

13-INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

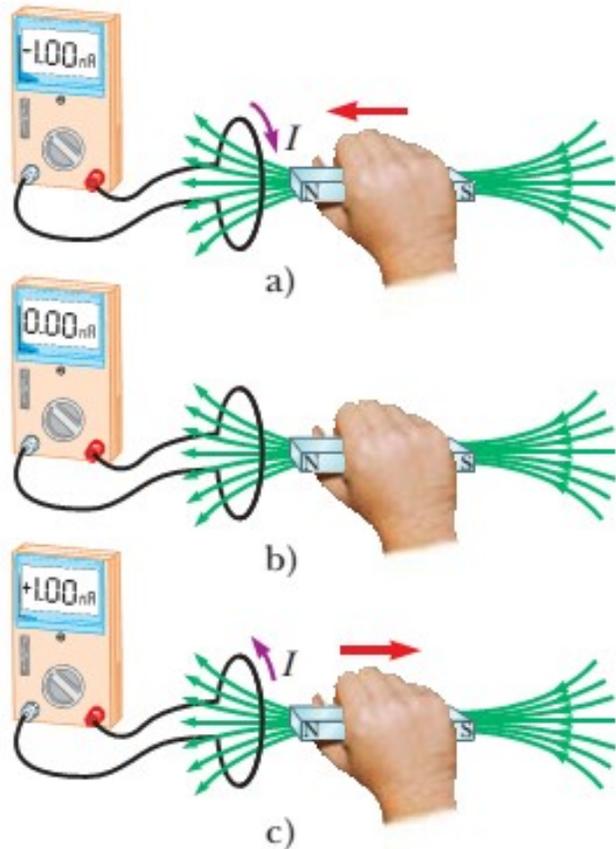


Figura 31.1

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

En la mayoría de los equipos eléctricos que se usan en la industria y el hogar, los que se conectan a un contacto de pared, la fuente de fem *no es una batería de corriente continua, sino una estación generadora de electricidad de **corriente alterna***, 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 nucleoelectrónica.

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

A través del fenómeno denominado ***inducción electromagnética***.

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



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.



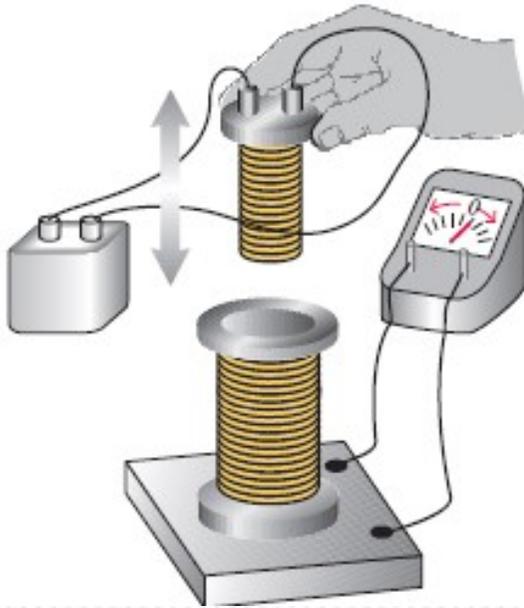
b) Mover el imán acercándolo o alejándolo de la bobina.



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) Si *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.

Ver video en EVA Ley de Faraday – Inducción electromagnética
https://m.youtube.com/watch?v=PT9bh_BrX9M&t=13s&ab_channel=TesaManuel

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 la fem inducida es proporcional a la **razón de cambio del flujo magnético Φ_B** respecto al tiempo a través de la bobina.

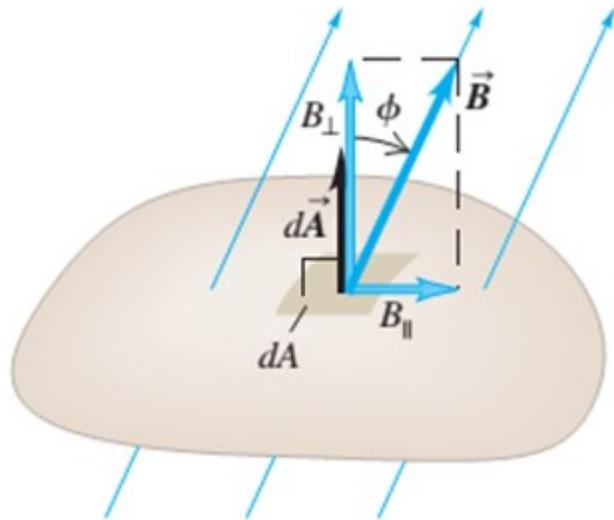
Las **fem inducidas magnéticamente** son el resultado de la **acción de fuerzas no electrostáticas**.

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**, que 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 (ε) en un circuito es igual a menos la derivada respecto al tiempo del flujo magnético (Φ_B) a través del circuito.

En otras palabras, 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 Faraday

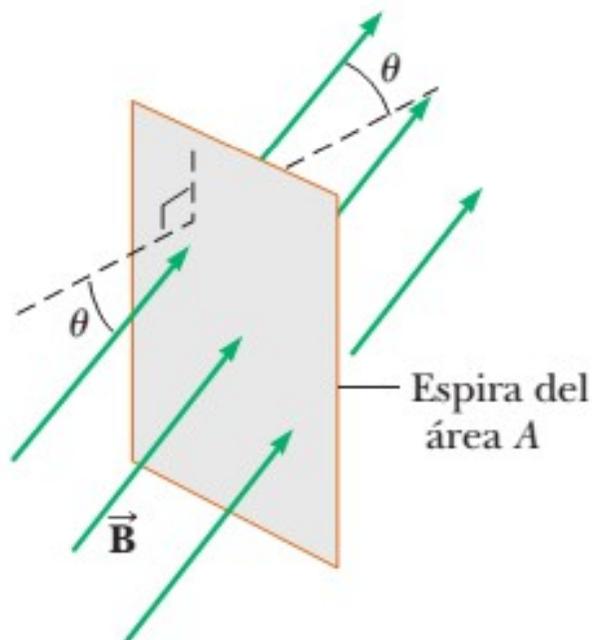
Bobina construida de N espiras, con la misma área, y Φ_B es el flujo magnético a través de una espira, se induce una fem en todas las espiras.

Para este caso:

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

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

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



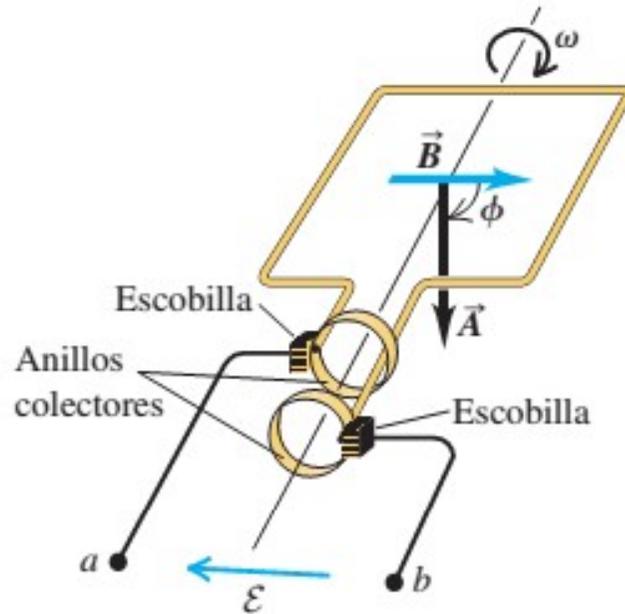
Entonces... ¿cómo se puede generar una fem?

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.

Supongo un campo magnético \mathbf{B} es uniforme y constante.

En el momento $t = 0$, considero $\varphi = 0$.

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

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

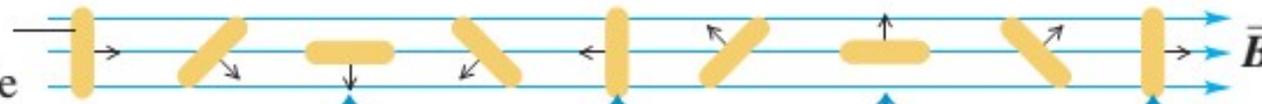
$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -\frac{d}{dt}(BA \cos \omega t) = \omega BA \sin \omega t$$



GENERADOR DE CORRIENTE ALTERNA

b)

Espira
(vista desde
el extremo)



El flujo disminuye
con máxima rapidez,
fem positiva máxima.

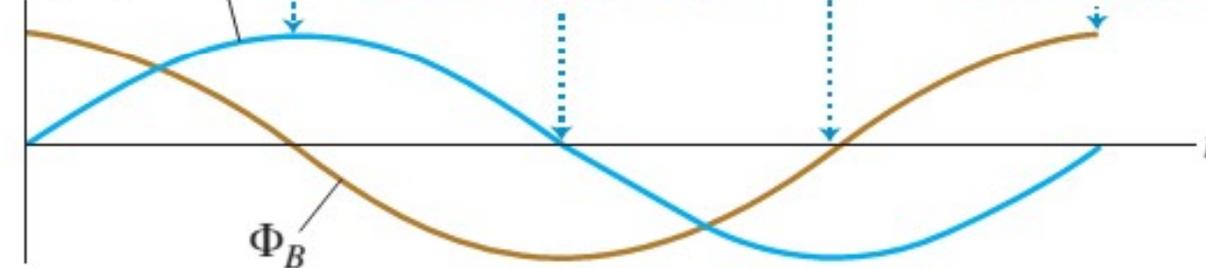
El flujo aumenta
con máxima rapidez,
fem negativa máxima.

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

\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 marrón) 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.

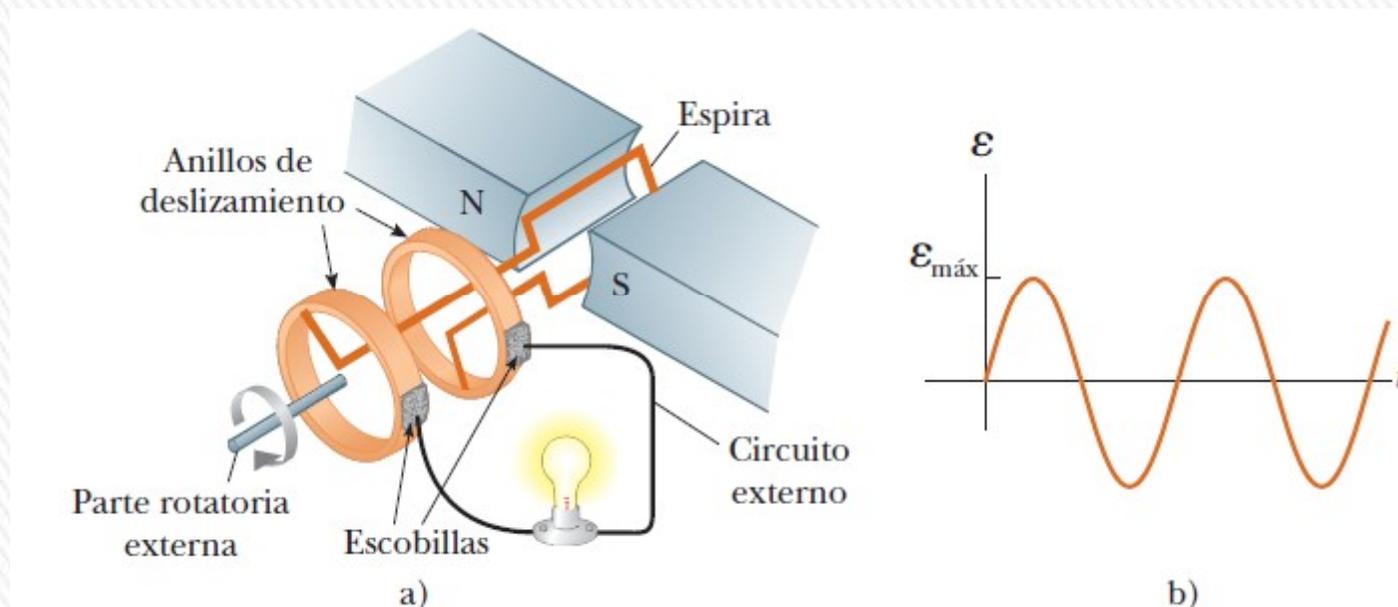


GENERADOR DE CORRIENTE ALTERNA

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

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

$$\varepsilon_{MAX} = \omega BA$$



- 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.

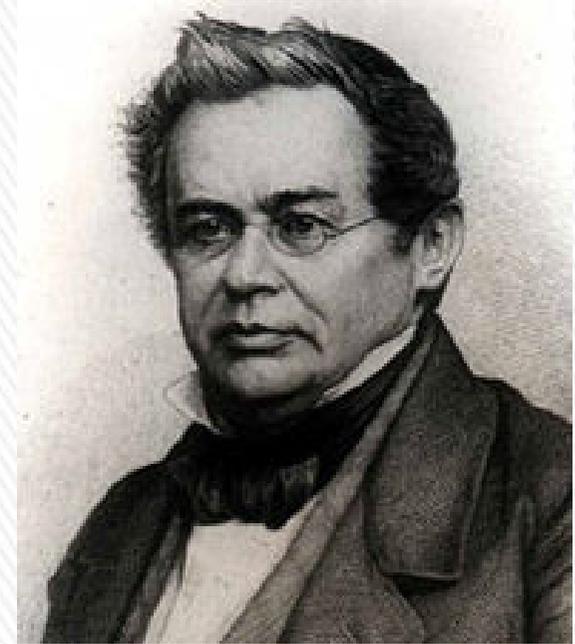
Ver video en EVA Funcionamiento de un generador de CA

https://m.youtube.com/watch?v=eLu8Njr-ICQ&t=2s&ab_channel=CASOLLIGENERADORES

Ley de Lenz

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, pero es más fácil de usar.



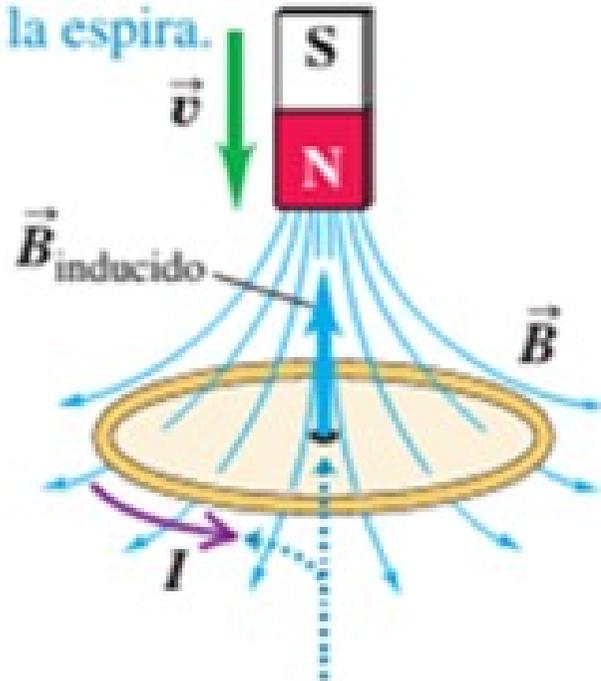
El sentido de cualquier efecto de la inducción magnética (una fem o corriente inducida) es la que se opone a la causa del efecto (la variación del flujo magnético).

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

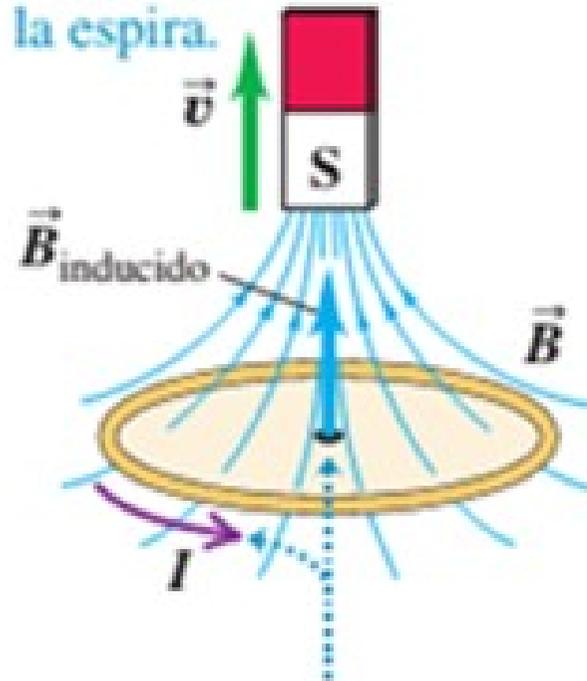
Es una consecuencia de la conservación de la energía.

Ley de Lenz

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



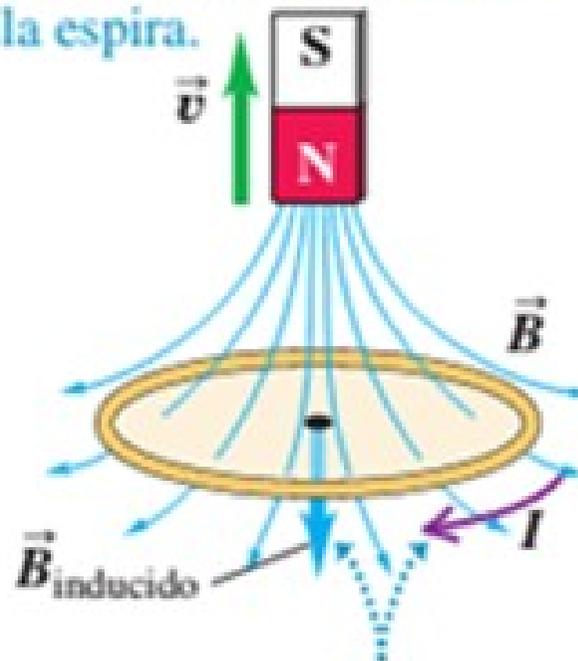
- b) El movimiento del imán ocasiona un flujo *decreciente* hacia arriba a través de la espira.



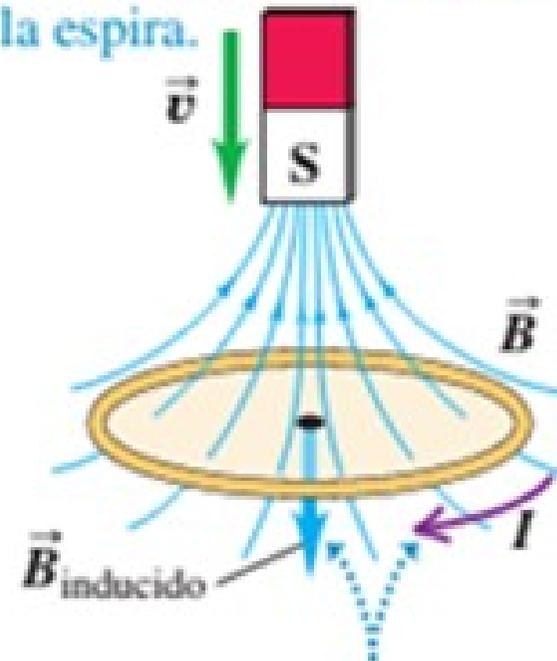
El campo magnético inducido es *hacia arriba* para oponerse al cambio del flujo. Para producir el campo inducido, la corriente inducida debe ir *en sentido antihorario*, vista desde arriba de la espira.

LEY DE LENZ

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

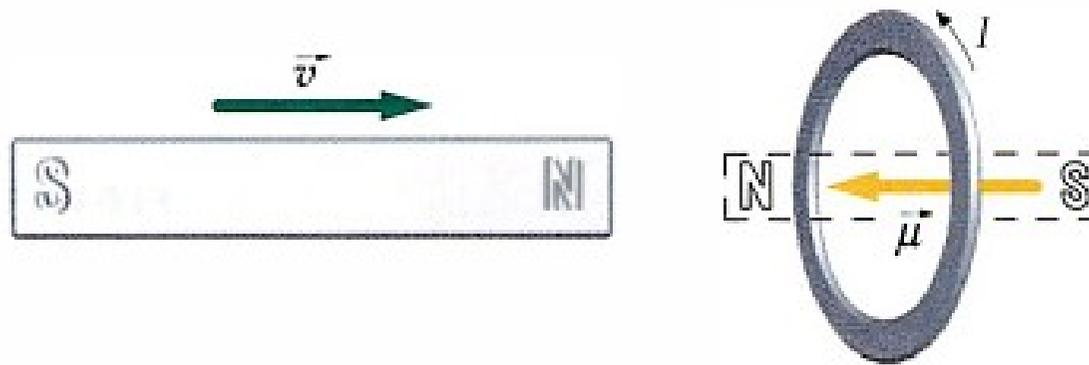


- d) El movimiento del imán ocasiona un flujo *creciente* hacia arriba a través de la espira.



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

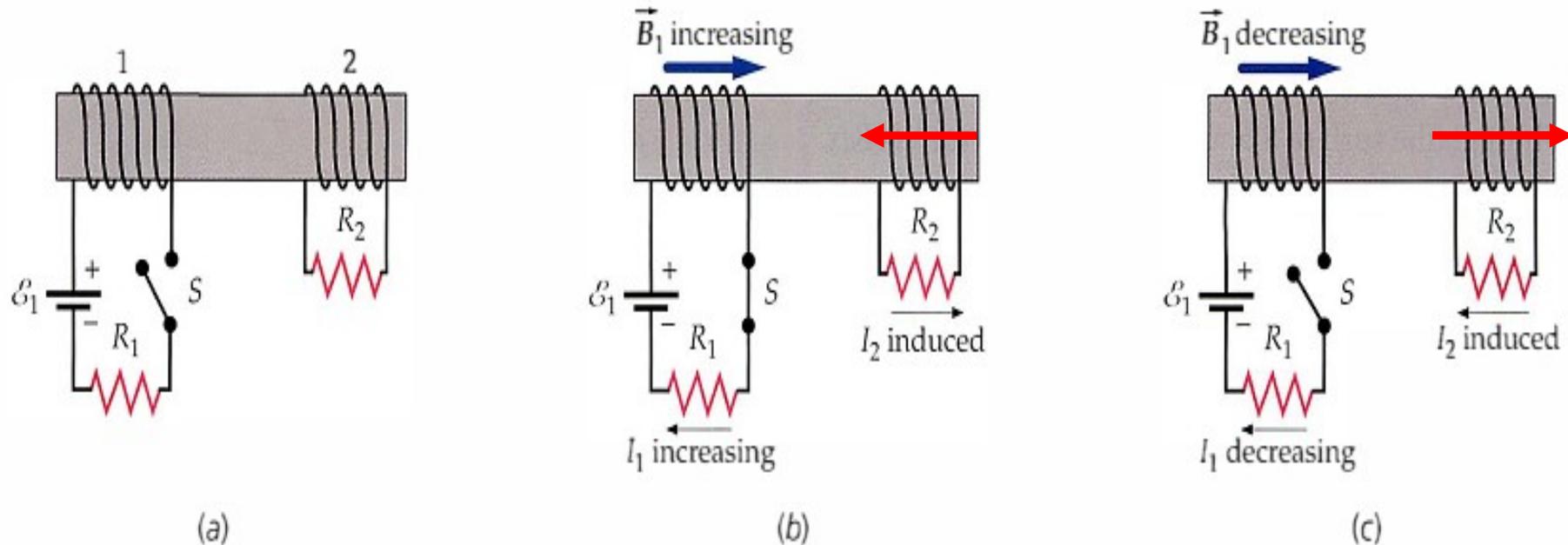
LEY DE LENZ



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 y crea un campo magnético B_1 que aumenta desde 0. El cambio de flujo a través del circuito 2 induce la corriente I_2 de modo que genere un campo magnético inducido que se oponga a B_1 .

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, generando un campo inducido en el mismo sentido de B_1 .

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

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

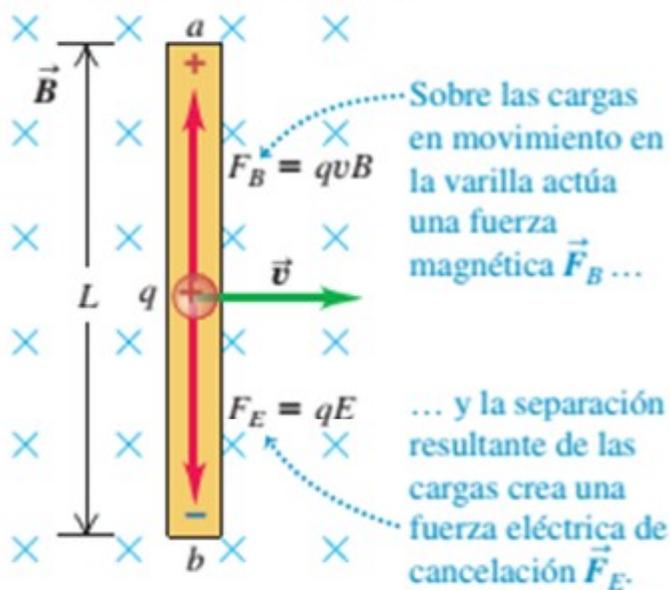
Las cargas libres se mueven creando exceso de carga positiva en a y de carga negativa en b . Se crea un campo eléctrico \mathbf{E} en el interior de la varilla. La carga se sigue acumulando hasta que \mathbf{E} :

$$qE = qvB$$

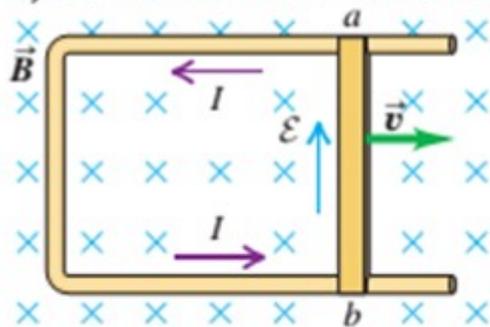
Se crea una diferencia de potencial: $V_{ab} = V_a - V_b$ igual a la magnitud del campo eléctrico E multiplicada por la longitud L de la varilla.

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

a) Varilla aislada en movimiento



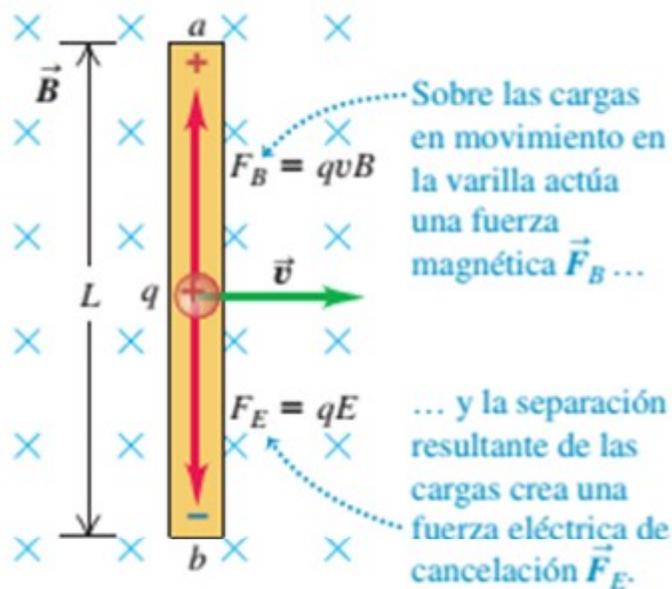
b) Varilla conectada a un conductor fijo



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.

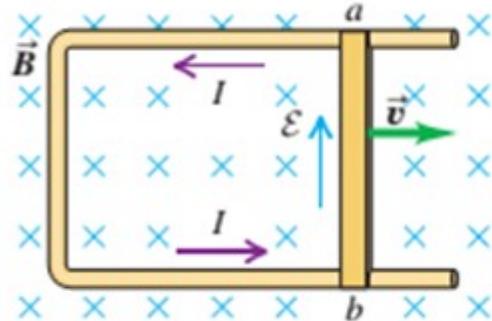
La varilla móvil se ha vuelto una fuente de fuerza electromotriz

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.

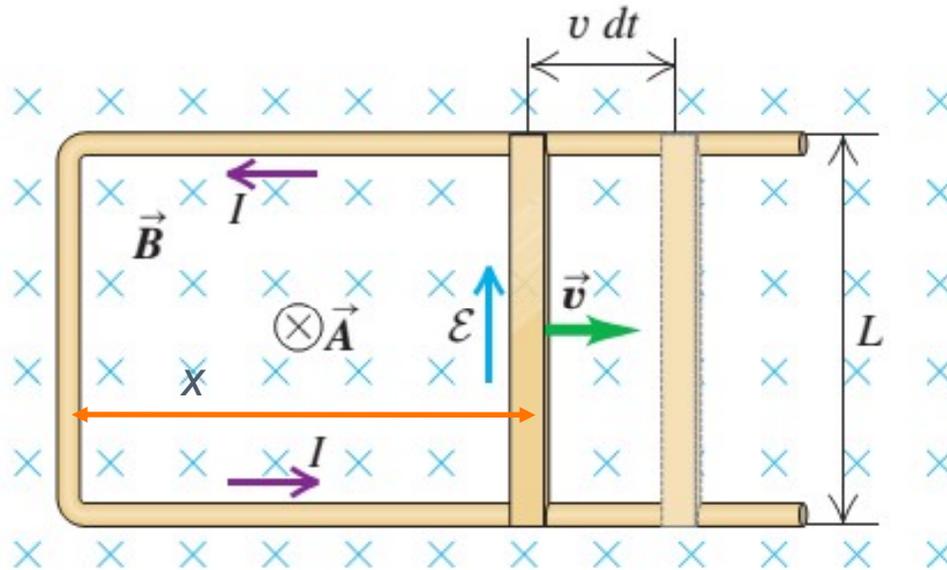
FUERZA ELECTROMOTRIZ (fem) DE MOVIMIENTO

$\Phi_B = B \cdot A = B \cdot (L \cdot x)$ lo único que varía es x , ya que $v = dx/dt$

Aplicando directamente la ley de Faraday:

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

$$\varepsilon = -BLv$$



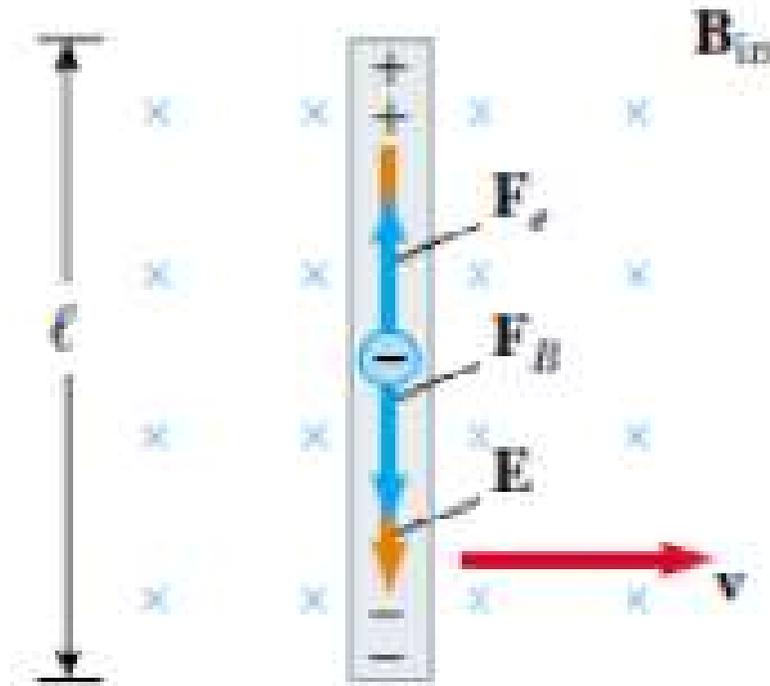
El sentido de la fem inducida se deduce mediante la ley de Lenz.

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.



FEM DE MOVIMIENTO O CINÉTICA

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.



Así como se genera una fem inducida se está generando un campo eléctrico inducido.

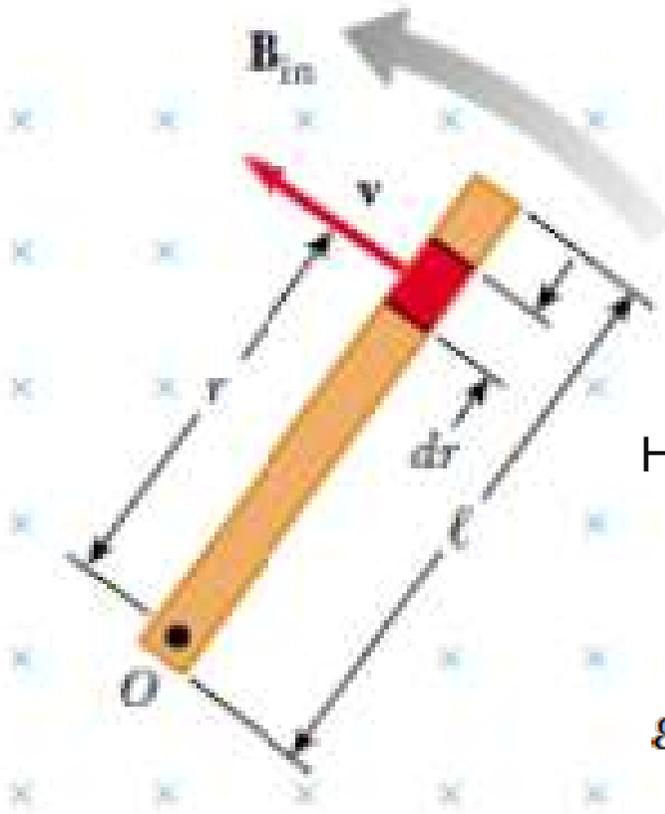
Barra conductora: longitud l , velocidad v a través campo magnético B (B y v *perpendiculares*).

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

Considero un elemento diferencial de la barra de longitud dl que tiene una rapidez v

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

Haciendo $dl = dr$ y considerando que $v = \omega r$

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

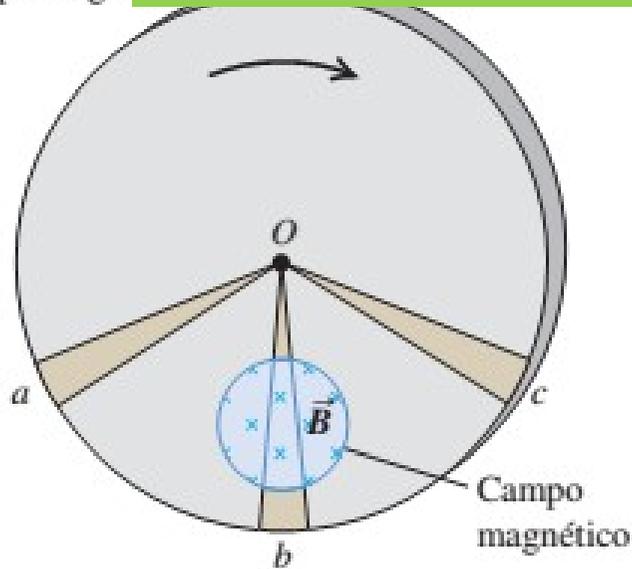
$$\mathcal{E} = \int d\mathcal{E} = B\omega \int_0^L r dr = \frac{1}{2} B\omega L^2$$

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

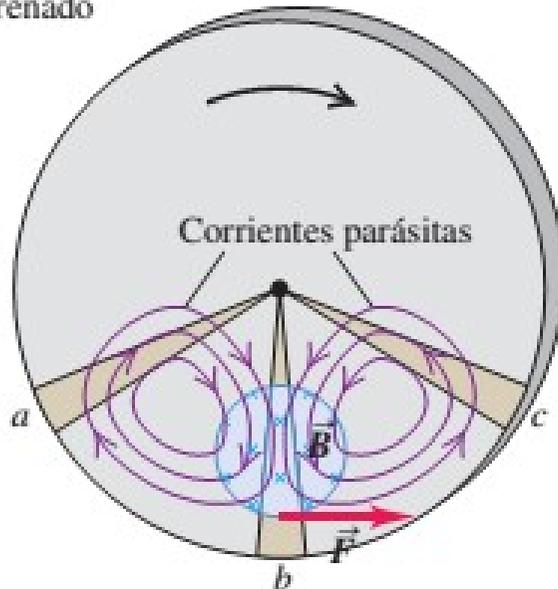
$$\mathcal{E} = \frac{1}{2} B\omega L^2$$

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** o de **Foucault**.

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 muestra 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)

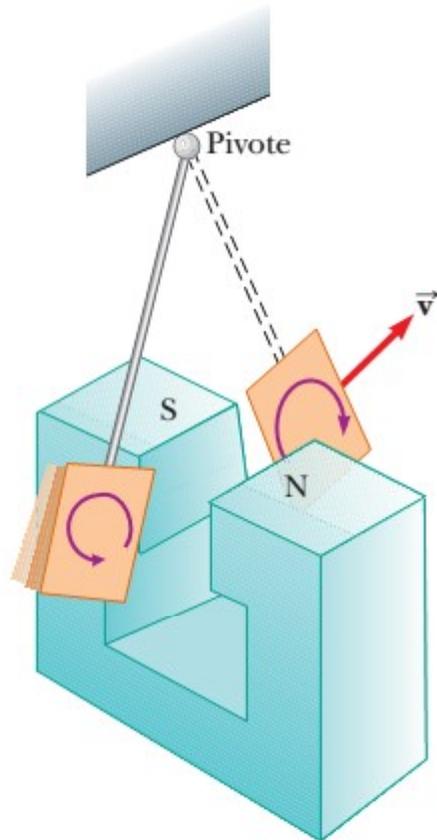
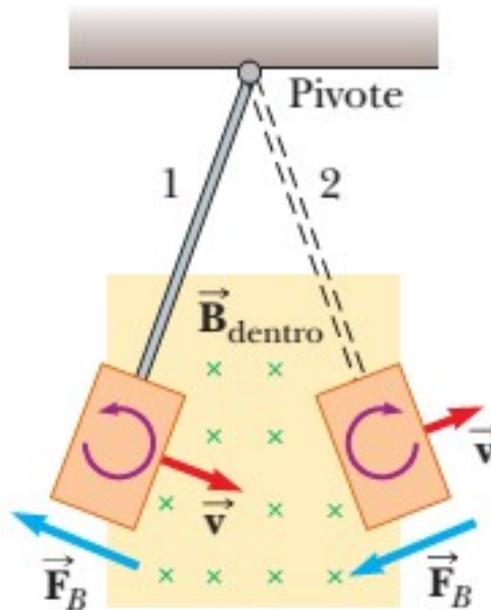


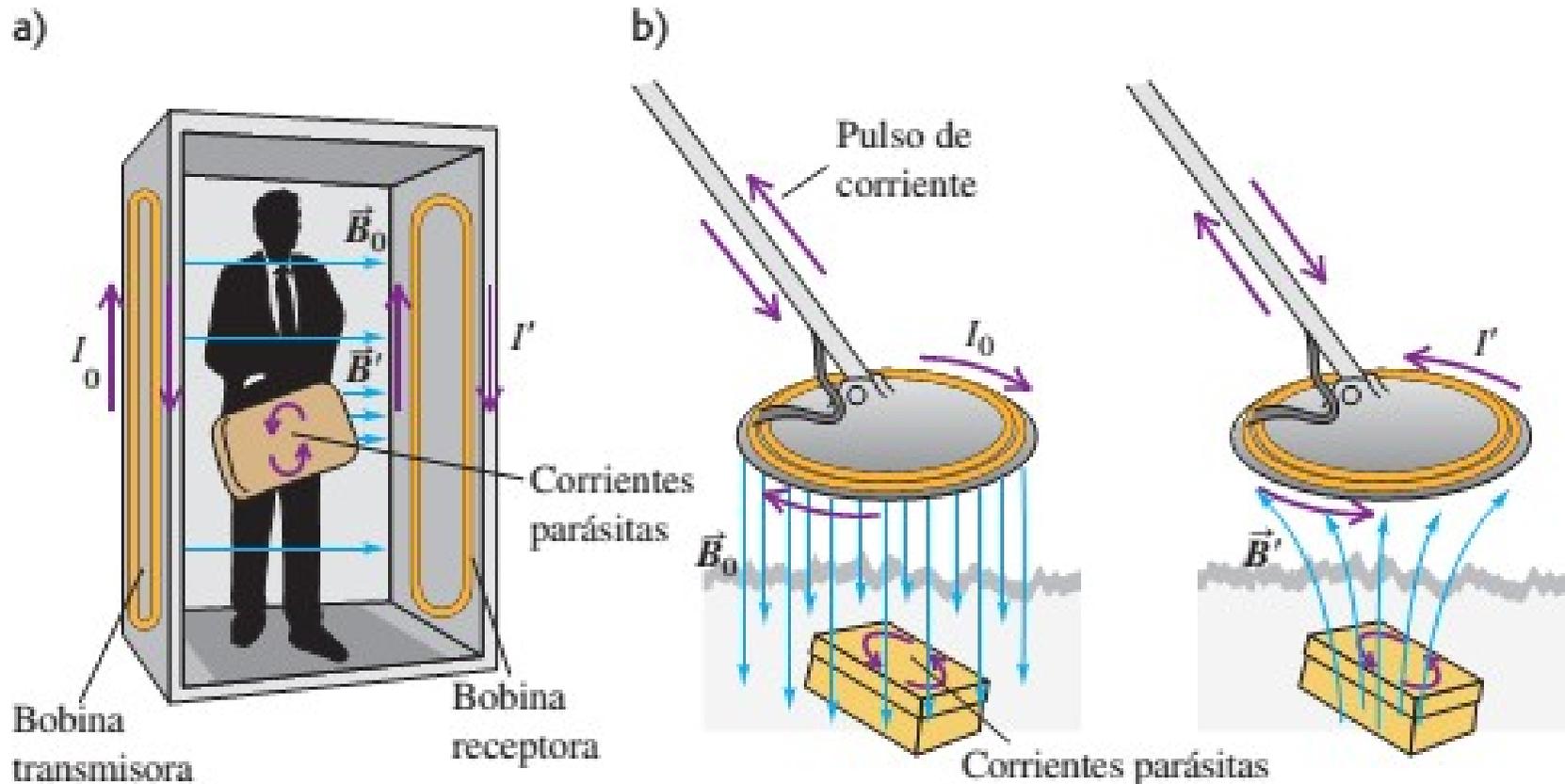
Figura 31.21 Formación de corrientes parásitas o de eddy en una placa conductora que se mueve a través de un campo magnético. Como la placa entra o sale del campo, el flujo magnético cambiante induce una fem, que es la que genera corrientes de eddy en la placa.



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.

MATERIALES MAGNÉTICOS

Cuando se introduce un dieléctrico en un campo eléctrico \mathbf{E} , el campo eléctrico se reduce a \mathbf{E}/κ , siendo κ la constante dieléctrica.

Similarmente, si se introduce un material en un campo magnético \mathbf{B} , el campo cambia a $K_m \mathbf{B}$, siendo K_m la constante magnética.

Hay tres tipos principales de materiales magnéticos:

diamagnéticos (K_m ligeramente inferior a 1). Se caracterizan por ser levemente repelidos por los imanes.

Ejemplos: antimonio, bismuto, cobre, oro, silicio, germanio, gases nobles, hidrógeno, agua,

paramagnéticos (K_m ligeramente superior a 1). Se caracteriza por ser levemente atraído por imanes.

Ejemplos: aire, magnesio, aluminio, titanio, wolframio.

ferromagnéticos (K_m varía con el campo aplicado y con el modo como ha sido tratado el material, pero su valor típico es muy superior a 1).

Ejemplos: hierro, cobalto, níquel, gadolinio y disprosio.

MATERIALES MAGNÉTICOS: DIAMAGNETISMO

Son repelidos levemente por los imanes.
1845 Faraday: interacción del bismuto con un imán: un B externo generado por un imán inducía en el bismuto un dipolo magnético con sentido opuesto
Ley de Lenz a nivel molecular o atómico: los átomos contienen electrones que se mueven libremente y cuando se aplica un B exterior se induce una corriente superpuesta cuyo efecto magnético es opuesto al campo aplicado.

Se presenta en sistemas moleculares que contengan todos sus electrones apareados y sistemas atómicos o iónicos que contengan orbitales llenos (espines de electrones de último nivel apareados con momento magnético prácticamente nulo).

K_m menor a 1 en factor de 0,001 al 0,01 %
Se presenta en todos los materiales, aunque muchas veces es contrarrestado por otros efectos.



Rana levita en un campo magnético de 16 T en laboratorio. La fuerza de suspensión es ejercida sobre las moléculas diamagnéticas del agua existentes en el cuerpo de la rana. La rana no sufrió ningún daño por causa de esta experiencia.

MATERIALES MAGNÉTICOS: PARAMAGNETISMO

Los efectos magnéticos asociados con los movimientos orbitales y con el spin de los electrones atómicos en ausencia de un campo magnético externo en general se anulan.

Sin embargo en los materiales paramagnéticos hay un momento dipolar magnético residual asociado a los átomos individuales.

Los momentos interactúan sólo de manera débil entre sí y se orientan al azar en ausencia de un campo magnético externo.

El proceso de alineamiento compite con el movimiento térmico, que tiende a orientar al azar a los momentos magnéticos.

Al colocarse en un campo magnético externo, los dipolos magnéticos tienden a alinearse dirigiendo sus momentos paralelamente al campo, aumentando así el campo total en el interior del material.

Como los efectos de los dipolos permanentes son en general mayores que los de las corrientes inducidas, el paramagnetismo cuando está presente, enmascarará por completo los efectos diamagnéticos.

Estos materiales no retienen las propiedades magnéticas cuando se elimina el campo externo.

El valor de K_m sobrepasa la unidad en un factor pequeño del orden de 0,01 %.



MATERIALES MAGNÉTICOS: FERROMAGNETISMO

Exhiben efectos magnéticos intensos.

Los campos magnéticos producidos por el espín de los electrones no se cancelan por completo.

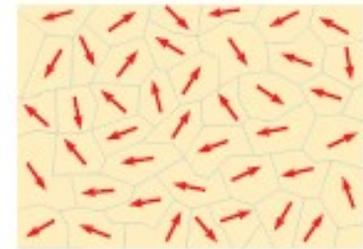
Contienen momentos magnéticos atómicos permanentes que tienden a alinearse paralelamente en presencia de un B externo, lo que se mantiene después de haberse retirado el B externo.

La alineación permanente se debe a un fuerte acoplamiento entre momentos vecinos, el cual puede entenderse sólo en términos de la mecánica cuántica.

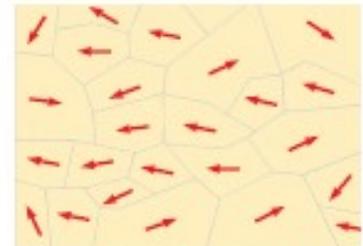
Constituidos por **dominios**: regiones microscópicas en las cuales todos los momentos magnéticos están alineados, con volúmenes de 10^{-12} a 10^{-8} m³ y contienen 10^{17} a 10^{21} átomos.

A temperaturas normales, la agitación térmica no es suficiente para alterar esta orientación de los momentos magnéticos.

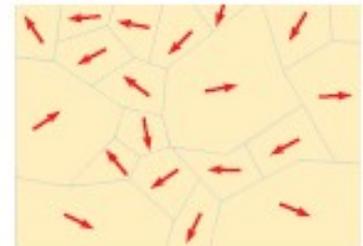
Cuando una sustancia ferromagnética alcanza o excede una temperatura crítica (**temperatura Curie**), pierde su magnetización residual. Por debajo de esta temperatura los momentos magnéticos están alineados y la sustancia es ferromagnética.



a)



b)

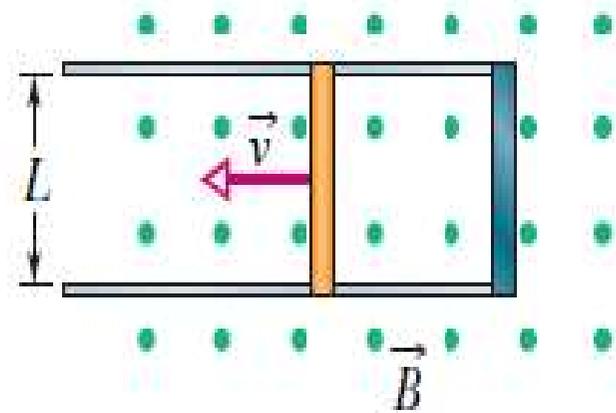


c)

- a) Orientación azar dipolos magnéticos atómicos en dominios de sustancia no magnetizada.
- b) Al aplicar un B externo, los dominios con componentes de momento magnético en la misma dirección que B se vuelven más grandes, dando a la muestra una magnetización neta.
- c) Conforme el campo se hace aún más intenso, los dominios con vectores de momentos magnéticos no alineados con el campo externo se vuelven muy pequeños.

EJEMPLO: ejercicio 3.2.6

3.2.6- La figura muestra una barra conductora de longitud L que, tirando de ella, es atraída a lo largo de rieles conductores horizontales, carentes de fricción, a una velocidad constante v . Un campo magnético vertical uniforme B ocupa la región en que se mueve la barra. Si $L = 10,8$ cm, $v = 4,86$ m/s y $B = 1,18$ T.



- Halle la fem inducida en la barra.
- Calcule la corriente en la espira conductora. Suponga que la resistencia de la barra sea de 415 m Ω y que la resistencia de los rieles sea despreciablemente pequeña.
- Determine la fuerza que debe aplicarse por un agente externo a la barra para mantener su movimiento.
- ¿A qué velocidad se está generando la energía interna en la barra?
- ¿A qué velocidad esta fuerza realiza trabajo sobre la barra? Compare esta respuesta con la respuesta dada a d).

$L = 10,8$ cm, $v = 4,86$ m/s, $B = 1,18$ T, $R = 415$ m Ω

a) $\epsilon = BLv = (1,18)(0,108)(4,86) = 0,5826$ V

$\epsilon = 0,583$ V

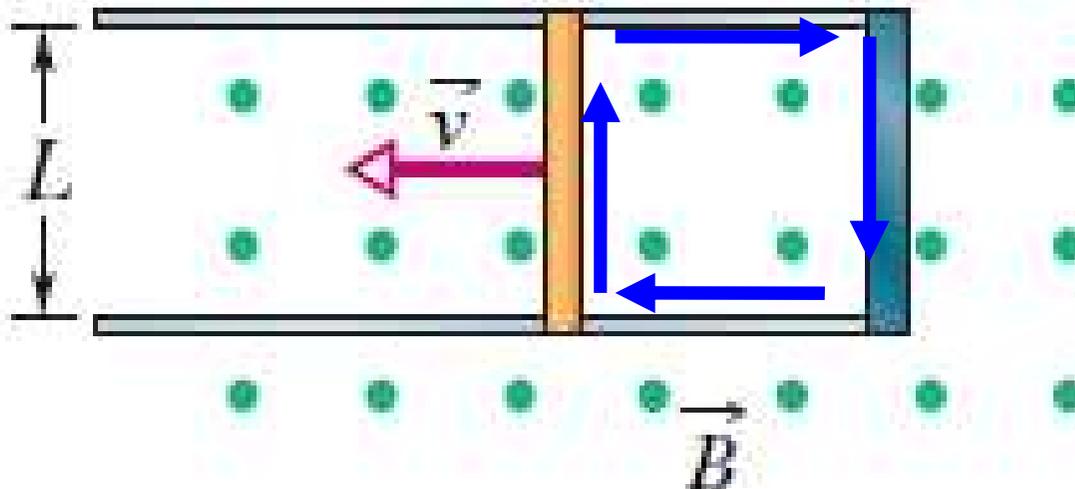
b) $I = \epsilon/R = 0,5826/0,415 = 1,3709$ A

$I = 1,37$ A

c) $F = BIL = (1,18)(1,3709)(0,108) = 0,16552$ N

$F = 0,166$ N

EJEMPLO: ejercicio 3.2.6



Supongo B saliente.
El flujo magnético
aumenta con el tiempo.
Por lo que el B_{inducido} se
debe oponer al existente.
Por lo tanto la corriente
en la espira debe ser en
sentido horario.

La velocidad se está generando la energía interna en la barra es la misma que la velocidad que la fuerza realiza trabajo sobre la barra.

La velocidad se está generando la energía interna en la barra, es la potencia disipada por efecto Joule:

$$\mathcal{P}_{\text{dis.}} = I^2 R = \frac{\mathcal{E}^2}{R} = \frac{(BLv)^2}{R}$$

La velocidad que la fuerza realiza trabajo sobre la barra es la potencia entregada:

$$\mathcal{P}_{\text{ent.}} = F \cdot v = (B \cdot I \cdot L)v = B \left(\frac{BLv}{R} \right) Lv = \frac{B^2 L^2 v^2}{R}$$

$$\mathcal{P}_{\text{dis.}} = \mathcal{P}_{\text{ent.}} = F \cdot v = (0,16552 \text{ N}) \left(4,86 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) = 0,80443 \text{ W}$$

$$\mathcal{P} = 0,804 \text{ W}$$