

03.4-INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

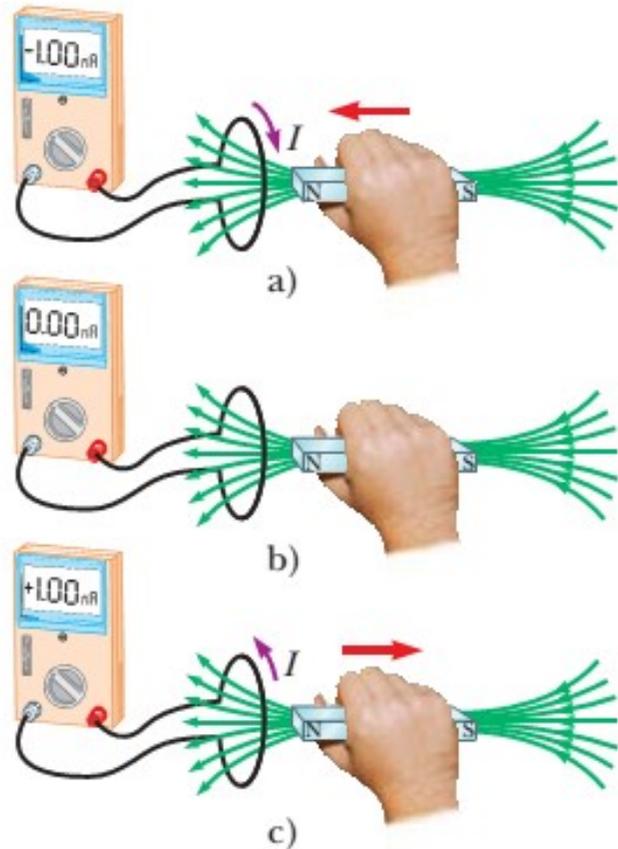
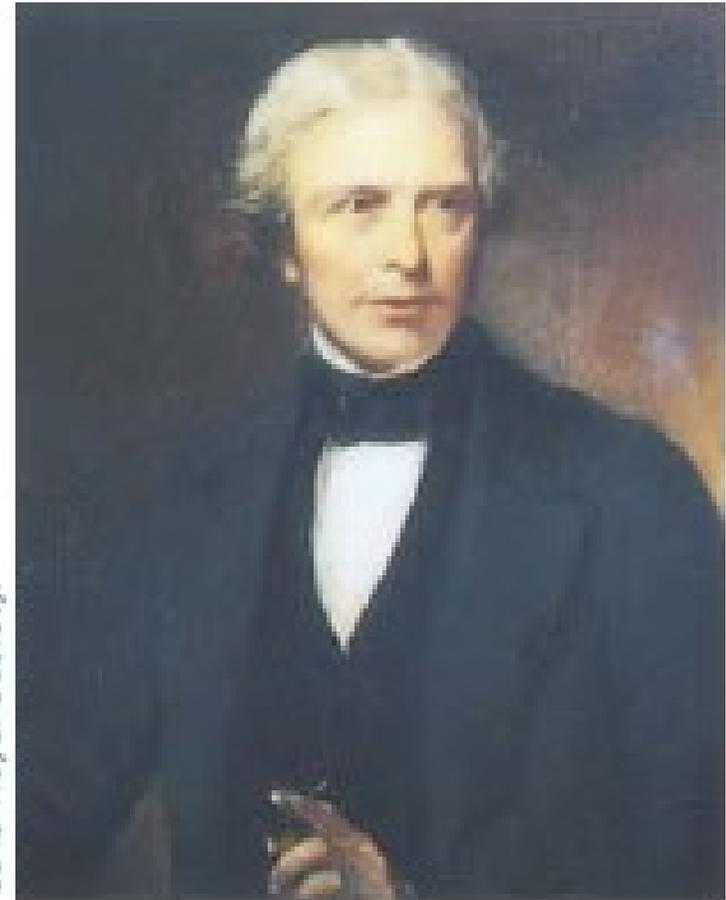


Figura 31.1

Permiso cortesía del Presidente y del Consejo de la Royal Society.



MICHAEL FARADAY

Físico y químico inglés (1791-1867) Faraday ha sido considerado a menudo el científico experimental más grande del siglo XIX. Sus innumerables contribuciones al estudio de la electricidad incluyen la invención del motor eléctrico, del generador eléctrico y del transformador, así como el descubrimiento de la inducción electromagnética y de las leyes de la electrólisis. Influido poderosamente por la religión, se negó a trabajar para las fuerzas armadas británicas en el desarrollo de gases venenosos.

INTRODUCCIÓN

La mayoría de los equipos eléctricos que se usan en la industria y el hogar (cualquiera que se conecte a un contacto de pared), la fuente de fem *no es una batería, sino una estación generadora* de electricidad, la cual produce energía eléctrica convirtiendo otras formas de energía: potencial gravitacional en una planta hidroeléctrica; química en una planta termoeléctrica que consume carbón o petróleo o atómica en una central nucleoelectrica.

Pero, **¿cómo se realiza esta conversión de la energía?**

La respuesta es un fenómeno conocido como **inducción electromagnética**.

El principio fundamental de la inducción electromagnética, es la **ley de Faraday**, que relaciona la fem inducida con el flujo magnético variable en cualquier circuito.

La **ley de Lenz** ayuda a predecir el sentido de las fem y las corrientes inducidas. Estos principios nos permitirán comprender los dispositivos de conversión de energía eléctrica, como los motores eléctricos, generadores y transformadores.

La inducción electromagnética nos indica que un campo magnético que varía con el tiempo actúa como fuente de campo eléctrico.

Experimentos de inducción

Realizados por 1830 por Michael Farady y Joseph Henry.

a) Si el imán cercano está inmóvil, el medidor no indica corriente: en el circuito no hay fuente de fem.

b) Si el imán se *mueve* y se *acerc*a o se *aleja* de la bobina, el medidor indica corriente en el circuito, pero solo mientras el imán se mueve.

Si el imán permanece fijo y es la bobina la que se mueve, otra vez se detecta corriente durante el movimiento.

a) Un imán fijo NO induce una corriente en una bobina.



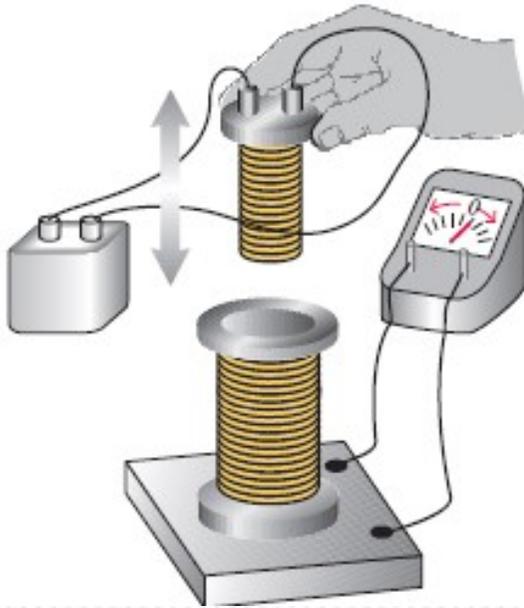
b) Mover el imán acercándolo o alejándolo de la bobina.



Esta corriente se llama **corriente inducida**, y la fem correspondiente que se requiere para generarla recibe el nombre de **fem inducida**.

Experimentos de inducción

c) Movimiento de una segunda bobina que conduce corriente, acercándola o alejándola de la primera



d) Variación de la corriente en la segunda bobina (cerrando o abriendo el interruptor)



c) Si se cambia el imán por una 2da. bobina conectada a una batería, sucede lo mismo que con el imán..

d) *ambas se mantienen inmóviles* y se varía la corriente en la segunda, ya sea abriendo y cerrando el interruptor, o bien, cambiando la resistencia de la segunda bobina con el interruptor cerrado.

Si se modifica la corriente de la segunda bobina, hay una corriente inducida en el primer circuito, pero únicamente mientras está cambiando la corriente en el segundo circuito.



Experimentos de inducción

Estos y otros experimentos muestran que el elemento común es el **flujo magnético variable Φ_B** a través de la bobina conectada al galvanómetro.

La **ley de inducción de Faraday** establece que en todas estas situaciones la fem inducida es proporcional a la *razón de cambio del flujo magnético Φ_B* a través de la bobina. a la toma de corriente de pared utiliza fem inducidas.

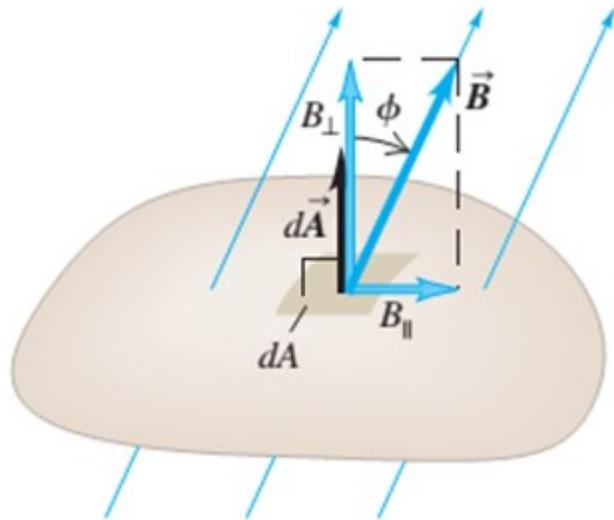
Las **fem inducidas magnéticamente**, al igual que las otras que se vieron anteriormente, son el resultado de la **acción de fuerzas no electrostáticas**.

Tendremos que diferenciar con cuidado entre los **campos eléctricos electrostáticos** producidos por cargas (de acuerdo con la ley de Coulomb), y los **no electrostáticos** producidos por campos magnéticos variables.

Un campo magnético que varía en el tiempo actúa como fuente de campo eléctrico. También se prueba que un campo *eléctrico* que varía con el tiempo actúa como fuente de un campo *magnético*.

Resultados que forman parte de las **ecuaciones de Maxwell**, describen comportamiento de campos eléctricos y magnéticos en *cualquier* situación y predicen la existencia de las ondas electromagnéticas,

Ley de Faraday



Flujo magnético a través de un elemento de área $d\vec{A}$:
 $d\Phi_B = \vec{B} \cdot d\vec{A} = B_{\perp} dA = B dA \cos \phi$.

La causa de la inducción electromagnética es el **flujo magnético** cambiante en el tiempo a través de un circuito.

Flujo magnético:

$$d\Phi_B = \vec{B} \cdot d\vec{A} = B_{\perp} dA = B dA \cos \phi$$

$$\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A} = \int B dA \cos \phi$$

Si \vec{B} es uniforme sobre un área plana \vec{A}

$$\Phi_B = \vec{B} \cdot \vec{A} = BA \cos \phi$$

Ley de Faraday de la inducción:

La fem inducida en una espira cerrada es igual al negativo de la tasa de cambio del flujo magnético a través de la espira con respecto al tiempo.

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

Ley de inducción de Faraday- La fem inducida (ε) en un circuito es igual a menos la derivada respecto al tiempo del flujo magnético (Φ_B) a través del circuito (es decir al negativo de la velocidad con que cambia con el tiempo el flujo magnético)

Ley de Faraday

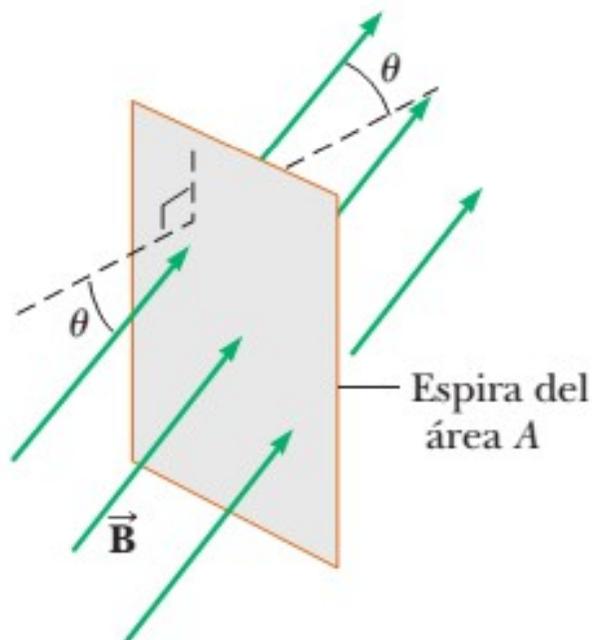
Bobina construida de N espiras, con la misma área, y Φ_B es el flujo magnético a través de una espira, se induce una fem en todas las espiras.

Para este caso:

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi_B}{dt}$$

Si el campo B es uniforme en un área plana A , se tiene que:

$$\varepsilon = -\frac{d}{dt} (BA \cos \phi)$$



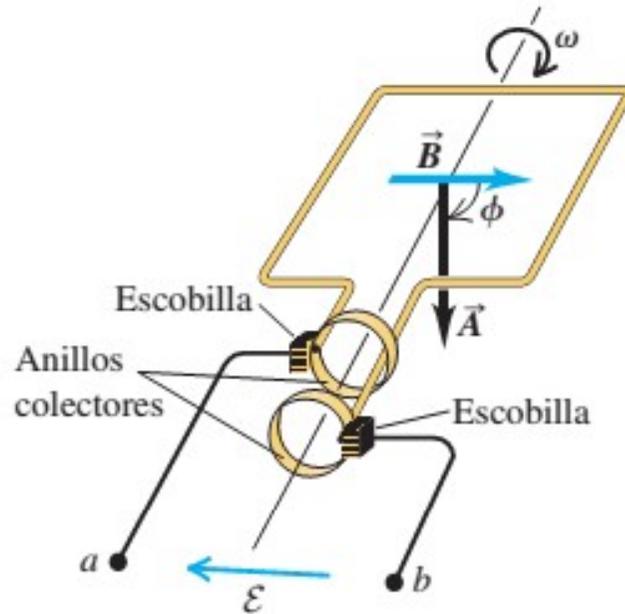
Entonces... ¿cómo se puede generar una fem?

Variando el campo B
Modificando el área A
O variando el ángulo θ



GENERADOR DE CORRIENTE ALTERNA

a)



Versión sencilla de un **alternador**, un dispositivo que genera una fem.

Se hace girar una espira rectangular con rapidez angular constante ω alrededor del eje que se indica. El campo magnético \mathbf{B} es uniforme y constante. En el momento $t = 0$, $\phi = 0$.

El campo magnético es uniforme en toda la espira

$$\frac{d\phi}{dt} = \omega \Rightarrow \phi = \omega t$$

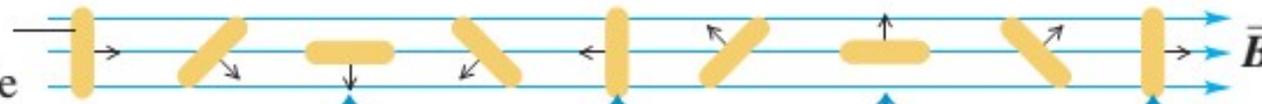
$$\Phi_B = \vec{B} \cdot \vec{A} = BA \cos \phi = BA \cos \omega t$$

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -\frac{d}{dt}(BA \cos \omega t) = \omega BA \sin \omega t$$

GENERADOR DE CORRIENTE ALTERNA

b)

Espira
(vista desde
el extremo)



El flujo disminuye
con máxima rapidez,
fem positiva máxima.

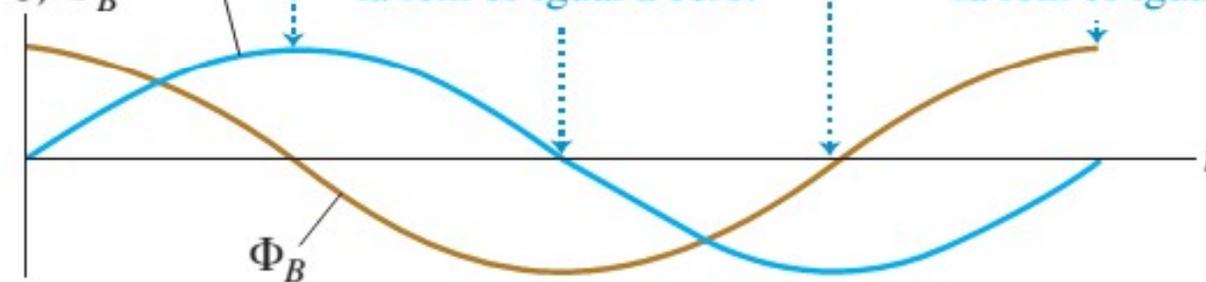
El flujo aumenta
con máxima rapidez,
fem negativa máxima.

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

\mathcal{E}, Φ_B

El flujo alcanza su
valor más negativo,
la fem es igual a cero.

El flujo alcanza
su valor más positivo,
la fem es igual a cero.

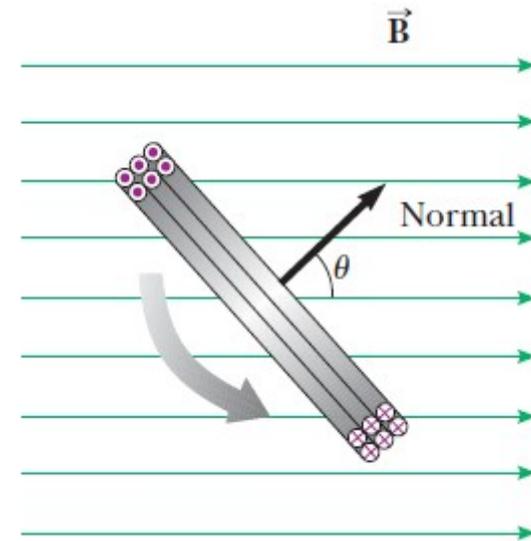


Gráfica del flujo a través de la espira (en ocre) y la fem resultante (en celeste) entre las terminales *a* y *b*, a lo largo de las posiciones correspondientes de la espira durante una rotación completa.

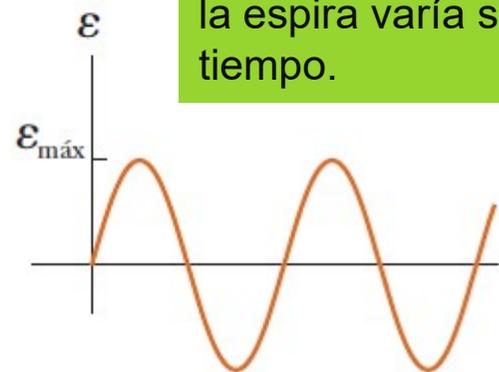
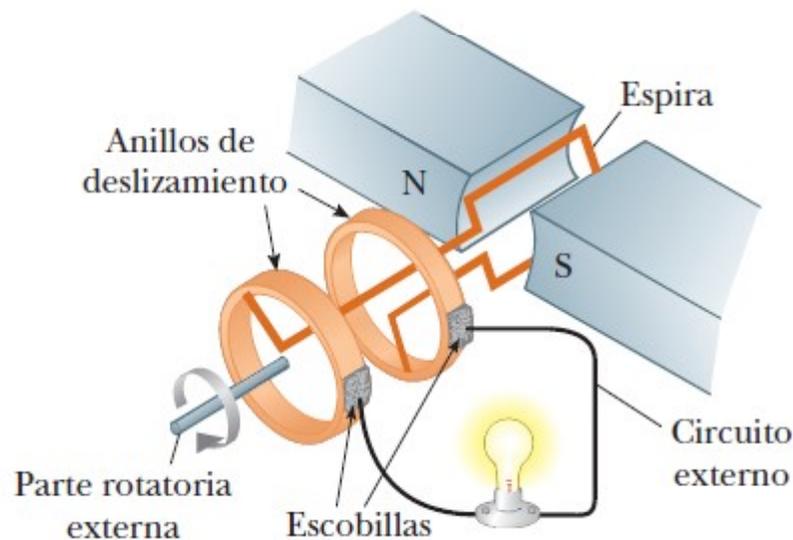


GENERADOR DE CORRIENTE ALTERNA

$$\Phi_B = \vec{B} \cdot \vec{A} = BA \cos \phi = BA \cos \omega t$$
$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -\frac{d}{dt}(BA \cos \omega t) = \omega BA \sin \omega t$$
$$\varepsilon_{MAX} = \omega BA$$



Espira que encierra un área A y que tiene N vueltas, girando con una velocidad angular constante v en un campo magnético. La fem inducida en la espira varía senoidalmente con el tiempo.



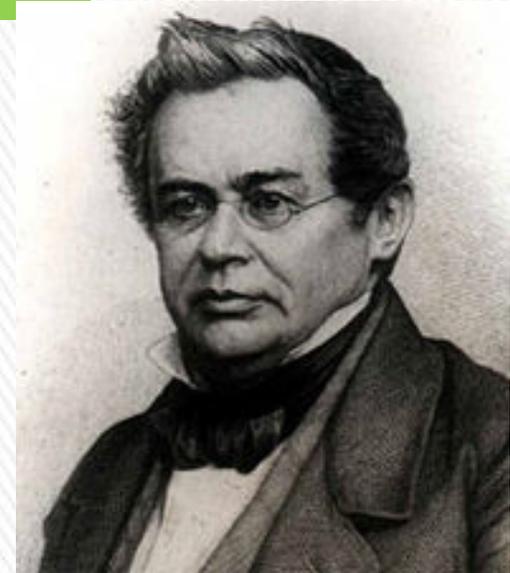
a) Diagrama de un generador de CA. Se induce una fem en una espira que gira en un campo magnético. b) Fem alternante inducida en la espira graficada en función del tiempo.

Ley de Lenz

Es un método alternativo conveniente para determinar el sentido de una corriente o una fem inducidas.

No es un principio independiente: se puede obtener de la ley de Faraday. Siempre da los mismos resultados que las reglas de los signos que presentamos en relación con la ley de Faraday, pero es más fácil de usar.

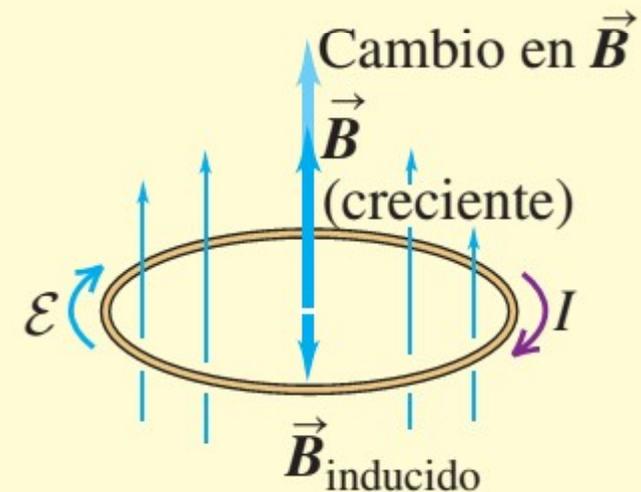
La ley de Lenz también ayuda a entender de manera intuitiva los distintos efectos de la inducción y el papel de la conservación de la energía.



La dirección de cualquier efecto de la inducción magnética es la que se opone a la causa del efecto.

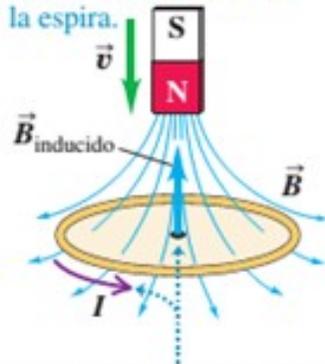
La corriente o fem inducida siempre tiende a oponerse al cambio que la generó, o a cancelarlo.

Se relaciona directamente con la conservación de la energía.



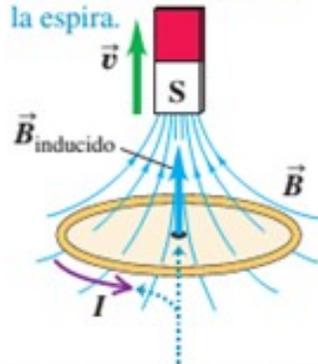
Ley de Lenz

- a) El movimiento del imán ocasiona un flujo *creciente* hacia abajo a través de la espira.

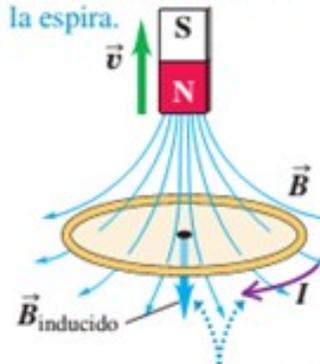


El campo magnético inducido es *hacia arriba* para oponerse al cambio del flujo. Para producir el campo inducido, la corriente inducida debe ir *en sentido antihorario*, vista desde arriba de la espira.

- b) El movimiento del imán ocasiona un flujo *decreciente* hacia arriba a través de la espira.

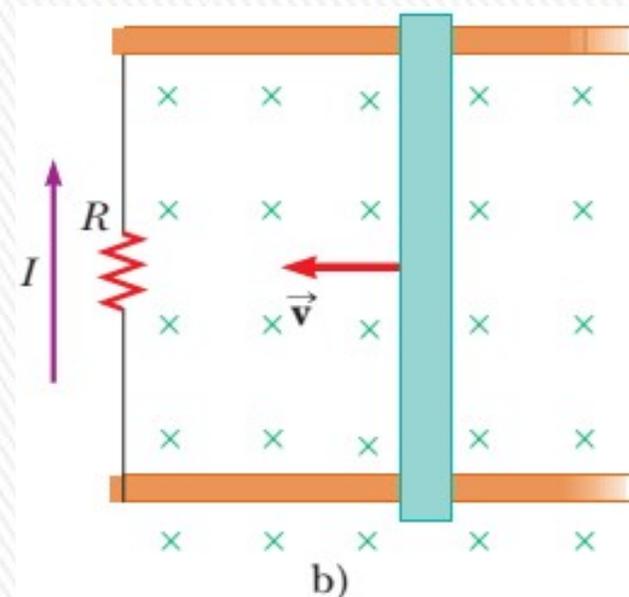
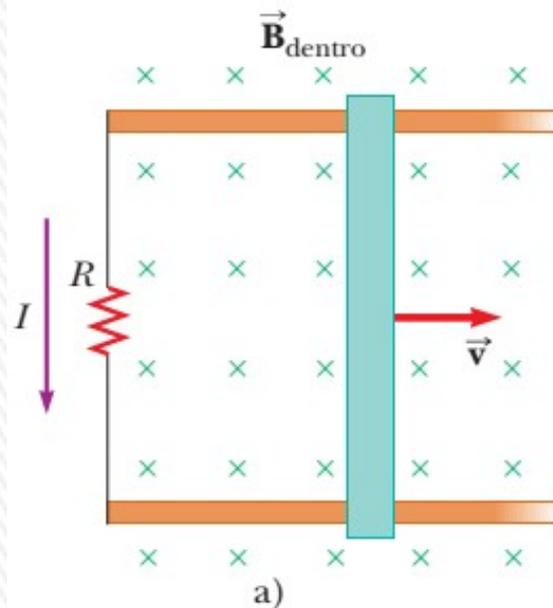
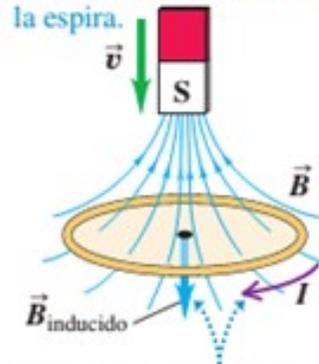


- c) El movimiento del imán produce un flujo *decreciente* hacia abajo a través de la espira.

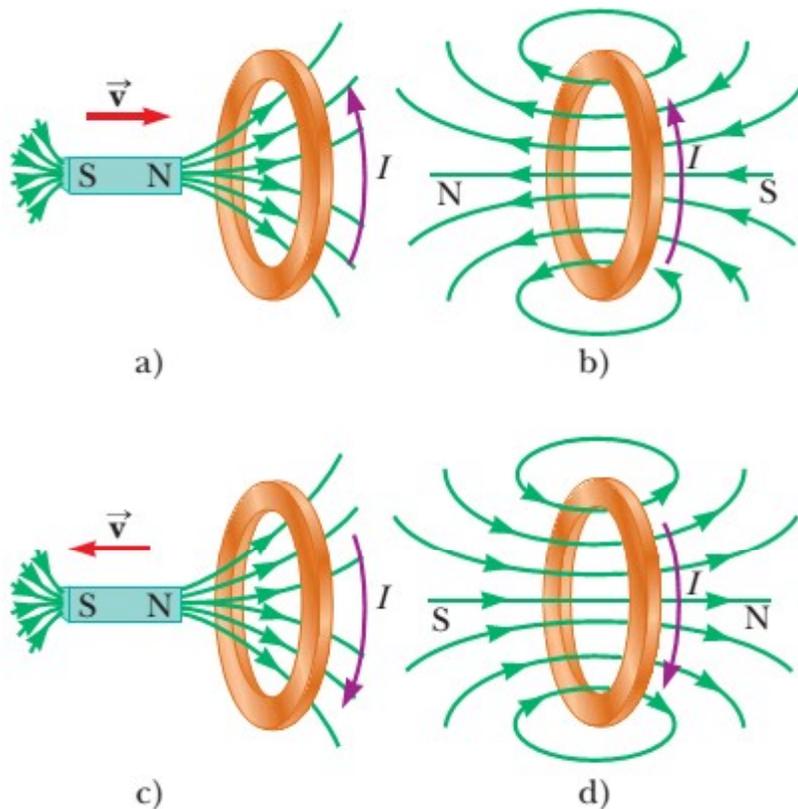


El campo magnético inducido es *hacia abajo* para oponerse al cambio de flujo. Para producir este campo inducido, la corriente inducida debe ir *en sentido horario*, vista desde arriba de la espira.

- d) El movimiento del imán ocasiona un flujo *creciente* hacia arriba a través de la espira.



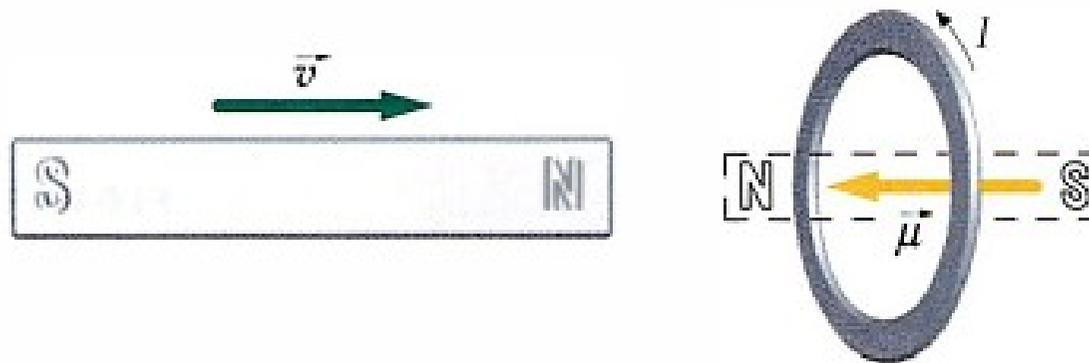
LEY DE LENZ



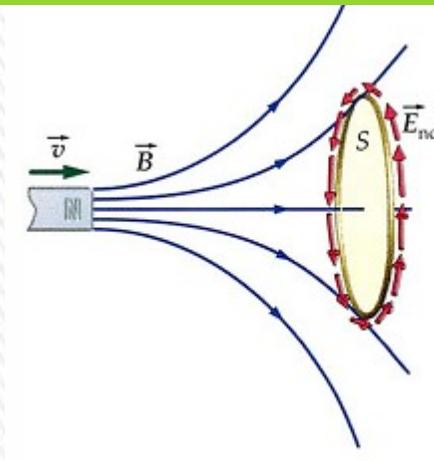
- a) Imán se mueve hacia espira, se induce corriente en la dirección mostrada.
- b) La corriente inducida produce su propio B dirigido hacia la izquierda, que contrarresta el creciente flujo externo.
- c) Imán se mueve alejándose de espira conductora estacionaria, se induce una corriente en la dirección que se muestra.
- d) Esta corriente inducida produce un B que se dirige hacia la derecha y por tanto contrarresta flujo externo decreciente.



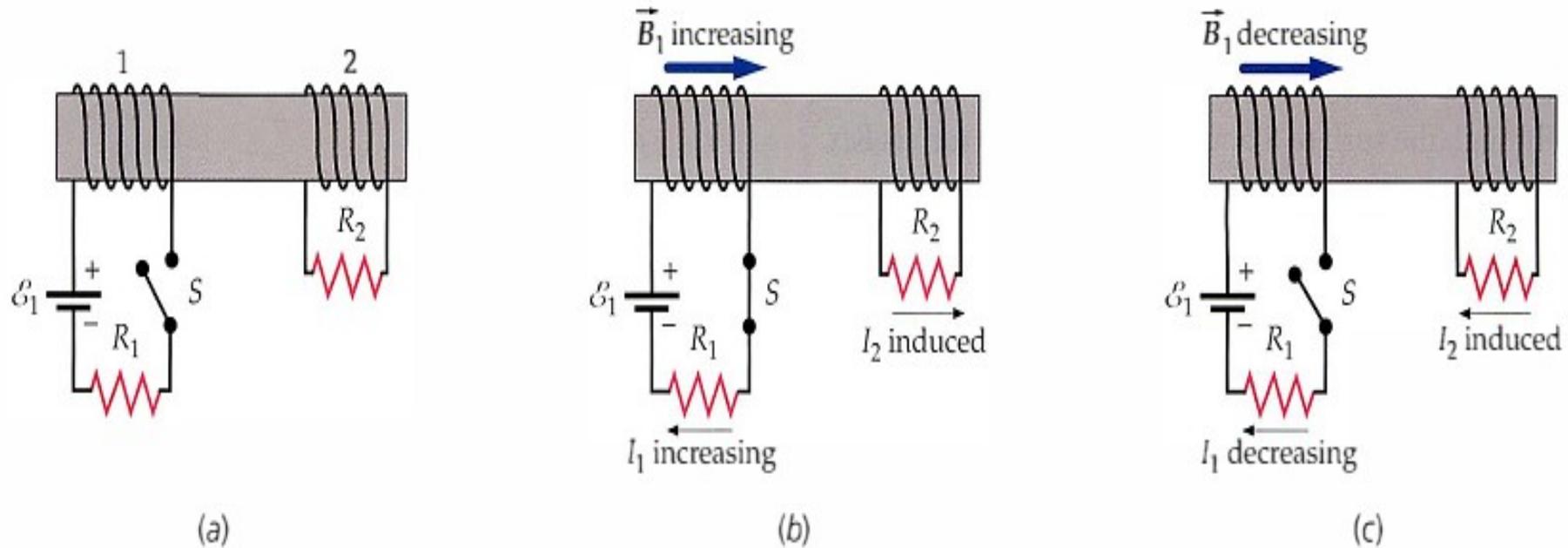
LEY DE LENZ



El momento magnético de la espira (mostrado en contorno como si fuera un imán de barra) debido a la corriente inducida es tal que se opone al movimiento de la barra imán. El imán de barra se está moviendo hacia la espira, el momento magnético inducido repele el imán de barra.



LEY DE LENZ



a) Dos circuitos adyacentes.

b) Justo después de que el interruptor se cierra, I_1 crece en la dirección mostrada. El cambio de flujo a través del circuito 2 induce la corriente I_2 . El flujo a través de circuito 2 debido a I_2 se opone al cambio de flujo debido a I_1

c) A medida que se abre el interruptor, disminuye I_1 y el flujo a través del circuito 2 cambia. La corriente inducida I_2 entonces tiende a mantener el flujo a través del circuito 2.

FUERZA ELECTROMOTRIZ (fem) DE MOVIMIENTO

Conductor en U en \mathbf{B} uniforme perpendicular al plano de la figura, dirigido *hacia* la página.

Varilla de metal con longitud L entre los dos brazos del conductor forma un circuito, y se mueve la varilla hacia la derecha con velocidad \mathbf{v} constante.

Una partícula cargada q (positiva) en la varilla experimenta una fuerza magnética

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

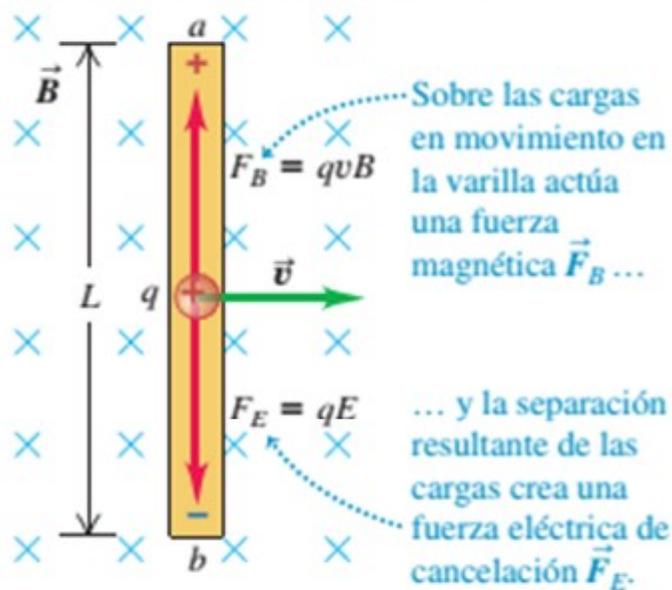
Las cargas libres se mueven creando exceso de carga positiva en a y de carga negativa en b . Se crea un campo eléctrico \mathbf{E} en el interior de la varilla. La carga se sigue acumulando hasta que \mathbf{E} :

$$qE = qvB$$

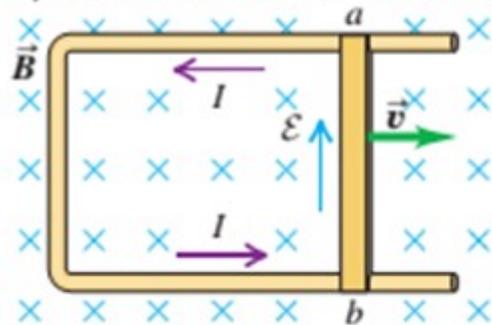
Se crea una diferencia de potencial: $V_{ab} = V_a - V_b$ igual a la magnitud del campo eléctrico E multiplicada por la longitud L de la varilla.

$$V_{ab} = V_a - V_b = E \cdot L = vBL$$

a) Varilla aislada en movimiento



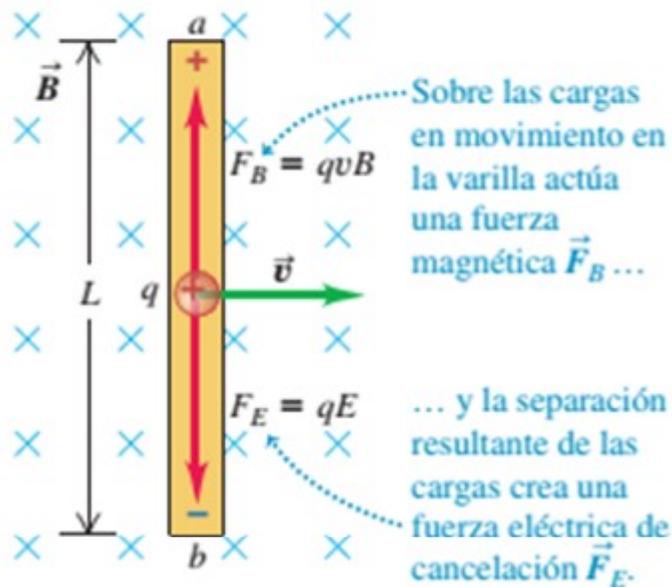
b) Varilla conectada a un conductor fijo



La fem \mathcal{E} en la varilla móvil crea un campo eléctrico en el conductor fijo.

FUERZA ELECTROMOTRIZ (fem) DE MOVIMIENTO

a) Varilla aislada en movimiento



El campo eléctrico establece una corriente en el sentido que se indica.

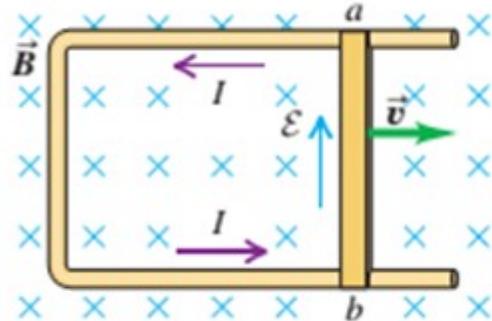
La varilla móvil se ha vuelto una fuente de fuerza electromotriz

Esta fem se denomina **fuerza electromotriz de movimiento**, y se denota con ε .

$$\varepsilon = vBL$$

(fem de movimiento; longitud y velocidad perpendiculares a \mathbf{B} uniforme)

b) Varilla conectada a un conductor fijo



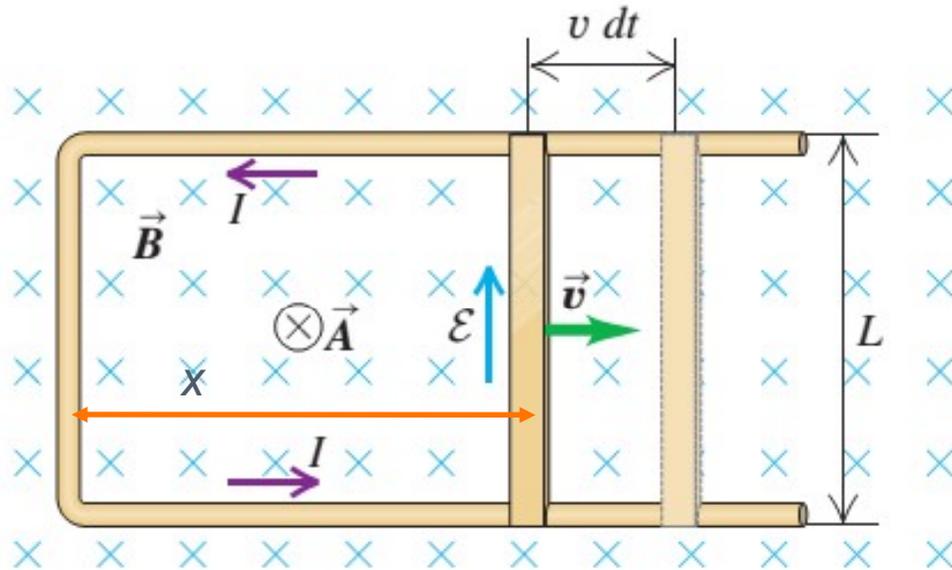
La fem ε en la varilla móvil crea un campo eléctrico en el conductor fijo.

FUERZA ELECTROMOTRIZ (fem) DE MOVIMIENTO

Aplicando directamente la ley de Faraday:

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -B \frac{dA}{dt} = -B \frac{d(L \cdot x)}{dt} = -BL \frac{dx}{dt}$$

$$\varepsilon = -BLv$$

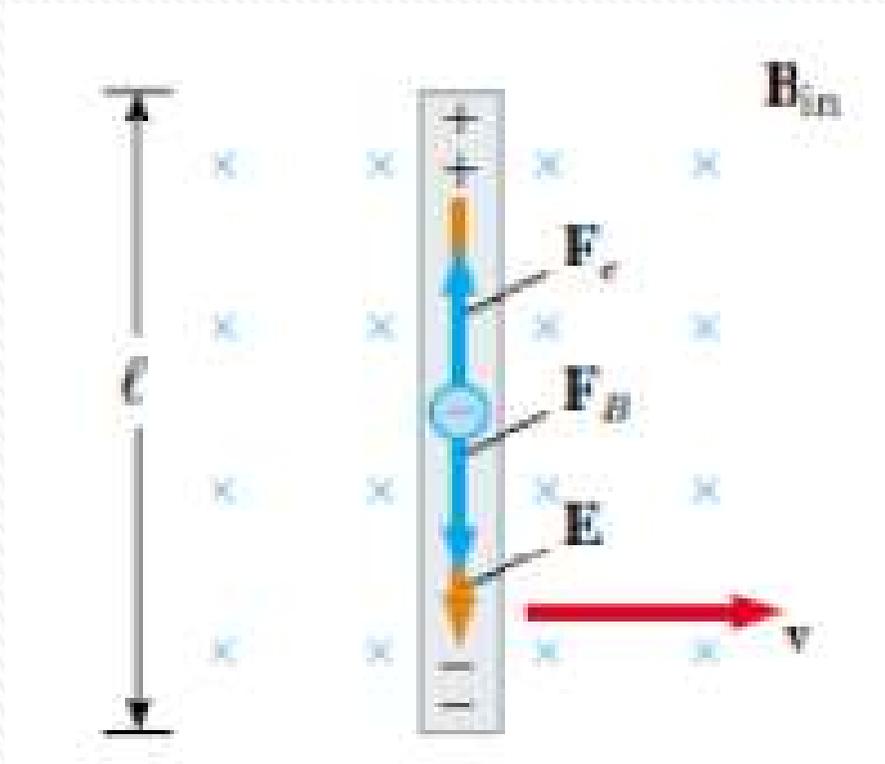


El sentido de la fem inducida se deduce mediante la ley de Lenz.

Aún si el conductor no forma un circuito completo se puede usar...en ese caso podemos completar el circuito mentalmente entre los extremos del conductor y aplicar la ley de Lenz para determinar el sentido de la corriente.

Se puede generalizar el concepto de fem de movimiento para un conductor de *cualquier* forma que se mueva en un campo magnético, uniforme o no (suponiendo que el campo magnético en cada punto no varía con el tiempo)

FEM DE MOVIMIENTO O CINÉTICA



Barra conductora: longitud l , velocidad v a través campo magnético B (B y v *perpendiculares*).

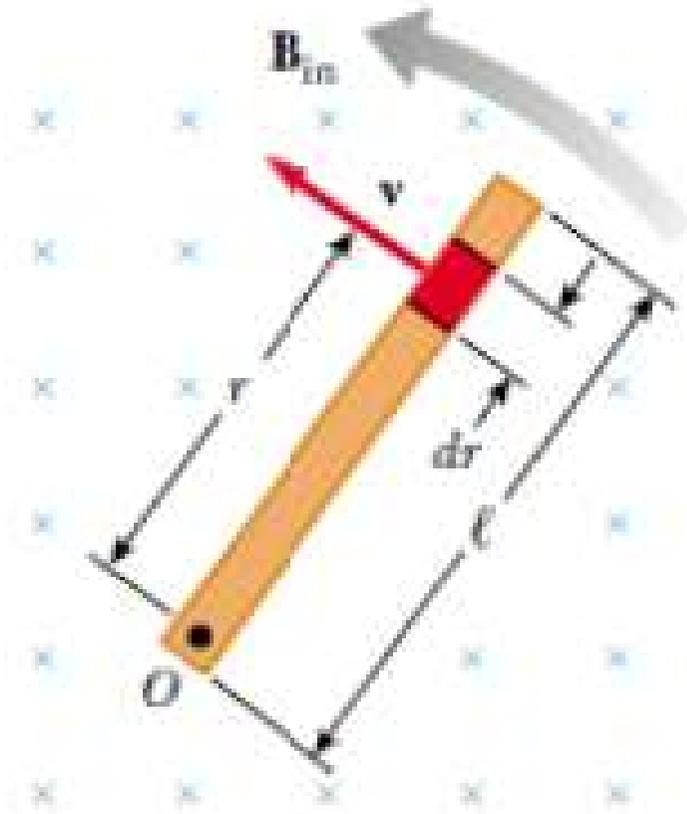
Se induce en los extremos de la barra una fem igual a:

$$\varepsilon = Blv$$

La diferencia de potencial se mantiene mientras exista movimiento a través del campo. Si se invierte el sentido de movimiento, se invierte la polaridad.



Fuerza electromotriz de movimiento



Fem de movimiento inducida en una barra giratoria

$$d\mathcal{E} = (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l}$$

$$d\mathcal{E} = vBdl$$

$$d\mathcal{E} = Bvdr = B\omega r dr$$

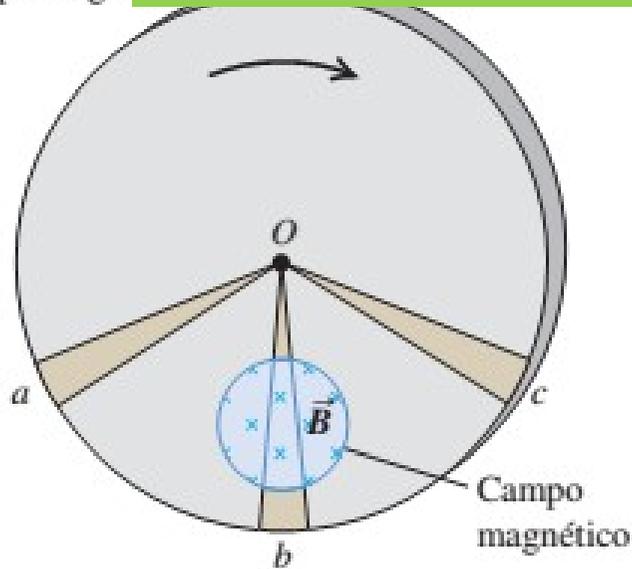
$$\mathcal{E} = \int d\mathcal{E} = B\omega \int_0^L r dr = \frac{1}{2} B\omega L^2$$

Si tenemos una barra conductora que gira alrededor de un eje en uno de sus extremos en un campo magnético uniforme que es perpendicular al plano de rotación, se induce una fem entre los extremos de la barra dado por

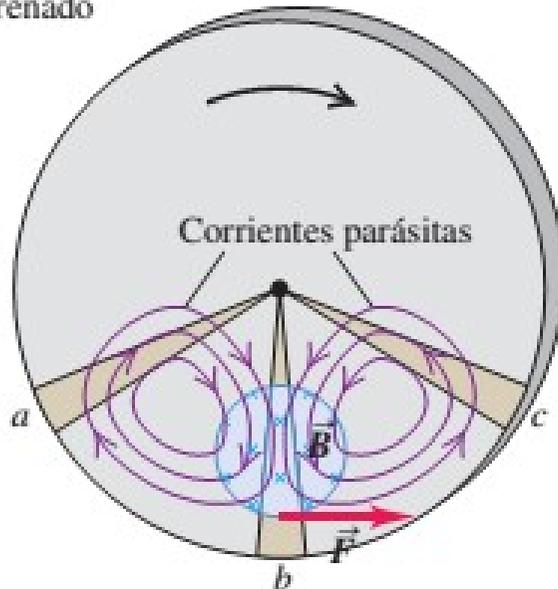
$$\mathcal{E} = \frac{B\omega l^2}{2}$$

a) Disco met
campo magne

CORRIENTES PARÁSITAS (EDDY CURRENT)



b) Corrientes parásitas resultantes y fuerza de frenado



Cuando masas de metal se mueven en campos magnéticos, o están situados en campos magnéticos cambiantes, surgen corrientes inducidas que circulan por todo el volumen del material.

Sus patrones de flujo recuerdan los remolinos en un río y reciben el nombre de **corrientes parásitas**.

Disco metálico gira en un B perpendicular al plano del disco, pero confinado a una porción limitada del área del disco.

El sector Ob se desplaza a través del campo y tiene una fem inducida en él.

Los sectores Oa y Oc no están en el campo, pero constituyen trayectorias de retorno para que las cargas desplazadas a lo largo de Ob regresen de b a O . El resultado es una circulación de corrientes parásitas en el disco, en forma parecida a la que se ilustra en la figura.

De acuerdo a la ley de Lenz el sentido de la corriente inducida en las inmediaciones del sector Ob debe ser tal que experimente una fuerza magnética que se *opone* a la rotación del disco.

CORRIENTES PARÁSITAS (EDDY CURRENT)

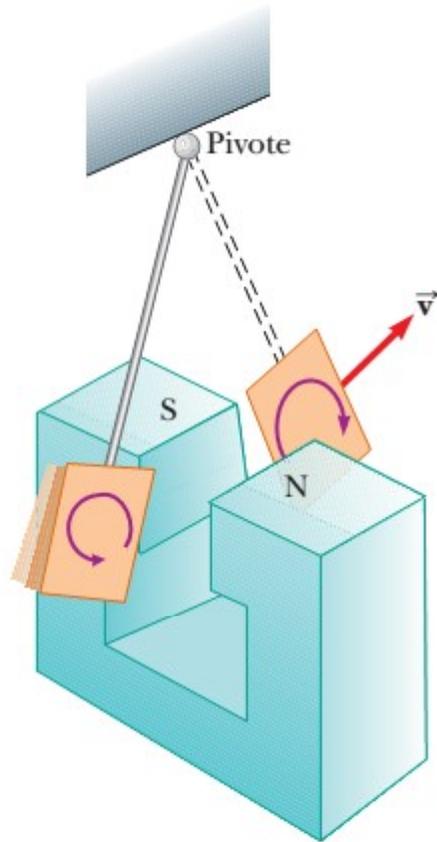
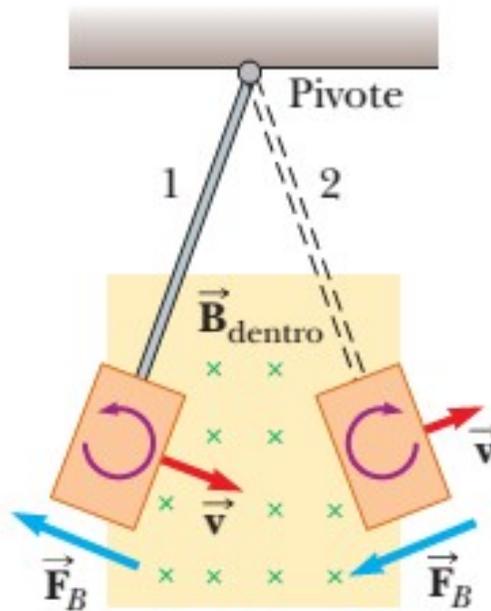


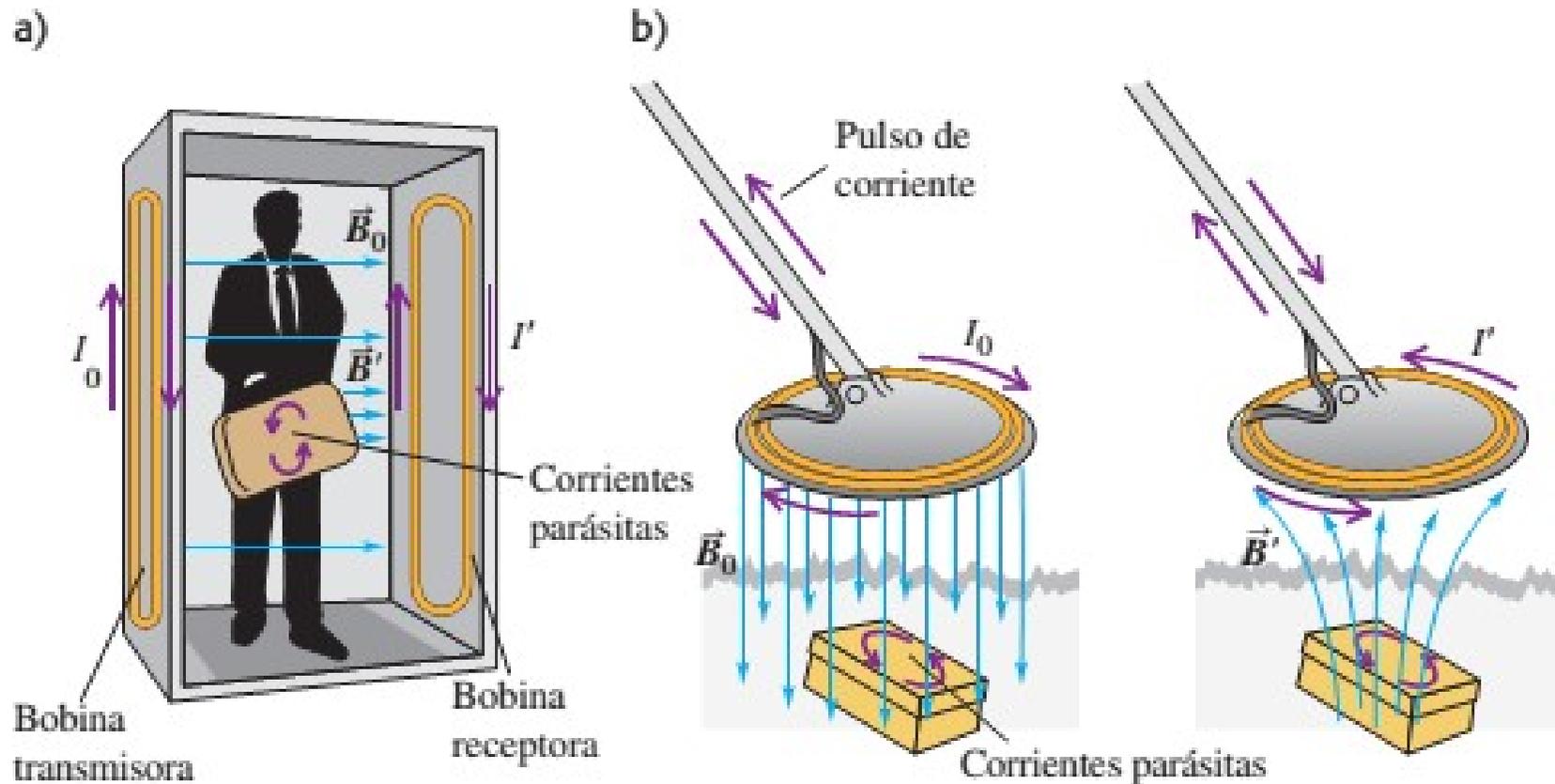
Figura 31.21 Formación de corrientes parásitas o de eddy en una placa conductora que se mueve a través de un campo magnético. Como la placa entra o sale del campo, el flujo magnético cambiante induce una fem, que es la que genera corrientes de eddy en la placa.



Usos prácticos: disco metálico en contador de corriente, hornos de inducción detectores de metal, frenos electromagnéticos.

Efectos indeseables: transformador de corriente alterna, las bobinas enrolladas alrededor del núcleo conducen corriente que varía en forma sinusoidal, las corrientes eddys resultantes en el núcleo desperdician energía por calentamiento I^2R y establecen por sí mismas una fem opuesta indeseable en las bobinas.

CORRIENTES PARÁSITAS (EDDY CURRENT)



a) Un detector de metales en un punto de revisión en un aeropuerto genera un campo magnético alternante B_0 . Esto induce corrientes parásitas en un objeto conductor que pase por el detector. A la vez, las corrientes parásitas producen un campo magnético alternante B' , el cual induce una corriente en la bobina receptora del detector.

b) Los detectores de metal portátiles funcionan con el mismo principio.