica se usan electroimanes superconductores.



La sustitución de las bobinas de cobre giratorias por una corriente de plasma en un generador se ha vuelto operacional sólo con el desarrollo de nueva la tecnología capaz de producir plasmas con temperaturas suficientemente altas. Las plantas actuales usan un plasma de alta temperatura formado al quemar combustibles fósiles en aire o en oxígeno.⁴

Es importante destacar que los generadores no producen energía: tan sólo convierten la energía de otra clase en energía eléctrica. Como vimos en el capítulo 3, la energía de la fuente, ya sea fósil o nuclear, eólica o hidráulica, se convierte en energía mecánica para impulsar turbinas. El generador que se utiliza convierte la mayoría de tal energía mecánica en electricidad. Algunas personas creen que la electricidad es una fuente primaria de energía. No lo es. Es una forma de llevar la energía que debe tener una fuente.

Transformadores (opcional)

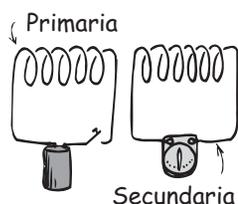


FIGURA 25.11

Siempre que se abre o se cierra el interruptor de la primaria, se induce voltaje en el circuito secundario.

Es claro que la energía eléctrica se puede transportar por medio de conductores, y ahora describiremos cómo se puede transportar por el espacio vacío. La energía puede transferirse de un dispositivo a otro con el arreglo sencillo que se muestra en la figura 25.11. Observa que una bobina está conectada a una batería, y la otra bobina está conectada a un galvanómetro. Se acostumbra llamar *primaria* (entrada) a la bobina conectada a la fuente de energía o fuente de poder, y a la otra bobina se le llama *secundaria* (salida). Tan pronto como se cierra el interruptor de la primaria y pasa la corriente por su bobina, también en la secundaria se produce una corriente, aunque no haya conexión material entre las dos bobinas. Sin embargo, por la secundaria sólo pasa un breve impulso de corriente. Después, cuando se abre el interruptor de la primaria, se registra en la secundaria un nuevo impulso de corriente, pero en la dirección contraria.

Veamos la explicación: se forma un campo magnético en torno a la primaria cuando la corriente comienza a pasar por la bobina. Esto quiere decir que el campo magnético está creciendo, es decir, *cambiando*, en torno a la primaria. Pero como las bobinas están cerca entre sí, este campo que cambia se extiende hasta la bobina de la secundaria, y entonces induce un voltaje en la secundaria. Este voltaje inducido sólo es temporal, porque cuando en la primaria la corriente y el campo magnético llegan a un estado constante, es decir, cuando ya no cambia el campo magnético, ya no se induce voltaje en la secundaria. Pero cuando se

⁴ Las temperaturas más bajas son suficientes cuando el fluido que conduce eléctricamente es metal líquido, por lo general, litio. Un sistema de energía de mhd de metal líquido se expresa como sistema de energía mhdml.

apaga el interruptor, la corriente de la primaria baja a cero. El campo magnético en torno a la bobina desaparece y con ello se induce un voltaje en la bobina secundaria, que siente el cambio. Vemos que se induce voltaje siempre que *cam-bia* un campo magnético que pasa por la bobina, independientemente de la causa.

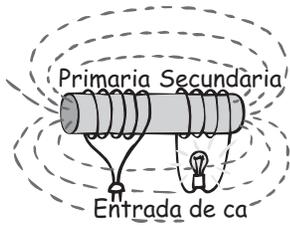


FIGURA 25.12
Esquema de un transformador sencillo.

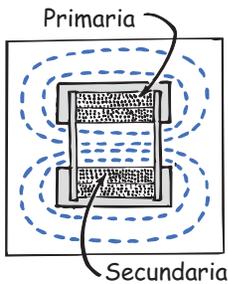
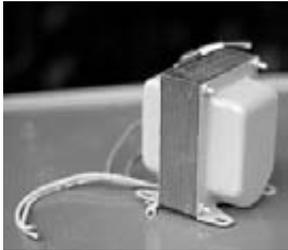


FIGURA 25.13
Un transformador real y más eficiente. Las bobinas primaria y secundaria están devanadas en la parte interna del núcleo de hierro, que guía las líneas magnéticas alternantes (punteadas) producidas por la corriente alterna en la primaria. El campo alternante induce voltaje de corriente alterna en la secundaria. Así, la potencia a un voltaje de la primaria se transfiere a la secundaria, a un voltaje distinto.

EXAMÍNATE

Cuando en la figura 25.11 se abre o cierra el interruptor de la primaria, el galvanómetro de la secundaria indica una corriente. Pero si el interruptor permanece cerrado, el galvanómetro de la secundaria no indica corriente. ¿Por qué?

Si colocas un núcleo de hierro por el interior de las bobinas primaria y secundaria en el arreglo de la figura 25.11, el campo magnético dentro de la primaria se intensifica por el alineamiento de los dominios magnéticos. También se concentra el campo en el núcleo, y pasa a la bobina secundaria, que intercepta más del cambio en el campo. El galvanómetro indicará que los golpes de corriente son mayores al abrir o cerrar el interruptor de la primaria. En vez de abrir y cerrar un interruptor para producir los cambios de campo magnético, imagina que para activar la primaria se usa corriente alterna. Entonces, la frecuencia de los cambios periódicos del campo magnético es igual a la frecuencia de la corriente alterna. Éste es un **transformador** (figura 25.12). Un arreglo más eficiente se presenta en la figura 25.13.

Si la primaria y la secundaria tienen iguales cantidades de espiras (se suelen llamar *vuel-tas*) de alambre, los voltajes alternos en la entrada y en la salida serán iguales. Pero si la bobina secundaria tiene más vueltas que la primaria, el voltaje alterno producido en la secundaria será mayor que el alimentado a la primaria. En este caso, se dice que *sube* el voltaje. Si la secundaria tiene doble cantidad de vueltas que la primaria, el voltaje de la secundaria será del doble que el de la primaria.

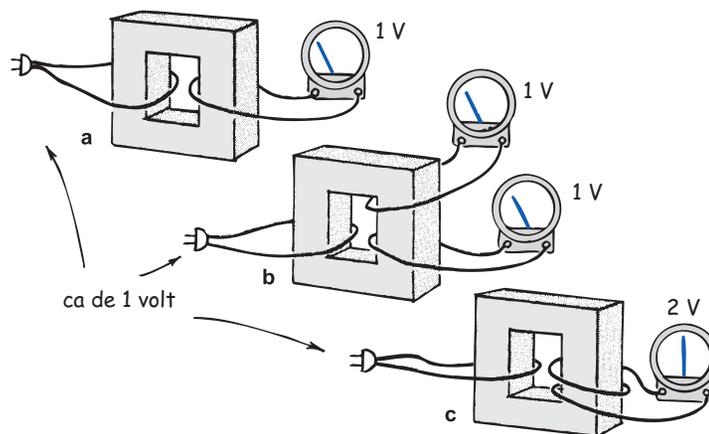
Esto se puede ver en los arreglos que muestra la figura 25.14. Primero examina el caso sencillo de una sola espira primaria conectada con una fuente alterna de 1 volt, y una sola espira secundaria conectada con el voltímetro de ca *a*). La secundaria intercepta el campo magnético cambiante de la primaria, y en aquélla se induce un voltaje de 1 volt. Si se pone otra espira en torno al núcleo, de manera que el transformador tenga dos secundarias *b*), interceptará el mismo cambio de campo magnético. Se ve entonces que también en él se induce 1 volt. No hay necesidad de mantener separadas las dos secundarias, porque las podríamos unir *c*) para tener un voltaje total inducido de 1 volt + 1 volt = 2 volts. Eso equivale a decir que en una sola secundaria que tenga doble cantidad de vueltas que la primaria, se inducirá un voltaje de 2 volts. Si la secundaria se devana o se forma con triple cantidad de vueltas, se inducirá tres veces más voltaje. El voltaje aumentado puede iluminar los letreros de neón o enviar energía a gran distancia.

COMPRUEBA TU RESPUESTA

Cuando el interruptor permanece en la posición cerrada, hay una corriente constante en la primaria, y un campo magnético constante en torno a la bobina. Este campo se extiende hasta la secundaria, pero a menos que haya un cambio en el campo, no se producirá inducción electromagnética.

FIGURA 25.14

a) El voltaje de 1 V inducido en la secundaria es igual al voltaje de la primaria. b) También se induce un voltaje de 1 V en la secundaria que se agregó, ya que intercepta el mismo cambio de campo magnético de la primaria. c) Los voltajes de 1 V, inducidos en las dos secundarias con una vuelta equivalen a un voltaje de 2 V inducido en una sola secundaria con dos vueltas.



Si la secundaria tiene menos vueltas que la primaria, el voltaje alterno producido en la secundaria será *menor* que el producido en la primaria. Se dice que el voltaje *baja*. Con este voltaje menor se pueden hacer funcionar con seguridad los trenes eléctricos de juguete. Si la secundaria tiene la mitad de las vueltas que la primaria, entonces se induce en aquélla tan sólo la mitad del voltaje que se alimenta la primaria. Así, la energía eléctrica se puede alimentar a la primaria a determinado voltaje alterno, para tomar de la secundaria un voltaje alterno mayor o menor, según las cantidades relativas de vueltas en los devanados de la primaria y la secundaria que tenga el transformador.

La relación entre los voltajes de la primaria y de la secundaria con las cantidades de vueltas es la siguiente:

$$\frac{\text{Voltaje en la primaria}}{\text{Cantidad de vueltas en la primaria}} = \frac{\text{Voltaje en la secundaria}}{\text{Cantidad de vueltas en la secundaria}}$$

Parecería que se puede obtener algo sin costo, con un transformador de subida; pero no es así, porque la conservación de energía determina siempre lo que puede suceder. Cuando un transformador sube el voltaje, la corriente en la secundaria es menor que la corriente en la primaria. En realidad, el transformador transfiere energía de una a otra bobinas. No te vayas a confundir con lo siguiente: de ninguna manera puede subir la energía, ¡no!, debido a la conservación de energía. Un transformador sube o baja el voltaje, pero no cambia la energía. La rapidez con la que se transfiere la energía se llama *potencia*. La potencia usada en la secundaria es la que se suministra en la primaria. La primaria no suministra más que la que usa la secundaria, de acuerdo con la ley de la conservación de la energía. Si no se tienen en cuenta las pequeñas pérdidas de potencia debidas al calentamiento del núcleo, entonces

$$\text{Potencia que entra a la primaria} = \text{potencia que sale de la secundaria}$$

La potencia eléctrica es igual al producto del voltaje por la corriente, y se puede decir que

$$(\text{Voltaje} \times \text{Corriente})_{\text{primaria}} = (\text{Voltaje} \times \text{Corriente})_{\text{secundaria}}$$

Se ve que si la secundaria tiene más voltaje que la primaria, aquélla tendrá menos corriente. La facilidad con que se pueden subir y bajar los voltajes con un transformador es la causa principal de que la mayoría de la electricidad sea de corriente alterna y no de corriente directa.

EXAMÍNATE

1. Si se mandan 100 V de corriente alterna a través de las 100 vueltas de la primaria de un transformador, ¿cuál será el voltaje de salida, si la secundaria tiene 200 vueltas?
2. Suponiendo que la respuesta a la pregunta anterior sea 200 V, y que la secundaria esté conectada a una lámpara de escenario con 50Ω de resistencia, ¿cuál será la corriente en el circuito de la secundaria?
3. ¿Cuál es la potencia en la bobina secundaria?
4. ¿Cuál es la potencia en la bobina primaria?
5. ¿Cuál es la corriente alterna que toma la bobina primaria?
6. El voltaje subió y la corriente bajó. Según la ley de Ohm, mayor voltaje produce mayor corriente. ¿Ésta es una contradicción, o la ley de Ohm no se aplica a circuitos que tienen transformadores?

Autoinducción (opcional)

Las espiras con corriente de una bobina no sólo interactúan con espiras de otras bobinas, sino también interactúan entre sí. Cada espira de una bobina interactúa con el campo magnético que rodea la corriente de otras espiras en la misma bobina. Se trata de la *autoinducción*. Se produce un voltaje autoinducido. Este voltaje siempre tiene dirección que se opone al cambio de voltaje que lo produce, y se acostumbra llamar “fuerza contraelectromotriz”.⁵ No seguiremos explicando la autoinducción ni la fuerza contraelectromotriz, excepto para examinar uno de sus efectos comunes que es peligroso. Imagina que una bobina con una gran can-

COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Partiendo de $100 \text{ V}/100 \text{ vueltas}$ de la primaria = (?) $\text{V}/200 \text{ vueltas}$ de la secundaria, verás que la secundaria produce 200 V.
 2. De acuerdo con la ley de Ohm, $200 \text{ V}/50 \Omega = 4 \text{ A}$.
 3. Potencia = $200 \text{ V} \times 4 \text{ A} = 800 \text{ W}$.
 4. De acuerdo con la ley de la conservación de la energía, la potencia en la primaria es igual, 800 W.
 5. $800 \text{ W} = 100 \text{ V} \times (?) \text{ A}$, de manera que verás que la primaria toma 8 A. (Observa que el voltaje sube de la primaria a la secundaria, y que la corriente baja en forma correspondiente.)
 6. Sigue siendo válida la ley de Ohm en el circuito de la secundaria. El voltaje inducido en ese circuito, dividido entre la carga (la resistencia) del mismo, es igual a la corriente que pasa por él. Por otro lado, en el circuito de la primaria, no hay resistencia convencional. Lo que “resiste” a la corriente en la primaria es la transferencia de energía a la secundaria.
-

⁵ La oposición de un efecto inducido a la causa inductora se llama ley de Lenz; es una consecuencia de la conservación de la energía.

**FIGURA 25.15**

Cuando se abre el interruptor, desaparece el campo magnético de la bobina. Este cambio repentino en el campo puede inducir un voltaje gigantesco.

tividad de vueltas se usa como electroimán, y que se activa con una fuente de corriente directa, quizá con una pequeña batería. Entonces, la corriente en la bobina forma un campo magnético intenso. Cuando desconectamos la batería abriendo un interruptor, es mejor estar preparado para recibir una sorpresa. En ese momento la corriente en el circuito baja con rapidez a cero, y el campo magnético en la bobina sufre una disminución repentina (figura 25.15). ¿Qué sucede cuando cambia repentinamente un campo magnético en una bobina, aun cuando sea la misma que lo produce? La respuesta es que se induce un voltaje. El campo magnético que desaparece con rapidez, con la energía almacenada, puede inducir un voltaje enorme, el suficiente para provocar una gran chispa a través del interruptor, o a través de ti, si lo estás abriendo. Por esta razón los electroimanes se conectan con un circuito que absorbe el exceso de carga y evita que la corriente baje con demasiada rapidez. De este modo se reduce el voltaje autoinducido. Por cierto, es el mismo motivo por el que debes desconectar los electrodomésticos accionando un interruptor, y no tirando de su clavija. Los circuitos del interruptor pueden evitar un cambio brusco de la corriente.

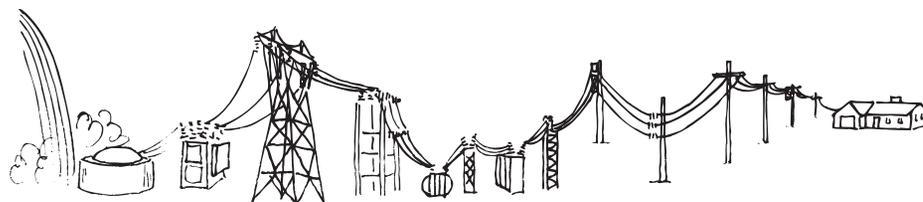
Transmisión de electricidad (opcional)

Casi toda la energía eléctrica que se usa en la actualidad está en la forma de corriente alterna, y por tradición, debido a la facilidad con la que puede convertirse de un voltaje a otro.⁶ Cuando fluyen grandes corrientes por los conductores, producen pérdidas de calor y de energía, y por esta razón la energía eléctrica se transmite a grandes distancias con altos voltajes y las correspondientes corrientes bajas (potencia = voltaje \times corriente). La energía se genera a 25,000 V o menos, y cerca de la planta generadora se sube hasta 750,000 V, para transmitirla a grandes distancias; después, se baja el voltaje por etapas, en las subestaciones y puntos de distribución, hasta los voltajes que se necesitan en aplicaciones industriales (con frecuencia 440 V o más) y para los hogares (240 V y 120 V).

Así, la energía se transfiere de un sistema de conductores a otro, por inducción electromagnética. Sólo hay que dar un pequeño paso más cuando se ve que los mismos principios se pueden aplicar para eliminar los conductores y enviar la energía desde una antena radiotransmisora hasta un receptor de radio a muchos kilómetros de distancia. Sólo se necesitan ampliar estos conceptos un poco más para explicar la transformación de la energía de los electrones vibratorios en el Sol, que envían energía hasta la vida terrestre. Los efectos de la inducción electromagnética son muy trascendentales.

FIGURA 25.16

Transmisión de la electricidad.



⁶ En la actualidad, las instalaciones eléctricas pueden transformar voltajes de corriente directa aplicando tecnología de semiconductores. Pon atención a los avances actuales en tecnología de superconductores, y entérate de los cambios resultantes en la forma en que se transmite la energía.

Inducción de campos

La inducción electromagnética explica la inducción de voltajes y corrientes. En realidad, los campos más básicos son la raíz tanto de los voltajes como de las corrientes. La perspectiva moderna de la inducción electromagnética señala que los campos eléctricos y magnéticos son inducidos. Tales campos, a la vez, producen los voltajes que hemos examinado. La inducción se lleva a cabo esté presente o no un alambre conductor, o cualquier medio material. En este sentido más general, la ley de Faraday establece que

Un campo eléctrico es inducido en cualquier región del espacio en la que un campo magnético cambie a través del tiempo.

Hay un segundo efecto, que es una extensión de la ley de Faraday, excepto en que se intercambian los papeles de los campos eléctrico y magnético. Se trata de una de las múltiples simetrías de la naturaleza. Dicho efecto fue enunciado por el físico inglés James Clerk Maxwell, en la década de 1860, y se conoce como la **contraparte de Maxwell a la ley de Faraday**:

Se induce un campo magnético en cualquier región del espacio en la que un campo eléctrico cambie a través del tiempo.

En cada caso, la magnitud del campo inducido es proporcional a la rapidez con la que cambia el campo que induce. Los campos magnético y eléctrico inducidos son perpendiculares entre sí.

Maxwell se dio cuenta del vínculo entre las ondas electromagnéticas y la luz.⁷ Si las cargas eléctricas se ponen a vibrar en el rango de frecuencias que coincida con el de la luz visible, ¡las ondas producidas *serán* luminosas! Maxwell descubrió que la luz visible tan sólo son ondas electromagnéticas en el rango de frecuencias a las cuales es sensible el ojo.



Hace 200 años, la gente obtenía luz del aceite de ballena. ¡Las ballenas deberían estar contentas de que los humanos descubrieron la forma de aprovechar la electricidad!

¡EUREKA!

FIGURA 25.17

Sheron Snyder convierte energía mecánica en energía electromagnética, que a la vez se convierte en luz.



⁷ Antes de su descubrimiento, Maxwell tuvo una cita con una joven, con quien se casaría más adelante. Mientras conversaban en el jardín, la joven comentó sobre la belleza de las estrellas y lo maravillosas que son. Maxwell le preguntó cómo se sentiría ella al saber que estaba hablando con la única persona en el mundo que sabía lo que en realidad era el brillo de las estrellas, lo cual era verdadero: en ese momento, James Clerk Maxwell era la única persona en el mundo que sabía que la luz de cualquier tipo es energía que viaja en ondas de campos magnéticos y eléctricos que continuamente se regeneran entre sí.

LOS CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS Y EL CÁNCER

Ten en cuenta esta receta para ser famoso como defensor de un mundo mejor. Escribe un libro que se venda mucho sobre un riesgo grave, pero oculto, conviértete en héroe a la vista del público y, para ponerle la cereza al pastel, gana mucho dinero. La receta es bastante sencilla si quieres sacrificar tu objetividad y quizás hasta tu integridad. Sólo identifica lo que atemoriza a la gente, encuentra un culpable a quien le ajuste bien el papel de villano, y luego busca informes testimoniales (¡no busques estudios!) que apunten con el dedo al culpable. Cuando las personas con conocimientos te confronten, acúsalas de encubrir la verdad y de unir sus fuerzas con las del culpable. Esta receta ha tenido bastante éxito en todos los tiempos.

Por ejemplo, en 1989 uno de esos alarmistas publicó una serie de artículos sensacionales en una revista importante que avivó los temores del público sobre la supuesta relación entre las líneas eléctricas y el cáncer. Su afirmación fue que las personas que viven cerca de las líneas de transmisión corrían un gran riesgo de padecer cáncer. Afirmó que vivir cerca de las líneas de transmisión era el mayor riesgo para la salud que enfrentaba el público estadounidense. Avivó el fuego que se había iniciado unos 10 años atrás, cuando otro alarmista informó acerca de la mayor frecuencia de leucemia en los niños que vivían cerca de transformadores de potencia en Denver. El temor a la leucemia y a los transformadores pronto se generalizó a varios tipos de cáncer y a las líneas de transmisión por todo el país. No debe sorprender que el periodista de la revista mencionara datos que confirmaran sus acusaciones, mientras que no tuvo en cuenta otros datos que no las confirmaban. Es como encontrar agujeros de bala en la pared de un granero, pintar círculos alrededor de ellos, y luego decir que hay una gran correlación entre las balas y el blanco. Sí; hay muchos agujeros de bala (cánceres) en el área del blanco (cerca de las líneas eléctricas); pero también hay muchos agujeros de bala en otras áreas. Tampoco debe sorprender que el escritor encontrara que es más efectivo relatar anécdotas estremecedoras de sufrimientos y muertes por cáncer, que informar sobre los resultados de estudios publicados acerca del tema. Se convirtió en héroe popular, apareció en los programas de mayor audiencia en la televisión y publicó un libro con su serie de artículos en la revista,

el cual por cierto se vendió como pan caliente con el morbo título de *Las corrientes de la muerte*. El autor fue Paul Brodeur, quien ya falleció.

Los campos magnéticos que produce la energía eléctrica en la mayoría de los hogares y los centros de trabajo, tienen aproximadamente 1% de la intensidad del campo magnético natural de la Tierra. El consenso abrumador entre los científicos fue que no existía el riesgo con las líneas de transmisión, lo cual consideró Brodeur como prueba de que la comunidad científica estaba coludida con las empresas eléctricas y el gobierno, para crear una farsa masiva. Los estudios se acumularon. En 1994 un estudio entre 223,000 trabajadores electricistas canadienses y franceses no indicó aumento general en el riesgo de cáncer asociado con la exposición ocupacional a los campos electromagnéticos. Un estudio bibliográfico exhaustivo, realizado en 1995 por la American Physical Society, no encontró relación alguna entre el cáncer y las líneas de transmisión.

Muchas afirmaciones científicas espurias vienen de personas sinceras que realmente creen en su retórica, pero que no examinan con profundidad o de manera crítica aquello de lo que están hablando. Sus afirmaciones mal fundadas pueden confundir hasta a un auditorio de gente educada, que de repente se encuentra con una plétora de opiniones científicas disparatadas. Una vez que comienza a rodar cuesta abajo, una bola de nieve pseudocientífica lograr gran impulso y costar mucho dinero. No estamos seguros si el señor Brodeur creía realmente lo que decía o sólo era un charlatán; pero lo que sí sabemos es el costo de su retórica desbocada: más de 20 años de paranoia y miles de millones de dólares gastados inútilmente. Durante todo ese tiempo, no prosperó una sola demanda judicial por efectos perjudiciales de los campos electromagnéticos.

La preocupación y el miedo generados por los estudios de campos electromagnéticos y cánceres no fomentaron la prevención del cáncer, ni a nadie tranquilizaron. Los dólares no aportaron información alguna sobre la causa o la cura del cáncer. Imagínate las ventajas de que sólo se hubiera gastado, para descubrir causas biológicas válidas del cáncer, una fracción de lo que se gastó para contrarrestar una amenaza imaginaria.

En perspectiva⁸

Los antiguos griegos descubrieron que cuando se frotaba un trozo de ámbar (plástico natural, semejante al mineral), atraía pequeños trozos de papiro. Encontraron rocas extrañas en la isla de Magnesia, que atraían al hierro. Probablemente porque el aire de Grecia es relativamente húmedo, nunca notaron (ni

⁸ Adaptado de R. P. Feynman, R. B. Leighton y M. Sands, *The Feynman Lectures on Physics*, vol. II, pp. 1 a 10 y 1 a 11. (Reading, Mass.: Addison-Wesley-Longman, 1964.) Muchos físicos consideran que Richard P. Feynman, galardonado con el Nobel de física y profesor de esta disciplina en el California Institute of Technology, está entre los físicos más brillantes y más inspiradores de esta época, así como el más pintoresco. Murió en 1988.

estudiaron) los efectos de la carga eléctrica que son comunes en los climas secos. Nuestros conocimientos de fenómenos eléctricos y magnéticos no avanzaron, sino hasta hace 400 años. El mundo de los seres humanos se redujo a medida que se fue aprendiendo cada vez más acerca de la electricidad y el magnetismo. Fue posible, primero, mandar señales por medio del telégrafo a grandes distancias; luego, hablar con otras personas a muchos kilómetros de distancia, a través de alambres; y después no sólo hablar, sino también enviar imágenes a muchos kilómetros de distancia, sin conexiones físicas.

La energía, tan vital para la civilización, se pudo transmitir a cientos de kilómetros. La energía de los ríos que fluían por terrenos elevados se captó en tuberías que alimentaban “norias” gigantescas, conectadas a ensambles de alambres de cobre, torcido y tramado, que giraban en trozos de hierro monstruos que se llamaron *generadores*. De ellos salía energía a través de barras de cobre tan gruesas como tu muñeca, y se mandaba a bobinas gigantescas, devanadas sobre núcleos de transformadores, para elevar el voltaje y poder salvar con eficiencia la gran distancia hasta las ciudades. A continuación, las líneas de transmisión, divididas en ramales y después en más transformadores, para llegar después a más ramificaciones y a difusión, hasta que por último la energía del río quedaba distribuida entre ciudades enteras, haciendo girar motores, calentando, alumbrando y haciendo funcionar diversos artefactos. Fue el milagro de las luces calientes a partir del agua fría, a cientos de kilómetros de distancia; ese milagro fue posible por las partes de hierro y cobre de diseño especial que giraban, porque se habían descubierto las leyes del electromagnetismo.

Estas leyes fueron descubiertas en tiempos de la Guerra Civil estadounidense. Desde una perspectiva lejana de la historia de la humanidad, no cabe duda de que palidecen los eventos como el de esa guerra, y parecen como insignificancias provincianas, en comparación con el suceso más importante del siglo XIX: el descubrimiento de las leyes del electromagnetismo.

Resumen de términos

Contraparte de Maxwell a la ley de Faraday Se crea un campo magnético en cualquier región del espacio donde un campo eléctrico cambie al paso del tiempo. La magnitud del campo magnético inducido es proporcional a la rapidez con que cambia el campo eléctrico. La dirección del campo magnético inducido es perpendicular a la del campo eléctrico que cambia.

Generador Dispositivo de inducción electromagnética que produce una corriente eléctrica al hacer girar una bobina dentro de un campo magnético estacionario. Un generador convierte la energía mecánica en energía eléctrica.

Inducción electromagnética Inducción de voltaje cuando un campo magnético cambia al paso del tiempo. Si el campo magnético dentro de una espira cerrada cambia en cualquier forma, se induce un voltaje en la espira:

$$\text{Voltaje inducido} \sim \frac{\Delta \text{ de campo magnético}}{\Delta \text{ de tiempo}} \times \text{núm. de vueltas}$$

Es un enunciado de la ley de Faraday. La inducción de voltaje en realidad es el resultado de un fenómeno más fundamental: la inducción de un *campo* eléctrico, definida para el caso más general a continuación.

Ley de Faraday Se crea un campo eléctrico en cualquier región del espacio en la que cambie un campo magnético con el paso del tiempo. La magnitud del campo eléctrico inducido es proporcional a la rapidez con la que cambia el campo magnético. La dirección del campo inducido es perpendicular al campo magnético que cambia.

Transformador Un dispositivo para transferir la energía eléctrica de una bobina de alambre a otra, mediante inducción electromagnética, con la finalidad de transformar un valor de voltaje en otro.

Preguntas de repaso

Inducción electromagnética

1. ¿Exactamente qué fue lo que descubrieron Michael Faraday y Joseph Henry?
2. ¿Qué debe cambiar para que suceda la inducción electromagnética?

Ley de Faraday

- Además del voltaje inducido ¿de qué depende la corriente generada por la inducción electromagnética?
- ¿Cuáles son las tres maneras con las que se puede inducir un voltaje en un conductor?

Generadores y corriente alterna

- ¿Cómo se compara la frecuencia del voltaje inducido con la frecuencia con la que se introduce y se saca un imán en una bobina de alambre?
- ¿Cuál es la semejanza básica entre un generador y un motor eléctrico? ¿Cuál es la diferencia básica entre ambos?
- En el ciclo de rotación de un generador sencillo, ¿dónde es máximo el voltaje inducido?
- ¿Por qué un generador produce corriente alterna?

Producción de energía eléctrica

- ¿Quién descubrió la inducción electromagnética y quién le dio usos prácticos?

Energía de un turbogenerador

- ¿Qué es una armadura?
- ¿Qué es lo que suele suministrar energía a la turbina de una central eléctrica?

Energía magnetohidrodinámica

- ¿Cuáles son las diferencias principales entre un generador MHD y un generador convencional?
- ¿Se aplica la ley de Faraday de la inducción a un generador MHD?

Transformadores

- Desde luego, la energía eléctrica se puede conducir mediante cables, pero, ¿se puede conducir a través del espacio vacío? Si es así, ¿cómo?
- ¿La inducción electromagnética es clave en un transformador?
- ¿Por qué en un transformador se requiere corriente alterna?
- Si un transformador es muy eficiente, ¿puede aumentar la energía? Explica por qué.
- ¿Qué nombre se le da a la rapidez con que se transfiere energía?
- ¿Cuál es la principal ventaja de la corriente alterna sobre la corriente directa?

Autoinducción

- Cuando cambia el campo magnético en una bobina de alambre, en cada espira de la bobina se induce un voltaje. ¿Se inducirá voltaje en una espira si la fuente del campo magnético es la bobina misma?

Transmisión de electricidad

- ¿Por qué la electricidad se transmite con altos voltajes a grandes distancias?
- Para transmitir energía eléctrica, ¿se requieren conductores eléctricos entre la fuente y el consumidor? Menciona un ejemplo que sustente tu respuesta.

Inducción de campo

- ¿Qué se induce cuando se altera rápidamente un campo magnético?
- ¿Qué se induce cuando se altera rápidamente un campo eléctrico?

En perspectiva

- ¿Cómo parte de la energía de un río de agua fría puede transformarse en la energía de una lámpara caliente, la cual está a cientos de kilómetros de distancia?

Proyecto

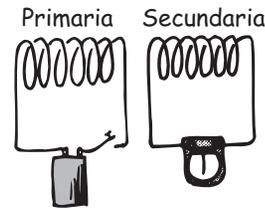
Escribe una carta a tu abuelita y dile cuál es la respuesta a lo que ha sido un misterio durante varios siglos: ¿qué es la luz? Explícale como la luz se relaciona con la electricidad y el magnetismo.

Ejercicios

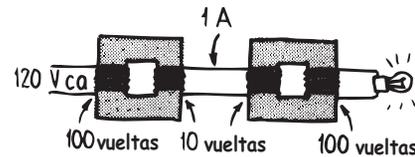
- ¿Por qué la palabra *cambio* se utilizó tantas veces en este capítulo?
- Un sensor común de una guitarra eléctrica consiste en una bobina de alambre en torno a un imán permanente pequeño, como se muestra en la figura 25.5. ¿Por qué este tipo de sensor no funciona si las cuerdas son de nylon?
- ¿Por qué un núcleo de hierro aumenta la inducción magnética de una bobina de alambre?
- ¿Por qué la armadura y los devanados de campo de un motor eléctrico por lo general se devanan sobre un núcleo de hierro?
- ¿Por qué la armadura de un generador es más difícil de girar cuando se conecta a un circuito y suministra corriente eléctrica?
- ¿Por qué un motor también suele comportarse como generador?
- ¿Un ciclista recorrerá mayor distancia sin pedalear si apaga la lámpara conectada a su generador? Explica por qué.
- Si un automóvil pasa sobre una espira de alambre amplia y cerrada, incrustada en el asfalto, ¿se alterará el campo magnético terrestre dentro de la espira? ¿Se producirá así un impulso de corriente? ¿Puedes imaginar una aplicación práctica de esto para un semáforo?
- En la zona de seguridad de un aeropuerto, la gente pasa por un campo magnético alterno débil, dentro de una bobina de alambre. ¿Qué pasaría si alguna pieza metálica que lleve alguien alterara ligeramente el campo magnético de la bobina?
- Un tramo de cinta de plástico recubierta de óxido de hierro se magnetiza más en unas partes que en otras. Cuando la cinta pasa frente a una pequeña bobina de alambre, ¿qué sucede en la bobina? ¿Cuál es la aplicación práctica de esto?

11. La esposa de Joseph Henry sacrificó con tristeza parte de su vestido de seda de novia, para que Joseph pudiera recubrir los conductores de sus electroimanes. ¿Qué finalidad tenía ese recubrimiento de seda?
12. Un detector de sismos sencillo consiste en una caja pequeña anclada al suelo. Colgado en el interior de la caja hay un imán masivo rodeado por bobinas estacionarias de alambre y fijas a la caja. Explica cómo funciona este dispositivo, aplicando dos importantes principios de la física; uno lo estudiamos en el capítulo 2 y el otro en este capítulo.
13. ¿En qué se diferencian la dirección del campo magnético y sus efectos entre el efecto del motor y el efecto del generador, como se muestra en la figura 25.7?
14. Cuando giras manualmente el eje de un motor eléctrico, ¿qué ocurre en el interior de las bobinas de alambre?
15. Tu amigo dice que si haces girar a mano el eje de un motor de corriente directa, el motor se vuelve un generador de corriente directa. ¿Estás de acuerdo con él? ¿Por qué?
16. ¿Aumenta el valor de voltaje cuando el generador se hace girar con más rapidez? Explica por qué.
17. Una sierra eléctrica que funciona a rapidez normal, toma una cantidad relativamente pequeña de corriente. Pero si se atora con alguna pieza de madera que se esté cortando, y se evita que gire el motor, la corriente sube en forma dramática y el motor se sobrecalienta. ¿Por qué?
18. Si colocas un anillo metálico en una región donde un campo magnético alterne con rapidez, el anillo se calentará. ¿Por qué?
19. Un mago pone un anillo de aluminio sobre una mesa, bajo la cual está oculto un electroimán. Cuando dice “¡jabracadabra!” (y oprime un interruptor que manda corriente por la bobina bajo la mesa), el anillo salta por el aire. Explica este “truco”.
20. En la imagen que viene al inicio del capítulo, Jean Curtis le pregunta a sus alumnos por qué levita el aro de cobre que rodea al núcleo de hierro del electroimán. ¿Cuál es la explicación? ¿En ello interviene ca o cd?
21. ¿Cómo podría encenderse una lámpara eléctrica acercándola a un electroimán, sin tocarlo? ¿Se requiere corriente alterna o corriente directa? Defiende tu respuesta.
22. Un tramo de alambre se dobla para formar una espira cerrada, y se hace pasar un imán a través de ella; se induce un voltaje y, en consecuencia, una corriente en el alambre. Otro tramo de alambre, del doble de longitud, se dobla para formar dos espiras y se hace pasar también un imán por ellas. Se induce un voltaje doble; pero la corriente es la misma que la que se produjo en la espira única. ¿Por qué?

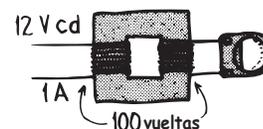
23. Dos bobinas de alambre semejantes, pero separadas, se montan cercanas entre sí, como se muestra a continuación. La primera bobina se conecta con una batería y por ella pasa la corriente directa. La segunda se conecta con un galvanómetro. 1. ¿Cómo responde el galvanómetro cuando se cierra el interruptor del primer circuito? 2. ¿Y después de cerrarlo, cuando la corriente de la batería es constante? 3. ¿Y cuando se abre el interruptor?



24. ¿Por qué se inducirá más voltaje en el aparato de la figura de arriba, si se introduce un núcleo de hierro en las bobinas?
25. ¿Por qué un transformador requiere que la corriente sea alterna?
26. ¿Cómo se compara la corriente en la secundaria de un transformador con la corriente en la primaria, cuando el voltaje de la secundaria es el doble del voltaje en la primaria?
27. ¿En qué sentido puede considerarse que un transformador es una palanca eléctrica? ¿Qué sí multiplica? ¿Qué no multiplica?
28. ¿Cuál es la diferencia principal entre un transformador de subida y un transformador de bajada?
29. ¿Por qué normalmente se puede escuchar un zumbido cuando está trabajando un transformador?
30. ¿Por qué un transformador no funciona con corriente directa? ¿Por qué requiere ca?
31. ¿Por qué es importante que el núcleo de un transformador pase por las dos bobinas?
32. ¿Las bobinas primaria y secundaria en un transformador están físicamente unidas, o hay espacio entre ambas? Explica por qué.
33. En el circuito de abajo, ¿cuántos volts salen y cuántos amperes pasan por la lámpara?



34. En el circuito de abajo, ¿cuántos volts salen al medidor, y cuántos amperes pasan por él?



35. ¿Cómo podrías contestar la pregunta anterior si la entrada fuera 12 V de ca?
36. ¿Un transformador eficiente puede aumentar la energía? Defiende tu respuesta.
37. Tu amigo dice que, según la ley de Ohm, un alto voltaje produce una alta corriente. Después te pregunta que, entonces, ¿cómo es posible transmitir energía a alto voltaje y *baja* corriente en una línea de transmisión? ¿Cuál es tu iluminadora respuesta?
38. Si se lanza un imán recto a través de una bobina de alambre de gran resistencia, caerá lentamente. ¿Por qué?
39. Tu profesor de física deja caer un imán recto a través de un tramo vertical de tubo de cobre, y cae apreciablemente con más lentitud que cuando se dejó caer a través de él un objeto no magnetizado.
40. Este ejercicio es similar al anterior. ¿Por qué un imán recto caerá más despacio y alcanzará la velocidad terminal en un tubo de cobre o de aluminio, pero no en un tubo de cartón?
41. Aunque el cobre y el aluminio no son magnéticos, ¿por qué es más difícil que una placa de cualquiera de estos metales pase por los polos de un imán, que una placa de cartón?
42. Una barra de metal, sujeta en un extremo, oscila libremente en ausencia de un campo magnético. Sin embargo, cuando oscila entre los polos de un imán, sus oscilaciones se detienen con rapidez. ¿Por qué? (Tal amortiguamiento magnético se utiliza en diversos dispositivos prácticos.)
43. El ala metálica de un avión funciona como un “alambre” que atraviesa el campo magnético terrestre. Se induce un voltaje entre las puntas de las alas, y pasa corriente de un ala a la otra, pero sólo durante un tiempo corto. ¿Por qué la corriente se detiene, aun cuando el avión sigue volando por el campo magnético terrestre?
44. ¿Qué hay de incorrecto en este esquema? Para generar electricidad sin combustible, conecta un motor que mueva un generador que produzca electricidad, cuyo voltaje suba con transformadores de tal modo que el generador pueda hacer funcionar el motor y, al mismo tiempo, suministre electricidad para otros usos.
45. Si no hay imanes cerca, ¿por qué la corriente fluye en una espira grande de alambre que se agita en el aire?
46. Sabemos que la fuente de una onda sonora es un objeto vibratorio. ¿Cuál será la fuente de una onda electromagnética?
47. ¿Qué hace una onda de radio que llega a los electrones de una antena receptora?
48. ¿Cómo supones que la frecuencia de una onda electromagnética se compare con la de los electrones que pone a oscilar en una antena receptora?
49. Un amigo dice que se generan uno a otro los campos eléctricos y los magnéticos que cambian, y que eso causa la luz visible, cuando la frecuencia del

cambio coincide con las frecuencias de la luz visible. ¿Estás de acuerdo con él? Explica por qué.

50. ¿Existirían las ondas electromagnéticas, si los campos magnéticos que cambian produjeran campos eléctrico, pero en cambio los campos eléctricos que cambian no pudieran producir campos magnéticos? Explica por qué.

Problemas

1. La bobina primaria de un transformador de subida toma 100 W. Calcula la potencia que suministra la bobina secundaria.
2. Un transformador ideal tiene 50 vueltas en su primaria y 250 vueltas en su secundaria. A la primaria se le conectan 12 V de corriente alterna. Calcula: a) los volts de corriente alterna disponibles en la secundaria; b) la corriente que pasa por un dispositivo de 10 ohms conectado con la secundaria; c) la potencia suministrada a la primaria.
3. Un tren eléctrico de juguete necesita 6 V para funcionar. Si la bobina primaria de su transformador tiene 240 vueltas, ¿cuántas vueltas debe tener la secundaria, si la primaria se conecta con la corriente doméstica de 120 V?
4. Los letreros de neón necesitan unos 12,000 V para funcionar. ¿Cuál debe ser la relación de las vueltas en la secundaria entre las vueltas en la primaria en un transformador para letrero de neón que funcione con alimentación de 120 V?
5. En el otro lado de la ciudad se suministran 100 kW (10^5 W) de potencia, mediante un par de líneas de transmisión entre las cuales el voltaje es de 12,000 V. a) ¿Qué corriente pasa por las líneas? b) Cada una de las dos líneas tiene 10 ohms de resistencia. ¿Cuál será el cambio de voltaje a *lo largo* de la línea? (Piensa con cuidado. Este cambio de voltaje es a lo largo de cada línea y no entre las líneas.) c) ¿Qué potencia se emite como calor en ambas líneas al mismo tiempo (aparte de la potencia enviada a los consumidores)? ¿Puedes ver por qué es importante subir los voltajes con transformadores para transmisión a grandes distancias?

Recuerda: las preguntas de repaso te permiten autoevaluarte para ver si captaste las ideas fundamentales del capítulo. Los ejercicios y los problemas son “lagartijas” aparte, para que después trates de tener al menos una comprensión satisfactoria del capítulo y puedas manejar las preguntas de repaso.

