

# 25

CAPÍTULO 25

## Inducción electromagnética

- 25.1 Inducción electromagnética
- 25.2 Ley de Faraday
- 25.3 Generadores y corriente alterna
- 25.4 Producción de potencia
- 25.5 Transformadores
- 25.6 Autoinducción
- 25.7 Transmisión de potencia
- 25.8 Inducción de campo



**1** Jean Curtis suscita una discusión entre los alumnos para explicar por qué el anillo de cobre levita sobre el núcleo de hierro del electroimán. **2** Un transformador de vecindario común por lo general disminuye 2,400 volts a 240 volts para las casas y pequeños negocios. **3** Z. Tugba Kahyaoglu muestra a sus alumnos cómo un imán modifica el giro de una armadura cuando invierte la polaridad del imán. **4** Sheron Snyder convierte energía mecánica en energía electromagnética, la que a su vez se convierte en luz.

En tiempos pasados, la mayoría de los grandes colaboradores científicos eran hombres con recursos financieros. Las personas que no tenían dinero estaban muy ocupadas ganándose la vida y no disponían del tiempo que exigen las investigaciones científicas serias. Michael Faraday fue una excepción.

Michael Faraday fue uno de los cuatro hijos de James Faraday, quien era herrero en un pueblo al sureste de Londres. Michael sólo tenía una educación escolar básica y fue en gran medida autodidacta. A los 13 años de edad se convirtió en aprendiz de un encuadernador local y, durante su aprendizaje de siete años, leyó muchos libros en el taller de encuadernación. Se interesó mucho en la ciencia, especialmente en la electricidad. En 1812, al final de su formación,



y con 20 años de edad, Faraday asistió a las conferencias impartidas por el renombrado químico inglés sir Humphry Davy, de la *Royal Institution* y la *Royal Society*. Faraday tomó apuntes detallados, los puso en forma de libro y envió a Davy un libro con más de 300 páginas de las conferencias. Davy quedó muy impresionado y felicitó a Faraday, aunque al principio le recomendó permanecer en el

negocio de la encuadernación. Sin embargo, al año siguiente, cuando el asistente de Davy fue despedido por peleonero, Davy invitó a Faraday a ocupar su puesto.

En la sociedad inglesa clasista de la época, Faraday no era considerado un caballero. Cuando Davy fue a una gira de 18 meses por el continente, en compañía de su esposa, Faraday fue con ellos pero viajó afuera del carruaje y comió con la servidumbre porque la esposa de Faraday se rehusó a tratarlo como un igual. No obstante, Faraday tuvo oportunidad de conocer a la élite científica de Europa y escuchó un montón de ideas estimulantes.

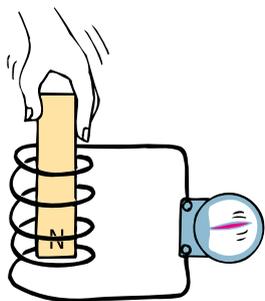
Faraday se encaminó a ser uno de los más importantes científicos experimentales de la época. Realizó descubrimientos

importantes en química, electrólisis y especialmente electricidad y magnetismo. En 1831 hizo su más notable descubrimiento. Cuando movió un imán hacia las espiras de un alambre, indujo corriente eléctrica en ellas. Ésta es la *inducción electromagnética*, que coincidentemente la descubrió más o menos al mismo tiempo en Estados Unidos Joseph Henry (el material para el aislamiento de las espiras de alambre de Henry fue donado, con lágrimas en los ojos, por su esposa, quien sacrificó parte de la seda de su vestido de bodas para cubrir los alambres). En aquella época la única forma de producir una corriente eléctrica sustancial era con baterías. La inducción electromagnética dio lugar a la era de la electricidad.

Las habilidades matemáticas de Faraday se limitaban al álgebra simple y no se extendían hasta la trigonometría. En consecuencia, comunicó sus ideas de manera gráfica y con lenguaje simple. Imaginó que los efectos eléctricos y magnéticos serían transportados por “líneas de fuerza”. Ahora se les llama líneas de campos eléctrico y magnético, y siguen siendo herramientas útiles en la ciencia y la ingeniería.

Faraday rehusó participar en la producción de armas químicas para la guerra de Crimea por razones éticas. Era profundamente religioso y conoció a su esposa, Sarah Barnard, mientras asistía a la iglesia. No tuvieron hijos. Fue elegido para ser miembro de sociedades prestigiosas y gozó de un alto estatus científico en sus últimos años de vida. Rechazó ser caballero y dos veces se negó a ser presidente de la *Royal Society*. Destinó grandes esfuerzos a proyectos de servicio para compañías privadas y el gobierno británico: aumentó la seguridad de las minas de carbón, inventó nuevas formas de operar los faros para la navegación y halló otras maneras de controlar la contaminación. Faraday fue un auténtico “ecologista”.

La unidad de capacitancia eléctrica, el farad, recibe su nombre en honor de Faraday. Murió a la edad de 75 años, en 1867. Antes de su muerte rechazó que se le sepultara en la abadía de Westminster. Ahí se encuentra una placa conmemorativa con su nombre, cerca de la tumba de Isaac Newton. De hecho, Faraday fue enterrado en un lote en la iglesia a la que asistía.



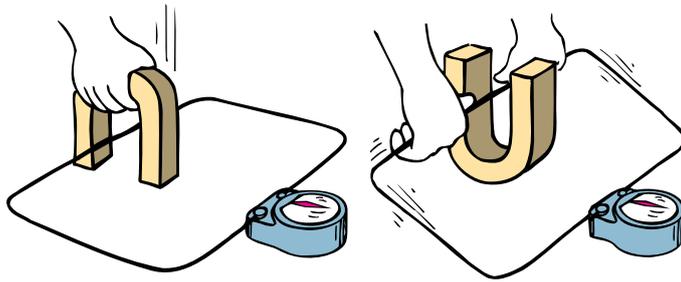
**FIGURA 25.1**

Cuando el imán se coloca en la bobina, se induce un voltaje en la bobina y sus cargas se ponen en movimiento.

## 25.1 Inducción electromagnética

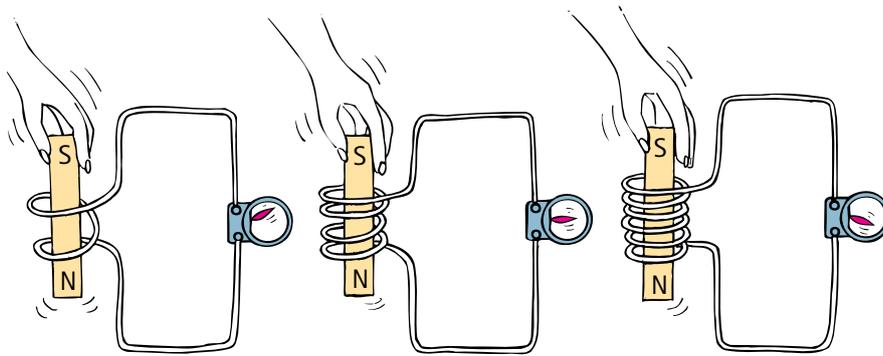
Faraday y Henry descubrieron que la corriente eléctrica podía producirse en un alambre con sólo mover un imán adentro o afuera de sus espiras (Figura 25.1). No se necesitan baterías ni ninguna otra fuente de voltaje, sólo el movimiento de un imán en una espira de alambre. Este fenómeno de inducir voltaje al cambiar el campo magnético en las espiras de alambre se llama **inducción electromagnética**. El voltaje es causado, o *inducido*, por el movimiento relativo entre un alambre y un campo magnético; esto es: que el campo magnético de un imán se mueva cerca de un conductor estacionario o que el conductor se mueva en un campo magnético estacionario (Figura 25.2).

Cuanto más grande sea el número de espiras de alambre que se mueven en un campo magnético, mayor es el voltaje inducido (Figura 25.3). Empujar un imán en una bobina con el doble de espiras inducirá el doble de voltaje; empujarlo en una bobina con 10 veces más espiras inducirá 10 veces más voltaje; y así sucesivamente. Puede parecer



**FIGURA 25.2**  
En la espira de alambre se induce un voltaje cuando el campo magnético se mueve y pasa por el alambre o el alambre se mueve por el campo magnético.

que se obtiene algo (energía) a cambio de nada con sólo aumentar el número de espiras en una bobina de alambre. Pero, si supones que la bobina está conectada a un resistor u otro dispositivo que disipa energía, esto no es así. Se descubre que es más difícil empujar el imán al interior de una bobina compuesta por un número mayor de espiras.



**FIGURA 25.3**  
Cuando un imán se inserta en una bobina que tiene el doble de espiras que otra bobina, se induce el doble de voltaje. Si el imán se inserta en una bobina con tres veces más espiras, entonces se induce tres veces más voltaje.

Esto se debe a que el voltaje inducido produce una corriente, que, a su vez, produce un electroimán, el cual repele el imán en tu mano. Más espiras significan más voltaje, lo cual significa que se realiza más trabajo para inducirlo (Figura 25.4). La cantidad de voltaje inducido depende de cuán rápido las líneas de campo magnético entran o salen de la bobina. Un movimiento muy lento apenas produce voltaje. El movimiento rápido induce mayor voltaje.

La inducción electromagnética está a tu alrededor. En la carretera, ésta activa los semáforos cuando un automóvil pasa por encima de las bobinas de alambre que están bajo la superficie de la carretera, y cambia su campo magnético. Los automóviles híbridos la utilizan para convertir la energía del frenado en energía eléctrica para sus baterías. La inducción electromagnética la percibes en los sistemas de seguridad de los aeropuertos cuando cruzas bobinas verticales y, si llevas contigo una cantidad importante de hierro, éste cambia el campo magnético de las bobinas y dispara una alarma. Se le utiliza en las tarjetas bancarias cuando su banda magnética se desliza por un escáner. Como verás al final del capítulo, y al comienzo del siguiente, incluso es la base de las ondas electromagnéticas que llamas luz.



**FIGURA 25.4**  
Es más difícil empujar el imán en una bobina que tiene más espiras porque el campo magnético de cada espira de corriente resiste al movimiento del imán.

**PUNTO DE CONTROL**

¿La inducción electromagnética (IEM) es una fuente de energía?

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

No. La IEM no es una fuente de energía, sino una manera de transformar energía mecánica en energía eléctrica. Para producir energía mediante IEM es indispensable realizar trabajo.



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

**FIGURA 25.5**

Las pastillas fonocaptoras de las guitarras son pequeñas bobinas con imanes en su interior. Los imanes magnetizan las cuerdas de acero. Cuando las cuerdas vibran, se induce un voltaje en las bobinas y se aumenta mediante un amplificador; el sonido se produce mediante una bocina.

## pti

- Las linternas de inducción no necesitan baterías. Sacude la linterna durante más o menos 30 segundos y generarás hasta 5 minutos de iluminación brillante. La inducción electromagnética ocurre cuando un imán interno se desliza entre las bobinas que cargan un capacitor. Cuando el brillo disminuya, sacude de nuevo. Tú eres quien suministra la energía para cargar el capacitor.



**SCREENCAST: Inducción electromagnética**



Cuando bajas la rapidez de un automóvil híbrido al frenarlo, el motor eléctrico se convierte en un generador y carga una batería.



## 25.2 Ley de Faraday

La inducción electromagnética se resume mediante la **ley de Faraday**, que afirma:<sup>1</sup>

**El voltaje inducido en una bobina es proporcional al producto de su número de espiras, el área transversal de cada espira y la tasa a la que cambia el campo magnético dentro de dichas espiras.**

La cantidad de *corriente* producida por la inducción electromagnética depende no sólo del voltaje inducido, sino también de la resistencia de la bobina y el circuito al cual está conectado.<sup>2</sup> Por ejemplo, un imán se puede insertar y sacar de una espira cerrada de caucho y meter y sacar de una espira cerrada de cobre. El voltaje inducido en cada una es el mismo, siempre que las espiras sean del mismo tamaño y el imán se mueva con la misma rapidez. Pero la corriente en cada una es muy diferente. Los electrones en el caucho perciben el mismo campo eléctrico que los del cobre, pero sus enlaces con los átomos fijos impiden el movimiento de la carga que ocurre de un modo tan libre en el cobre.

Se han mencionado dos formas de inducir voltaje en una espira de alambre: cuando mueves la espira cerca de un imán y cuando mueves un imán cerca de la espira. Existe una tercera forma: cuando cambias una corriente en una espira cercana. Los tres casos tienen el mismo ingrediente esencial: un campo magnético variable en la espira.

### PUNTO DE CONTROL

- ¿Qué ocurre cuando un bit de información almacenado magnéticamente en un disco de computadora gira bajo la cabeza lectora que contiene una pequeña bobina?
- Si empujas un imán dentro de una bobina conectada a un resistor, como se muestra en la Figura 25.4, sentirás resistencia cuando empujas. ¿Por qué esta resistencia es mayor en una bobina que tiene más espiras?

### COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

- El campo magnético variable de la bobina induce un voltaje. De esta forma, la información almacenada magnéticamente en el disco se convierte en señales eléctricas.
- Dicho de manera simple, se necesita más trabajo que suministre más energía para que más corriente la disipe en el resistor. También puedes verlo de esta forma: cuando empujas un imán dentro de una bobina, haces que la bobina se convierta en un imán (un electroimán). Cuantas más espiras haya en la bobina, más intenso será el electroimán que produzcas y con más fuerza empujará de vuelta contra el imán que estás moviendo. (Si el electroimán de la bobina atrajera a tu imán en lugar de repelerlo, se crearía energía de la nada y se violaría la ley de conservación de la energía. Pero esto no ocurre.)

<sup>1</sup>En forma de ecuación,

$$\text{Voltaje inducido} \sim \text{número de espiras} \times \text{área de cada espira} \times \frac{\Delta \text{ campo magnético}}{\Delta \text{ tiempo}}$$

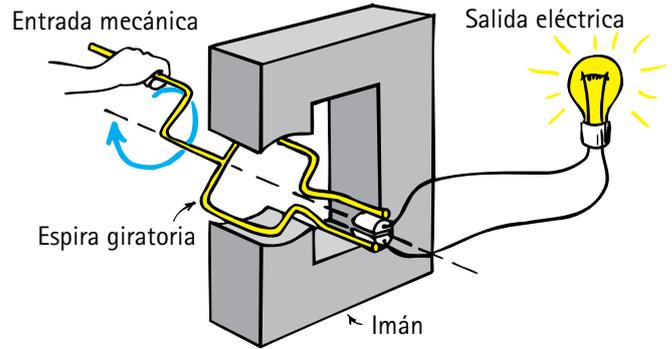
<sup>2</sup>La corriente también depende de la “inductancia” de la bobina. La inductancia mide la tendencia de una bobina a resistir un cambio de corriente porque el magnetismo producido por una parte de la bobina actúa para oponerse al cambio de corriente en otras partes de la bobina. En los circuitos CA, es semejante a la resistencia, lo que depende de la frecuencia de la fuente CA y del número de espiras de la bobina. En este libro no se abordará este tema.

## 25.3 Generadores y corriente alterna

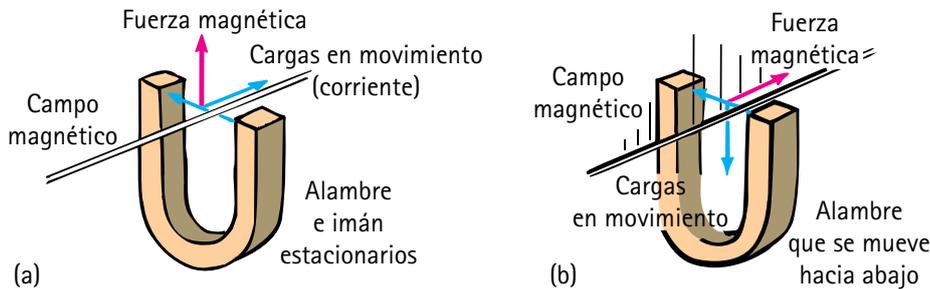
Cuando un extremo de un imán se inserta y se saca repetidas veces de una bobina de alambre, la dirección del voltaje inducido alterna. A medida que aumenta la intensidad del campo magnético dentro de la bobina (a medida que el imán entra en la bobina), el voltaje inducido en la bobina se dirige en una dirección. Cuando la intensidad del campo magnético disminuye (a medida que el imán sale de la bobina), el voltaje se induce en la dirección opuesta. La frecuencia del voltaje alterno que se induce es igual a la frecuencia del campo magnético variable en el interior de la espira.

Es más práctico inducir voltaje con el movimiento de una bobina que con el movimiento de un imán. Esto puede hacerse si giras la bobina (o espira) en un campo magnético estacionario (Figura 25.6). Esta configuración se llama **generador**. La construcción de un generador es, en principio, idéntica a la de un motor. Parecen iguales, pero las funciones de entrada y salida se invierten. 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 tan sólo transforman energía de una forma en otra.

Es interesante comparar la física de un motor y un generador y ver que ambos funcionan de acuerdo con el mismo principio básico: que electrones en movimiento experimentan una fuerza que es mutuamente perpendicular tanto a su velocidad como al campo magnético que atraviesan (Figura 25.7). A la desviación del alambre (movimiento como resultado de la corriente) se le llamará *efecto motor*, y a lo que ocurre como resultado de la ley de la inducción (corriente como resultado de movimiento) se le llamará *efecto generador*. Estos efectos se resumen en las partes (a) y (b) de la figura (donde, por convención, las flechas de corriente y fuerza se aplican a una carga positiva). Estúdialas. ¿Puedes observar que los dos efectos están relacionados?



**FIGURA 25.6**  
Un generador simple. En la espira se induce un voltaje cuando ésta gira en el campo magnético.



**FIGURA 25.7**  
(a) Efecto motor: cuando la carga se mueve a lo largo del alambre, hay una fuerza ascendente perpendicular sobre la carga. Dado que no hay una ruta conductora ascendente, la fuerza sobre la carga jala el alambre hacia arriba. (b) Efecto generador: cuando un alambre sin corriente inicial se mueve hacia abajo, la carga en el alambre experimenta una fuerza de deflexión perpendicular a su movimiento. Existe una ruta conductora en esta dirección, de modo que la carga se mueve y constituye una corriente.

En la Figura 25.8 puedes ver el ciclo de inducción electromagnética. Observa que, cuando la espira de alambre gira en el campo magnético, cambia el número de líneas de campo magnético en el interior de la espira. Cuando el plano de la espira es perpendicular a las líneas de campo, se encierra el número máximo de líneas. A medida que la espira gira, en efecto corta las líneas, de modo que menos líneas están encerradas. Cuando el plano de la espira es paralelo a las líneas de campo, ninguna línea está encerrada. La rotación continua aumenta y disminuye el número de líneas encerradas en una forma cíclica, y la mayor tasa de cambio en las líneas de campo ocurre cuando el número de líneas de campo encerradas se vuelve cero. Por tanto, el voltaje inducido es mayor a medida que la espira gira y pasa por una orientación

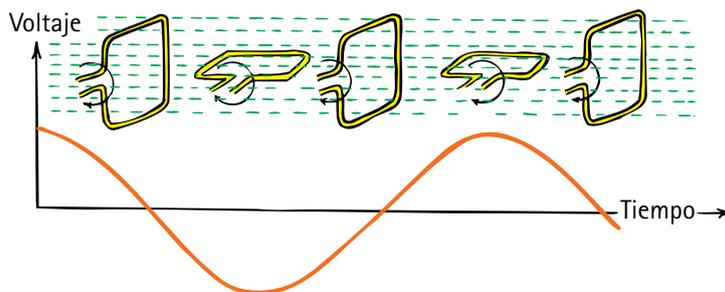


**VIDEO:** Aplicación de la IEM

paralela a las líneas. Puesto que el voltaje inducido por el generador alterna, la corriente producida es CA, corriente alterna.<sup>3</sup> La corriente alterna de las casas se produce con generadores estandarizados, de modo que la corriente pasa por 60 ciclos de cambio a cada segundo: 60 hertz.

**FIGURA 25.8**

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



### PUNTO DE CONTROL

¿En qué momento se necesita una entrada de energía para que salga energía mediante inducción electromagnética?

### COMPRUEBA TU RESPUESTA

Siempre.

## 25.4 Producción de potencia

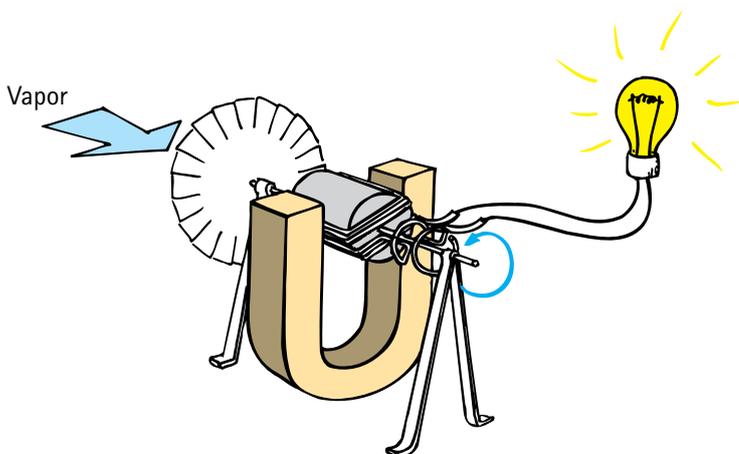
Unos 50 años después de que Michael Faraday y Joseph Henry descubrieran la inducción electromagnética, Nikola Tesla y George Westinghouse dieron un uso práctico a estos hallazgos y demostraron al mundo que la electricidad podía generarse de manera confiable y en cantidades suficientes para iluminar ciudades enteras.

### Potencia de turbogenerador

Tesla construyó generadores muy parecidos a los que están en funcionamiento en la actualidad, pero un poco más complicados que el modelo sencillo que se analizó antes. Los generadores de Tesla tenían armaduras —núcleos de hierro enrollados con manojos de alambre de cobre— que se hacían girar dentro de intensos campos magnéticos mediante una turbina, la cual, a su vez, giraba mediante la energía del vapor o del agua que caía. Las espiras de alambre giratorias de la armadura cortaban el campo magnético de los electroimanes circundantes, lo que en consecuencia inducía un voltaje y una corriente alternos.

Puedes pensar en este proceso desde un punto de vista atómico. Cuando los alambres de la armadura giratoria cortan el campo magnético, fuerzas electromagnéticas con dirección opuesta actúan sobre las cargas negativas y positivas. Los electrones responden a esta fuerza con un movimiento masivo momentáneo relativamente libre en una dirección por toda la red cristalina del cobre; los átomos de cobre, que en realidad son iones positivos, se fuerzan en la dirección contraria. Sin embargo, dado que los iones están anclados en la red, es difícil que lleguen a moverse. Sólo los electrones se mueven; se desplazan de ida y vuelta en forma alternada con cada rotación de la

 Para hacer un gran descubrimiento, no es suficiente con estar en el lugar correcto en el momento correcto: también son importantes la curiosidad y el trabajo arduo.



**FIGURA 25.9**

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

<sup>3</sup>Con escobillas apropiadas y otros medios, la CA de las espiras puede convertirse en CD para hacer un generador CD.

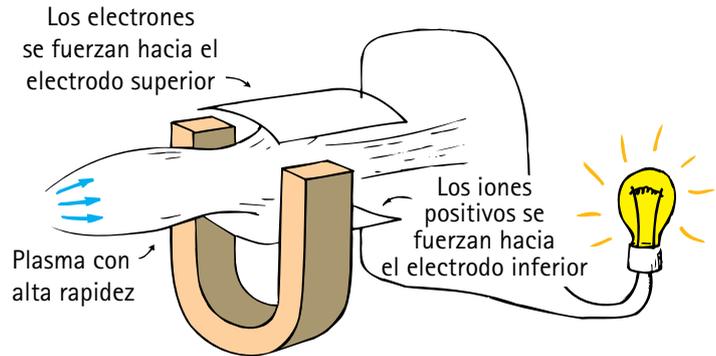
armadura. La energía de este desplazamiento electrónico se registra en los electrodos terminales del generador.

## Potencia MHD

Un interesante dispositivo, similar al turbogenerador, es el generador MHD (magnetohidrodinámico), que elimina la turbina y la armadura giratoria por completo. En lugar de hacer que las cargas se muevan en un campo magnético vía una armadura giratoria, un plasma de electrones e iones positivos se expande por una boquilla y se mueve con rapidez supersónica a través de un campo magnético. Al igual que en la armadura de un turbogenerador, el movimiento de las cargas a través de un campo magnético da lugar a un voltaje y a un flujo de corriente en concordancia con la ley de inducción de Faraday. Mientras que las “escobillas” de un generador convencional llevan la corriente hacia el circuito de carga externo, en el generador MHD la misma función la realizan placas conductoras, o *electrodos* (Figura 25.10). A diferencia del turbogenerador, el generador MHD puede operar a cualquier temperatura a la que pueda calentarse el plasma, ya sea por combustión o por procesos nucleares. La temperatura alta resulta en una eficiencia termodinámica alta, lo cual significa más potencia por la misma cantidad de combustible y menos calor de desecho. La eficiencia aumenta aún más cuando el calor de “desecho” se utiliza para convertir agua en vapor y accionar un generador convencional de turbina de vapor.

Esta sustitución de las bobinas de cobre giratorias por un plasma que fluye se ha vuelto funcional sólo a partir del desarrollo de la tecnología para producir plasmas con una temperatura suficientemente alta. Las plantas de corriente utilizan un plasma a alta temperatura formado por la combustión de combustibles fósiles en aire u oxígeno.<sup>4</sup>

Es importante saber que los generadores no producen energía, tan sólo convierten energía de alguna otra forma en energía eléctrica. Como se estudió en el Capítulo 7, la energía de una fuente, ya sea combustible fósil o nuclear, o viento o agua, se convierte en energía mecánica para impulsar la turbina. El generador unido convierte la mayor parte de esta energía mecánica en energía eléctrica. Algunas personas creen que la electricidad es una fuente primaria de energía. No lo es. Es un portador de energía que necesita una fuente.



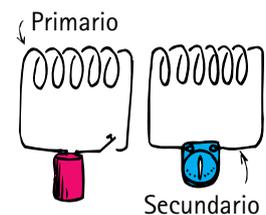
**FIGURA 25.10**

Un generador MHD simplificado. Fuerzas con direcciones opuestas actúan sobre las partículas positivas y negativas en el plasma de alta rapidez que se mueve por el campo magnético. El resultado es una diferencia de voltaje entre los dos electrodos. Entonces fluye corriente de un electrodo al otro a través de un circuito externo. No hay partes móviles; sólo el plasma se mueve. En la práctica, se usan electroimanes superconductores.

## 25.5 Transformadores

Sin duda, la energía eléctrica puede transportarse a lo largo de alambres, y ahora se verá cómo puede transportarse a través del espacio vacío. La energía puede transferirse de un dispositivo a otro con el arreglo simple que se muestra en la Figura 25.11. Observa que un embobinado está conectado a una batería y el otro está conectado a un galvanómetro. Es habitual referirse al embobinado conectado a la fuente de poder como el *primario* (entrada) y al otro como el *secundario* (salida). En cuanto el interruptor se cierra en el primario y la corriente pasa a través de su embobinado, una corriente también ocurre en el secundario, aun cuando no haya conexión material entre los dos embobinados. Sin embargo, en el secundario, sólo ocurre un breve pico de corriente. Después, cuando se abre el interruptor del primario, de nuevo se registra un pico de corriente en el secundario, pero en la dirección opuesta.

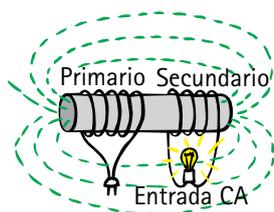
Ésta es la explicación: cuando la corriente comienza a fluir por el embobinado, alrededor del primario se acumula un campo magnético. Esto significa que el campo magnético crece (esto es, *cambia*) alrededor del primario. Pero, dado que los embobinados



**FIGURA 25.11**

Siempre que el interruptor del primario se abre o se cierra, se induce un voltaje en el circuito secundario.

<sup>4</sup>Temperaturas más bajas son suficientes cuando el fluido conductor de electricidad es un metal líquido, por lo general litio. Un sistema de potencia MHD de metal líquido se conoce como sistema de potencia LMMHD (por sus siglas en inglés).



**FIGURA 25.12**  
Un transformador simple.

están cerca uno del otro, este campo variable se extiende hacia el embobinado secundario, lo que en consecuencia induce un voltaje en el secundario. Este voltaje inducido sólo es temporal porque, cuando la corriente y el campo magnético del secundario llegan a un estado estacionario —esto es, cuando el campo magnético ya no cambia—, ya no se induce un voltaje en el secundario. Pero, cuando el interruptor se apaga, la corriente en el primario desciende a cero. El campo magnético alrededor del embobinado colapsa, con lo que induce un voltaje en el embobinado secundario, que percibe el cambio. Se observa que el voltaje se induce siempre que un campo magnético *cambia* a través del embobinado, sin importar la razón.

### PUNTO DE CONTROL

**Cuando el interruptor del primario de la Figura 25.11 se abre o se cierra, el galvanómetro del secundario registra una corriente. Pero cuando el interruptor permanece cerrado, no se registra corriente en el galvanómetro del secundario. ¿Por qué?**

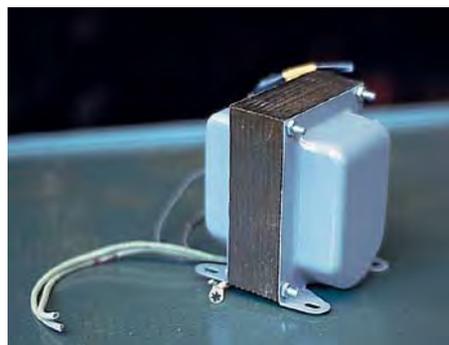
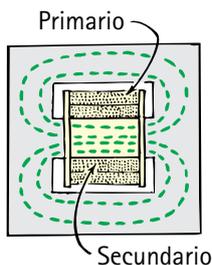
### COMPRUEBA TU RESPUESTA

Cuando el interruptor permanece en la posición cerrada, existe una corriente estacionaria en el primario y un campo magnético estacionario alrededor del embobinado. Este campo se extiende hacia el secundario pero, a menos que haya un *cambio* en el campo, no ocurre inducción electromagnética.

Si colocas un núcleo de hierro dentro de los embobinados primario y secundario de la configuración de la Figura 25.11, el campo magnético dentro del primario se intensifica por la alineación de dominios magnéticos. El campo también se concentra en el núcleo y se extiende hacia el secundario, que intercepta más del cambio en el campo. El galvanómetro mostrará picos de corriente mayores cuando el interruptor del primario se abra o cierre. En lugar de abrir y cerrar un interruptor para producir el cambio del campo magnético, supón que para activar al primario se usa una corriente alterna. Entonces, la frecuencia de los cambios periódicos en el campo magnético es igual a la frecuencia de la corriente alterna. Ahora se tiene un **transformador** (Figura 25.12). En la Figura 25.13 se muestra una configuración más eficiente.

**FIGURA 25.13**

Un transformador práctico y más eficiente. Los embobinados primario y secundario están enrollados en la parte interna del núcleo de hierro (amarillo), lo que guía las líneas magnéticas alternas (verde) producidas por la CA en el primario. El campo alternante induce un voltaje CA en el secundario. En consecuencia, la potencia a un voltaje del embobinado primario se transfiere al embobinado secundario a un voltaje diferente.



Si el primario y el secundario tienen igual número de espiras de alambre (por lo general llamadas *vueltas*), entonces los voltajes alternos de entrada y salida serán iguales. Pero si el embobinado secundario tiene más vueltas que el primario, el voltaje alterno producido en el embobinado secundario será mayor que el producido en el primario. En este caso, se dice que el voltaje *sube* (*incrementa*). Si el secundario tiene el doble de vueltas que el primario, el voltaje en el secundario será el doble que en el primario.

Puedes ver esto con las configuraciones de la Figura 25.14. Considera primero el caso simple de una sola espira primaria conectada a una fuente alterna de 1 volt, y una sola espira secundaria conectada al voltímetro CA (a). La espira secundaria intercepta el campo magnético variable de la primaria, y un voltaje de 1 V se induce en la

secundaria. Si otra espira se enrolla alrededor del núcleo, de modo que el transformador tenga dos secundarios (b), intercepta el mismo cambio en el campo magnético. Se ve que en este embobinado también se induce 1 V. No hay necesidad de separar ambos secundarios. Podrías unirlos (c) y aún así tener un voltaje inducido total de 1 V + 1 V, o 2 V. Esto es equivalente a decir que un voltaje de 2 V se inducirá en un solo secundario que tenga el doble de espiras que el primario. Si el secundario se devana con tres veces más espiras, entonces se inducirá el triple de voltaje. El voltaje incrementado puede iluminar una señal de neón o enviar potencia a través de una larga distancia.

Si el secundario tiene menos vueltas que el primario, el voltaje alterno producido en el secundario será *menor* que el producido en el primario. Se dice que el voltaje *se reduce*. Este voltaje reducido puede operar con seguridad un tren eléctrico de juguete. Si el secundario tiene la mitad de vueltas que el primario, entonces sólo la mitad de voltaje se induce en el secundario. De modo que la energía eléctrica puede alimentarse en el primario a un voltaje alterno dado y tomarse del secundario a un voltaje alterno mayor o menor, dependiendo del número relativo de vueltas en los devanados de las bobinas primaria y secundaria. La relación entre los voltajes primario y secundario con respecto al número relativo de vueltas está dada por:

$$\frac{\text{Voltaje primario}}{\text{Número de vueltas del primario}} = \frac{\text{voltaje del secundario}}{\text{número de vueltas del secundario}}$$

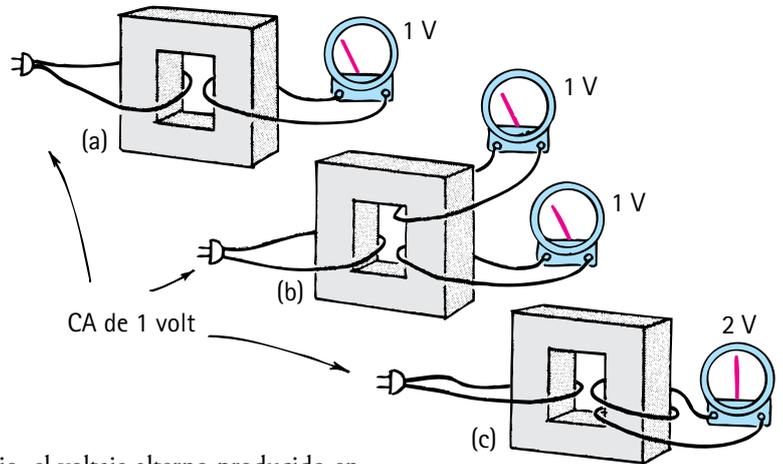
Podría parecer que se obtiene algo por nada con un transformador que sube el voltaje. No es así, pues la conservación de la energía siempre regula lo que puede ocurrir. Cuando el voltaje sube, la corriente en el secundario es menor que en el primario. En realidad, el transformador transfiere energía de una bobina a la otra. No te equivoques en este punto: un transformador de ninguna forma puede aumentar la energía, eso nunca pasa de acuerdo con la conservación de energía. Un transformador incrementa o disminuye el voltaje sin un cambio de energía. La tasa a la que la energía se transfiere se llama *potencia*. La potencia usada en el secundario la suministra el primario. El primario no da más de lo que usa el secundario, de acuerdo con la ley de conservación de la energía. Si ignoras la pequeña pérdida de potencia debida al calentamiento de los embobinados y el núcleo, entonces

$$\text{Potencia dentro del primario} = \text{potencia fuera del secundario}$$

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

$$(\text{Voltaje} \times \text{corriente})_{\text{primario}} = (\text{voltaje} \times \text{corriente})_{\text{secundario}}$$

Se ve que, si el secundario tiene más voltaje que el primario, tendrá menos corriente que el secundario. La facilidad con la que los voltajes pueden incrementarse o disminuirse con un transformador es la principal razón por la que la mayoría de la potencia eléctrica es CA en lugar de CD.



**FIGURA 25.14**  
 (a) El voltaje de 1 V inducido en el secundario es igual al voltaje del primario. (b) Un voltaje de 1 V también se induce en el secundario agregado porque intercepta el mismo cambio en campo magnético del primario. (c) Los voltajes de 1 V cada uno inducidos en los dos secundarios de una vuelta son equivalentes a un voltaje de 2 V inducido en un solo secundario de dos vueltas.

**PUNTO DE CONTROL**

1. Si 100 V de CA pasan a través del primario de 100 vueltas de un transformador, ¿cuál será la salida de voltaje si el secundario tiene 200 vueltas?
2. Si supones que la respuesta a la pregunta anterior es 200 V y el secundario está conectado a un reflector con una resistencia de 50 Ω, ¿cuál será la corriente CA en el circuito secundario?
3. ¿Cuál es la potencia en el embobinado secundario?

4. ¿Cuál es la potencia en el embobinado primario?
5. ¿Cuál es la corriente CA extraída por el embobinado primario?
6. El voltaje subió y la corriente bajó. La ley de Ohm dice que un aumento de voltaje producirá un aumento de la corriente. ¿Existe aquí alguna contradicción, o la ley de Ohm no se aplica a circuitos que tengan transformadores?

### COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. A partir de  $\frac{100 \text{ V}}{100 \text{ vueltas del primario}} = \frac{x \text{ V}}{200 \text{ vueltas del secundario}}$ , verás que  $x = 200 \text{ V}$ .
2. A partir de la ley de Ohm,  $200 \text{ V}/50 \Omega = 4 \text{ A}$ .
3. Potencia = voltaje  $\times$  corriente =  $200 \text{ V} \times 4 \text{ A} = 800 \text{ W}$ .
4. Por la ley de conservación de la energía, la potencia en la bobina primaria es la misma, 800 W.
5. 8 A, el doble ( $100 \text{ V} \times ? \text{ A} = 800 \text{ W}$ ).
6. ¡La ley de Ohm está vivita y coleando! La corriente en el secundario es igual al voltaje inducido dividido entre la carga (resistencia), pero es menor sólo cuando se compara con la corriente mayor extraída por el primario.  $IV_{\text{primario}} = IV_{\text{secundario}}$ . Es interesante que no haya una resistencia convencional en el primario, sólo una resistencia a la transferencia de energía hacia el secundario (consulta la Figura 25.4).

## 25.6 Autoinducción

Las espiras portadoras de corriente de una bobina interactúan no sólo con las espiras de otras bobinas, sino también con las espiras de la misma bobina. Cada espira de una bobina interactúa con el campo magnético alrededor de la corriente de otras espiras de la misma bobina. Esto es *autoinducción*. Se produce un voltaje autoinducido. Este voltaje siempre está en una dirección que se opone al voltaje variable que lo produce y suele denominarse “fuerza contraelectromotriz” o simplemente “contra-fem”.<sup>5</sup> En este libro no se abordará la autoinducción ni las contra-fem, excepto para reconocer un efecto común y peligroso.

Supón que una bobina con un gran número de vueltas se usa como electroimán y se activa con una fuente CD, tal vez una batería pequeña. Entonces, la corriente de la bobina se acompaña de un intenso campo magnético. Cuando se desconecta la batería por abrir un interruptor, mejor prepárate para una sorpresa. Cuando el interruptor se abre, la corriente en el circuito desciende rápidamente a cero y el campo magnético de la bobina experimenta una reducción súbita (Figura 25.15). ¿Qué ocurre cuando en una bobina cambia de manera súbita un campo magnético, incluso si es la misma bobina la que lo produce? La respuesta es que se induce un voltaje. El campo magnético que colapsa en forma rápida, con su almacén de energía puede inducir un voltaje enorme, tan grande que desarrolla una fuerte chispa a través del interruptor, ¡o hacia ti, si tú eres quien abre el circuito! Por esta razón, los electroimanes están conectados a un circuito que absorbe la carga excesiva y evita que la corriente caiga muy súbitamente. Esto reduce el voltaje autoinducido. Por cierto, ésta también es la razón por la cual, para desconectar los electrodomésticos, debes apagar el interruptor, y no jalar el enchufe. Los circuitos del interruptor pueden evitar un cambio súbito de corriente.



**FIGURA 25.15**

Cuando el interruptor se abre, el campo magnético de la bobina colapsa. Este cambio súbito en el campo puede inducir un voltaje enorme.

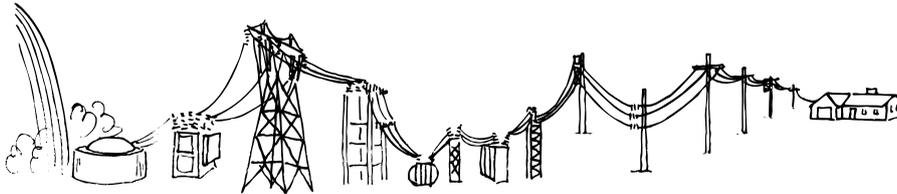
<sup>5</sup>La oposición de un efecto de inducción a una causa inductora se conoce como *ley de Lenz*; ésta es una consecuencia de la conservación de la energía.

## 25.7 Transmisión de potencia



Casi toda la energía eléctrica que se vende en la actualidad está en forma de CA, de manera tradicional debido a la facilidad con la que puede transformarse de un voltaje a otro.<sup>6</sup> Grandes corrientes en los alambres producen calor y pérdidas de energía, de modo que la potencia se transmite a lo largo de grandes distancias a voltajes altos y corrientes respectivamente bajas (potencia = voltaje  $\times$  corriente). La potencia se genera a 25,000 V o menos y se incrementa cerca de la estación eléctrica hasta a 750,000 V para una transmisión a larga distancia, luego se disminuye por etapas en subestaciones y puntos de distribución hasta los voltajes usados en las aplicaciones industriales (con frecuencia 440 V o más) y para las casas (240 y 120 V).

Observa los transformadores en los postes eléctricos de tu vecindario. Son los intermediarios entre las estaciones eléctricas y cada uno de los consumidores; con frecuencia zumban cuando hacen su trabajo.



**FIGURA 25.16**  
Transmisión de potencia.

Entonces, la energía se transfiere de un sistema de alambres de conducción a otros mediante inducción electromagnética. Se necesita sólo un pequeño paso adicional para descubrir que los mismos principios explican la eliminación de los alambres y el envío de energía desde una antena radiotransmisora hasta un receptor de radio a muchos kilómetros de distancia. En la actualidad, los teléfonos móviles, las tabletas y todo tipo de aparatos electrónicos lo demuestran. Extiende estos principios sólo un pequeñísimo paso más, a la transformación de la energía de los electrones vibratorios en el Sol y a la energía de la vida sobre la Tierra. Los efectos de la inducción electromagnética son de muy largo alcance.

## 25.8 Inducción de campo

La inducción electromagnética explica la inducción de voltajes y corrientes. En realidad, los *campos* más básicos están en la raíz tanto de los voltajes como de las corrientes. La visión moderna de la inducción electromagnética es que los campos eléctrico y magnético son inducidos. Éstos, a su vez, producen los voltajes ya considerados. De modo que la inducción ocurre haya o no haya alambres o algún otro medio conductor. En este sentido más general, la ley de Faraday afirma:

**Un campo eléctrico se induce en cualquier región del espacio donde un campo magnético cambie con el tiempo.**

Existe un segundo efecto, una extensión de la ley de Faraday. Es lo mismo, excepto que los papeles de los campos eléctrico y magnético se intercambian. Es una de las muchas simetrías de la naturaleza. Este efecto fue anticipado por el físico británico James Clerk Maxwell alrededor de 1860 y se conoce como la **contraparte de Maxwell a la ley de Faraday**:

**Un campo magnético se induce en cualquier región del espacio donde un campo eléctrico cambie con el tiempo.**

En cada caso, la intensidad del campo inducido es proporcional a la tasa de cambio del campo inducido. Los campos eléctrico y magnético inducidos están en ángulo recto uno con respecto al otro.



Las ondas electromagnéticas rara vez interactúan entre sí. El espacio que te rodea está lleno de ondas de radio, señales de televisión, mensajes de teléfonos móviles y luz, y cada una "hace su propia labor" e ignora a todas las demás. Cuán afortunado eres.

<sup>6</sup>En la actualidad, las instalaciones eléctricas pueden transformar voltajes CD con el uso de la tecnología de semiconductores. Sigue de cerca los adelantos recientes en la tecnología de superconductores y espera los cambios resultantes en la transmisión de potencia.



Hace doscientos años, las personas obtenían luz con aceite de ballena. ¡Las ballenas deben estar agradecidas de que los seres humanos descubrieran cómo aprovechar la electricidad!

Maxwell vio el vínculo entre las ondas electromagnéticas y la luz.<sup>7</sup> Si las cargas eléctricas se ponen a vibrar en el intervalo de frecuencias que coinciden con las de la luz, ¡se producen ondas que *son* luz! Maxwell descubrió que la luz son simplemente ondas electromagnéticas en el intervalo de frecuencias a las que el ojo es sensible.

Debido a la inducción electromagnética, la energía de los ríos elevados se ha aprovechado, convertido en electricidad y transportado a ciudades distantes. El advenimiento de los motores, los generadores y los transformadores ocurrió casi al mismo tiempo que se libraba la guerra civil estadounidense. Desde una perspectiva amplia de la historia de la humanidad, hay poca duda de que eventos como la Guerra de Secesión palidecen con una insignificancia provinciana frente al evento más significativo del siglo XIX: el descubrimiento y la aplicación de las leyes del electromagnetismo.

<sup>7</sup>En vísperas de su descubrimiento, cuenta la leyenda que Maxwell tenía una cita con una joven dama con quien se casaría después. Mientras caminaban por un jardín, su acompañante comentaba la belleza y maravilla de las estrellas. Maxwell le preguntó cómo se sentiría si supiera que caminaba al lado de la única persona en el mundo que sabía realmente qué era la luz de las estrellas. Y era cierto. En aquella época, James Clerk Maxwell era la única persona en el mundo que sabía que la luz de cualquier tipo es energía transportada en ondas de campos eléctricos y magnéticos que se regeneraban unos a otros de manera continua.

## RESUMEN DE TÉRMINOS (CONOCIMIENTO)

**Inducción electromagnética.** Creación de voltaje cuando un campo magnético cambia con el tiempo. Si el campo magnético en el interior de una espira cerrada cambia en alguna forma, se induce un voltaje en la espira:

$$\text{Voltaje inducido} \sim \text{área de las espiras} \times \frac{\Delta \text{ campo magnético}}{\Delta \text{ tiempo}}$$

Éste es un enunciado de la ley de Faraday. (Si muchas espiras están conectadas juntas en una bobina, el voltaje inducido se multiplica por el número de espiras.) La inducción de voltaje en realidad es el resultado de un fenómeno más fundamental, por lo general, la inducción de un *campo* eléctrico.

**Ley de Faraday.** El voltaje inducido en una bobina es proporcional al producto del número de sus espiras, el área transversal de cada espira y la tasa a la que cambia el campo magnético en el interior de dichas espiras.

**Generador.** Dispositivo de inducción electromagnética que produce una corriente eléctrica cuando gira una bobina dentro de un campo magnético estacionario. Un generador convierte energía mecánica en energía eléctrica.

**Transformador.** Dispositivo que transfiere potencia eléctrica de una bobina de alambre a otra mediante inducción electromagnética, con el propósito de transformar un valor de voltaje en otro.

**Contraparte de Maxwell a la ley de Faraday.** Un campo magnético se crea en cualquier región del espacio en la que un campo eléctrico cambie con el tiempo. La magnitud del campo magnético inducido es proporcional a la tasa a la que cambia el campo eléctrico. La dirección del campo magnético inducido está en ángulo recto respecto del campo eléctrico variable.

## PREGUNTAS CONCEPTUALES (COMPRESIÓN)

### 25.1 Inducción electromagnética

1. ¿Qué importante descubrimiento hicieron los físicos Michael Faraday y Joseph Henry?
2. ¿Qué debe cambiar para que en una bobina de alambre ocurra inducción electromagnética?

### 25.2 Ley de Faraday

3. Enuncia la ley de Faraday.
4. ¿Cuáles son las tres formas en las que puede inducirse voltaje en una espira de alambre?

### 25.3 Generadores y corriente alterna

5. ¿Cómo se relaciona la frecuencia del voltaje inducido con la frecuencia con la que un imán entra y sale de una bobina de alambre?
6. ¿Cuáles son las diferencias y semejanzas básicas entre un generador y un motor eléctrico?
7. ¿La corriente que produce un generador común es CA o CD?

8. ¿Cuál es la frecuencia común de la CA en las casas de Estados Unidos?

### 25.4 Producción de potencia

9. ¿Quién descubrió la inducción electromagnética y quién le dio un uso práctico?
10. ¿Qué es una armadura?
11. ¿Qué es lo que usualmente suministra la energía de entrada a una turbina?
12. ¿Es correcto decir que un generador produce energía? Defiende tu respuesta.
13. ¿Cuáles son las principales diferencias entre un generador MHD y un generador convencional?
14. ¿Un generador MHD emplea la ley de inducción de Faraday? Explica.

### 25.5 Transformadores

15. ¿Qué nombre recibe la tasa a la que se transfiere la energía?