

# ANUNCIOS

Primer parcial: sábado 11 de octubre hora 14:30.

Inscribirse por EVA en pestaña “Evaluaciones” antes del viernes al mediodía.

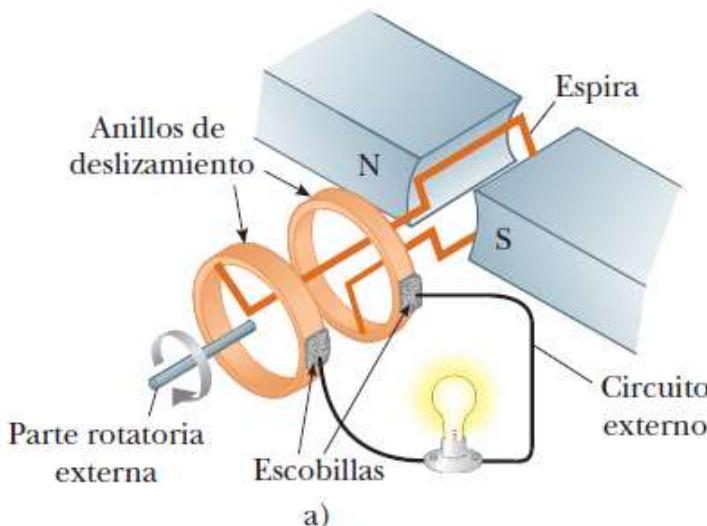
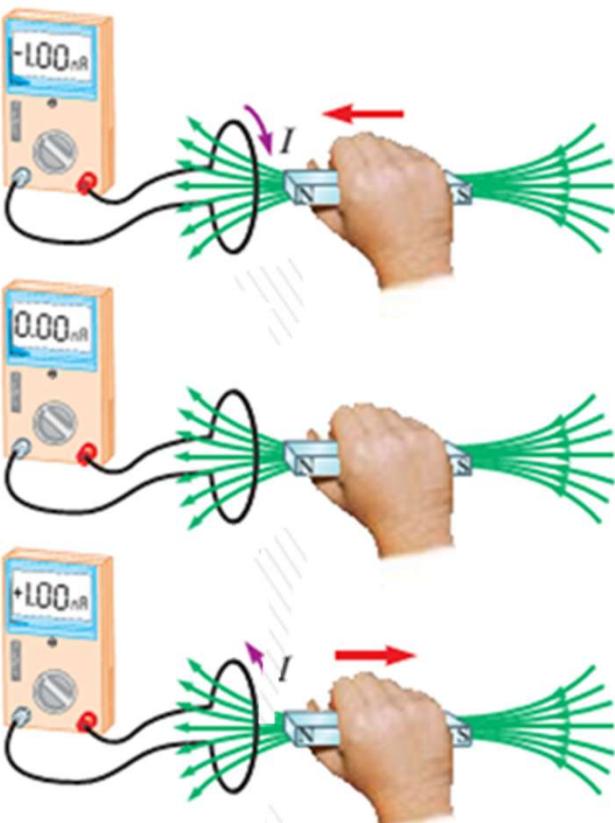
El miércoles 8 de octubre a partir de la hora 16:30, en el salón 202/04 se podrán recuperar las evaluaciones cortas 1 y/o 2.

Estudiantes inscriptos en formato virtual podrán recuperar ambas evaluaciones, los no inscriptos en esta modalidad podrán recuperar solamente una de las dos.

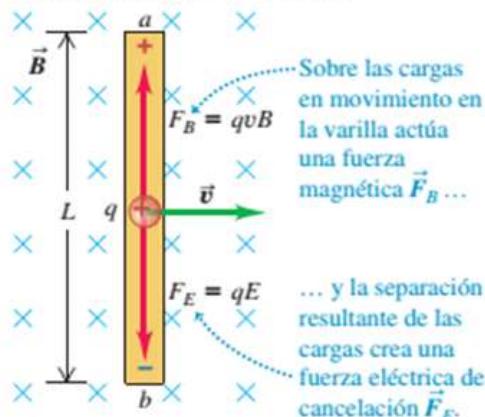
Se deberán inscribir a través de EVA hasta el martes 7/10. Las inscripciones están en la pestaña "Evaluaciones".



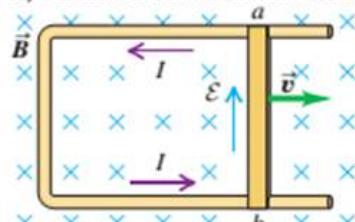
# 8- INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA



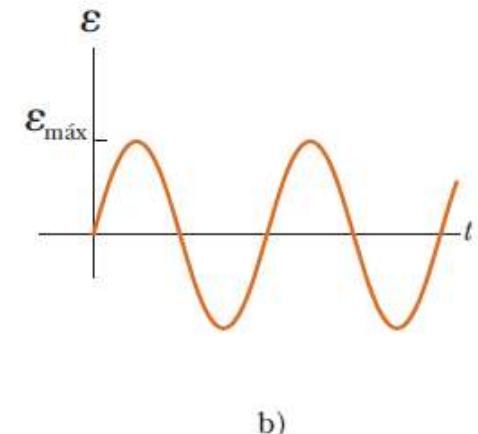
a) Varilla aislada en movimiento



b) Varilla conectada a un conductor fijo



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



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



# Repaso de la clase anterior

$$d\bar{F} = I d\bar{l} \times \bar{B}$$

Fuerza magnética sobre elemento  $d\bar{l}$  con corriente  $I$

Fuerza magnética sobre conductor recto de longitud  $L$  con corriente  $I$  en campo uniforme  $\bar{B}$ :

$$\bar{F} = I \bar{l} \times \bar{B}$$

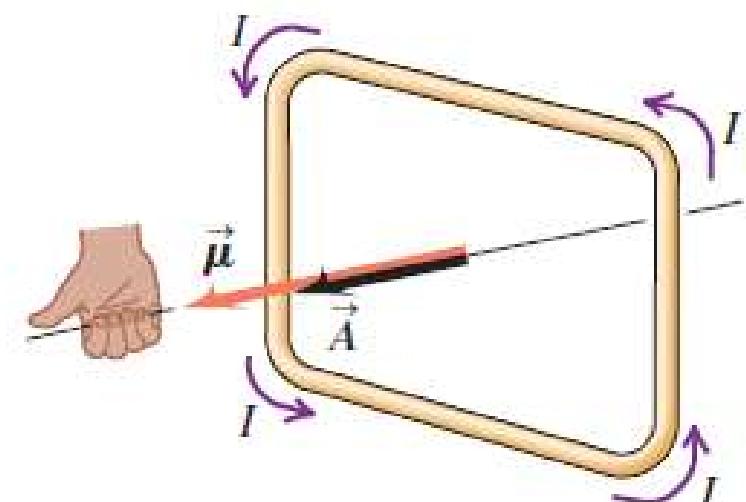
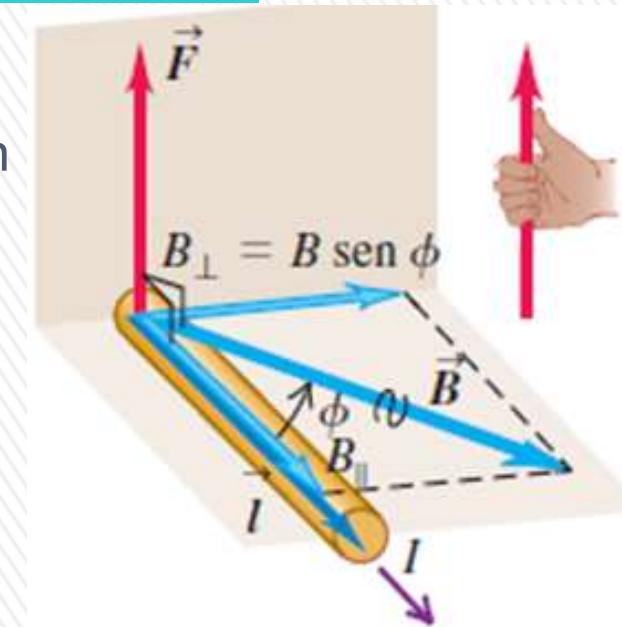
$$F = BiL \operatorname{sen}\phi$$

Fuerza sobre una espira con corriente  $I$  en campo uniforme  $\bar{B}$ :  $F = 0$

El producto  $IA$  se denomina **momento dipolar magnético** o **momento magnético de** la espira, el cual se denota:  $\mu$

Torque sobre espira con corriente  $I$  en campo unif.

$$\bar{\tau} = \bar{\mu} \times \bar{B}$$



# Repaso de la clase anterior

## Campo magnético de una carga en movimiento

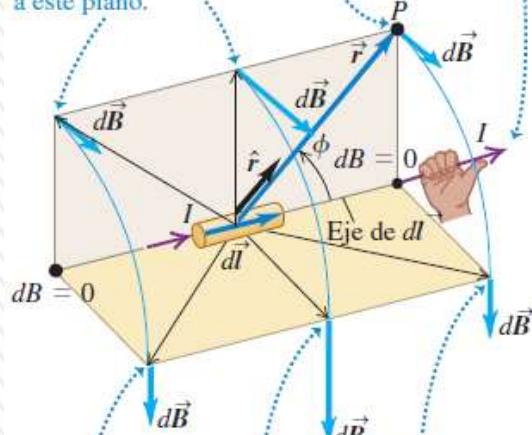
$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q \vec{v} \times \hat{r}}{r^2}$$

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{|q| v \sin \phi}{r^2}$$

$\mu_0$  permeabilidad del vacío, valor en el S.I. es:

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T.m/A}$$

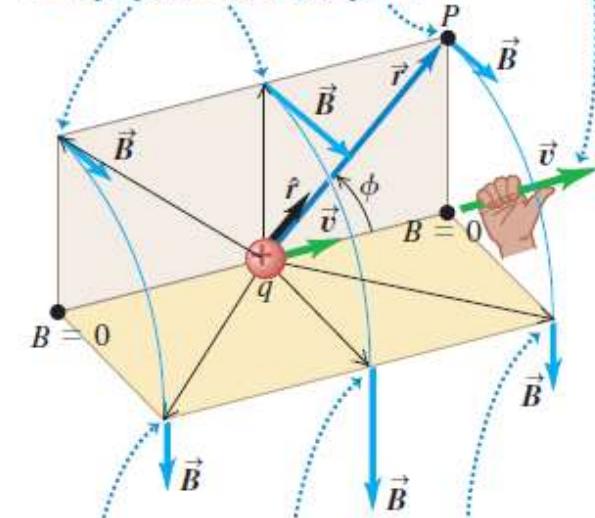
Para estos puntos de campo,  $\vec{r}$  y  $d\vec{l}$  están en el plano color beige, y  $d\vec{B}$  es perpendicular a este plano.



Para estos puntos de campo,  $\vec{r}$  y  $d\vec{l}$  encuentran en el plano color dorado, y  $d\vec{B}$  es perpendicular a este plano.

Además vimos campo creado por una espira y un solenoide

Para estos puntos de campo,  $\vec{r}$  y  $\vec{v}$  están en el plano color beige, y  $\vec{B}$  es perpendicular a este plano.



Para estos puntos de campo,  $\vec{r}$  y  $\vec{v}$  están en el plano color dorado, y  $\vec{B}$  es perpendicular a este plano.

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Id\vec{l} \times \hat{r}}{r^2}$$

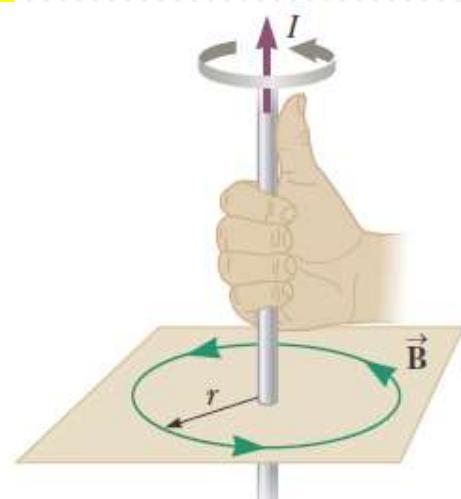
$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \sin \phi}{r^2}$$

Ley de Biot y Savart:  $\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{Id\vec{l} \times \hat{r}}{r^2}$

Campo cerca de conductor largo y recto con corriente I:

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

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



# INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

En la mayoría de los equipos eléctricos que se usan en la industria y el hogar, 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**.

Los primeros experimentos de inducción fueron realizados por 1830 por Michael Faraday y Joseph Henry.

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

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



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



Ver video en EVA Ley de Faraday – Inducción electromagnética

[https://m.youtube.com/watch?v=PT9bh\\_BrX9M&t=13s&ab\\_channel=TesaManuel](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  $\Phi_B$**  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  $\Phi_B$**  a través de la bobina.

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

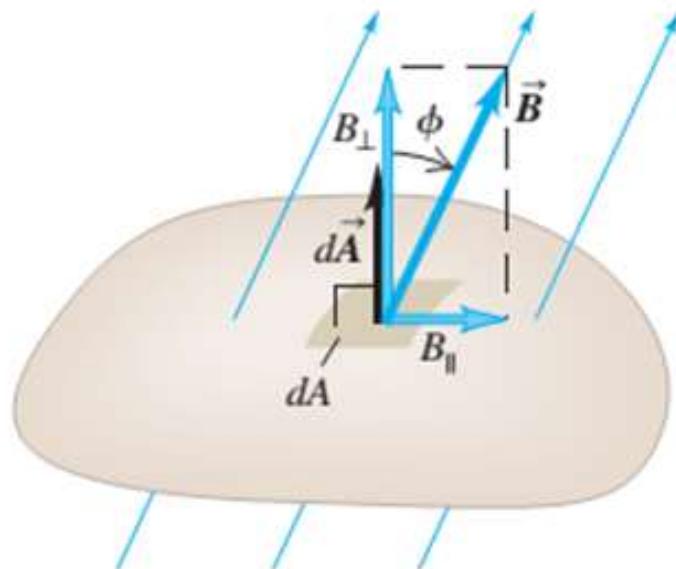
Un campo magnético que varía en el tiempo actúa como fuente de campo eléctrico.

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  $A$

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

## Ley de Faraday de la inducción:

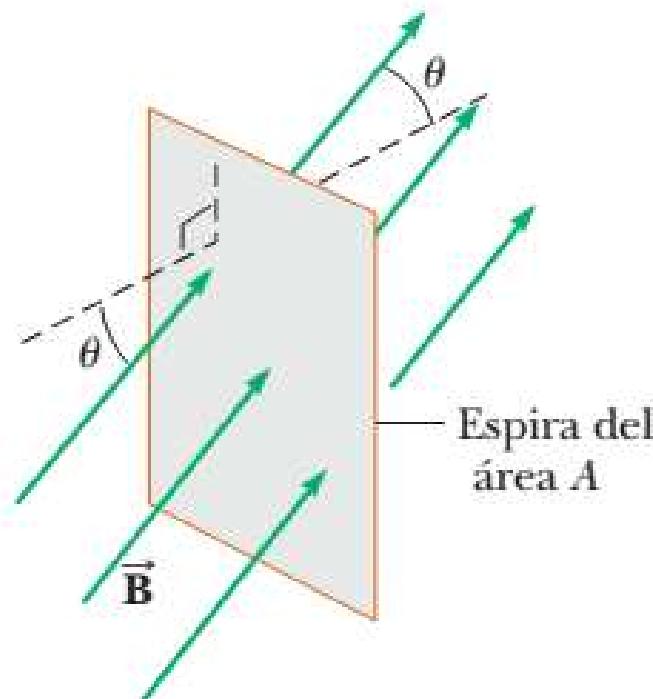
**La fem inducida ( $\varepsilon$ ) en un circuito es igual a menos la derivada respecto al tiempo del flujo magnético ( $\Phi_B$ ) a través del circuito (es decir al negativo de la velocidad con que cambia con el tiempo el flujo magnético).**  
**La fem inducida en una espira cerrada es igual al negativo de la tasa de cambio del flujo magnético a través de la espira con respecto al tiempo.**

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

# LEY DE FARADAY

Si tengo una bobina construida de  $N$  espiras, con la misma área, y  $\Phi_B$  es el flujo magnético a través de una espira, se induce una fem en todas las espiras.

Para este caso:



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

Se hace girar una espira rectangular con rapidez angular constante  $\omega$  alrededor del eje que se indica. El campo magnético  $\mathbf{B}$  es uniforme y constante.

En el momento  $t = 0$ ,  $\phi = 0$ .

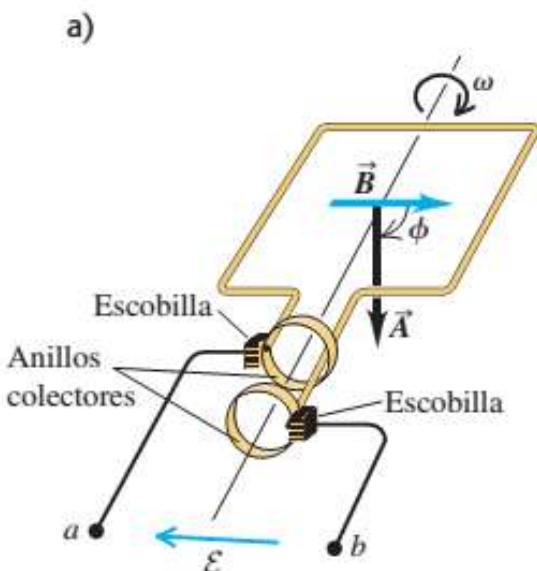
$$\frac{d\phi}{dt} = \omega \Rightarrow \phi = \omega t$$

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  $\theta$



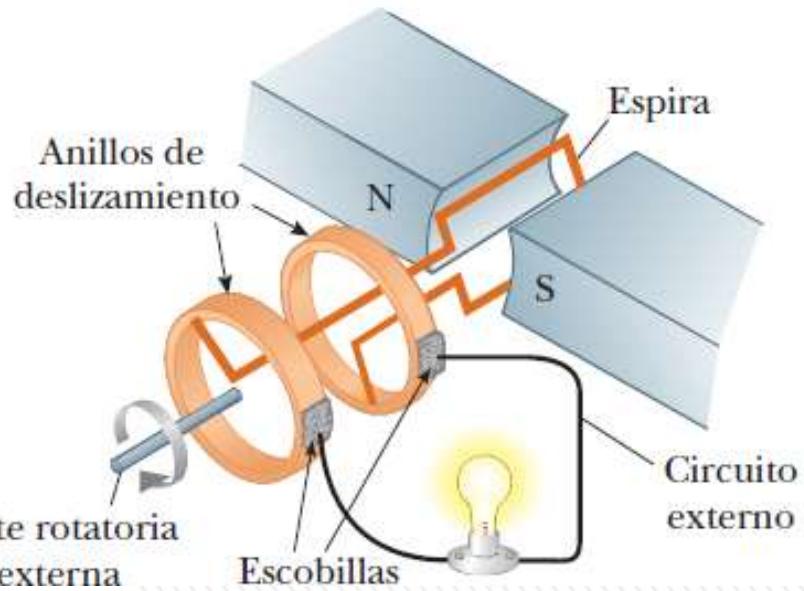
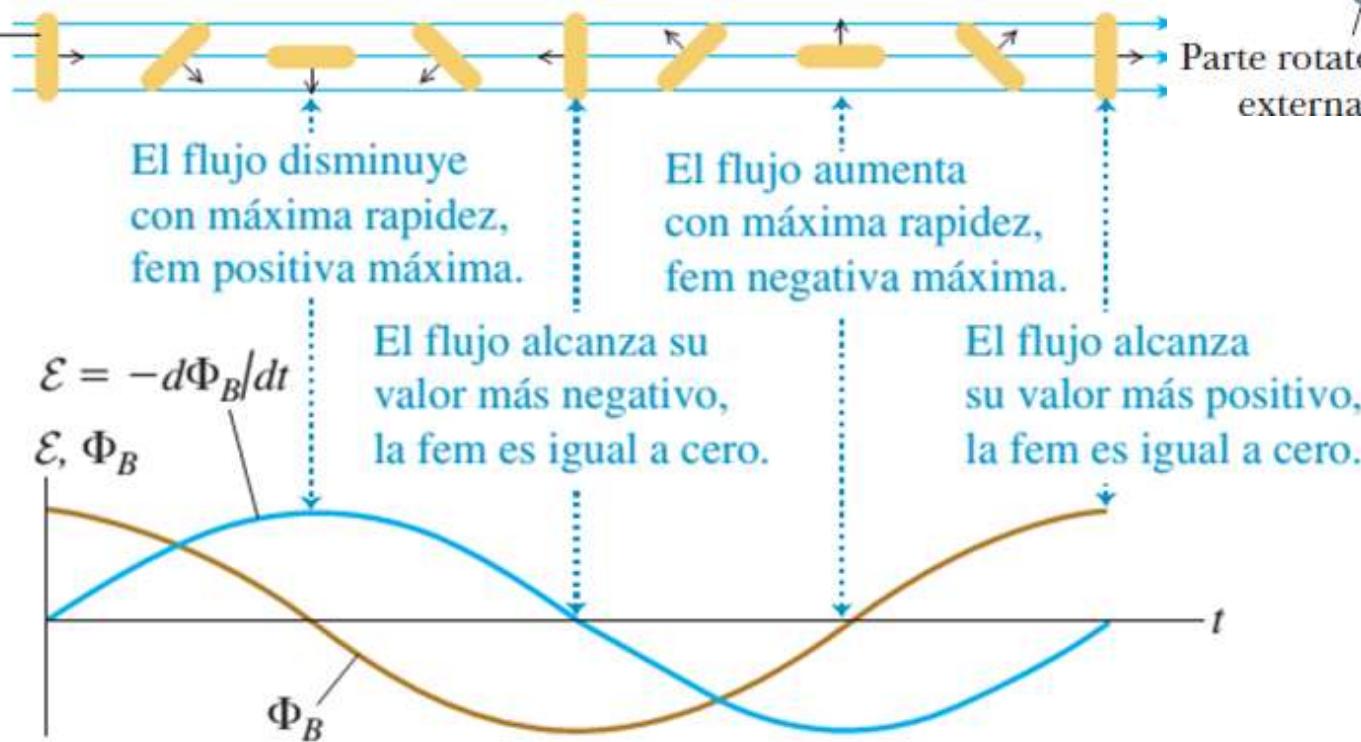
# GENERADOR DE CORRIENTE ALTERNA

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

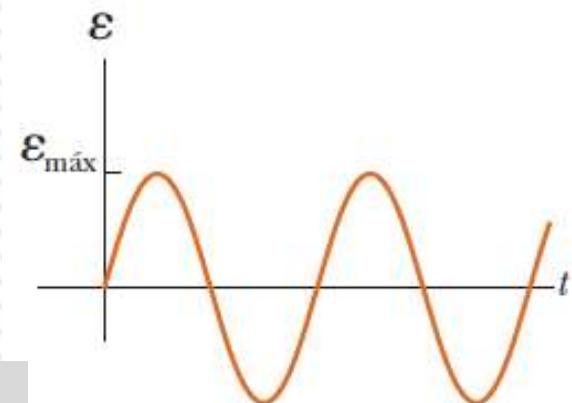
$$\Phi_B = \bar{B} \cdot \bar{A} = BA \cos \phi = BA \cos \omega t$$

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

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



Fem alterna 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](https://m.youtube.com/watch?v=eLu8NJr-ICQ&t=2s&ab_channel=CASOLLIGENERADORES)

# Ley de Lenz

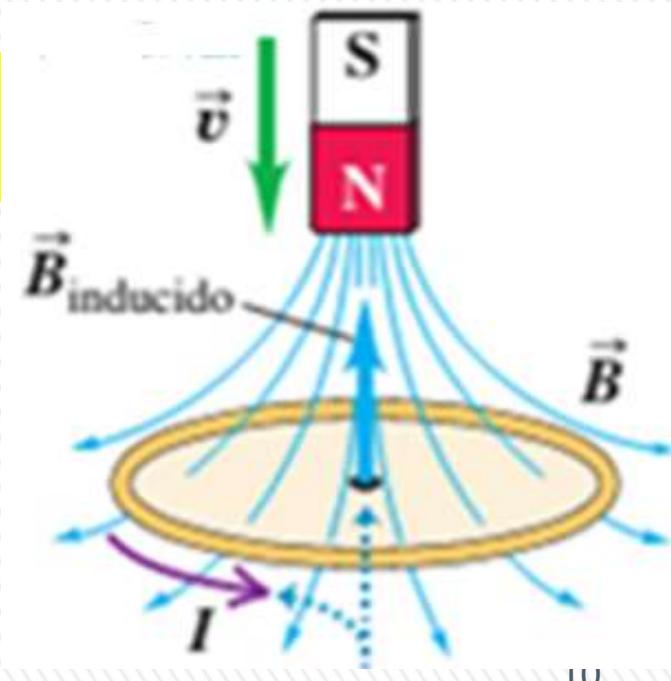
**Ley de Lenz:** Método alternativo conveniente para **determinar el sentido de una corriente o una fem inducidas.**

No es un principio independiente: se puede obtener de la ley de Faraday, pero es más fácil de usar y es consecuencia del principio de conservación de la energía.

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

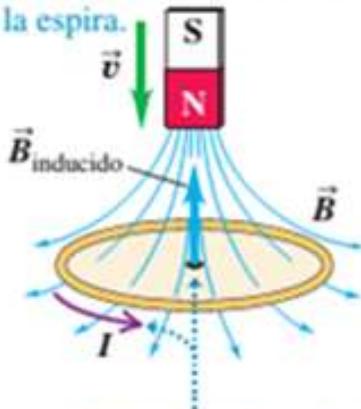
La corriente o fem inducida siempre tiende a oponerse al cambio que la generó, o a cancelarlo (variación del flujo magnético).

Se relaciona directamente con la conservación de la energía.

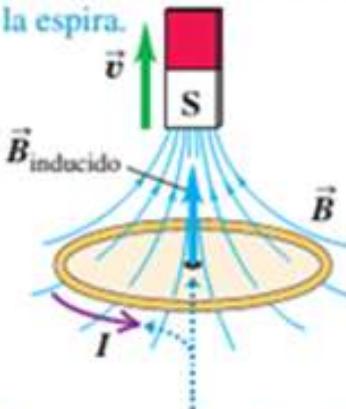


# Ley de Lenz

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

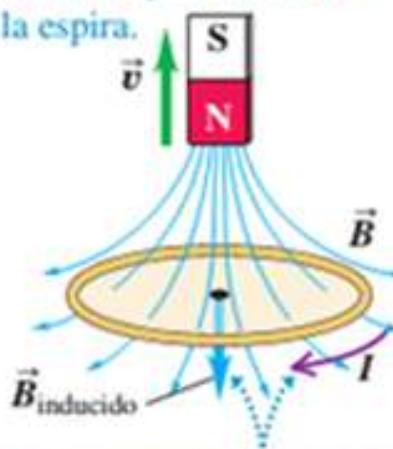


- b) El movimiento del imán ocasiona un flujo *decreciente hacia arriba* a través de la espira.

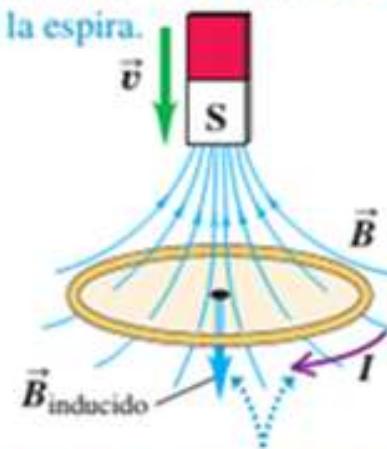


El campo magnético inducido es *hacia arriba* para oponerse al cambio del flujo. Para producir el campo inducido, la corriente inducida debe ir *en sentido antihorario*, vista desde arriba de la espira.

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

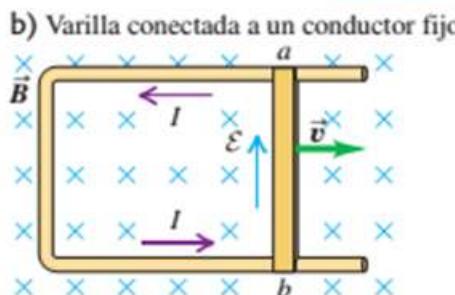
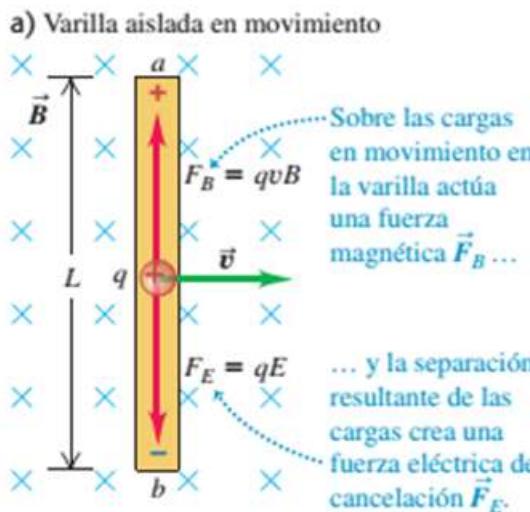


- d) El movimiento del imán ocasiona un flujo *creciente hacia arriba* a través de la espira.



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.

# 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

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

Las cargas libres se mueven creando exceso de carga positiva en  $a$  y de carga negativa en  $b$ .

Se crea un campo eléctrico **E** en el interior de la varilla. La carga se sigue acumulando hasta que **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.

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

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

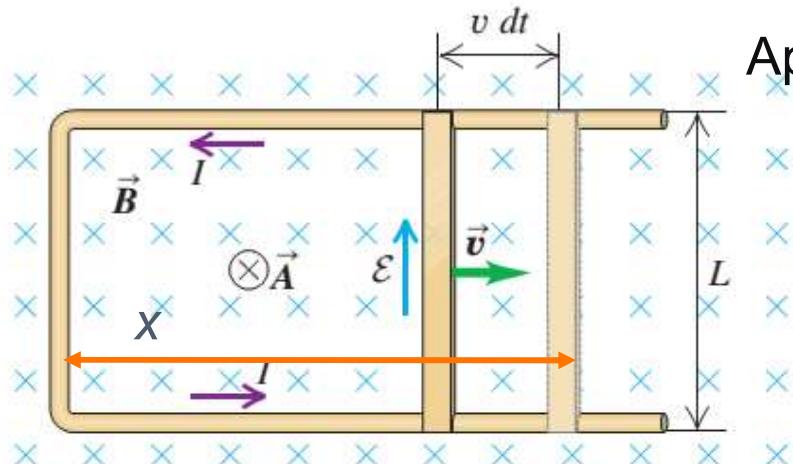
**La varilla móvil se ha vuelto una fuente de fuerza electromotriz**

Esta fem se denomina **fuerza electromotriz de movimiento**, y se denota con  $\epsilon$ .

$$\epsilon = vBL$$

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

# FUERZA ELECTROMOTRIZ (fem) DE MOVIMIENTO

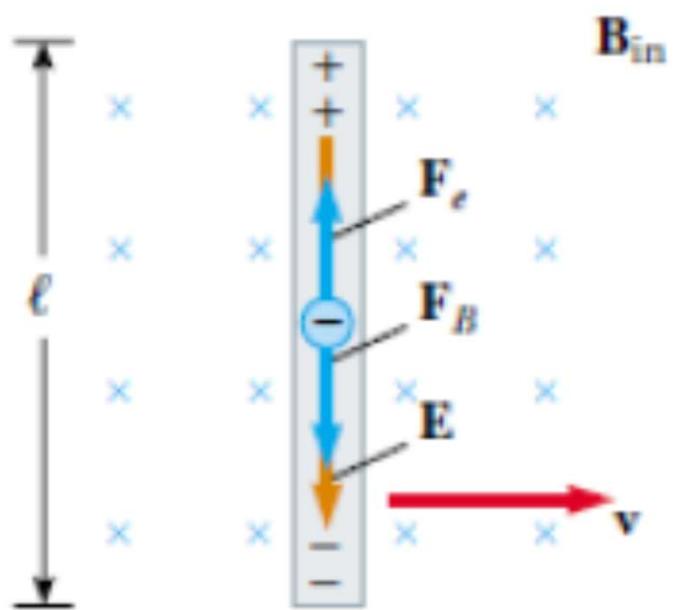


Aplicando directamente la ley de Faraday:

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

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.

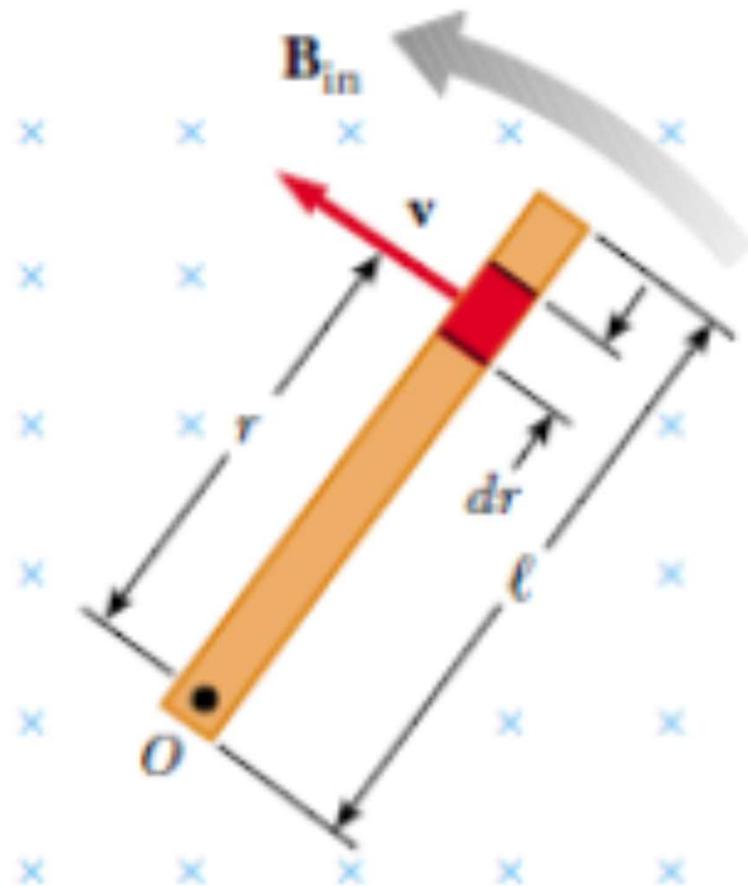


Barra conductora: longitud  $\ell$ , velocidad  $v$  a través campo magnético  $B$  ( $B$  y  $v$  perpendiculares). Se induce en los extremos de la barra una fem igual a:

$$\varepsilon = B/v$$

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

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

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

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

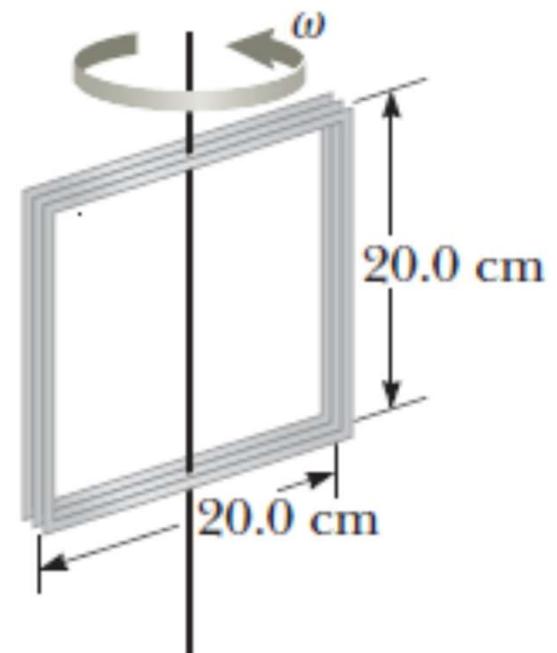
Si tenemos una barra conductora que gira alrededor de un eje en uno de sus extremos en un campo magnético uniforme que es perpendicular al plano de rotación, se induce una fem entre los extremos de la barra dado por

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

## EJEMPLO: ejercicio 3.2.8

Una bobina cuadrada de  $20\text{ cm} \times 20\text{ cm}$  de 100 vueltas de alambre gira alrededor de un eje vertical a 1500 rpm. La componente horizontal del campo magnético terrestre en la posición de la bobina es  $2,00 \times 10^{-5}\text{ T}$ .

- Calcular la máxima fem inducida en la bobina por este campo.
- Si el alambre tiene una resistencia por unidad de longitud de  $0,10\text{ }\Omega/\text{cm}$ , hallar la amplitud de la corriente inducida.
- ¿Cuánto vale la potencia promedio disipada en calor por la resistencia?



$$\mathcal{E}_{máx.} = N\omega BA$$

$N= 100$  espiras.

$$A= L^2=(0,20\text{ m})^2= 0,040\text{ m}^2$$

$$\omega = \frac{2\pi(1500\text{ rpm})}{60} = 157,08\text{ rad/s}$$

$$\mathcal{E}_{máx.} = N\omega BA = 100(157,08)(2,00 \times 10^{-5})(0,040) = 0,012566\text{ V}$$

$$\mathcal{E}_{máx} = 12,6\text{ mV}$$

La resistencia de la espira valdrá:  $R=0,10\text{ }\Omega/\text{cm} \times (100 \times 4 \times 20,0)\text{ cm} = 800\text{ }\Omega$

$$I_{máx} = \frac{\mathcal{E}_{máx}}{R} = \frac{0,012566}{800} = 1,57 \times 10^{-5}\text{ A}$$

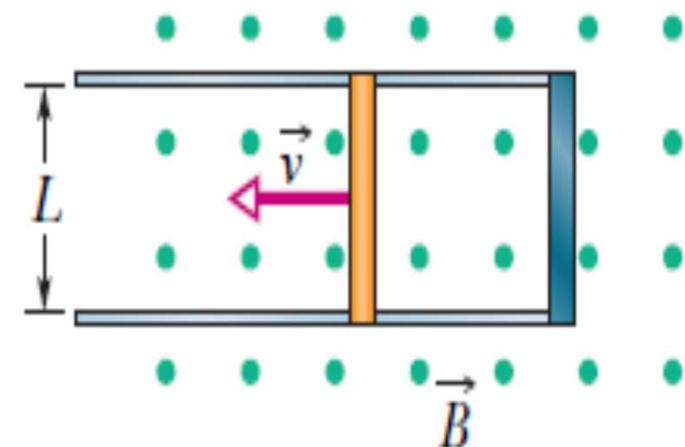
$$I_{máx} = 15,7\text{ }\mu\text{A}$$

$$\mathcal{P}_{dis.} = I^2 R = \frac{\mathcal{E}^2}{R} = \frac{(12,6 \times 10^{-3})^2}{800} = 1,97 \times 10^{-7}\text{ W}$$

## 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  $L = 10,8 \text{ cm}$ ,  $v = 4,86 \text{ m/s}$  y  $B = 1,18 \text{ T}$ .

- Halle la fem inducida en la barra.
- Calcule la corriente en la espira conductora. Suponga que la resistencia de la barra sea de  $415 \text{ m}\Omega$  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).



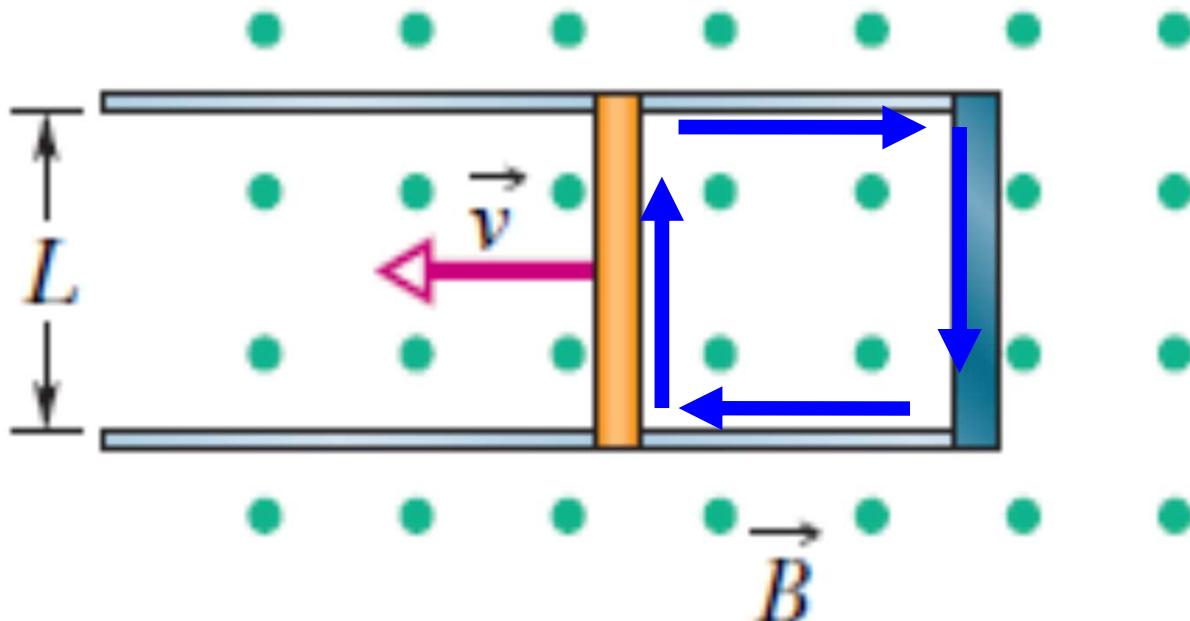
$$L=10,8 \text{ cm}, v = 4,86 \text{ m/s}, B = 1,18 \text{ T}, R = 415 \text{ m}\Omega$$

a)  $\varepsilon = BLv = (1,18)(0,108)(4,86) = 0,5826 \text{ V}$   **$\varepsilon = 0,583 \text{ V}$**

b)  $I = \varepsilon/R = 0,5826/0,415 = 1,3709 \text{ A}$   **$I = 1,37 \text{ A}$**

c)  $F = BIL = (1,18)(1,3709)(0,108) = 0,16552 \text{ N}$   **$F = 0,166 \text{ N}$**

## EJEMPLO: ejercicio 3.2.6



Supongo  $B$  saliente.  
El flujo magnético aumenta con el tiempo.  
Por lo que el  $B_{\text{inducido}}$  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:

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

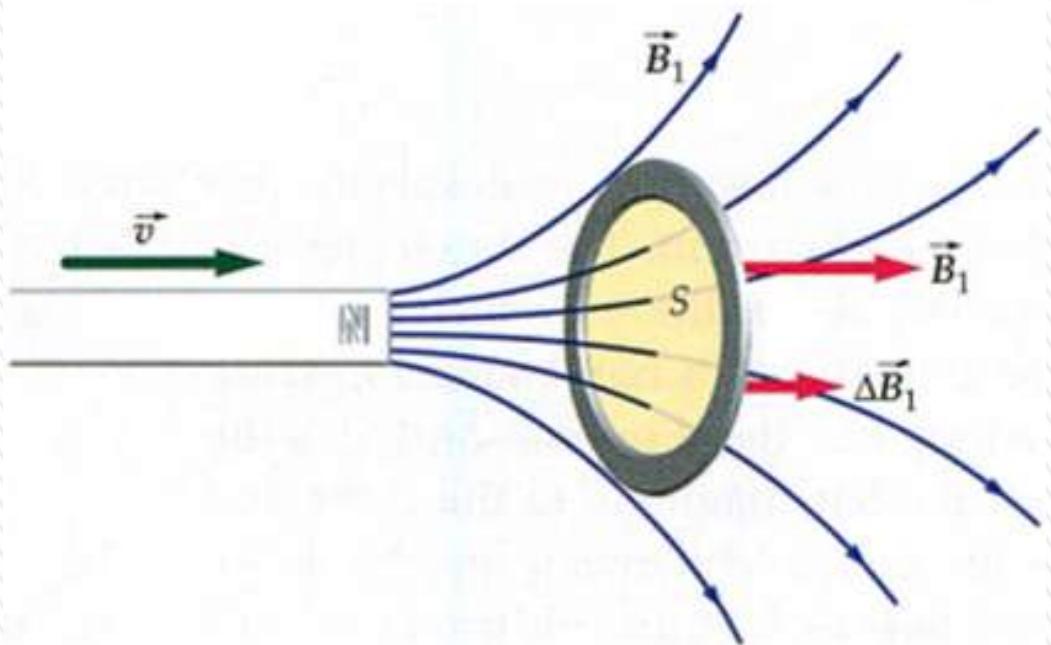
La velocidad que la fuerza realiza trabajo sobre la barra es la potencia entregada:

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

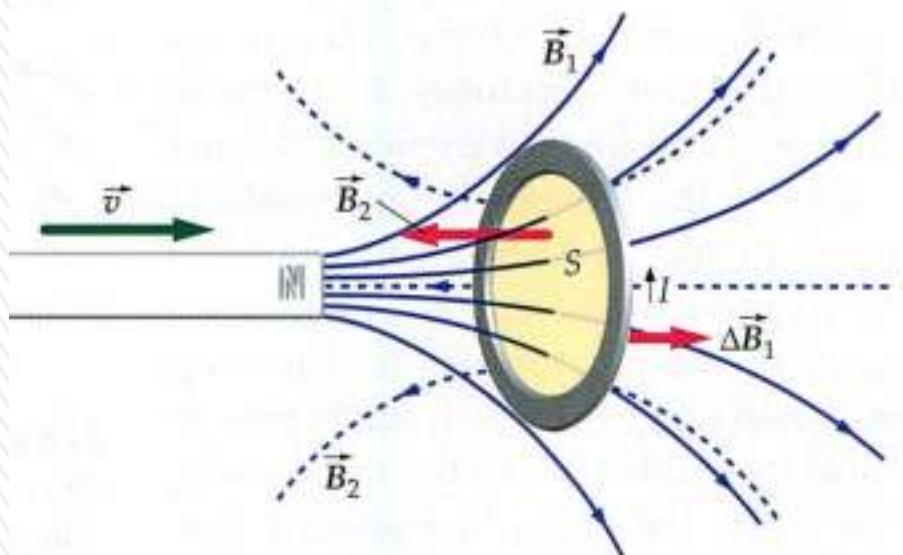
$$\mathcal{P}_{\text{dis.}} = \mathcal{P}_{\text{ent.}} = F \cdot v = (0,16552 \text{ N}) \left( 4,86 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) = 0,80443 \text{ W}$$

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

# QUICK QUIZ - CUESTIONARIO RÁPIDO



Se acerca el polo norte de un imán de barra hacia una espira.  
¿Cuál es el sentido de la corriente inducida?



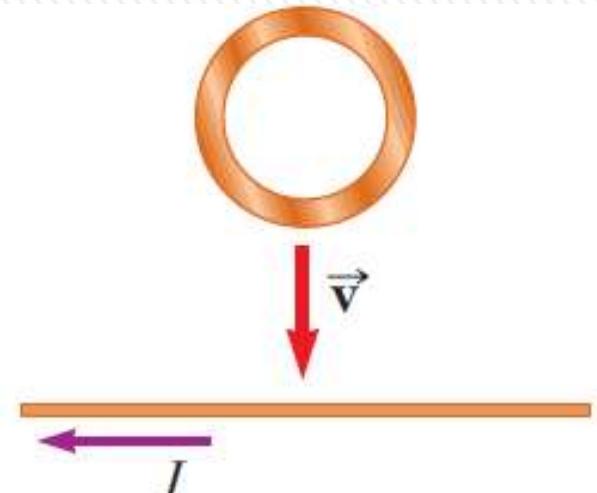
En sentido antihorario, como se muestra en la figura.  
El sentido de  $B_2$  inducido se debe oponer al de  $B_1$ , ya que el flujo magnético debido a éste va aumentando a medida que acerco el imán a la espira.



## QUICK QUIZ - CUESTIONARIO RÁPIDO

La figura muestra una espira redonda de alambre que cae hacia un alambre que conduce corriente hacia la izquierda. La dirección de la corriente inducida en la espira es:

- a) en sentido de las manecillas del reloj,
- b) opuesta a las manecillas del reloj,
- c) cero,
- d) imposible de determinar.

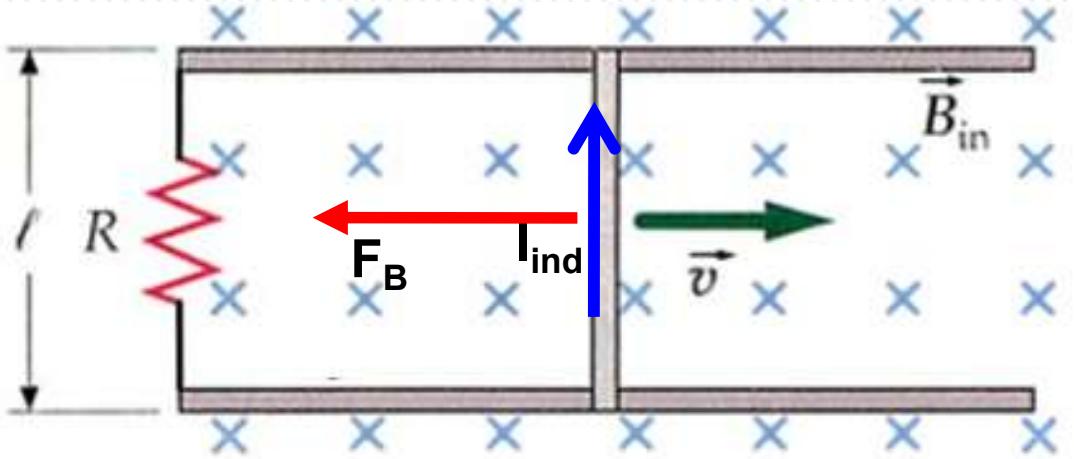


El campo magnético que crea el alambre crece a medida que se está más cerca del mismo, y en la región donde está la espira es entrante. Por tanto a medida que cae la espira, aumenta el flujo magnético entrante en la espira.

Por la ley de Lenz la corriente inducida se debe oponer a esto, por tanto debe producir un campo magnético saliente.

**El sentido de la corriente inducida en la espira debe tener sentido antihorario.**

# QUICK QUIZ - CUESTIONARIO RÁPIDO



Hay un campo magnético uniforme entrante a la pantalla, y la barra se desplaza hacia la derecha con rapidez  $v$ .

¿Cuál es el sentido de la corriente inducida por la barra?

En la barra es de abajo hacia arriba.

En la espira cerrada con  $R$ , la corriente inducida se mueve en sentido antihorario.

Genera una fuerza magnética que se opone al movimiento de la barra.

