AVISOS

Primer parcial: sábado 22 de octubre a las 14:00 en forma presencial.

Inscribirse en Elección de grupo:
"**Inscripción al primer parcial"** **(aún no disponible)**

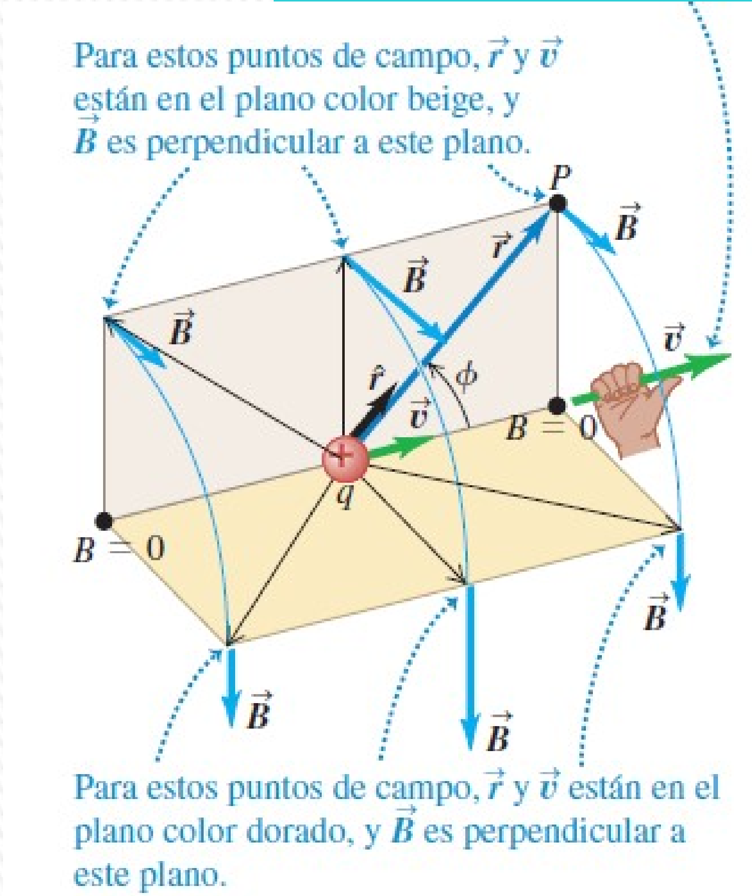
Tercer evaluación corta: Se realizará desde el jueves 20 hasta la medianoche del sábado 22/10, corresponde a la Unidad 3 (Electromagnetismo)

CLASES DE CONSULTAS:

Sábado 15/10 de 9:00 a 10:30

(en el enlace de Zoom de mi teórico)

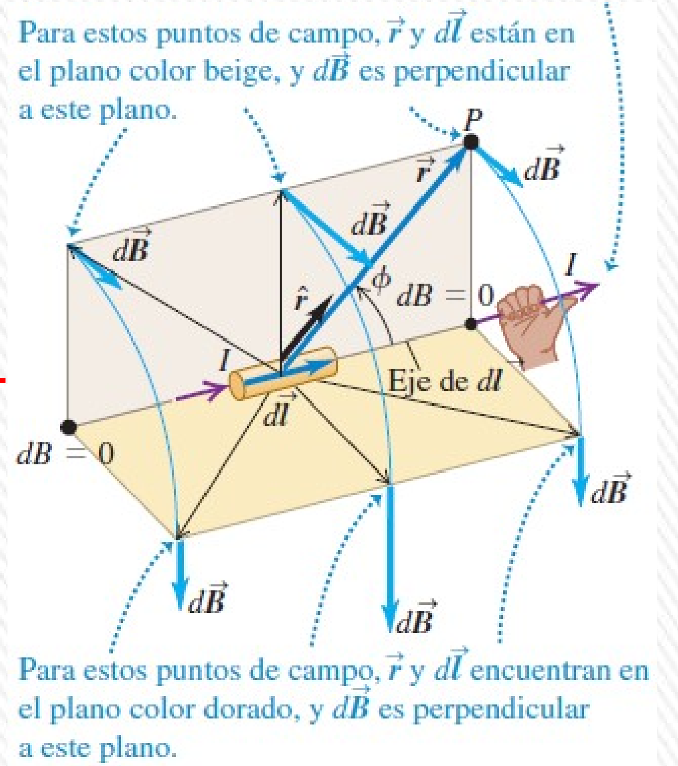
Repaso de la clase anterior



Campo magnético de una carga en movimiento

$$\overline{\boldsymbol{B}} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{q\,\overline{\boldsymbol{v}} \times \hat{\boldsymbol{r}}}{r^2} \qquad B = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{|q|\,v\,\sin\phi}{r^2}$$

μ_0 es una constante denominada **permeabilidad del vacío**, valor en el S.I. es: **$\mu_0 = 4\pi\times10^{-7}$ T.m/A**



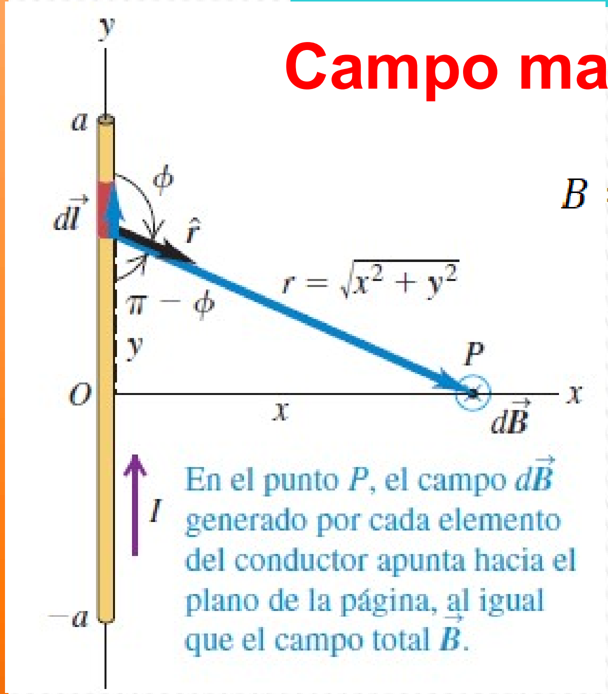
Campo magnético de elemento de corriente – Ley de BIOT-SAVART

$$d\overline{\boldsymbol{B}} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{I d\bar{\boldsymbol{l}} \times \hat{\boldsymbol{r}}}{r^2} \qquad dB = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{I dl\,\sin\phi}{r^2}$$

$$\overline{\boldsymbol{B}} = \frac{\mu_0}{4\pi}\int\frac{I d\bar{\boldsymbol{l}} \times \hat{\boldsymbol{r}}}{r^2}$$

Repaso de la clase anterior

Campo magnético de conductor recto con corriente



$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi}\int_{-a}^{a}\frac{x dy}{(x^2+y^2)^{\frac{3}{2}}}$$

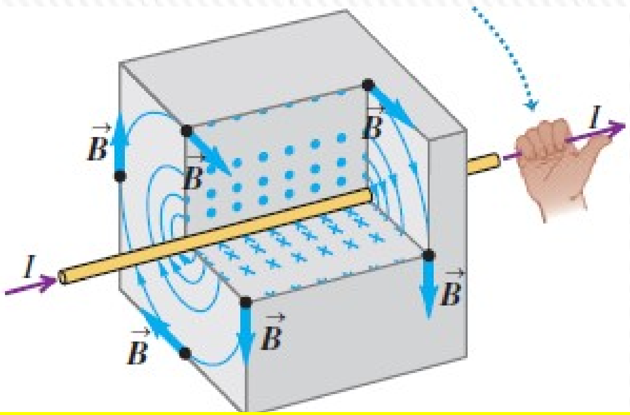
$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi}\frac{2a}{x\sqrt{x^2+a^2}}$$

$$si\ a \gg x \quad entonces: \sqrt{x^2+a^2} \approx a$$

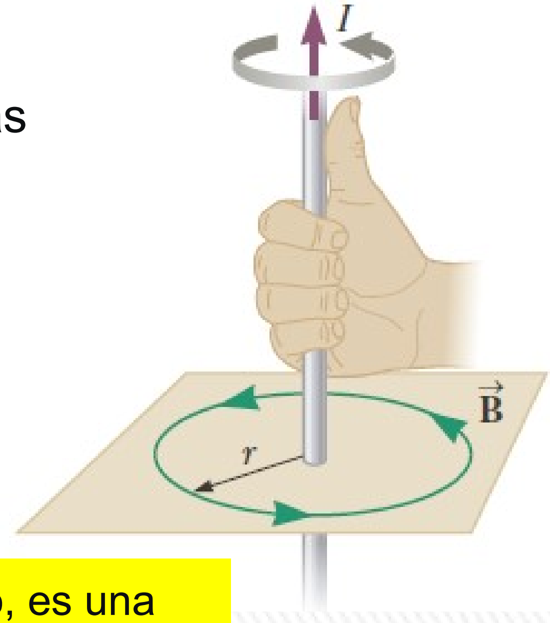
$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi x}$$

$$B(r) = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

$$B(r) = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} = \left(2{,}00 \times 10^{-7}\ \frac{T.m}{A}\right)\frac{I}{r}$$

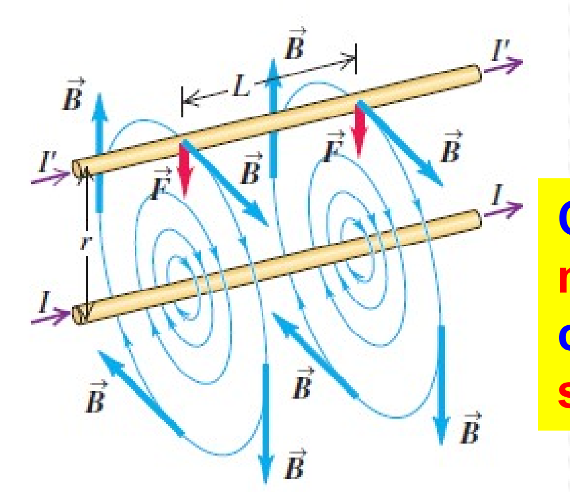


Las líneas de campo magnético son circunferencias concéntricas al alambre.
El sentido del campo está dado por la regla de la mano derecha.



ATENCIÓN: Resultado exacto di la longitud del alambre es infinito, es una buena aproximación cuando la distancia donde se calcula el campo es mucho menor que la longitud del alambre y se desprecian los efectos de borde.

Repaso de la clase anterior

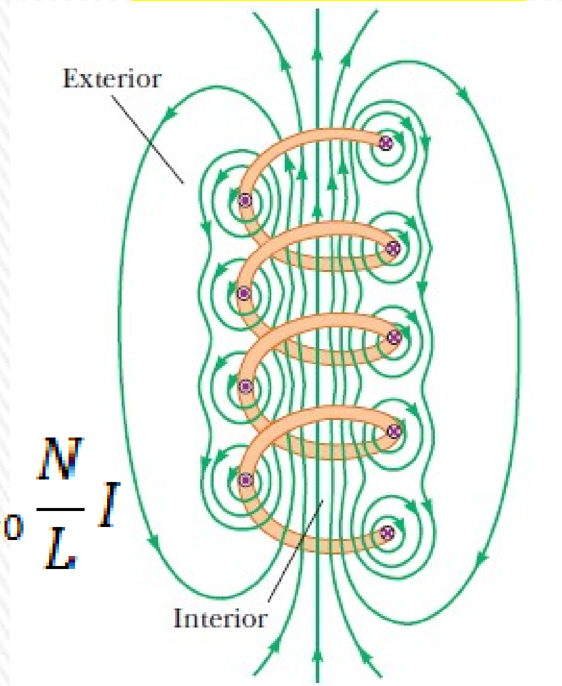


$$\frac{F}{L} = \frac{\mu_0 I I'}{2\pi r}$$

Conductores paralelos que llevan corrientes en un mismo sentido se atraen,
conductores paralelos que llevan corrientes en sentidos opuestos se repelen.

Campo magnético de una espira circular de corriente

$$B_x = \frac{\mu_0 I a^2}{2(x^2 + a^2)^{\frac{3}{2}}}$$



Campo magnético creado por un solenoide

En el interior el campo es uniforme y vale: $B = \mu_0 n I = \mu_0 \frac{N}{L} I$

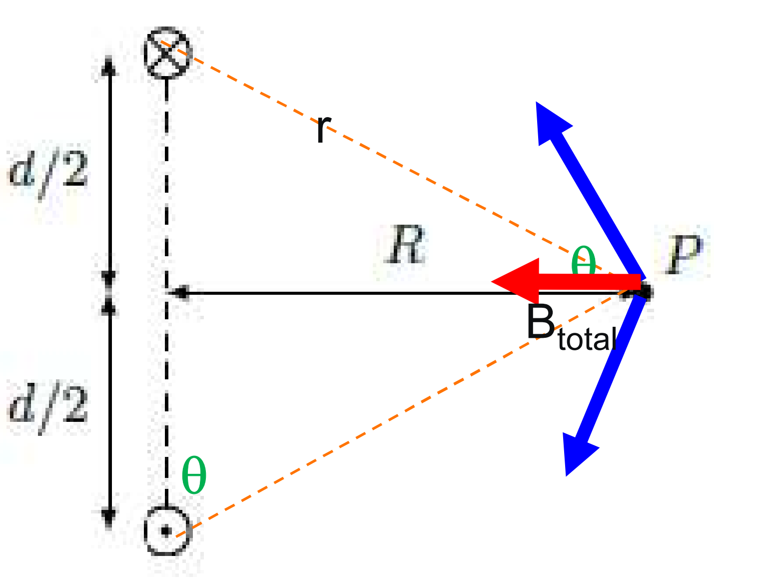
Y en el exterior: B=0.

EJEMPLO: ejercicio 3.2.1

Dos alambres paralelos, rectos y muy largos, están separados una distancia d, como se muestra en la figura. Ambos alambres conducen corrientes de módulo *i*, pero con sentidos opuestos.

a) Determine el campo magnético en un punto P equidistante de los dos alambres, que está a una distancia *R* del punto medio entre ellos.

b) Se coloca centrado en el punto P un tercer alambre recto de largo *L*, paralelo a los dos primeros, por el que circula una corriente i_0 saliente al plano de la figura. Determine la fuerza magnética sobre dicho alambre.



Las magnitudes de los campos magnéticos son iguales.

Las componentes verticales de los campos magnéticos se cancelan entre sí.

El campo resultante por tanto es la suma de las dos componentes horizontales.

Entonces: $B_{total} = 2B\cos\theta$

$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi r} \qquad r = \sqrt{R^2 + \left(\frac{d}{2}\right)^2} \qquad \cos\theta = \frac{\frac{d}{2}}{r} = \frac{d}{2r}$$

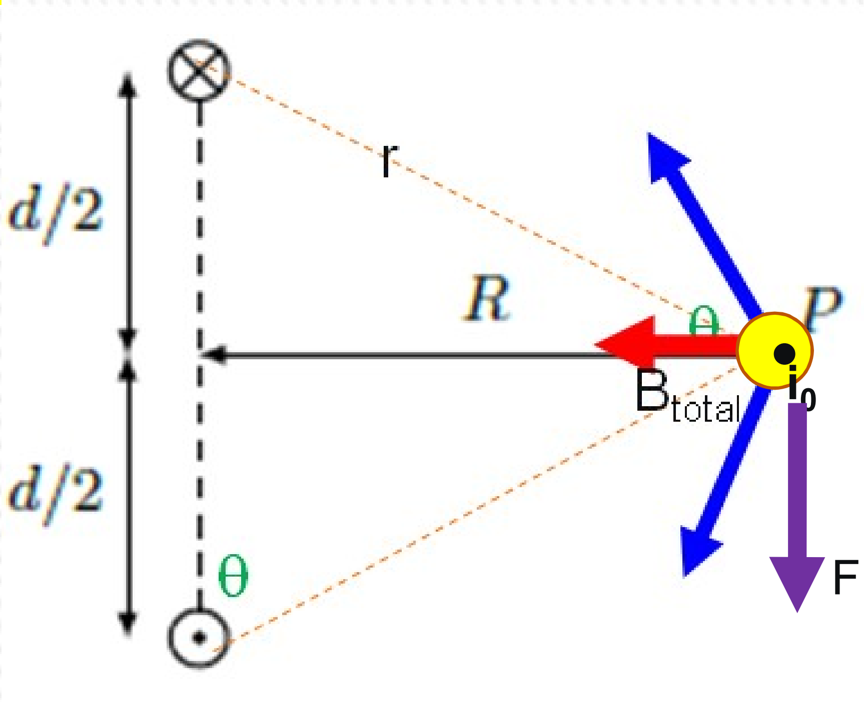
$$B_t = 2B\cos\theta = 2\frac{\mu_0 i}{2\pi r}\frac{d}{2r} = \frac{\mu_0 i d}{2\pi r^2} = \frac{\mu_0 i d}{2\pi\left(R^2 + \left(\frac{d}{2}\right)^2\right)}$$

$$\boxed{B_t = \frac{\mu_0 i d}{2\pi\left(R^2 + \left(\frac{d}{2}\right)^2\right)}}$$

EJEMPLO: ejercicio 3.2.1

$$B_t = \frac{\mu_0 i d}{2\pi\left(R^2 + \left(\frac{d}{2}\right)^2\right)}$$

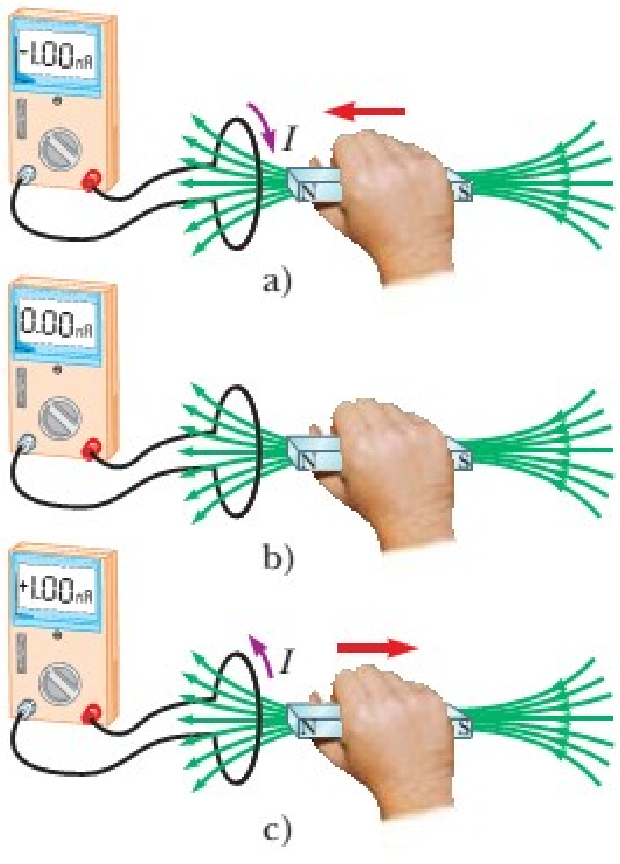
$$\overline{F} = i_0 \overline{L} \times \overline{B}$$



$$F = i_0 L B = i_0 L \frac{\mu_0 i d}{2\pi\left(R^2 + \left(\frac{d}{2}\right)^2\right)} = \frac{\mu_0 i i_0 d L}{2\pi\left(R^2 + \left(\frac{d}{2}\right)^2\right)}$$

$$F = \frac{\mu_0 i i_0 d L}{2\pi\left(R^2 + \left(\frac{d}{2}\right)^2\right)}$$

03.4-INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA



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 (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 nucleoeléctrica.

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

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

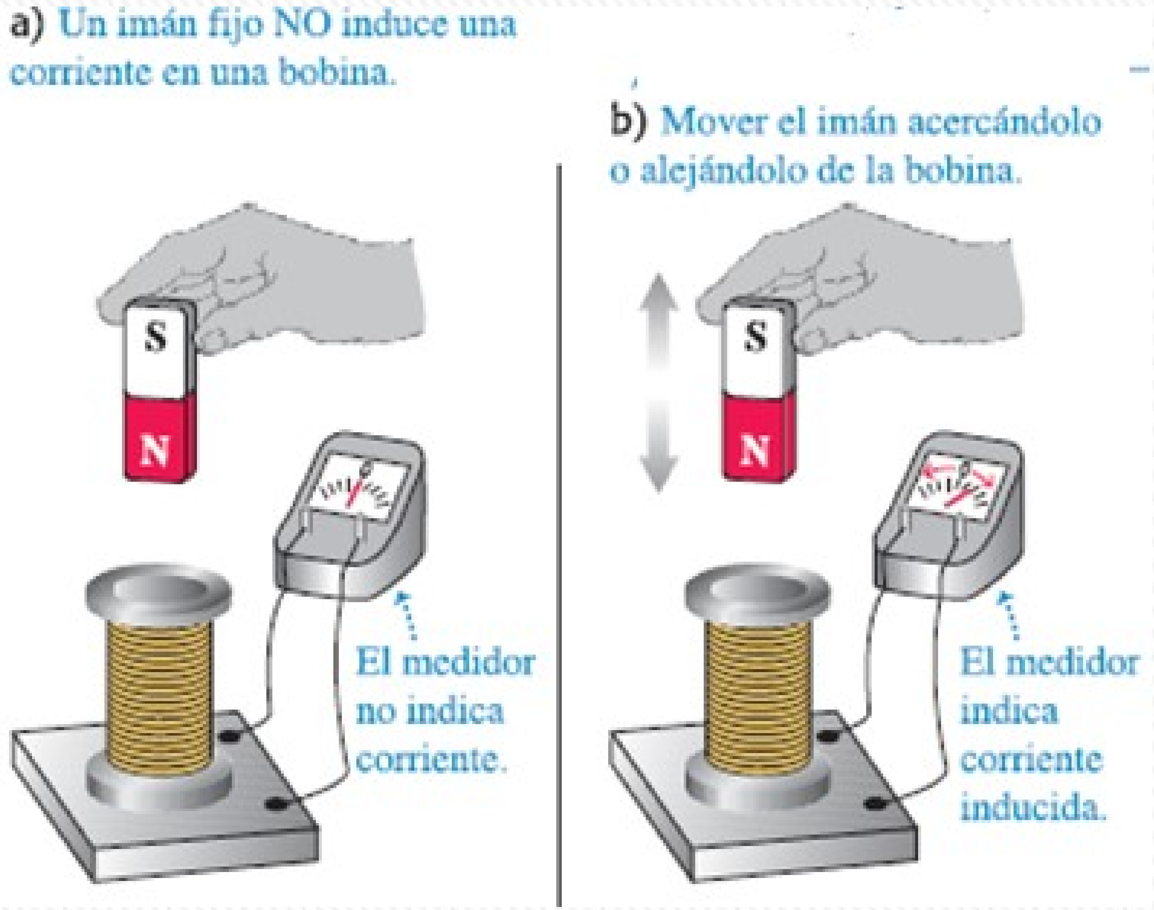
El principio fundamental de la inducción electromagnética, es la ***ley de Faraday***, *que* ***relaciona la fem inducida con el flujo magnético*** **variable en cualquier circuito**.

La **ley de Lenz** ayuda a **predecir el sentido de las fem y las corrientes inducidas**.

Experimentos de inducción

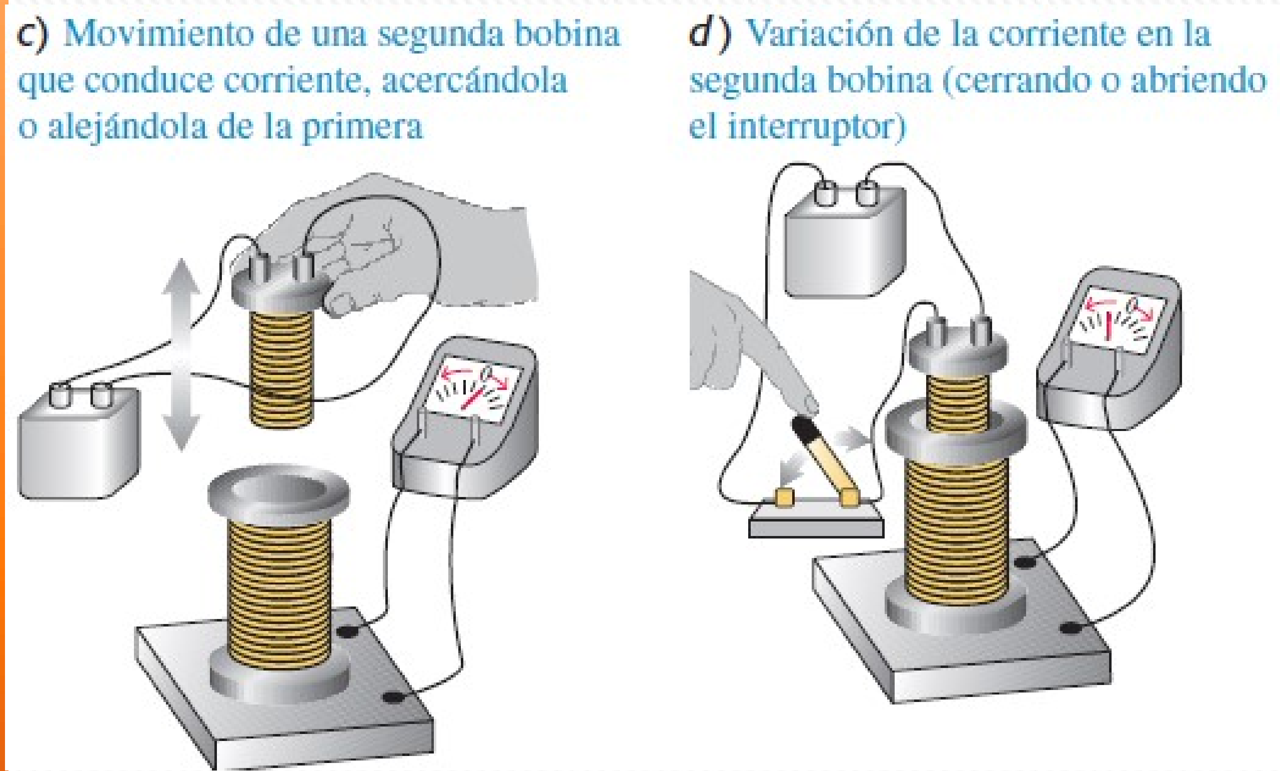
Realizados por 1830 por Michael Farady y Joseph Henry.

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 acerca 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.



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

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

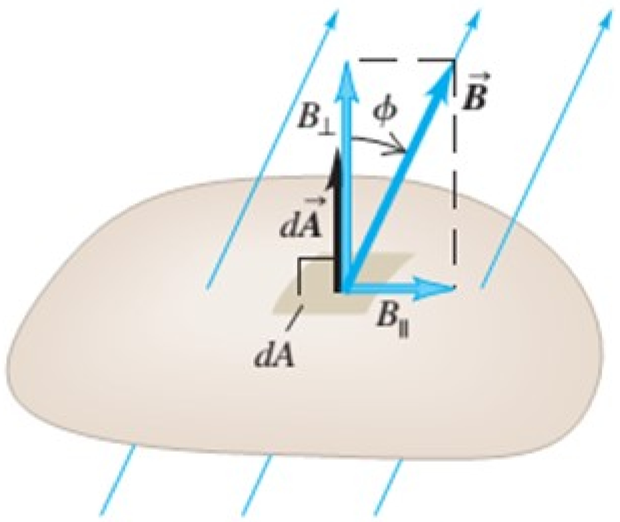
Se debe diferenciar con cuidado entre los **campos eléctricos electrostáticos** producidos por cargas eléctricas (de acuerdo con la ley de Coulomb), y los **no electrostáticos** producidos por campos magnéticos variables.

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***, 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:

$$d\Phi_B = \overline{\boldsymbol{B}}.\,d\overline{\boldsymbol{A}} = B_\perp dA = B dA \cos\phi$$

$$\Phi_B = \int \overline{\boldsymbol{B}}.\,d\overline{\boldsymbol{A}} = \int B dA \cos\phi$$

Si ***B*** es uniforme sobre un área plana ***A***

$$\Phi_B = \overline{\boldsymbol{B}}.\,\overline{\boldsymbol{A}} = BA\cos\phi$$

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 (ΦB) a través del circuito (es decir al negativo de la velocidad con que cambia con el tiempo el flujo magnético).
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.

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

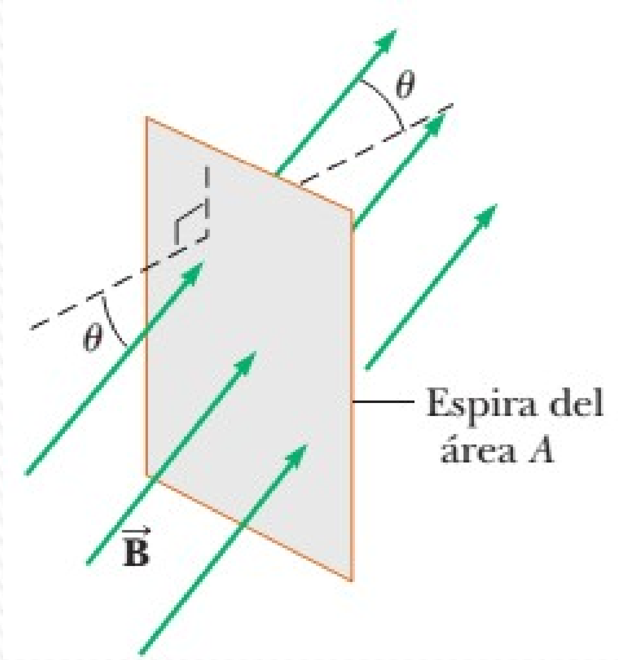
Ley de Faraday

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:

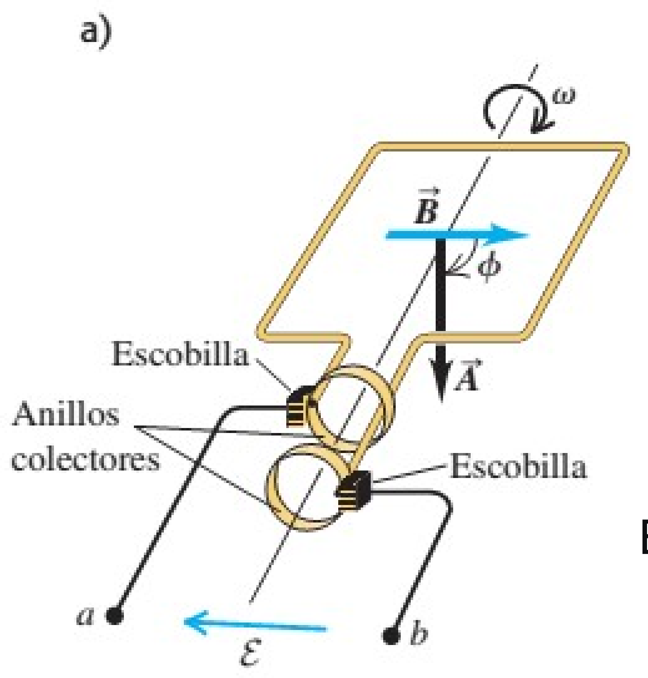
$$\varepsilon = -\frac{d}{dt}(BA\cos\phi)$$



Entonces… ¿cómo se puede generar una fem?

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

GENERADOR DE CORRIENTE ALTERNA



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 **B** es uniforme y constante. En el momento t =0, φ = 0.

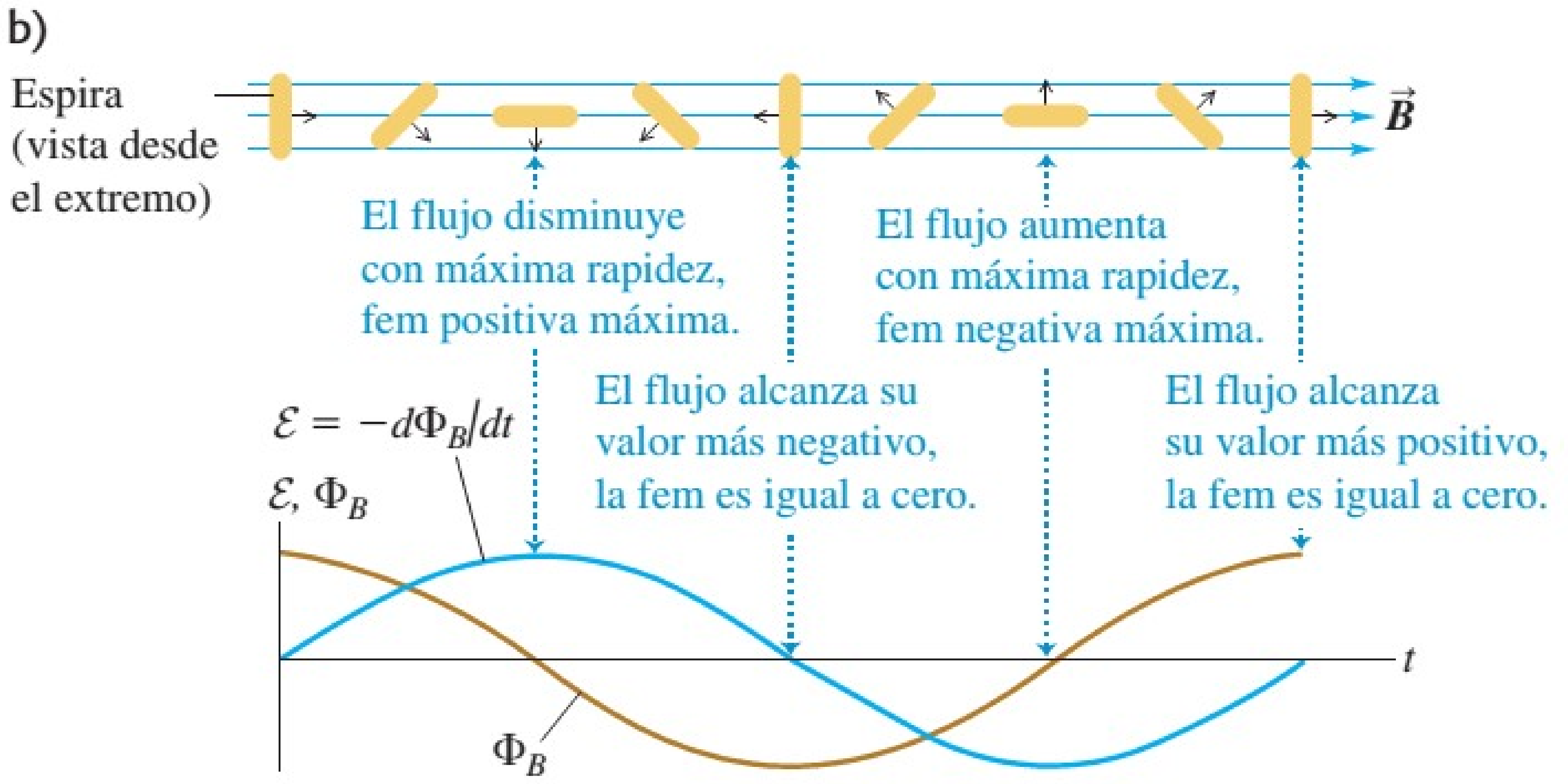
El campo magnético es uniforme en toda la espira

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

$$\Phi_B = \bar{B}.\bar{A} = BA\cos\phi = BA\cos\omega t$$

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

GENERADOR DE CORRIENTE ALTERNA



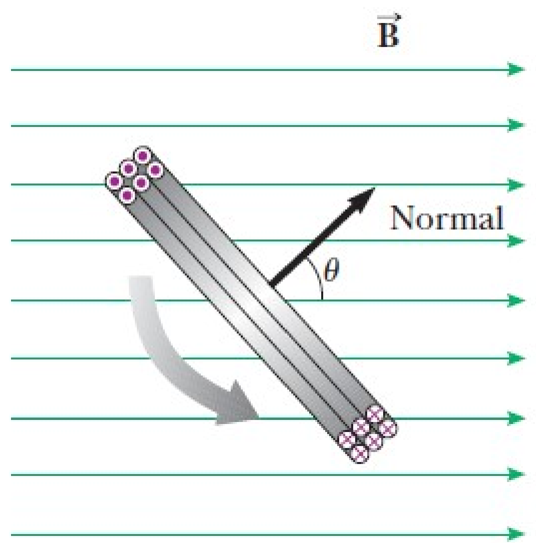
Gráfica del flujo a través de la espira (en ocre) y la fem resultante (en celeste) entre las terminales *a y b, a lo largo* de las posiciones correspondientes de la espira durante una rotación completa.

GENERADOR DE CORRIENTE ALTERNA

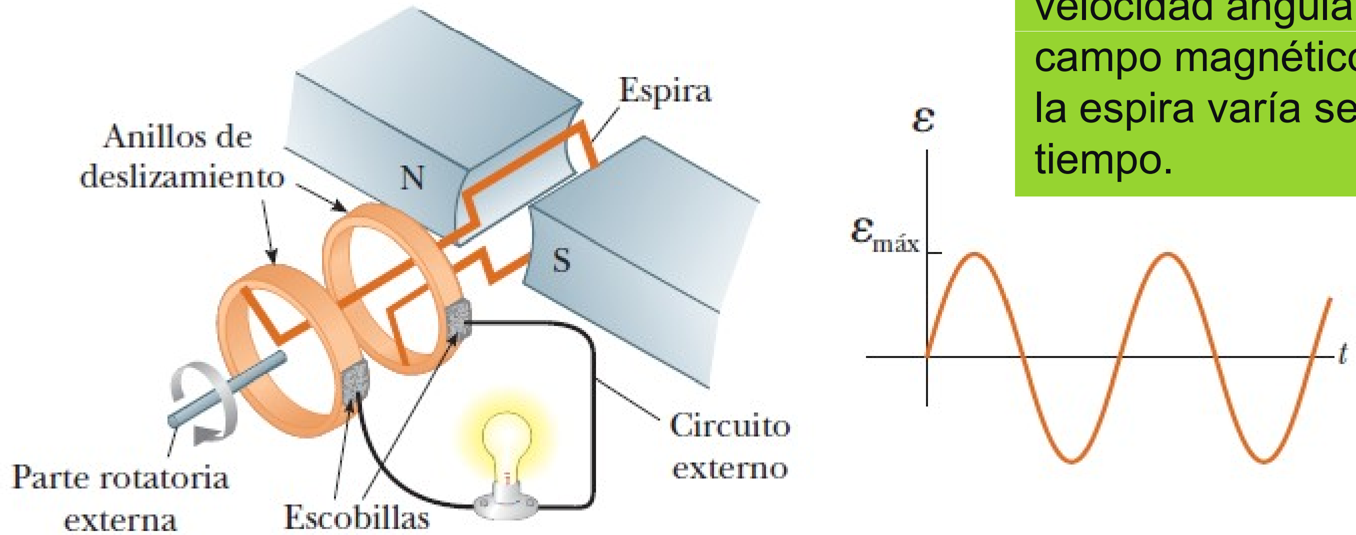
$$\Phi_B = \overline{\boldsymbol{B}}.\overline{\boldsymbol{A}} = BA\cos\phi = BA\cos\omega t$$

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

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



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.

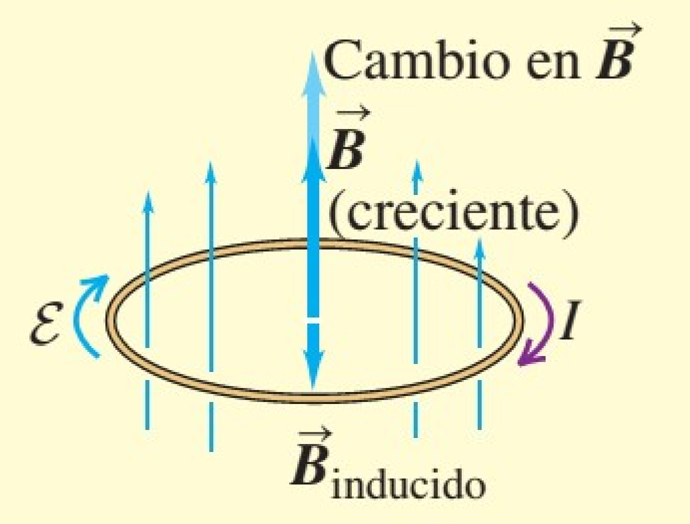
Ley de Lenz

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.

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.



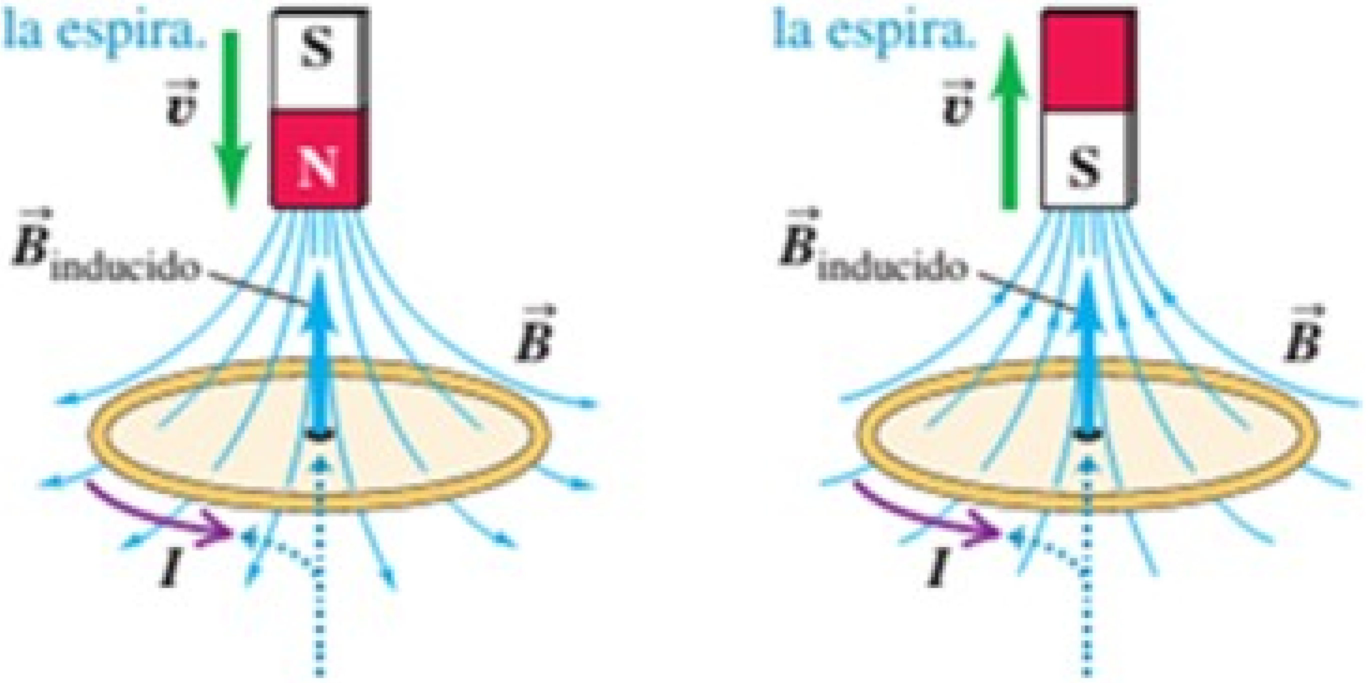
La corriente o fem inducida siempre tiende a oponerse al cambio que la generó, o a cancelarlo.

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.

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

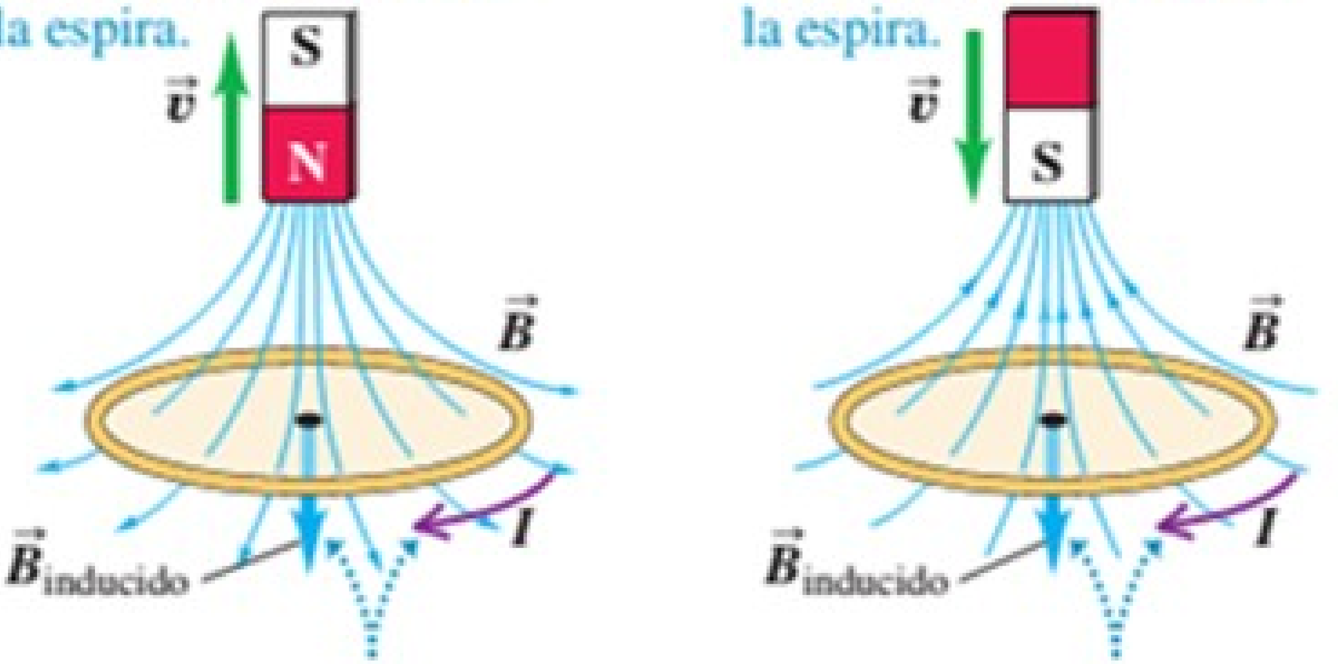


El campo magnético inducido es *hacia arriba* para oponerse al cambio del flujo. Para producir el campo inducido, la corriente inducida debe ir *en sentido antihorario*, vista desde arriba de la espira.

LEY DE LENZ

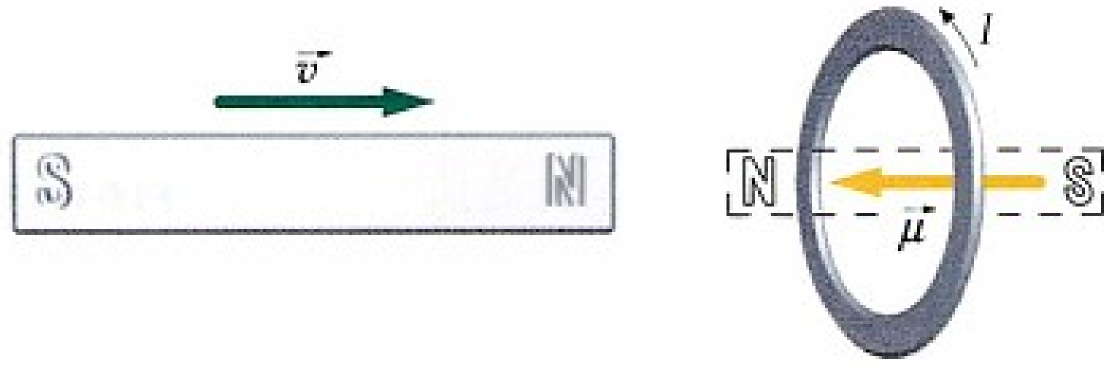
c) El movimiento del imán produce un flujo *decreciente hacia abajo* a través de la espira.

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



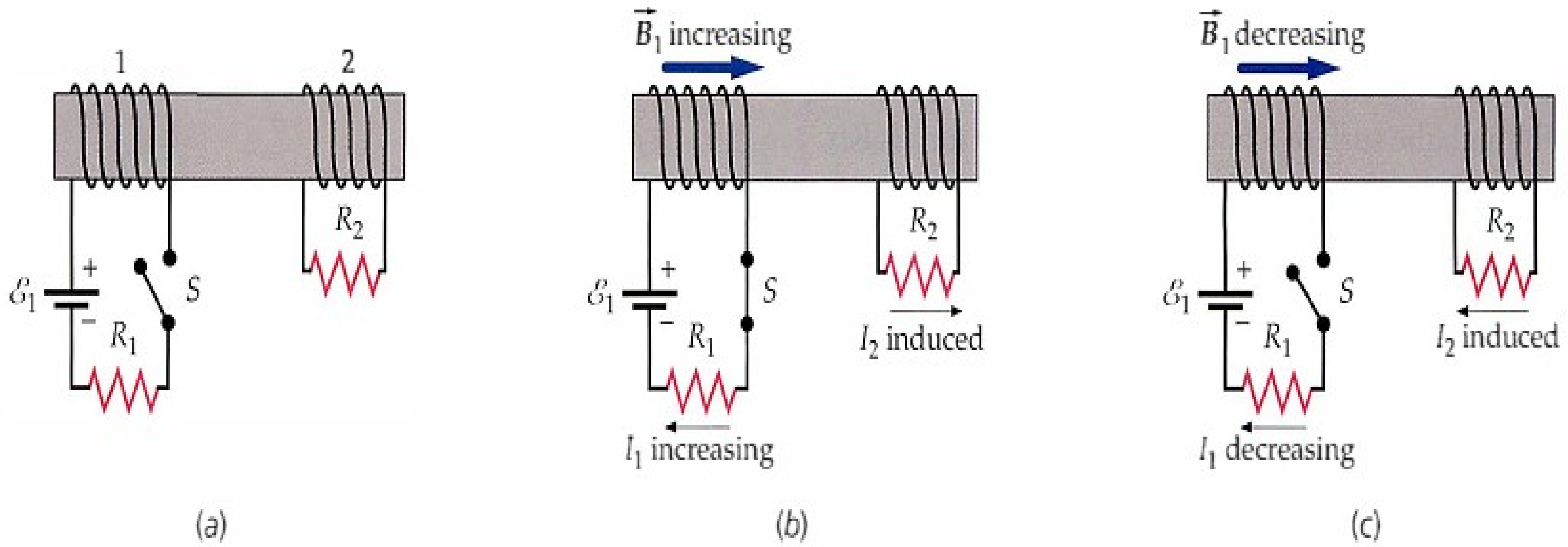
El campo magnético inducido es *hacia abajo* para oponerse al cambio del flujo. Para producir este campo inducido, la corriente inducida debe ir *en sentido horario*, vista desde arriba de la espira.

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

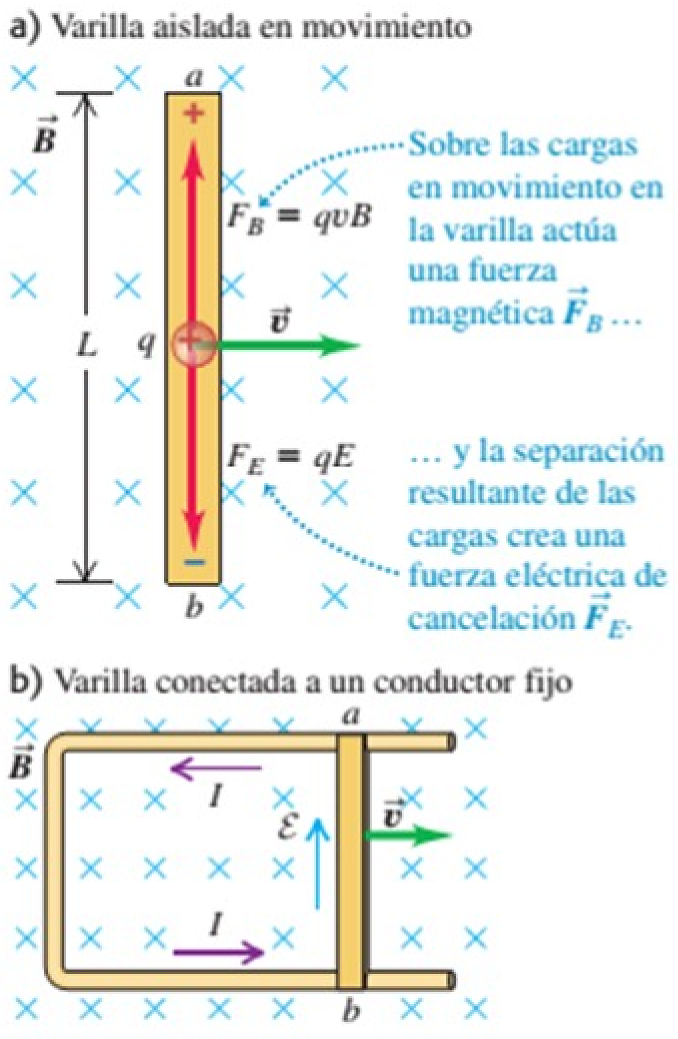


a) Dos circuitos adyacentes.

b) Justo después de que el interruptor se cierra, I_1 crece en la dirección mostrada. 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



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

Conductor en U en **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 **v** constante.

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

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

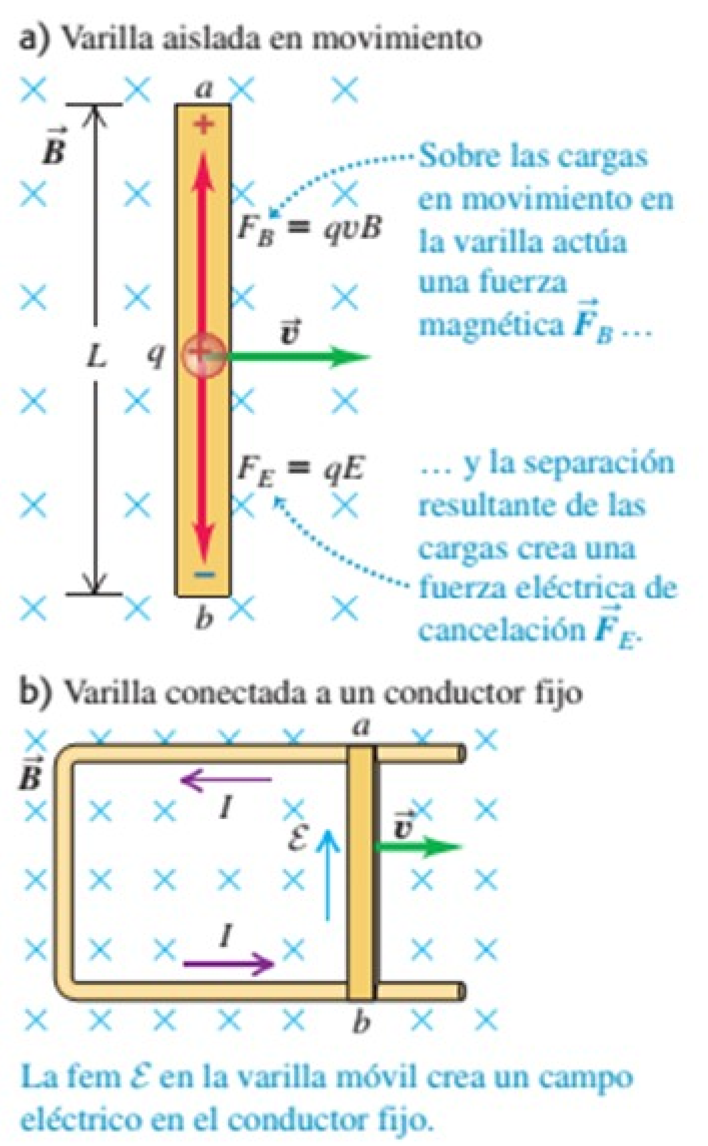
Las cargas libres se mueven creando exceso de carga positiva en *a* y de carga negativa en *b*.
Se crea un campo eléctrico **E** en el interior de la varilla. La carga se sigue acumulando hasta que **E**:

$$qE = qvB$$

Se crea una diferencia de potencial: Vab = Va - Vb igual a la magnitud del campo eléctrico *E* multiplicada por la longitud *L* de la varilla.

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

FUERZA ELECTROMOTRIZ (fem) DE 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.

$$\varepsilon = vBL$$

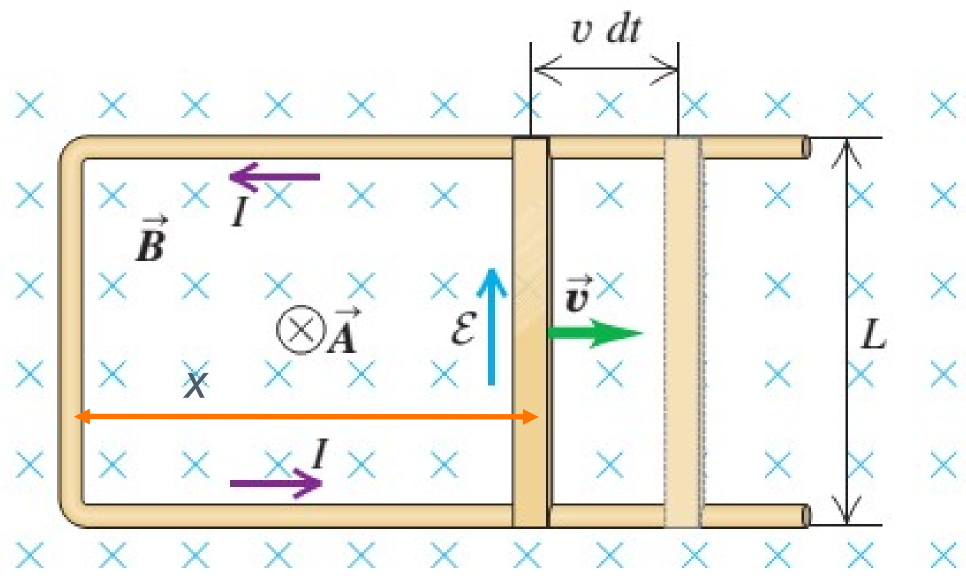
(fem de movimiento; longitud y velocidad perpendiculares a **B** uniforme)

FUERZA ELECTROMOTRIZ (fem) DE MOVIMIENTO

Aplicando directamente la ley de Faraday:

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

$$\varepsilon = -BLv$$

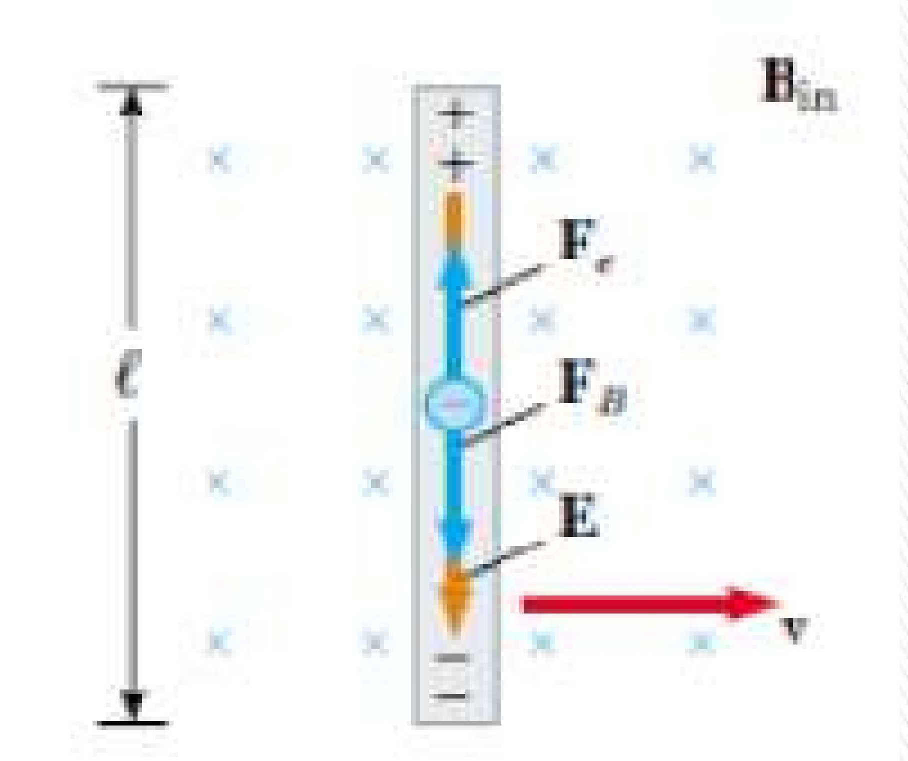


El sentido de la fem inducida se deduce mediante la ley de Lenz.

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

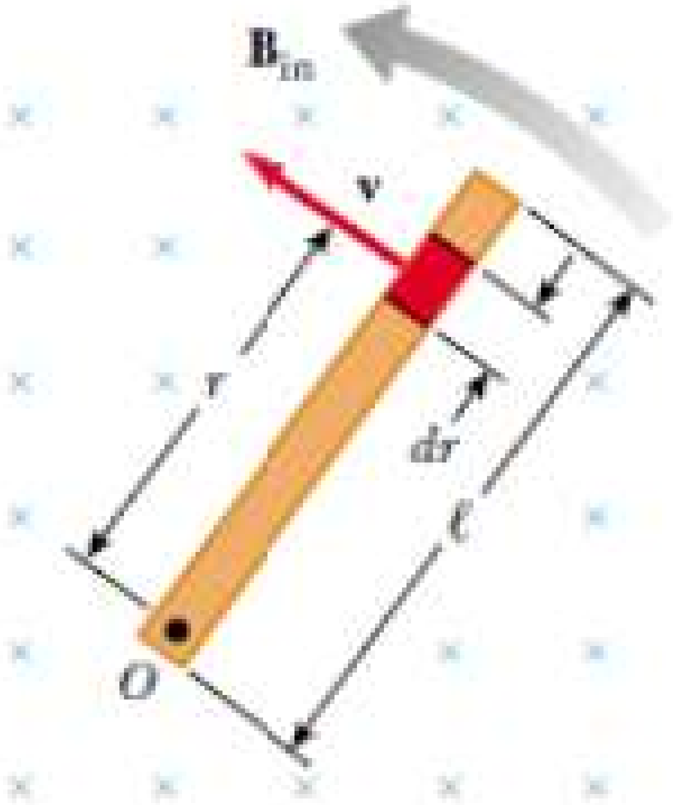


Barra conductora: longitud *l*, velocidad *v* a través campo magnético B (B y *v perpendiculares)*.
Se induce en los extremos de la barra una fem igual a:

$$\varepsilon = Blv$$

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

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

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

$$d\varepsilon = Bvdr = B\omega rdr$$

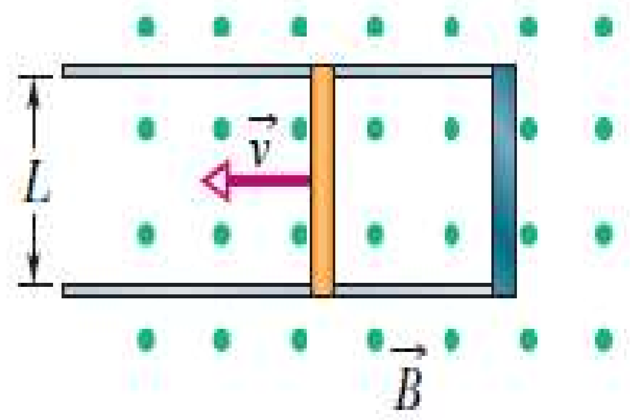
$$\varepsilon = \int d\varepsilon = B\omega \int_0^L rdr = \frac{1}{2} B\omega L^2$$

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

$$\varepsilon = \frac{B\omega l^2}{2}$$

EJEMPLO: ejercicio 3.2.6

La figura muestra una barra conductora de longitud *L* que es deslizada a lo largo de rieles conductores horizontales, carentes de fricción, a una velocidad constante ***v***. Un campo magnético uniforme **B** ocupa la región en que se mueve la barra. Si ***L***=10,8 cm, ***v*** = 4,86 m/s, **B** = 1,18 T, la resistencia de la barra es 415 mΩ y la resistencia de los rieles es despreciable:



a) Halle la fem inducida en la barra.
b) Calcule la corriente en la espira conductora.
c) Determine la fuerza que debe aplicarse por un agente externo a la barra para mantener su movimiento.

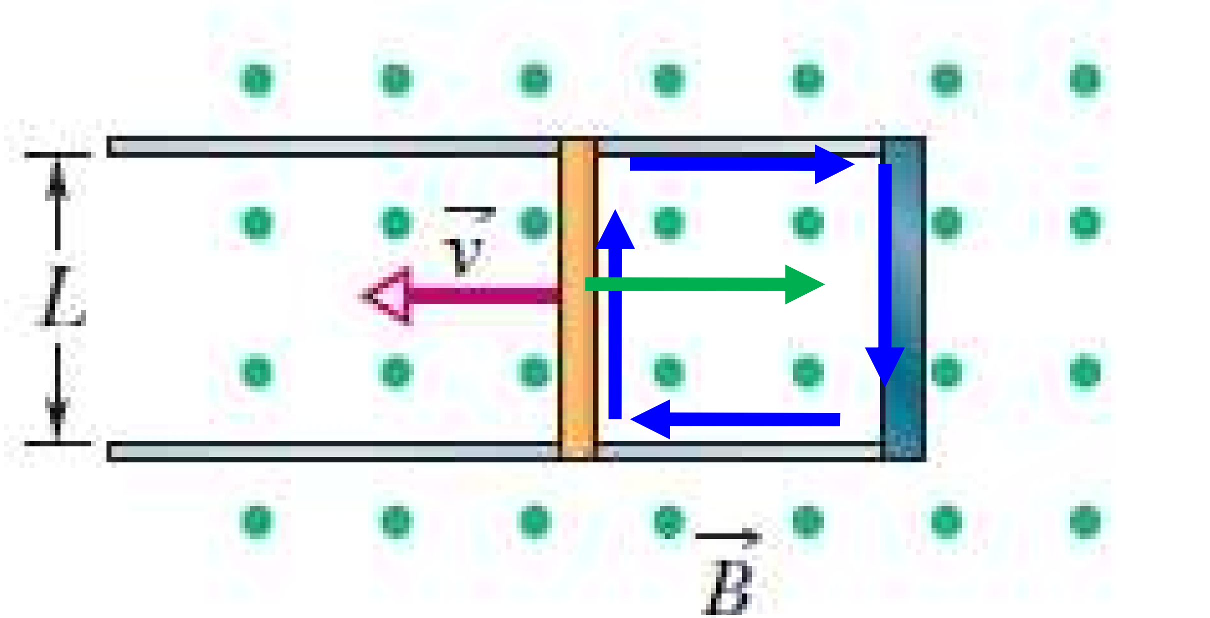
L=10,8 cm, ***v*** = 4,86 m/s, **B** = 1,18 T, R= 415 mΩ

a) ε= BLv= (1,18)(0,108)(4,86) = 0,5826 V **ε = 0,583 V**

b) I= ε/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:

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

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

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

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

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