

BASES DE LA LEY DE FARADAY Y LEY DE LENZ.

En 1831 Michael Faraday descubrió las corrientes inducidas al realizar experimentos con una bobina y un imán.

- De acuerdo con los experimentos realizados por Faraday podemos decir que:
- 1.- Las corrientes inducidas son aquellas producidas cuando se mueve un conductor en sentido transversal a las líneas de flujo de un campo magnético.
- 2.- La inducción electromagnética es el fenómeno que da origen a la producción de una fuerza electromotriz (fem) y de una corriente eléctrica inducida, como resultado de la variación del flujo magnético debido al movimiento relativo entre un conductor y un campo magnético.

- En la actualidad casi toda la energía que se consume en nuestros hogares y en la industria se **obtiene gracias al fenómeno de inducción electromagnética**. Por todo el mundo existen generadores movidos por **agua, vapor, petróleo o energía atómica**, en los cuales enormes bobinas giran entre los polos de potentes imanes y generan grandes cantidades de energía eléctrica.

- Los fenómenos de inducción electromagnética tienen una aplicación práctica invaluable, pues en ellos se fundan los dinamos y los alternadores que transforman la energía mecánica en eléctrica, así como los transformadores, los circuitos radioeléctricos y otros dispositivos de transmisión de energía eléctrica de un circuito a otro.

Enunciado de la Ley de Faraday.

- Con base en sus experimentos, Faraday enunció la ley del Electromagnetismo: la fem inducida en un circuito formado por un conductor o una bobina es directamente proporcional al número de líneas de fuerza magnética cortadas en un segundo. En otras palabras: la fem inducida en un circuito es directamente proporcional a la rapidez con que cambia el flujo magnético que envuelve.

- La ley anterior, en términos de la corriente inducida, se expresa de la siguiente manera: la intensidad de la corriente inducida en un circuito es directamente proporcional a la rapidez con que cambia el flujo magnético.
- La Ley de Faraday se expresa matemáticamente como: $\varepsilon = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$

O bien $\varepsilon = - \frac{\Phi_f - \Phi_i}{t}$

- Donde ε = fem media inducida en volts (V)
- Φ_f = flujo magnético final en webers (wb)
- Φ_i = flujo magnético innicial en webers (wb)
- t = tiempo en que se realiza la variación del flujo magnético medido en segundos (seg).
- El signo negativo (-) de la ecuación se debe a la oposición existente entre la fem inducida y la variación del flujo que la produce (Ley de Lenz).

- Cuando se trata de una bobina que tiene N número de vueltas o espiras, la expresión matemática para calcular la fem inducida será:
- $\epsilon = -N \frac{\Phi_f - \Phi_i}{t}$

Al calcular la fem inducida en un conductor recto de longitud L que se desplaza con una velocidad v en forma perpendicular a un campo de inducción magnética B se utiliza la expresión:

$$\epsilon = BLv$$

ENUNCIADO DE LA LEY DE LENZ.

- El físico ruso Heinrich Lenz (1804-1865) enunció una Ley sobre inducción magnética que lleva su nombre: **siempre que se induce una fem, la corriente inducida tiene un sentido tal que tiende a oponerse a la causa que lo produce.**
-

- De acuerdo con la Ley de Lenz, el sentido de la corriente inducida es contrario al de la corriente requerida para provocar el movimiento del campo magnético que la ha engendrado. Para comprender mejor esta Ley observemos la figura siguiente en (a) cuando el polo norte del imán se acerca a la bobina, la corriente inducida representada por la letra i tiene el sentido señalado por las flechas; de tal manera que, de acuerdo con la regla de la mano izquierda, los polos norte de la bobina y del imán se encuentran juntos.

- Como los polos del mismo nombre se rechazan, el polo norte de la bobina presenta una oposición al movimiento de aproximación del inductor, es decir del imán. En (b) si el imán se aleja, cambia el sentido de la corriente i en la bobina, por lo tanto el extremo del polo norte, ahora será el polo sur que atrae al polo norte del imán y se opone a su alejamiento. En estas condiciones podríamos expresar la Ley de Lenz en los siguientes términos:

- La corriente inducida en la bobina, es tal que el campo magnético producido por ella se opone al campo magnético del imán que la genera. Es evidente que el sentido de la fem y el de la corriente inducida es el mismo, pues apoya el principio de la conservación de la energía.

- Veamos: la corriente inducida en el circuito genera un campo magnético que de acuerdo con la Ley de Lenz se opone a la variación del flujo magnético, porque de no ser así el campo magnético de la corriente inducida aumentaría la variación del flujo magnético y produciría una corriente mayor. Ello implicaría un aumento desproporcional de la corriente con la simple producción de una insignificante variación inicial de las líneas del flujo magnético; de tal modo se obtendría energía eléctrica de manera ilimitada, lo cual es imposible.

INDUCCIÓN

1. Ley de inducción de Faraday. Ley de Lenz.
2. Ejemplos: fem de movimiento y por variación temporal de B.
3. Autoinductancia.
4. Energía magnética.

Bibliografía

-Tipler. "Física". Cap. 28. Reverté.

-Serway. "Física". Cap. 31. McGraw-Hill.

INDUCCIÓN

Sabemos que

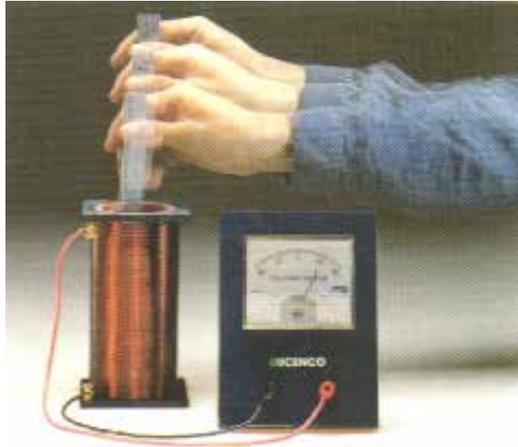
Espira de corriente + campo magnético \Rightarrow torque

Pero será que

Torque + campo magnetico \Rightarrow corriente?

1. Introducción

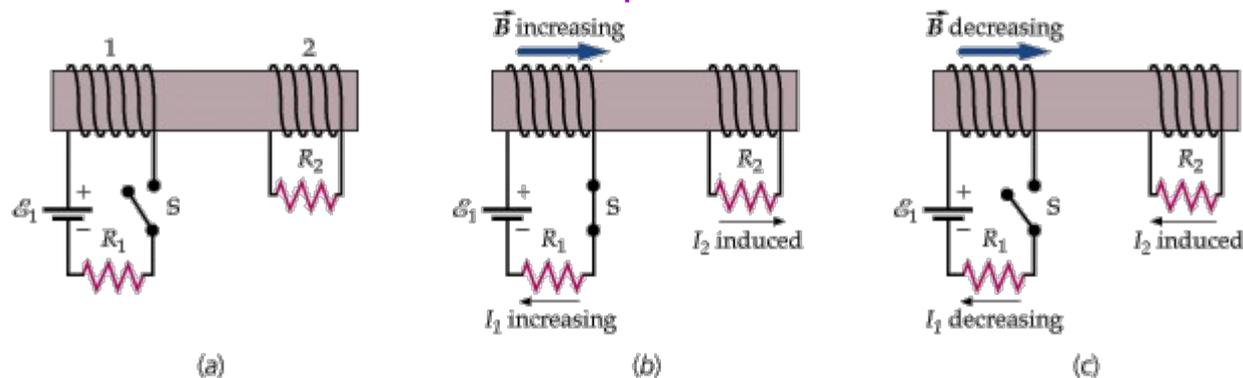
Experimento 1



En torno 1830, Faraday en Inglaterra y J. Henry en U.S.A., descubrieron de forma independiente, que un campo magnético induce una corriente en un conductor, siempre que el campo magnético sea variable.

Experimento 2

Variación de corriente \Rightarrow inducción



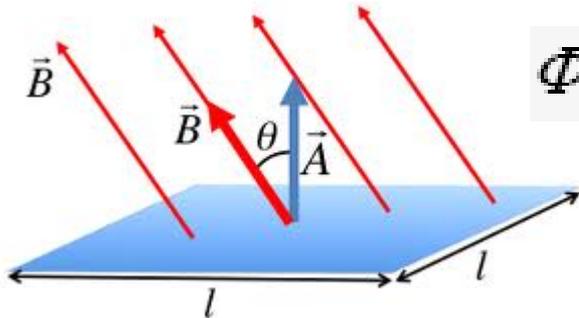
Qué es el Flujo Magnético?

Magnetic flux = $\Phi = B A$

Magnetic field

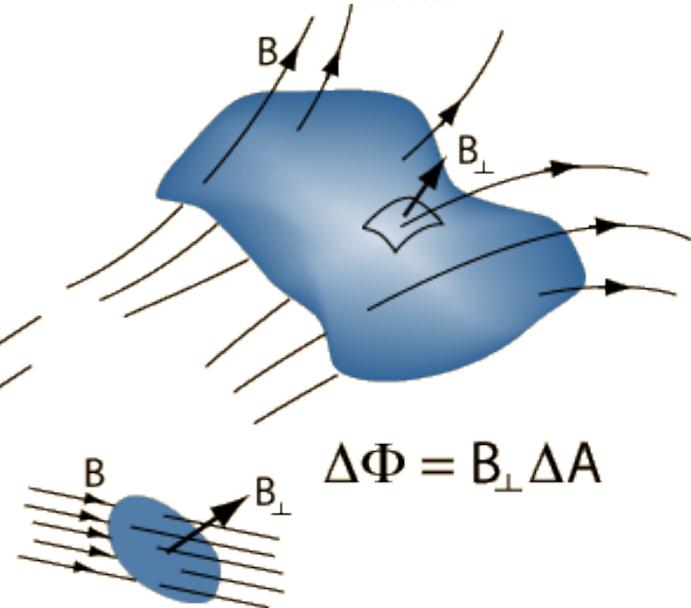
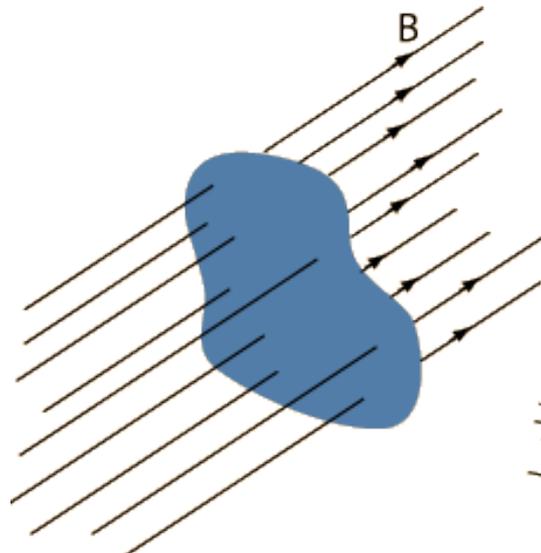
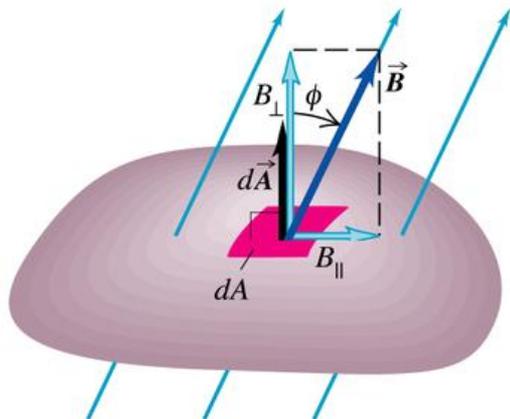
Area perpendicular to magnetic field B

$[\Phi] = \text{Weber} = \text{Wb} = \text{T}\cdot\text{m}^2$



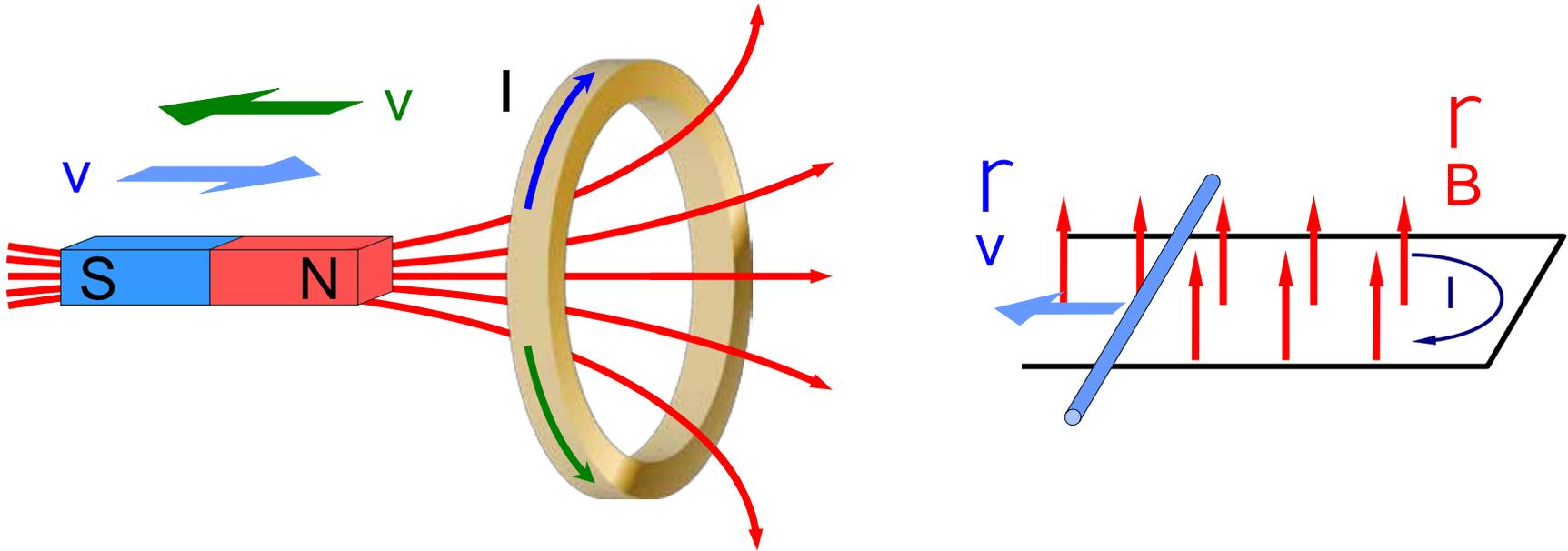
$\Phi = BA \cos \theta$

$\Phi_m = \iint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S},$



$\Delta\Phi = B_{\perp} \Delta A$

2. LEY DE FARADAY-LENZ.



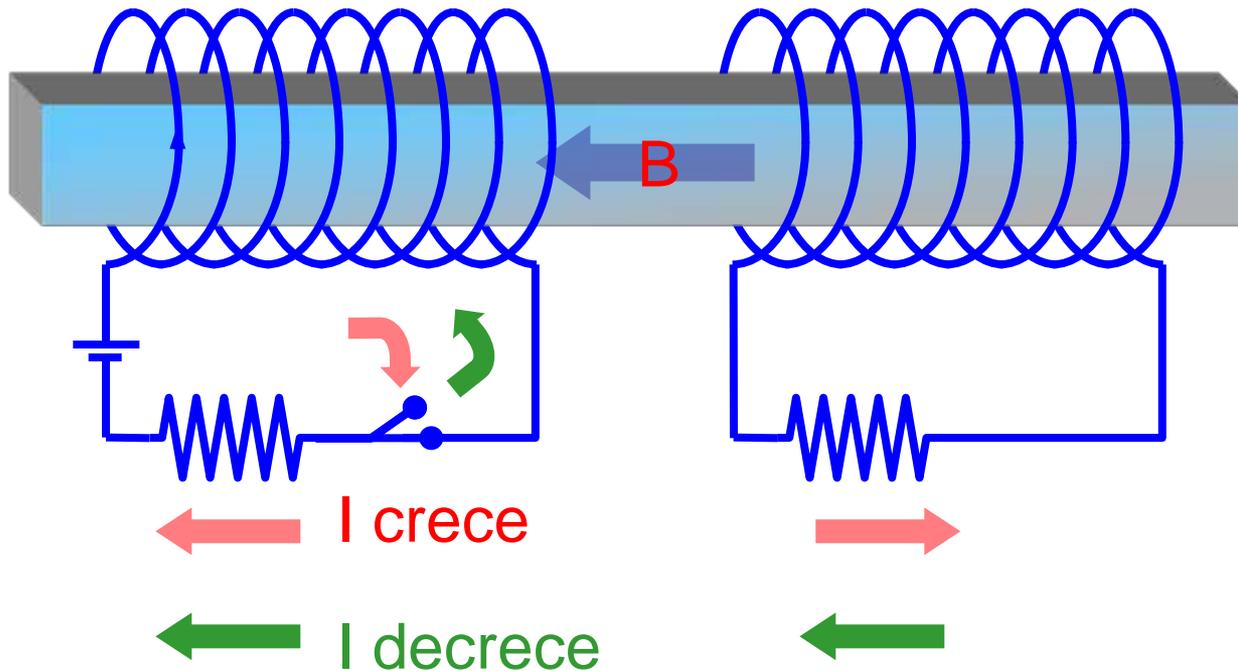
$$e = - \frac{dF}{dt}$$

La fuerza electromotriz inducida en un circuito, es directamente proporcional a la rapidez con que varía el flujo magnético a través del circuito y sentido contrario.

Un flujo variable produce una fem inducida en una espira. Como esta fem es el trabajo realizado por unidad de carga, esta fuerza por unidad de carga es el campo eléctrico inducido por el flujo variable. La integral de línea de este campo eléctrico alrededor de un circuito completo será el trabajo realizado por unidad de carga, que coincide con la fem del circuito.

$$e = \oint_c \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{dF_m}{dt}$$

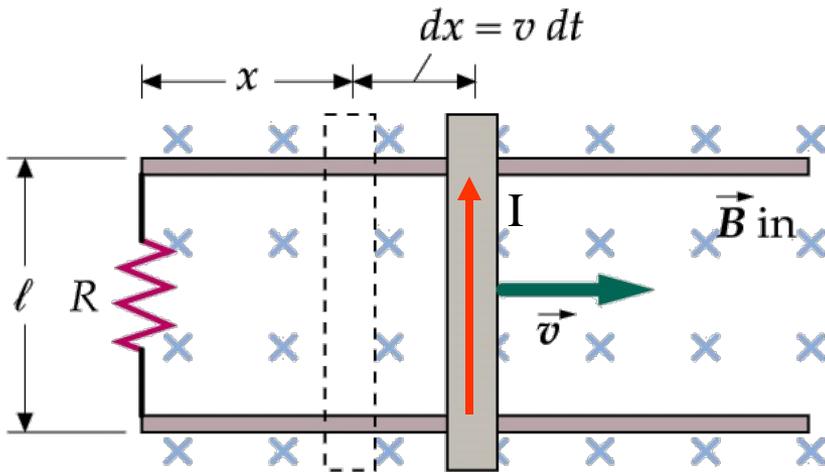
$$F = \oint_s \vec{B} \times d\vec{S}$$



La corriente inducida posee un sentido tal, que tiende a oponerse a la causa que la produce.

Fuerza electromotriz debida al movimiento.

Supongamos una varilla conductora que se desliza a lo largo de dos conductores que están unidos a una resistencia. El flujo magnético varía porque el área que encierra el circuito también lo hace.



$$F = B \cdot A = B l x$$

$$\frac{dF}{dt} = B l \frac{dx}{dt} = B l v \quad \text{Como} \quad e = - \frac{dF_m}{dt}$$

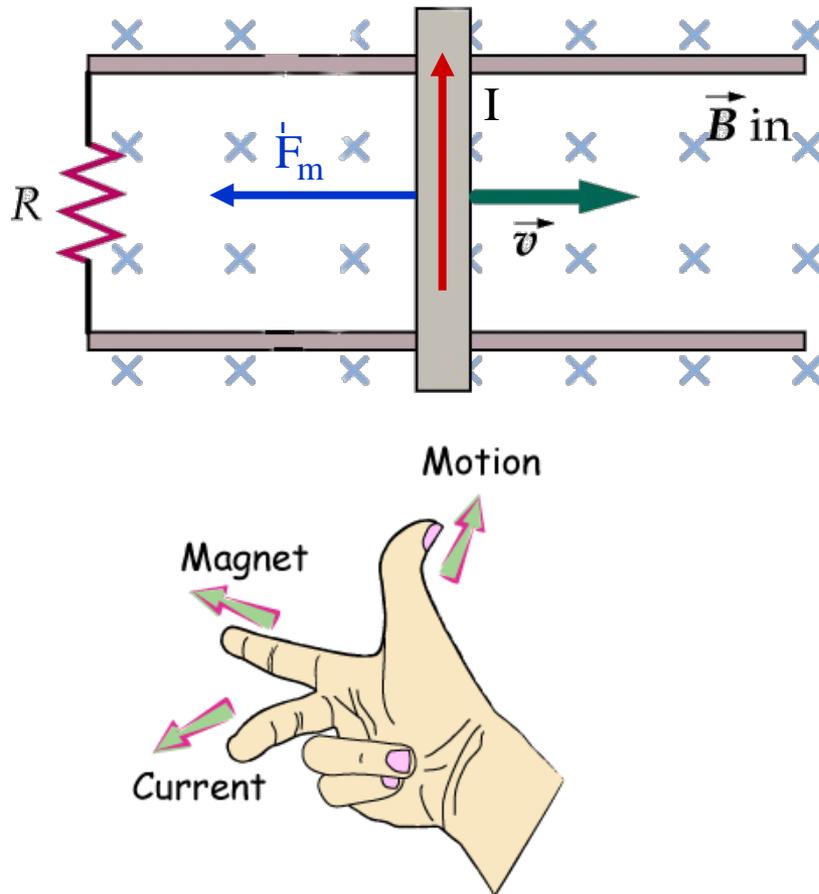
El módulo de la fem inducida será

$$|e| = B l v$$

Fem de movimiento es toda fem inducida por el movimiento relativo de un campo magnético y un segmento de corriente.

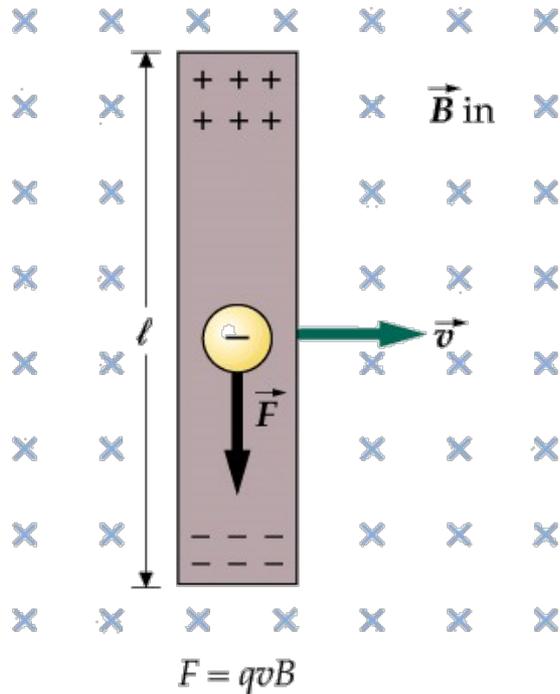
¿Cuál es el efecto de la aparición de esta corriente inducida?

El campo magnético ejerce una fuerza magnética sobre la varilla que se opone al movimiento



El resultado es que si impulsamos la varilla con una cierta velocidad hacia la derecha y luego se deja en libertad, la fuerza magnética que aparece sobre la varilla tiende a frenarla hasta detenerla. Para mantener la velocidad constante de la varilla, un agente externo debe ejercer una fuerza igual y opuesta a la fuerza magnética.

Otra forma: Fem de movimiento para un circuito abierto (Varilla aislada)



La fem se induce en una barra o en un alambre conductor que se mueve en el seno de un campo magnético incluso cuando el circuito está abierto y no existe corriente.

$$\text{Equilibrio} \implies F_m = F_e \implies v B = E$$

La diferencia de potencial a través de la barra será

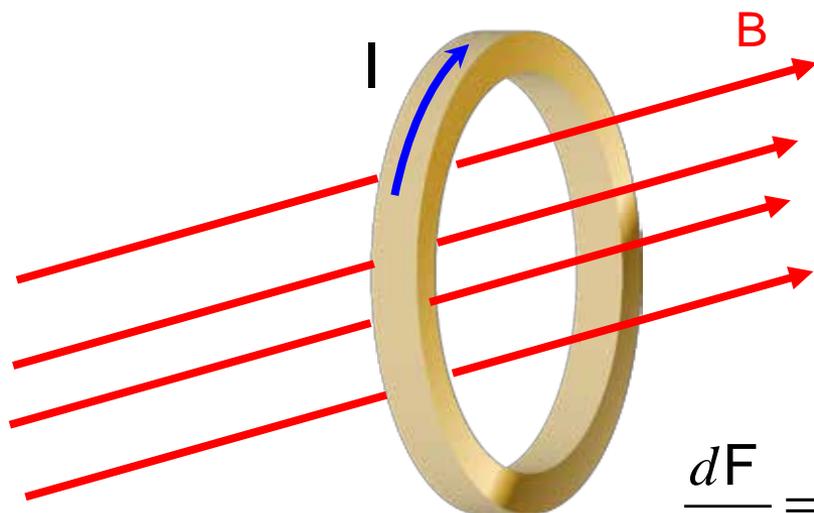
$$DV = El = Blv$$



$$|e| = Blv$$

Fuerza electromotriz debida la variación de B.

Campo magnético variable con el tiempo $B=B_0.t$ que forma un ángulo q con la normal a la espira



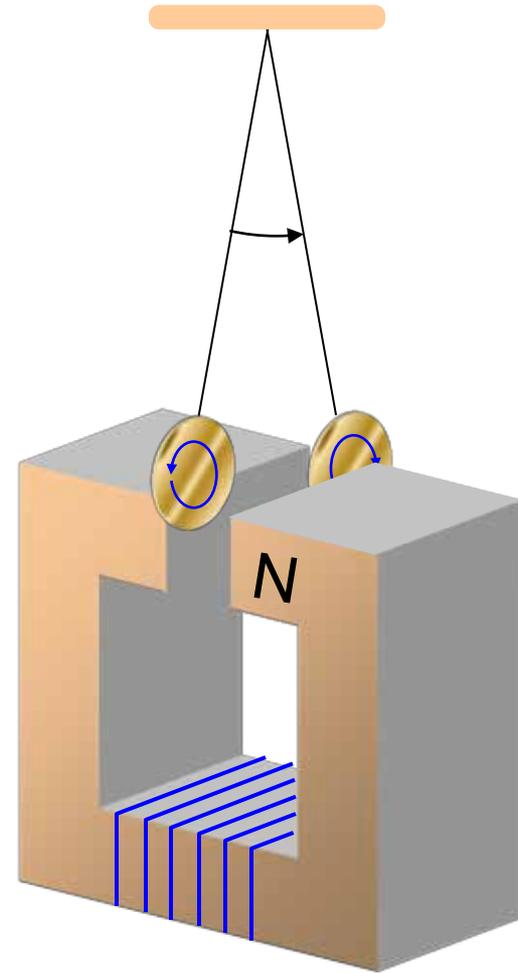
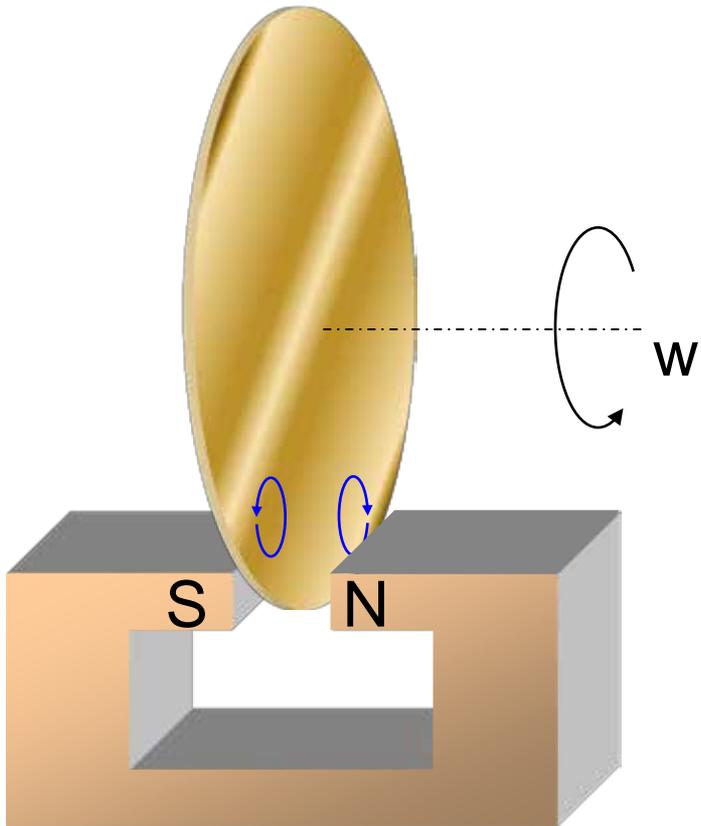
$$F = \oint_S \mathbf{B} \times d\mathbf{S} = \dot{B}(t) \cdot \dot{S} = B(t) \rho R^2 \cos(q)$$

$$\frac{dF}{dt} = \rho R^2 \cos(q) \frac{dB(t)}{dt} = \rho R^2 B_0 \cos(q)$$

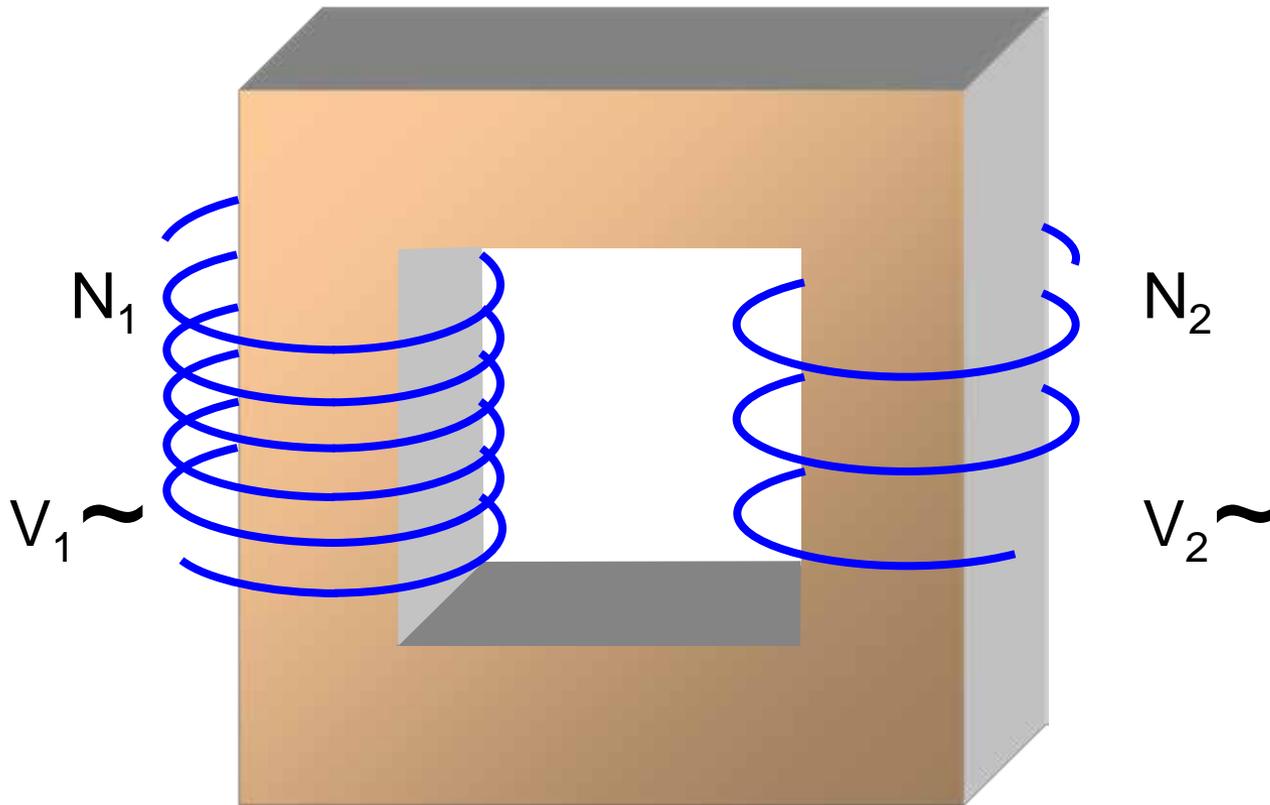
Como:

$$e = - \frac{dF_m}{dt} = - \rho R^2 B_0 \cos(q)$$

Corrientes de Foucault

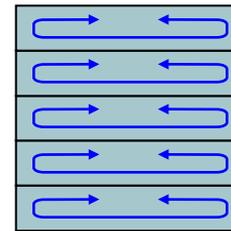
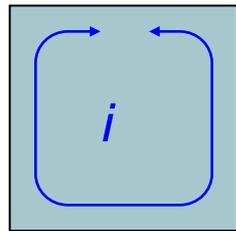
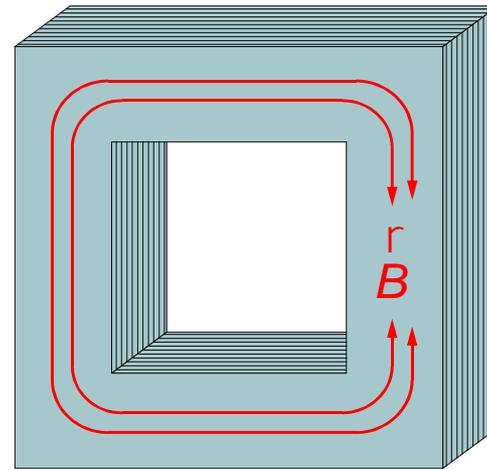
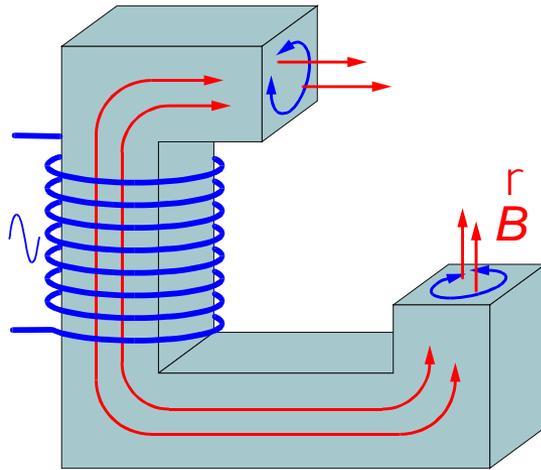


Transformador

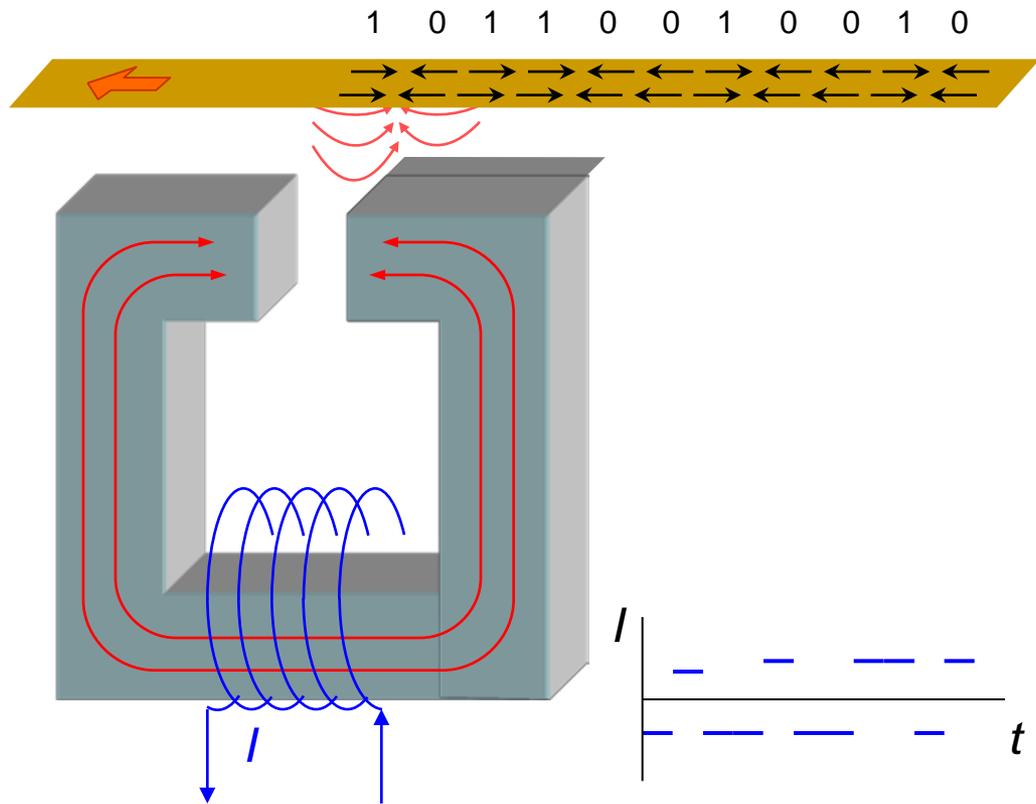


$$V_2 = \frac{N_2}{N_1} V_1$$

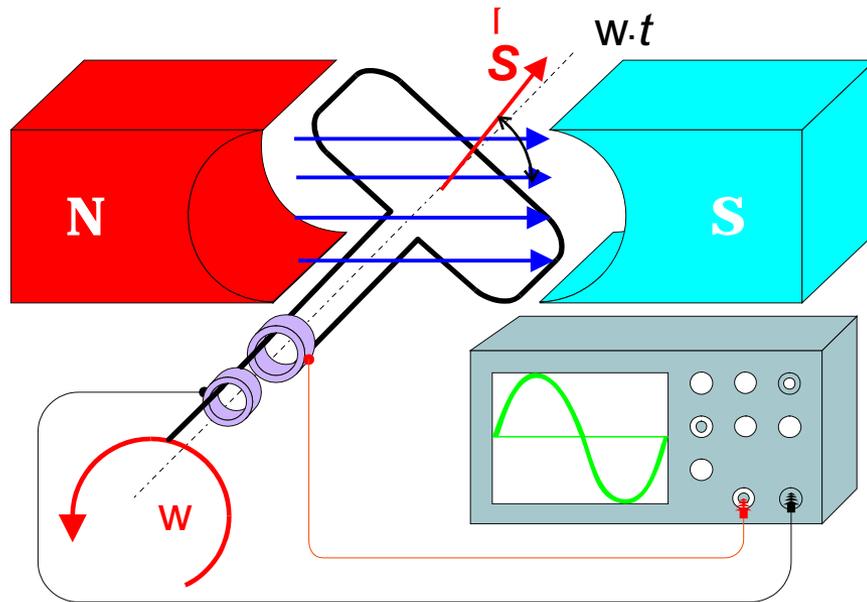
Corrientes de Foucault en transformadores



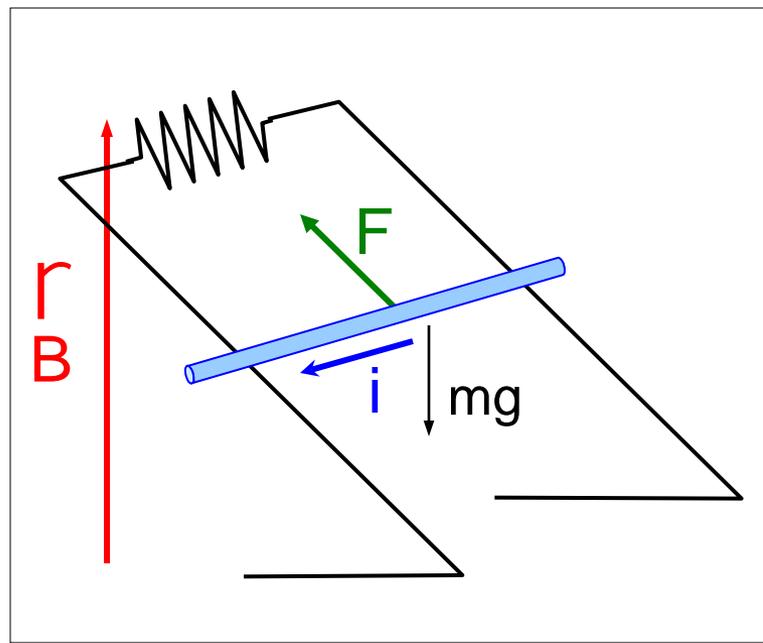
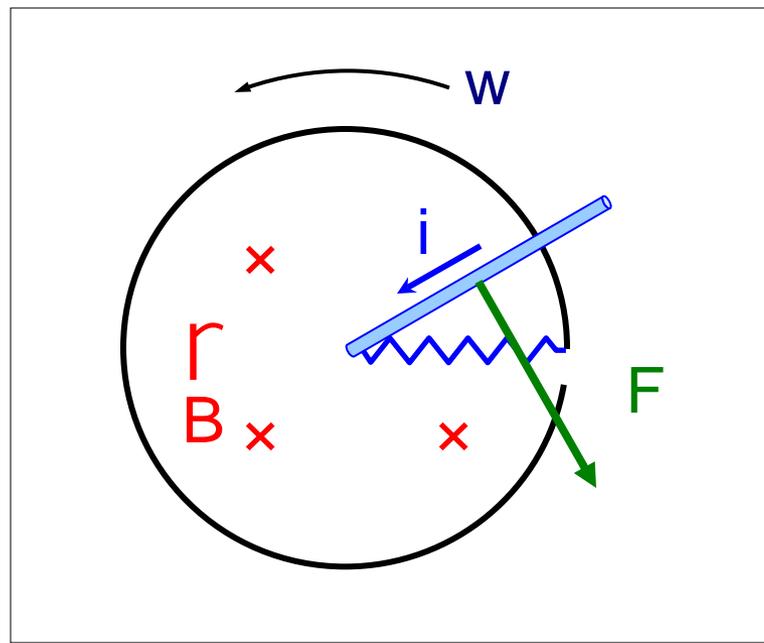
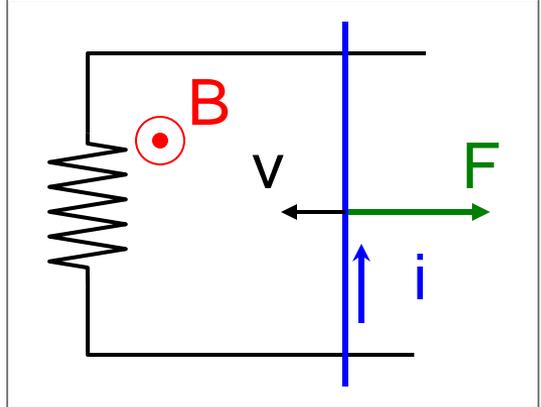
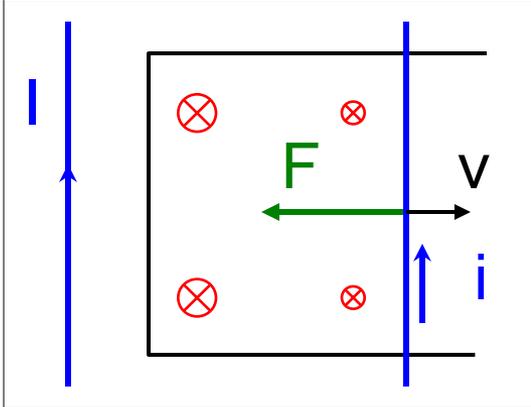
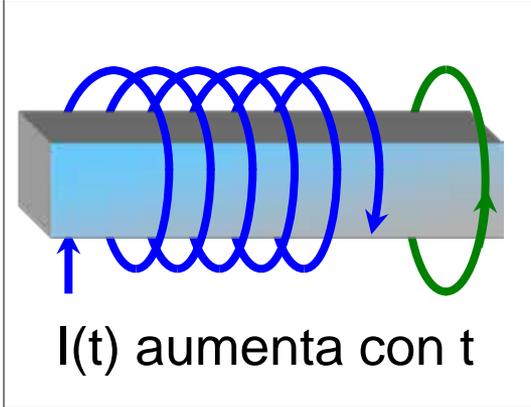
Lectura por inducción



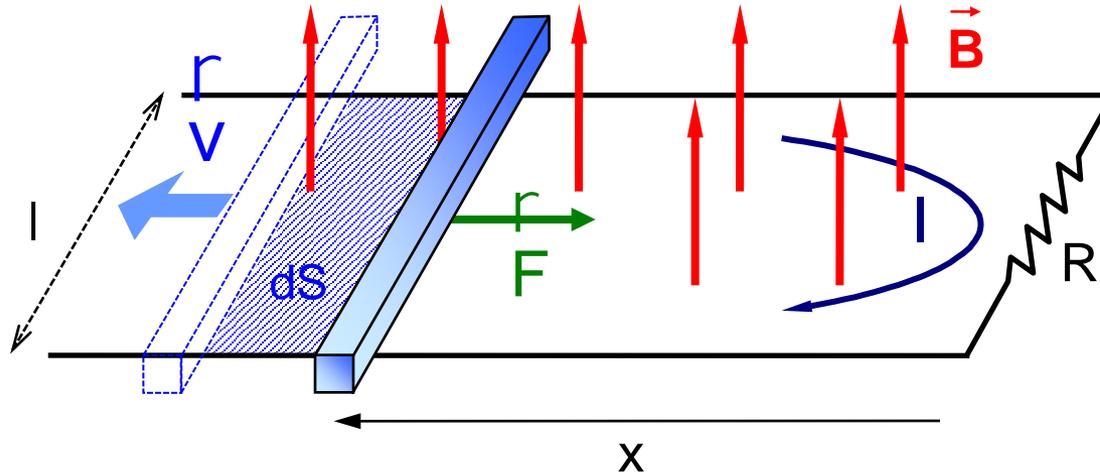
Generación de corriente alterna



Ejemplos



Fuerza sobre una barra móvil



$$F(t) = BS = Blx = Blvt$$

$$e = - \frac{dF(t)}{dt} = Blv$$

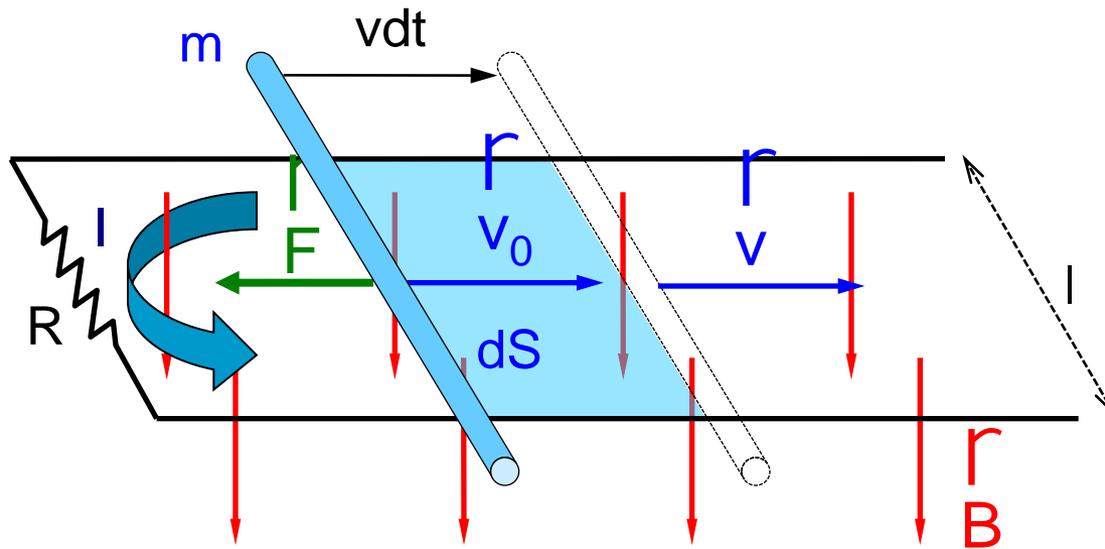
$$i = \frac{e}{R} = \frac{Blv}{R}$$

$$F = i l B = \frac{B^2 l^2 v}{R}$$

$$\vec{F} = - \frac{B^2 l^2}{R} \vec{v}$$



Barra lanzada con velocidad inicial



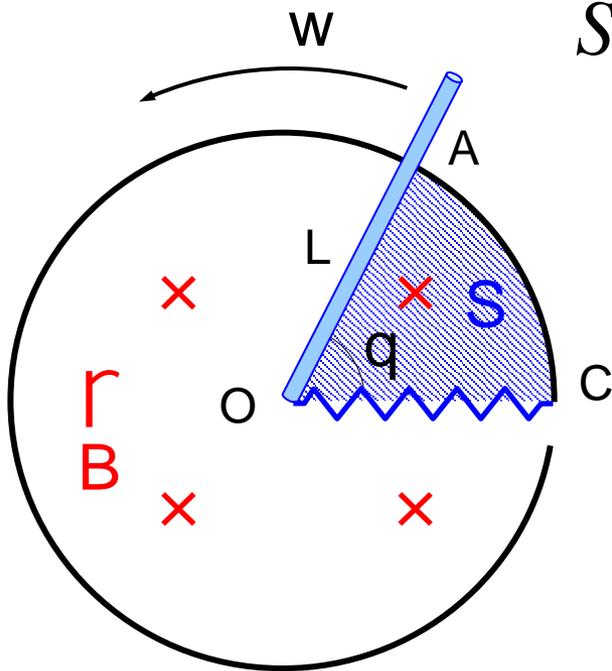
$$e = - \frac{dF(t)}{dt} = Blv$$

$$i = \frac{e}{R} = \frac{Blv}{R}$$

$$F = il'B \quad - \frac{B^2 l^2 v}{R} = m \frac{dv}{dt} \quad - \frac{mR}{B^2 l^2} \frac{dv}{v} = dt$$

$$v = v_0 e^{-\frac{B^2 l^2}{mR} t}$$

Inducción en una barra con movimiento circular



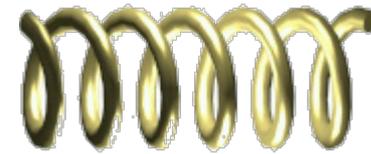
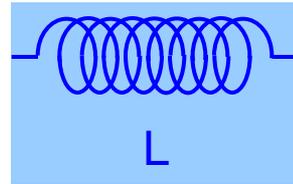
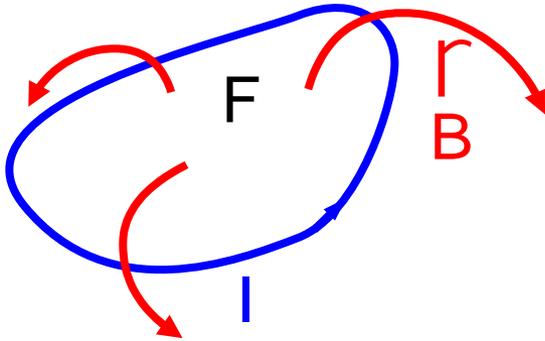
$$S = \frac{1}{2} L^2 \omega \quad F = BS = \frac{1}{2} BL^2 \omega$$

$$e = \frac{dF}{dt} = \frac{1}{2} BL^2 \omega$$

$$I = \frac{e}{R} = \frac{BL^2 \omega}{2R}$$

Autoinducción.

$$F = LI$$



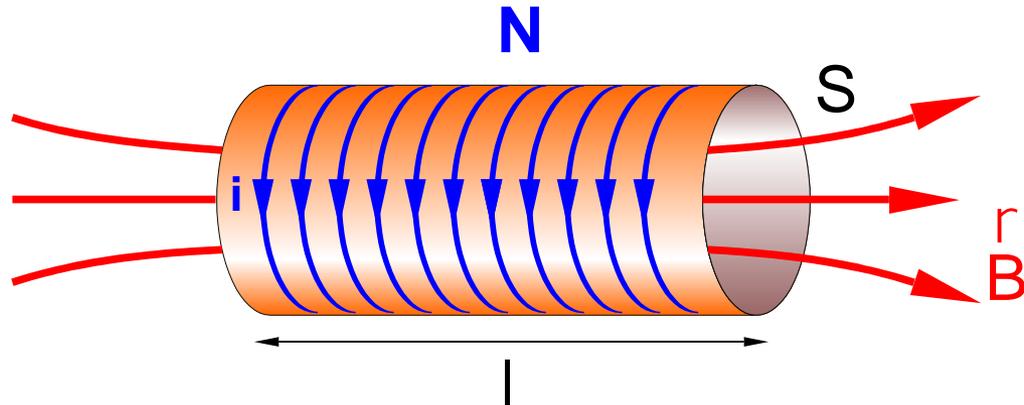
$$\mathcal{E} = - \frac{d\Phi}{dt} = -L \frac{dI}{dt}$$

U.S.I. M, L Henrio H

Un solenoide con muchas vueltas posee una gran autoinducción, y en los circuitos se representa como



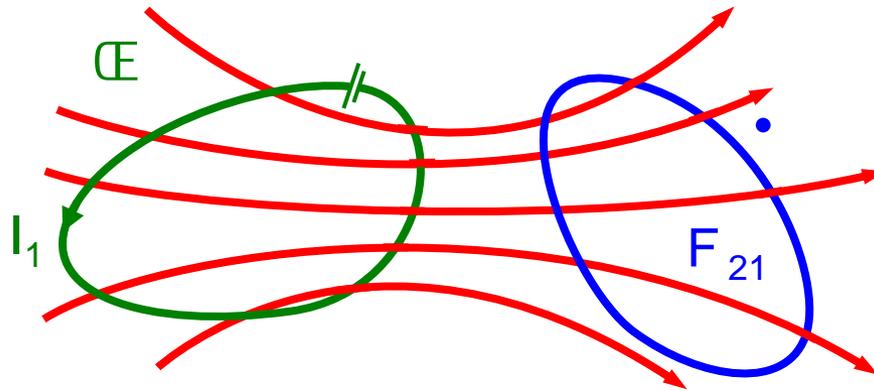
Ejemplo: Un solenoide largo y estrecho, de N espiras apretadas. Calcula la autoinducción.



$$F = BNS = \frac{\mu_0 N^2 Si}{l} \quad L = \frac{F}{i} = \frac{\mu_0 N^2 S}{l}$$

Inducción mutua y autoinducción

Inducción mutua

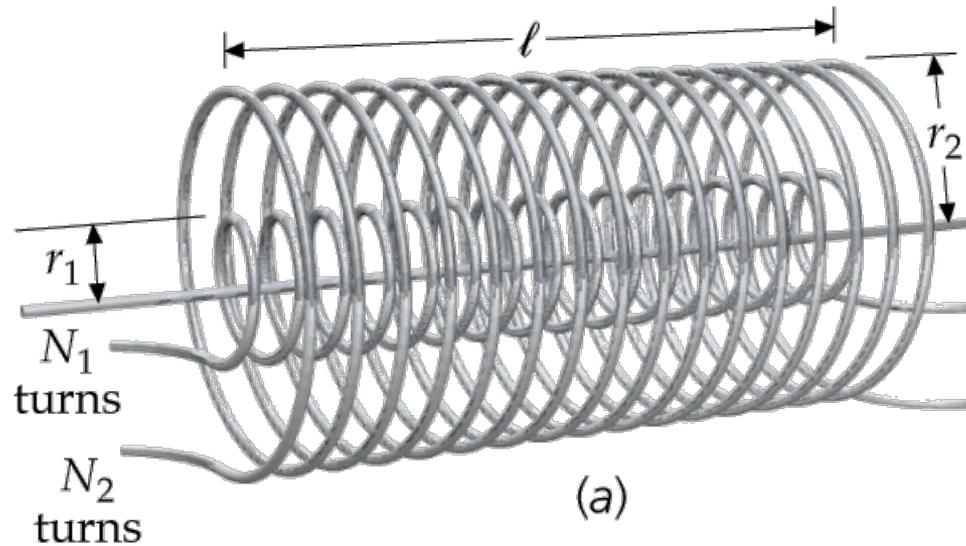


- $F_{21} = M_{21} I_1$
- M_{21} coeficiente de inducción mutua entre 1 y 2
- también $F_{12} = M_{12} I_2$
- $M_{21} = M_{12} = M$

S.I. Henrio H

$$H = Wb/A = T \cdot m^2/A$$

Ejemplo: Un solenoide largo y estrecho, de espiras apretadas, está dentro de otro solenoide de igual longitud y espiras apretadas, pero de mayor radio. Calcula la inducción mutua de los dos solenoides.



$$M_{12} = M_{21} = M = \mu_0 n_1 n_2 l \pi r_1^2$$

Para calcular la inducción mutua entre dos conductores, basta con suponer que por uno de ellos circula una corriente I y calcular el flujo de campo magnético a través del otro conductor. El cociente entre el flujo y la corriente es la inducción mutua.

4. Energía magnética

Una bobina o un solenoide almacena energía magnética de la misma forma que un condensador almacena energía eléctrica.

Ecuación de un circuito RL

$$e_o = IR + L \frac{dI}{dt}$$

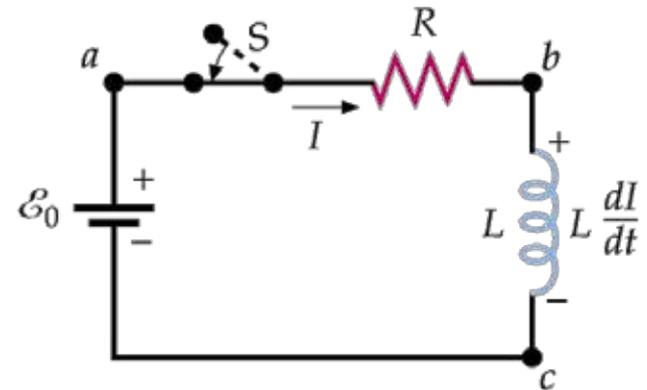
Multiplicando por I en ambos miembros, obtenemos una ecuación en términos de potencia

$$e_o I = I^2 R + L I \frac{dI}{dt}$$

Potencia suministrada por la batería

Potencia disipada en R por efecto Joule

Potencia almacenada en la bobina



Energía almacenada en la bobina: U_m

$$\frac{dU_m}{dt} = L I \frac{dI}{dt} \quad \text{p} \quad dU_m = L I dI$$

La energía total almacenada se obtiene integrando

$$U_m = \int_0^{I_f} dU_m = \int_0^{I_f} L I dI \quad \Rightarrow \quad \boxed{U_m = \frac{1}{2} L I_f^2}$$

Densidad de energía: Energía magnética por unidad de volumen

Caso de un solenoide

$$\left\{ \begin{array}{l} B = \mu_0 n I \quad \text{p} \quad I = \frac{B}{\mu_0 n} \\ L = \mu_0 n^2 l A \end{array} \right.$$

Resultado general:
densidad de energía

$$u_m = \frac{U_m}{V} = \frac{U_m}{l A}$$



$$\boxed{u_m = \frac{B^2}{2 \mu_0}}$$

Energía total

$$\boxed{U_m = \frac{1}{2 \mu_0} \int \mathbf{B}^2 dV}$$