7-FUENTES DE CAMPOS MAGNÉTICOS E INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

Hans Christian ØRSTED (1777-1851)

Jean Baptiste BIOT (1774-1862)

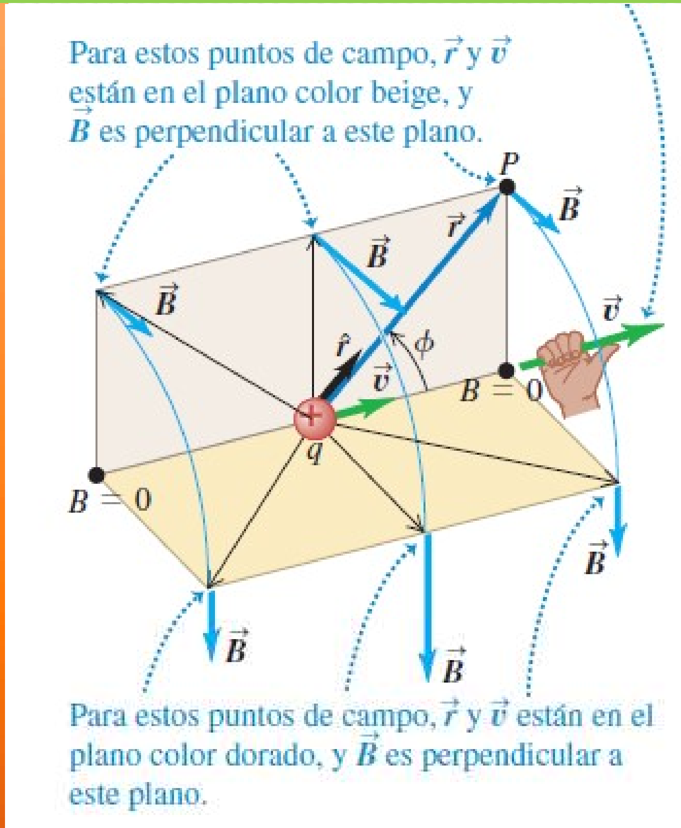
Felix SAVART (1791-1841)

Andrè-Marie AMPÈRE (1775-1836)

Michael FARADAY (1791-1867)

Heinrich LENZ (1804-1865)

Campo magnético de una carga en movimiento



Carga q en movimiento (punto fuente)

P: punto de campo o de observación

Los experimentos muestran que el campo magnético B, creado por una carga puntual q que se mueve con una velocidad v constante está dada por la siguiente expresión:

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

$\mu_0/4\pi$ una constante de proporcionalidad

μ_0 **permeabilidad del vacío**, valor en el S.I. es:

$\mu_0 = 4\pi\times10^{-7}$ T.m/A

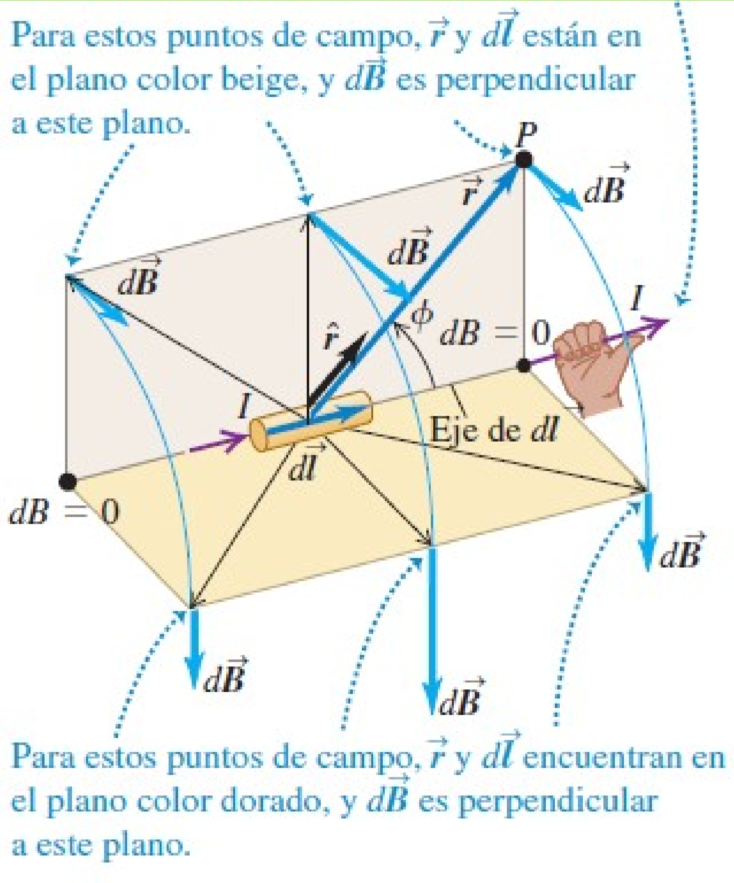
$\overline{r}$ vector que va desde el punto fuente al punto del campo P

$\hat{r} = \dfrac{\overline{r}}{r}$ es un versor de **r** (vector unitario) Φ ángulo que forman los vectores **r** y **v**.

B no es un campo central (según la dirección de **r**) sino que es perpendicular al plano que determinan **r** y **v**.

Para una carga puntual que se mueve con una cierta velocidad ***v***, las líneas de campo magnético son *círculos con centro en la línea que pasa por q determinada por* ***v*** *y que se* encuentran en planos perpendiculares a esta línea.

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



También hay un principio de superposición de campos magnéticos: **el campo magnético total generado por varias cargas en movimiento es la suma vectorial de los campos generados por las cargas individuales.**

Campo magnético *dB* generado por segmento *d**l*** de conductor que transporta corriente I, *área de la sección del conductor A y n partículas cargadas en movimiento por unidad de volumen, c/u* con carga *q*. *Carga total* ***dQ=nqAdl*** que viaja con velocidad $\boldsymbol{v_d}$. *(Los campos magnéticos* debidos a los movimientos *al azar de las cargas, en promedio, se cancelarán en* cada punto)

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{|dQ|\, v_d \sin\phi}{r^2} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{n|q|A\, dl\, v_d \sin\phi}{r^2}$$

Pero, la corriente *I* es: $(n|q|v_d)A = I$

Por lo que podemos escribir: $dB = \dfrac{\mu_0}{4\pi}\dfrac{I dl \sin\phi}{r^2}$

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

dl vector de longitud *dl, con dirección y sentido de la corriente en el* conductor

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

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

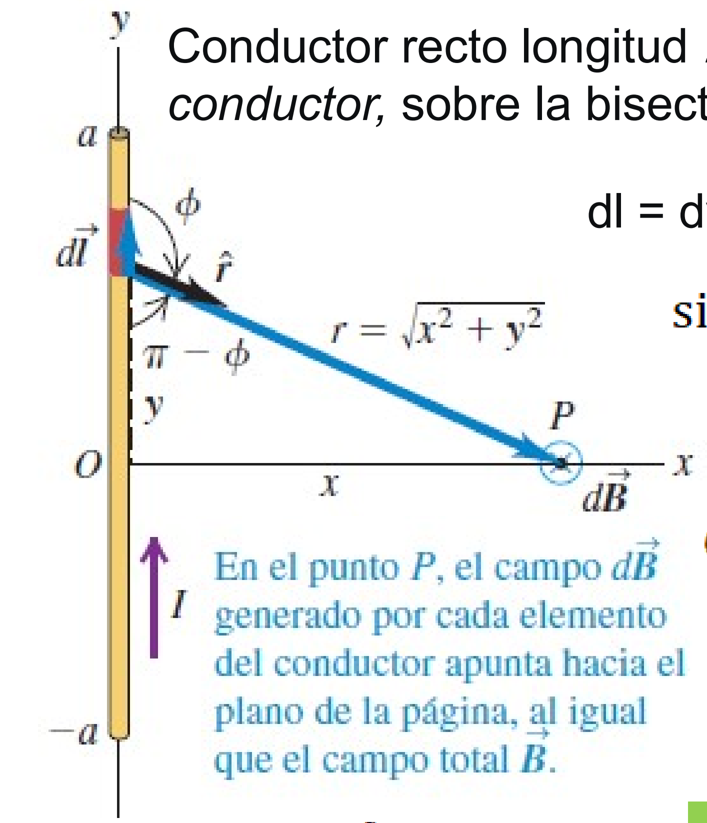
$$d\overline{\boldsymbol{B}} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{Id\overline{\boldsymbol{l}}\times\hat{\boldsymbol{r}}}{r^2}$$

Campo magnético total en cualquier punto del espacio debido a la corriente en un circuito completo, se integra la ecuación con respecto a todos los segmentos que conduzcan corriente:

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

Ley de Biot y Savart: J.B.Biot (1774-1862) y F. Savart (1791-1841) que llegaron a esta expresión que da el valor del campo magnético en algún punto del espacio, en función de la corriente que lo produce.

Campo magnético de un conductor recto que transporta corriente



Conductor recto longitud *2a con* corriente *I, campo en punto a distancia x del conductor,* sobre la bisectriz perpendicular.

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

dl = dy $\quad r = \sqrt{x^2 + y^2}$

$$\sin\phi = \sin(\pi - \phi) = \frac{x}{r} = \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}}$$

Por la regla de la mano derecha se tiene que

$d\bar{\mathbf{l}} \times \hat{\mathbf{r}}$ es perpendicular y entrante al plano de la figura

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{Idy}{x^2 + y^2}\frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{xIdy}{(x^2 + y^2)^{\frac{3}{2}}}$$

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

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

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

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

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

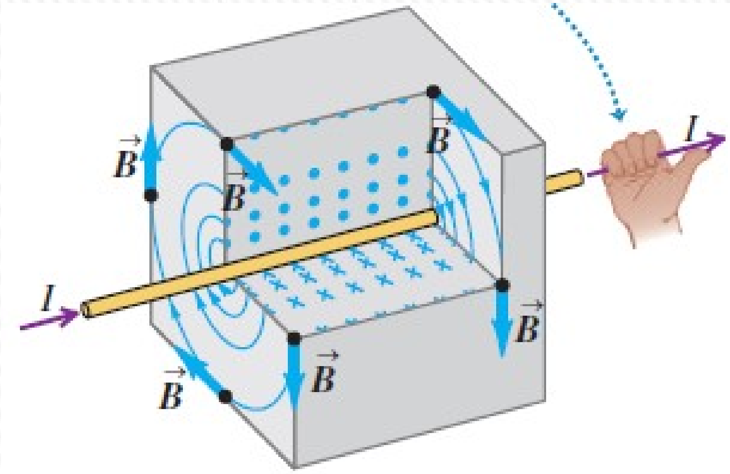
Si a→∞ hay simetría respecto al eje *y, B* tiene la misma *magnitud en todos los puntos de un círculo de radio r con centro en el conductor* y que se encuentre en un plano perpendicular a él, y la *dirección de debe ser* tangente en cualquier parte del círculo.

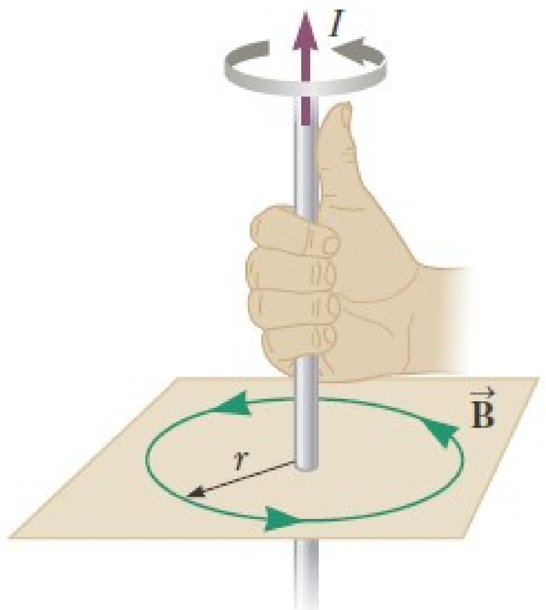
Campo magnético de un conductor recto que transporta corriente

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

Campo cerca de un conductor largo y recto portador de corriente

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

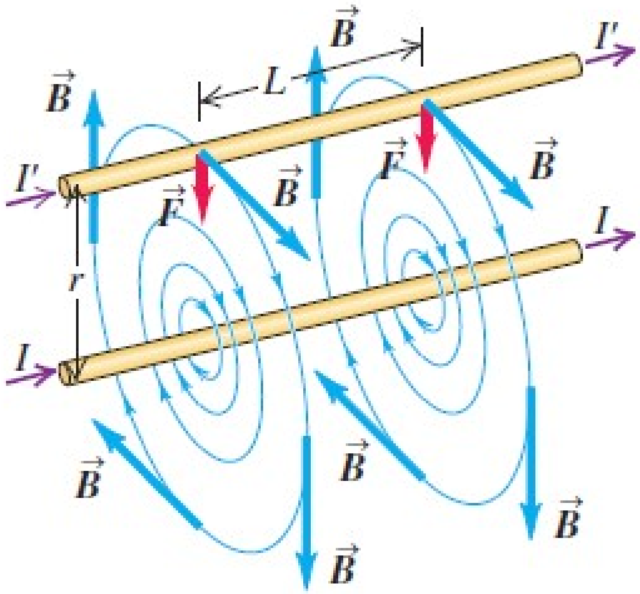




Las líneas de campo magnético son circunferencias concéntricas al alambre.
El sentido del campo está dado por la regla de la mano derecha, como se muestra en la figura.

ATENCIÓN:
Si bien este resultado es exacto sólo si la longitud del alambre es infinito, se puede usar como 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.

Fuerza entre dos conductores paralelos



Dos conductores largos, rectos y paralelos separados una distancia *r con corrientes I e I' en el* mismo sentido.

Cada conductor se encuentra en el campo magnético producido por el otro, por lo que cada uno experimenta una fuerza.

El conductor inferior produce un campo en la posición del conductor de arriba dado por: $B(r) = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$

Un segmento L del conductor superior experimenta una fuerza dada por: F=BI'L

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

La fuerza por unidad de longitud (F/L) vale: $$\frac{F}{L} = \frac{\mu_0 I I'}{2\pi r}$$

Regla de la mano derecha: fuerza sobre conductor superior dirigida *hacia abajo (atraída hacia el inferior).*

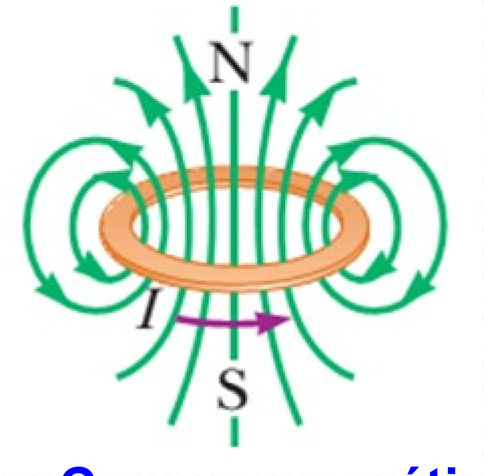
La corriente en el conductor *superior también origina un campo en la posición del inferior, operando en forma similar, se puede ver* que la fuerza sobre el conductor inferior va *hacia arriba, y tiene igual magnitud de F/L.*

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

Campos magnéticos de una espira circular de corriente y de un solenoide

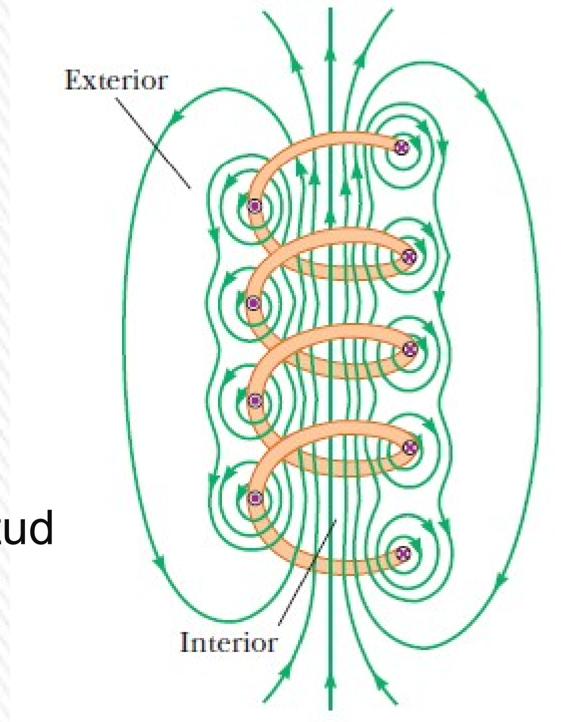
Campo magnético sobre el eje, a una distancia *x* de una espira de radio *a* por el que circula una corriente *I*

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



El campo en el centro (x=0) vale:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2a}$$



Campo magnético creado por un solenoide

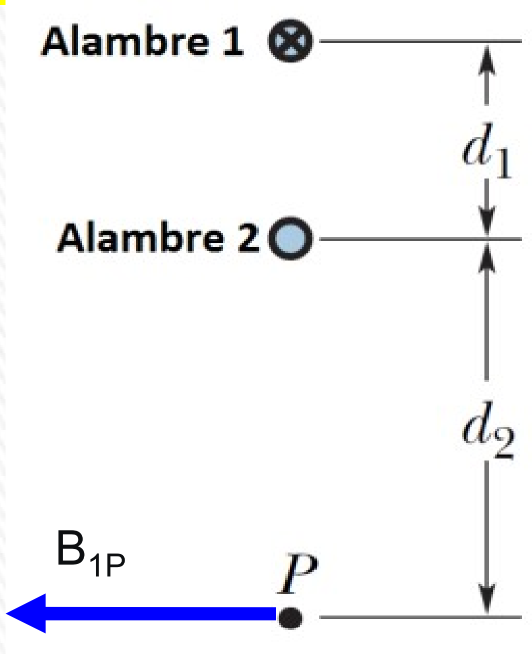
Solenoide: alambre largo enrollado en forma de hélice.
Se produce un campo magnético bastante uniforme en el i*nterior del solenoide cuando lleva una corriente.*
Para un solenoide largo, con n espiras por unidad de longitud se puede utilizar la siguiente aproximación.
En el interior el campo es uniforme y vale:

$$B = \mu_0 n I = \mu_0 \frac{N}{L} I$$

Y en el exterior: B=0.

EJEMPLO: ejercicio 3.2.2

3.2.2- Dos alambres paralelos rectos y largos perpendiculares al plano de la página están separados por una distancia d_1 = 7,50 cm. El alambre 1 conduce una corriente entrante I_1 = 6,50 A. ¿Cuál debe ser la corriente (magnitud y sentido) en el alambre 2, para que el campo magnético resultante en el punto *P* , situado a una distancia d_2 = 15,0 cm, sea cero?



Considero el campo (B_{1P}) que crea el alambre 1 en P.

Entonces el campo (B_{2P}) que debe crear el alambre 2 en P debe tener la misma magnitud y sentido contrario: $B_{1P} = B_{2P}$

Por tanto la corriente por el alambre 2 debe ser saliente (sentido contrario a la del alambre 1).

$$B_{1P} = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi r_1} = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi(d_1 + d_2)} \qquad B_{2P} = \frac{\mu_0 I_2}{2\pi r_2} = \frac{\mu_0 I_2}{2\pi d_2} \qquad \frac{\mu_0 I_1}{2\pi(d_1 + d_2)} = \frac{\mu_0 I_2}{2\pi d_2}$$

$$\frac{I_1}{d_1 + d_2} = \frac{I_2}{d_2} \qquad I_2 = \frac{d_2}{d_1 + d_2} I_1 \qquad I_2 = \frac{15,0}{7,50 + 15,0} 6,50 = 4,33\ A$$

I_2= 4,33 A saliente

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.

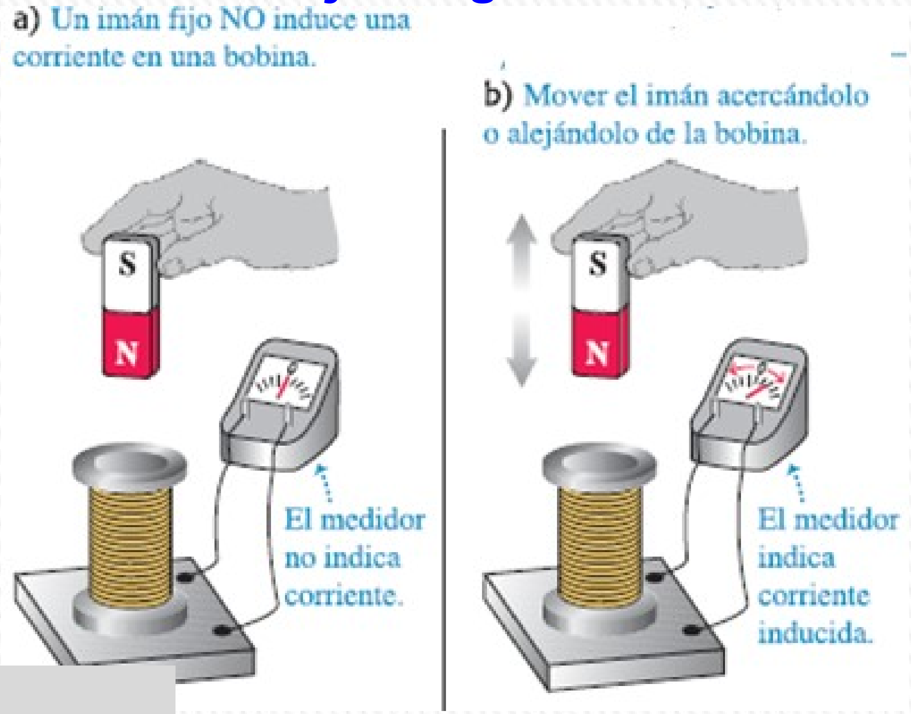
Pero, **¿cómo se realiza esta conversión de la energía?**

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 experimento 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.**



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 a través de la* bobina.**

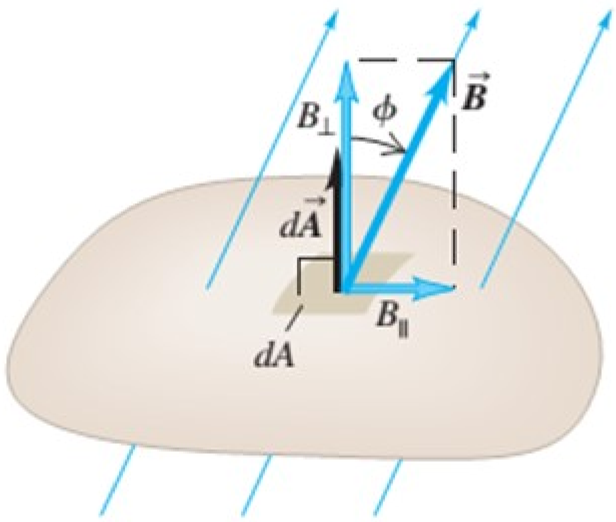
Las **fem inducidas magnéticamente** son el resultado de la **acción de fuerzas *no electrostáticas***.

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:

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

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

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:

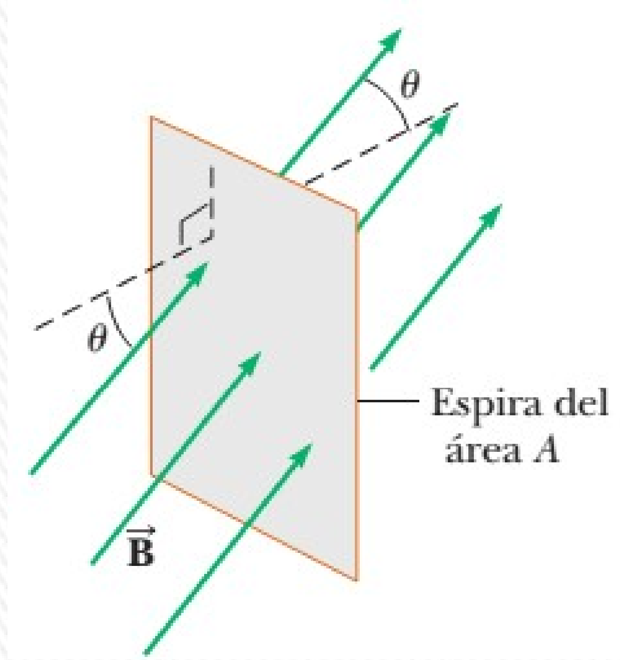
La fem inducida (ε) en un circuito es igual a menos la derivada respecto al tiempo del flujo magnético (ΦB) a través del circuito (es decir al negativo de la velocidad con que cambia con el tiempo el flujo magnético).
La fem inducida en una espira cerrada es igual al negativo de la tasa de cambio del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

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

LEY DE FARADAY

Si tengo una 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:

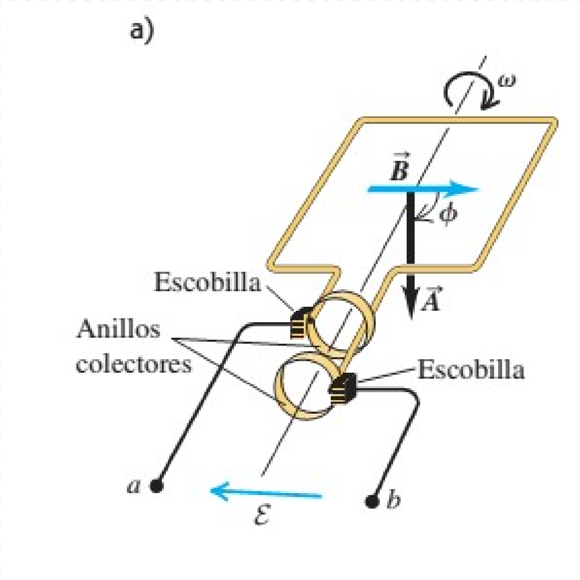
$$\varepsilon = -\frac{d}{dt}(BA\cos\phi)$$

Entonces… ¿cómo se puede generar una fem?

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

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.

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



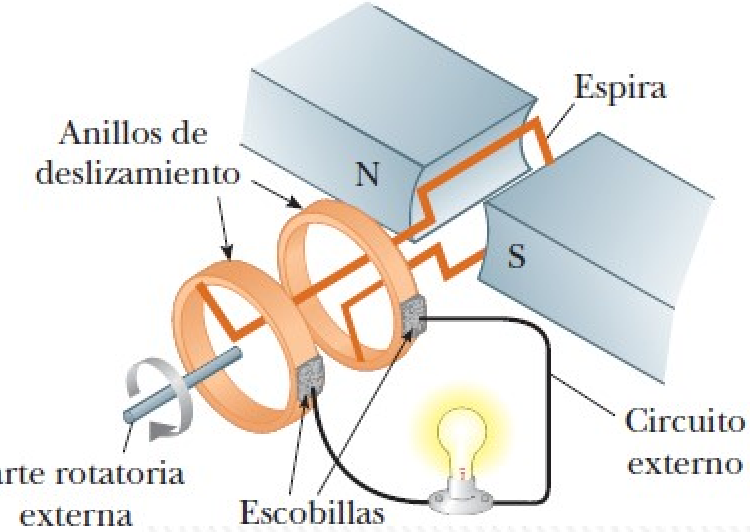
GENERADOR DE CORRIENTE ALTERNA

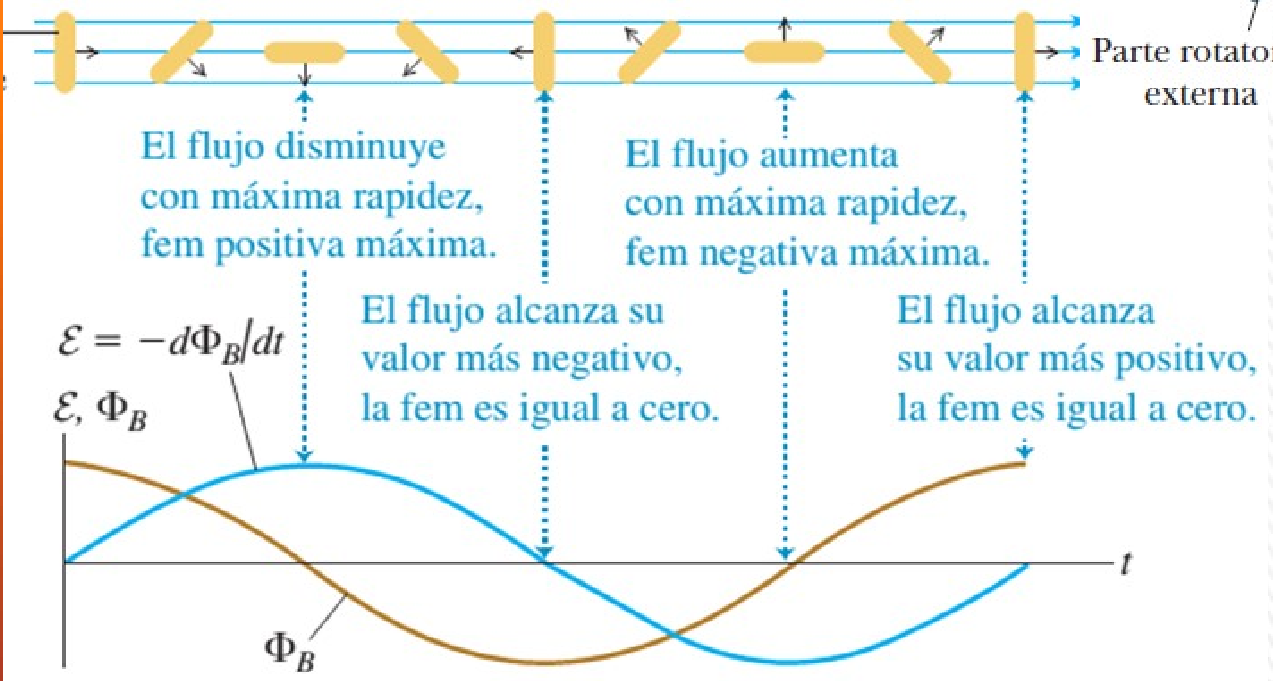
Versión sencilla de un ***alternador***, un dispositivo que genera una fem.

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

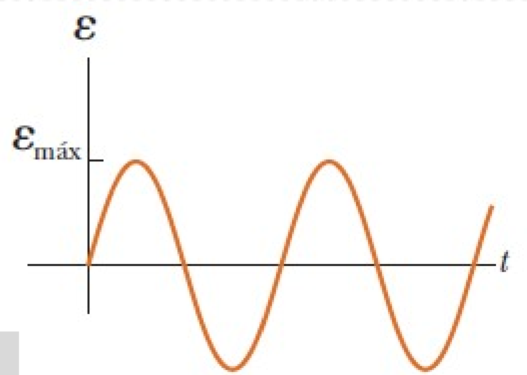
$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -\frac{d}{dt}(BA\cos\omega t) = \omega BA\sin\omega t$$

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





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

Ley de Lenz

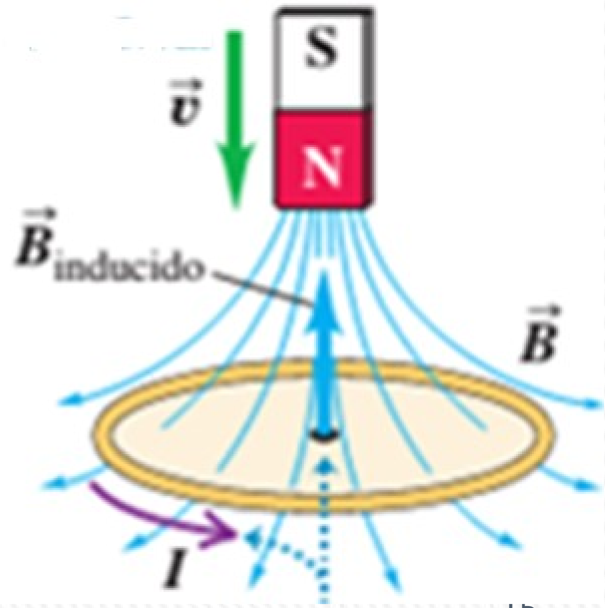
Ley de Lenz: Método alternativo conveniente para **determinar el sentido de una corriente o una fem inducidas**.

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.

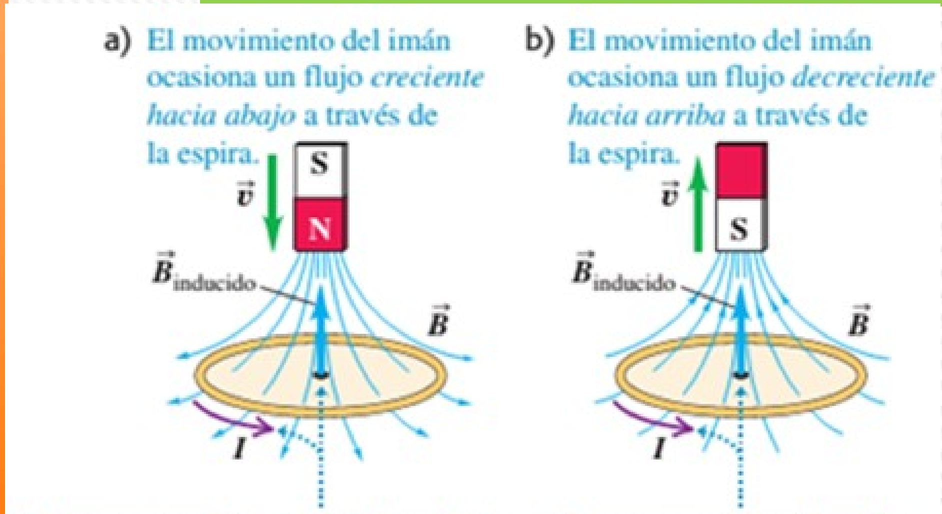
La dirección de cualquier efecto de la inducción magnética es la que se opone a la causa del efecto.

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

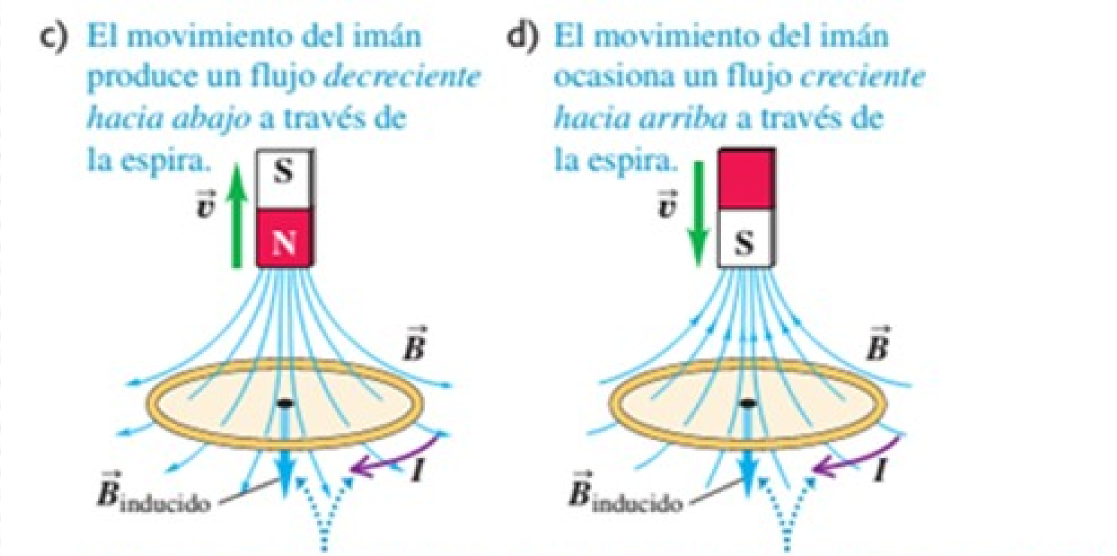
Se relaciona directamente con la conservación de la energía.



Ley de Lenz

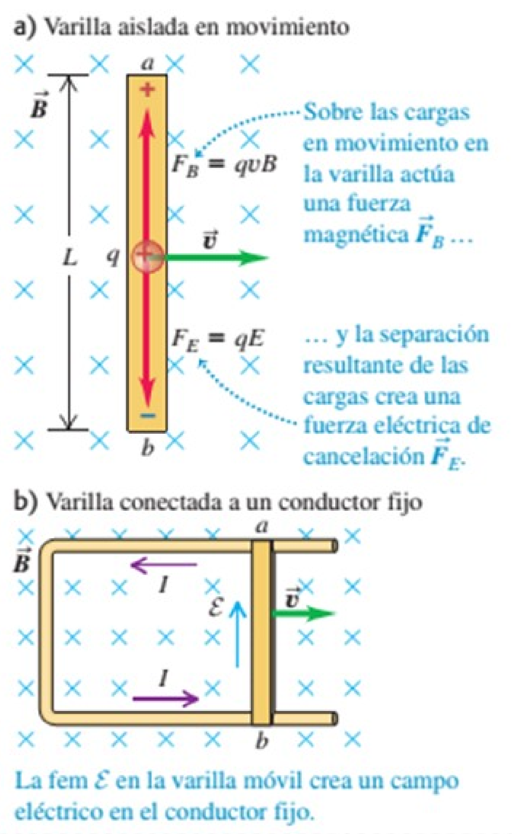


El campo magnético inducido es *hacia arriba* para oponerse al cambio del flujo. Para producir el campo inducido, la corriente inducida debe ir *en sentido antihorario*, vista desde arriba de la espira.



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



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.

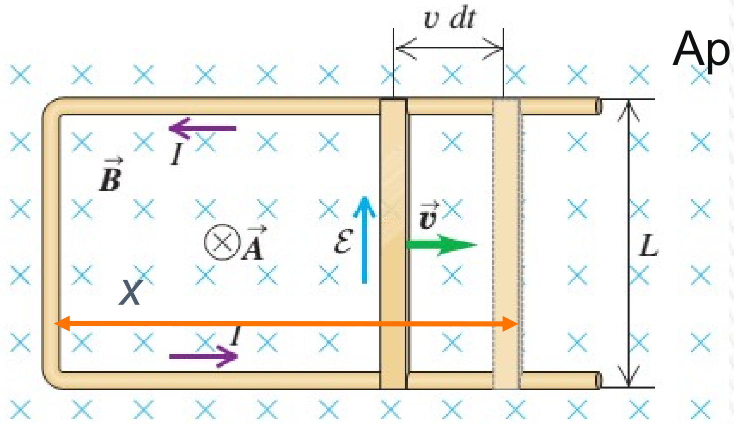
$$V_{ab} = V_a - V_b = E.L = vBL$$

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

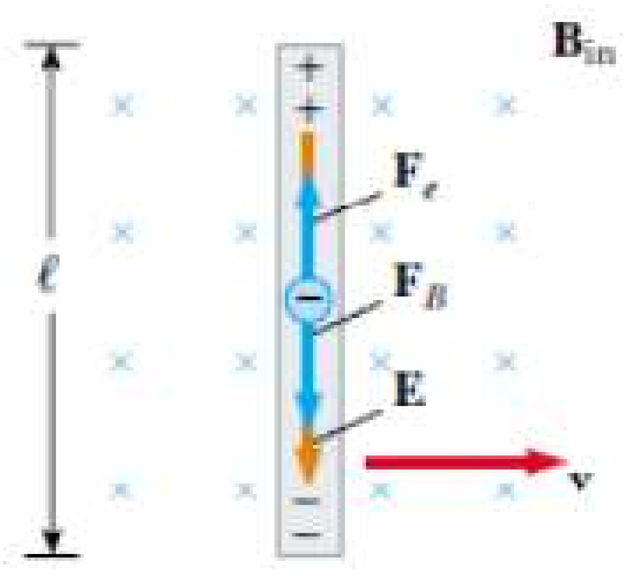


Aplicando directamente la ley de Faraday:

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

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.

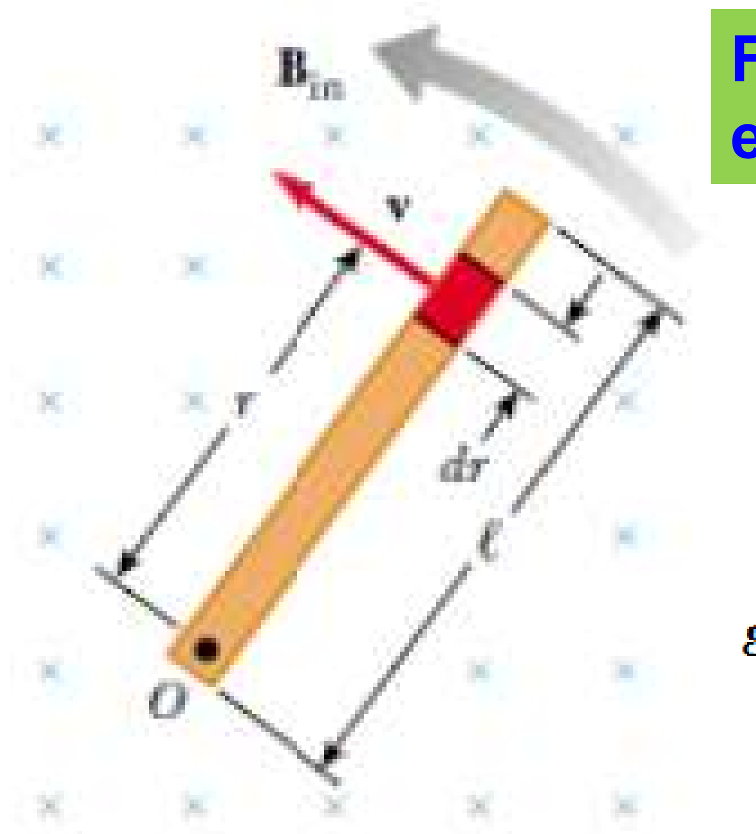


Barra conductora: longitud *l*, velocidad *v* a través campo magnético B (B y *v perpendiculares)*.
Se induce en los extremos de la barra una fem igual a:

$\varepsilon = Blv$

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

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

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

$$d\varepsilon = Bvdr = B\omega r dr$$

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

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

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