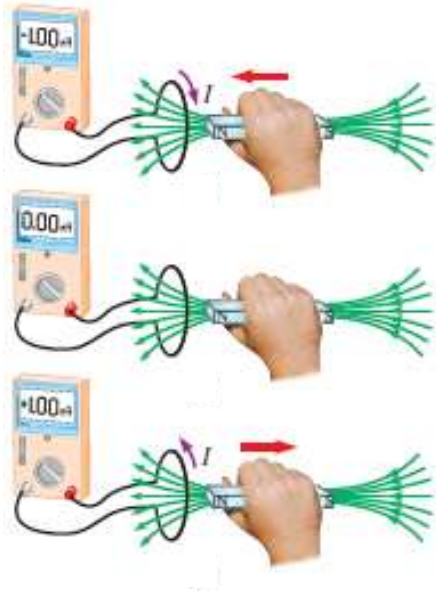


Ley de inducción de Faraday-Lenz

Prof. Gustavo Forte

Experimentos de Faraday



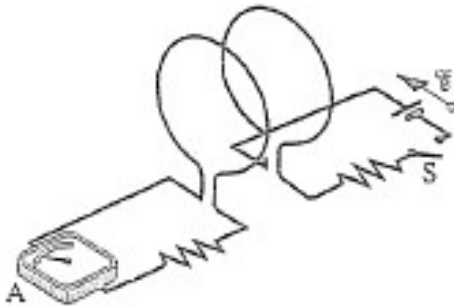
Se establece una corriente en la espira de alambre sin que haya una batería conectada → **corriente inducida**, producida por una **fem inducida**



El imán en movimiento o el cambio de corriente es lo que produce la **fem inducida**

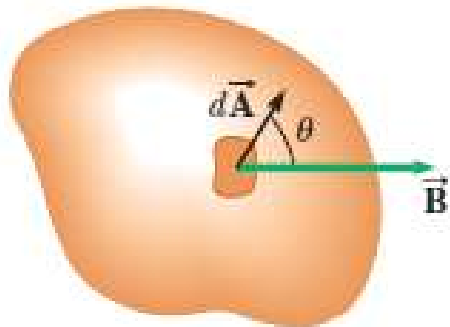


El cambio del número de líneas de campo que atraviesan la espira produce la **fem inducida** en la propia espira.



Flujo de un campo magnético

Algunas definiciones previas...

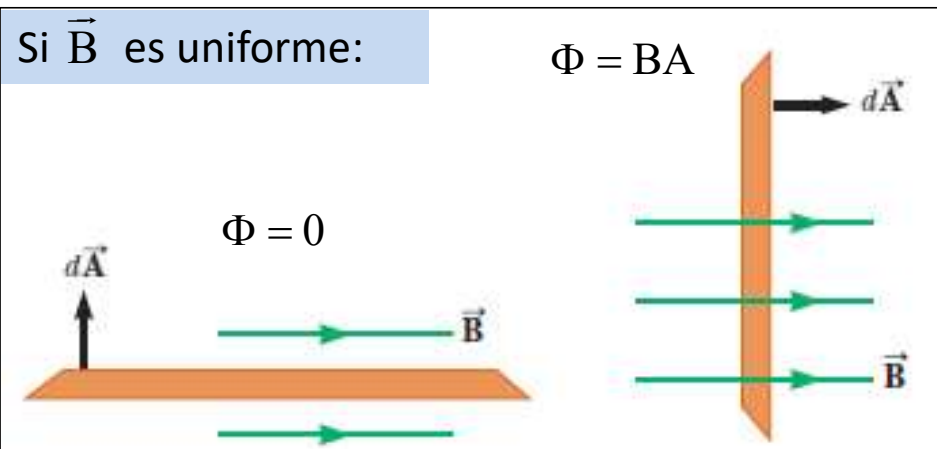


$\vec{B} \cdot d\vec{A} \rightarrow$ Flujo magnético a través del elemento de área dA

$\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A} \rightarrow$ Flujo magnético total a través de toda la superficie

Si \vec{B} es uniforme:

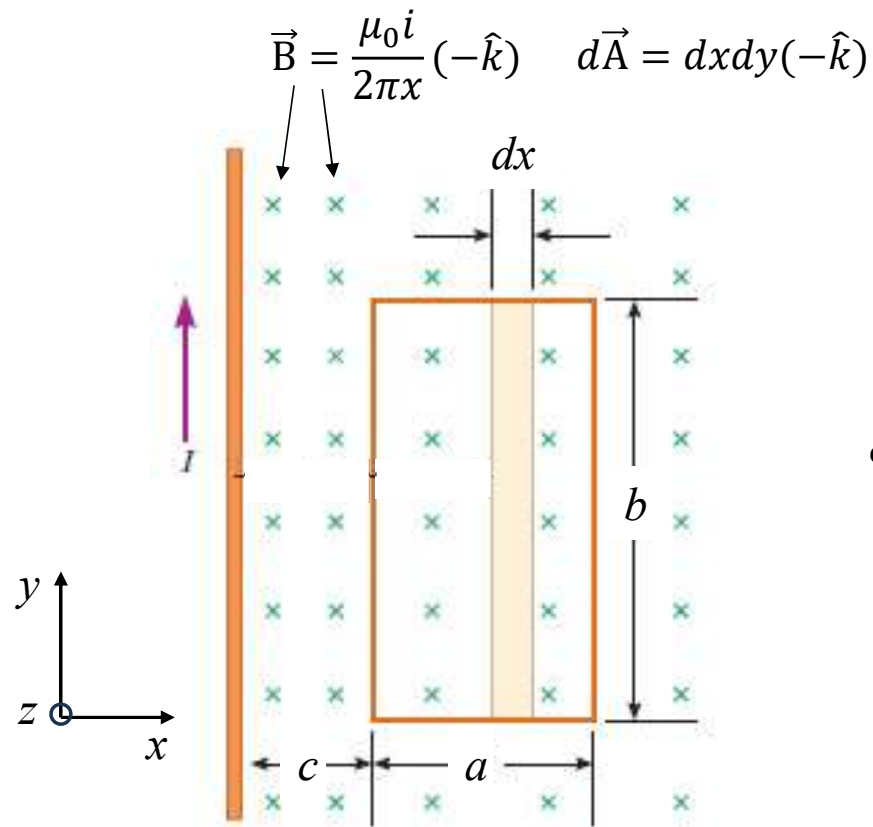
$$\Phi = BA$$



$$[\Phi_B] = \text{T} \cdot \text{m}^2 = \text{weber}$$

Flujo de un campo magnético

Si \vec{B} **no** es uniforme:



$$\Phi_B = \iint_A \vec{B} \cdot d\vec{A} = \int_0^b \int_c^{c+a} \frac{\mu_0 i}{2\pi x} dx dy$$

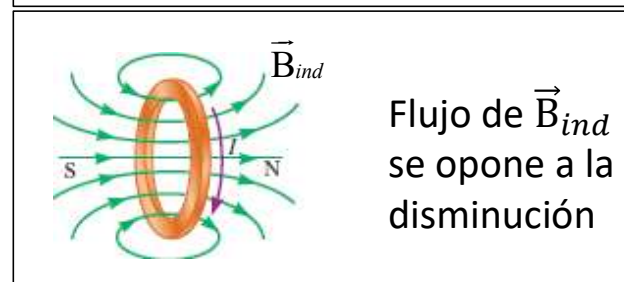
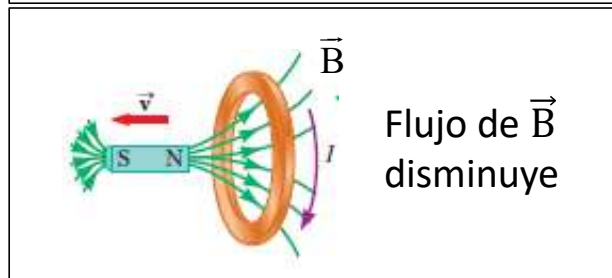
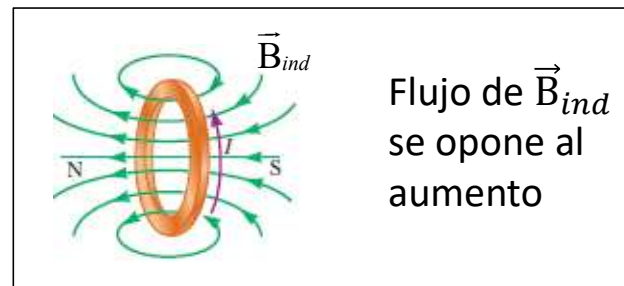
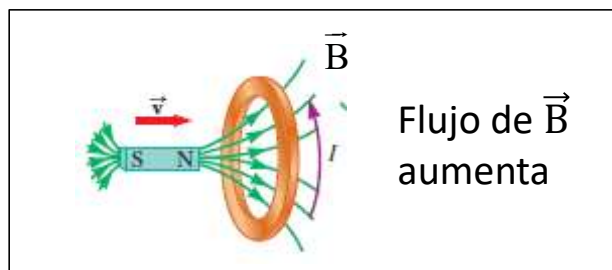
$$\Phi_B = \frac{\mu_0 i}{2\pi} b \int_c^{c+a} \frac{dx}{x} = \frac{\mu_0 i}{2\pi} b \ln\left(\frac{c+a}{c}\right)$$

Ley de inducción de Faraday y ley de Lenz

i. **la magnitud** de la fem inducida es igual a la rapidez con que el flujo magnético a través del circuito cambia con el tiempo.

$$|\mathcal{E}| = \left| \frac{d\Phi_B}{dt} \right| \rightarrow \text{Ley de Faraday}$$

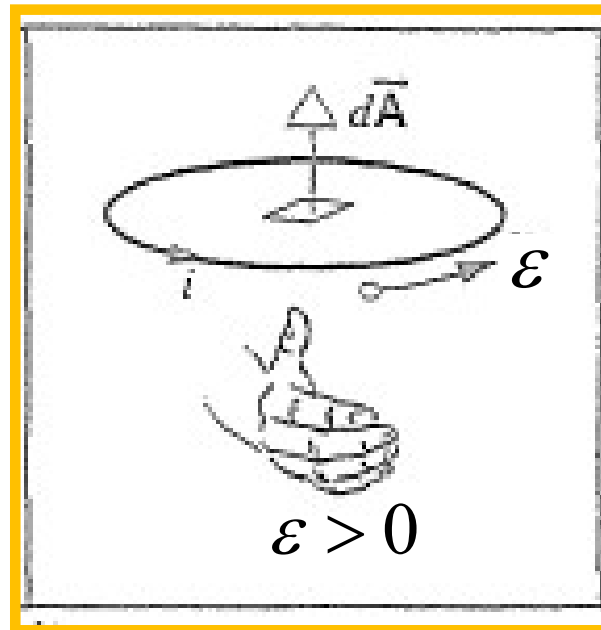
ii. **el sentido** de la fem inducida es tal que “**el flujo del campo magnético debido a la corriente inducida**” se opone “**al cambio (aumento o disminución) de flujo que produce a dicha corriente inducida**” \rightarrow Ley de Lenz



resultado experimental
de acuerdo con el
principio de
conservación de la
energía

Ley de Faraday – Lenz : convención de signos

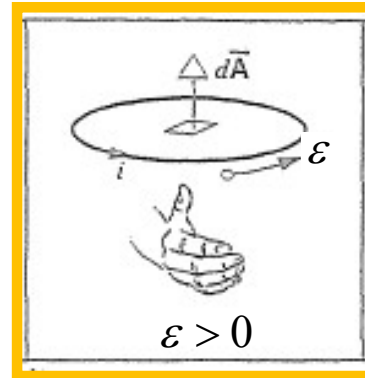
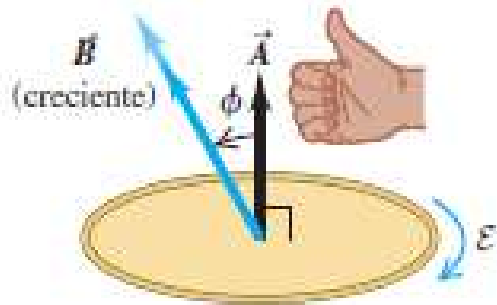
$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt} \rightarrow \text{Ley de Faraday - Lenz}$$



Ley de Faraday – Lenz : convención de signos

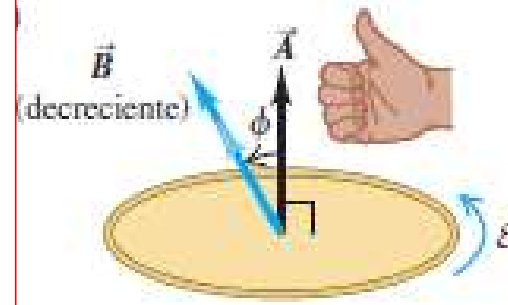
$$\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A} > 0$$

$$\frac{d\Phi_B}{dt} > 0 \rightarrow \varepsilon < 0$$



$$\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A} > 0$$

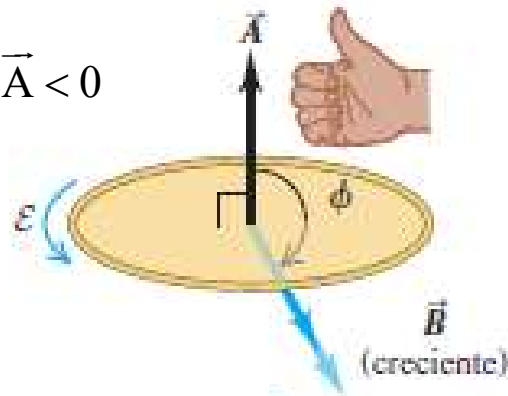
$$\frac{d\Phi_B}{dt} < 0 \rightarrow \varepsilon > 0$$



$$\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A} < 0$$

$$\frac{d\Phi_B}{dt} < 0$$

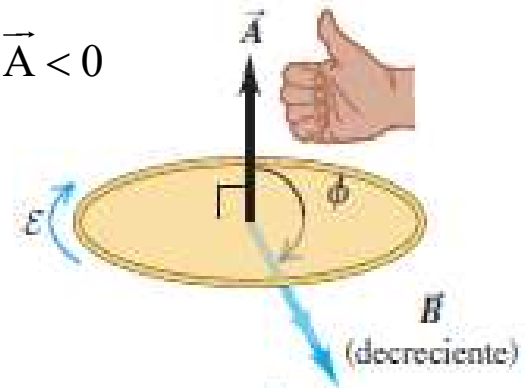
$$\varepsilon > 0$$



$$\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A} < 0$$

$$\frac{d\Phi_B}{dt} > 0$$

$$\varepsilon < 0$$



Ley de inducción de Faraday - Lenz

Para una bobina de N espiras, con el mismo área, atravesada por Φ_B , se induce una fem en **todas** las espiras. Las espiras están en serie \rightarrow sus fem se suman:

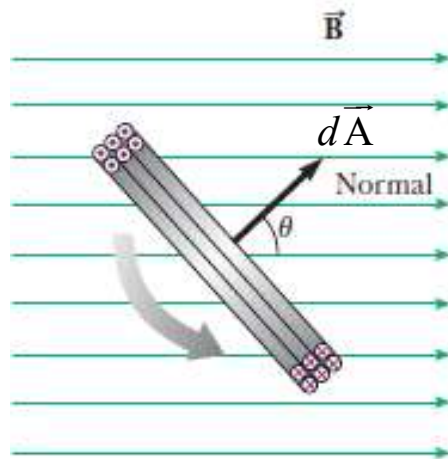
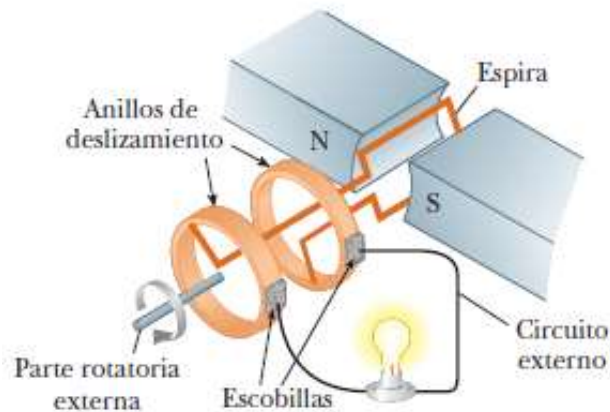
$$\mathcal{E} = -N \frac{d\Phi_B}{dt}$$

Una fem puede ser inducida en un circuito:

- i. La magnitud de \vec{B} cambia con el tiempo.
- ii. El área encerrada por la espira cambia con el tiempo.
- iii. El ángulo entre \vec{B} y $d\vec{A}$ cambia con el tiempo.
- iv. Combinación de varias.

$$\mathcal{E} = - \frac{d\left(\int \vec{B} \cdot d\vec{A}\right)}{dt}$$

Generador o alternador



El ángulo entre \vec{B} y $d\vec{A}$ cambia con el tiempo (iii)



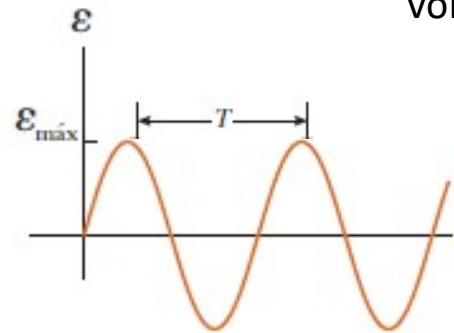
$$\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A} = BA \cos\theta = BA \cos\omega t$$

$$\begin{aligned} \varepsilon &= -N \frac{d\Phi_B}{dt} = -N \frac{d}{dt} (BA \cos\omega t) = \\ &= NBA\omega \sin\omega t \end{aligned}$$

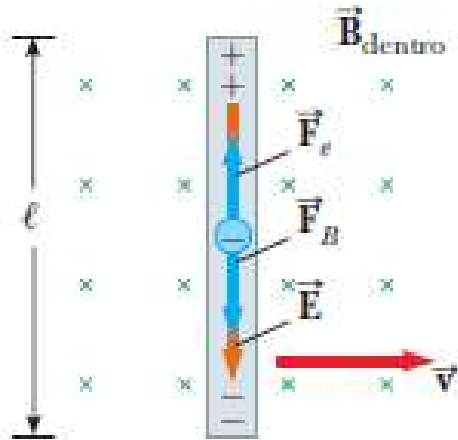
$$\varepsilon_{\text{máx}} = NBA\omega$$

$$\omega = 2\pi f = 2\pi/T$$

frecuencia angular del
voltaje alterno



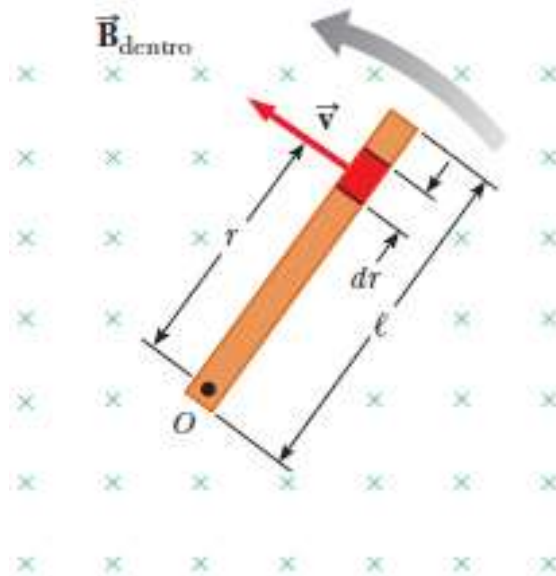
Fem de movimiento



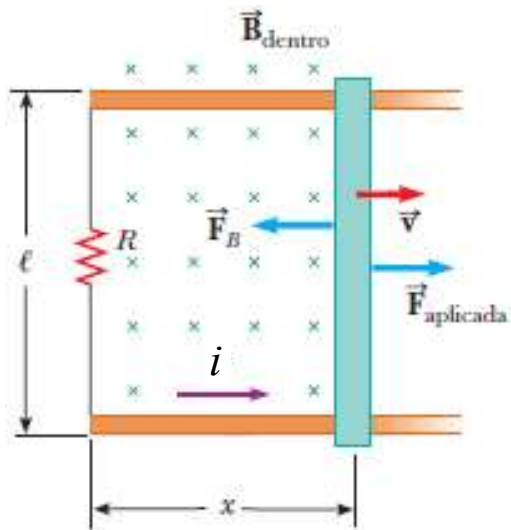
En el equilibrio: $qvB = qE$

$$\Delta V = El = vBl$$

La diferencia de potencial entre los extremos del conductor se mantiene **siempre que** éste se siga moviendo a través del \vec{B} uniforme.



Fem de movimiento

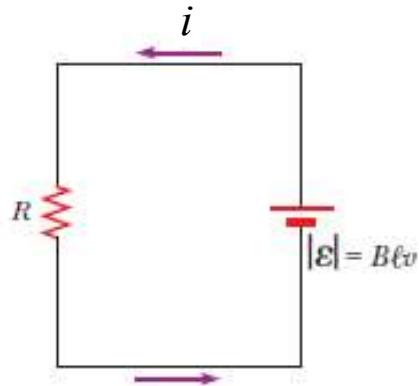


$\Phi_B = Blx \rightarrow$ el área encerrada por la espira cambia con el tiempo (ii)

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -\frac{d}{dt}(Blx) = -Bl\frac{dx}{dt}$$

$$\boxed{\varepsilon = -Blv} \rightarrow \text{fem de movimiento}$$

$$i = \frac{|\varepsilon|}{R} = \frac{Blv}{R}$$



Consideraciones energéticas:

$$F_B = i/B = F_{\text{aplicada}}$$

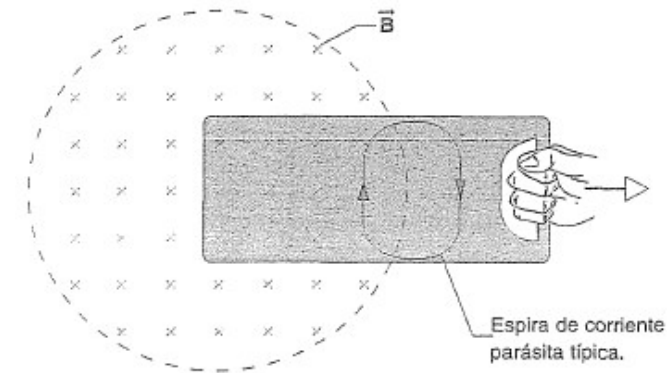
$$P = F_{\text{aplicada}} v = (i/B) v = \frac{(Blv)^2}{R} = \frac{\varepsilon^2}{R}$$

Fem de movimiento

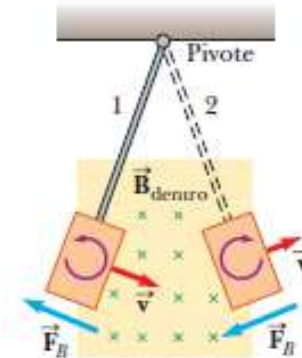
Corrientes parásitas

Aparecen cuando cambia el flujo magnético a través de un trozo macizo de material conductor.

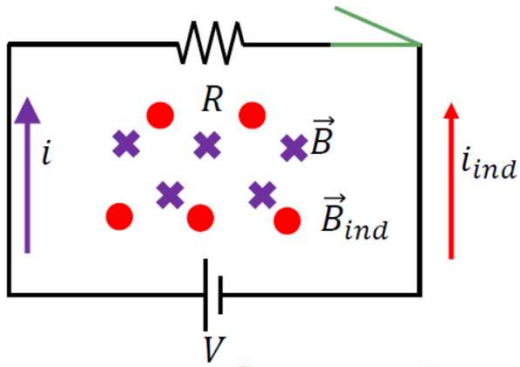
Efectos indeseables: aumentan la temperatura del material → las piezas conductoras se fabrican laminadas y aisladas unas de otras (núcleos de transformadores, motores).



Aprovechamiento: horno de inducción, frenos magnéticos



Autoinducción e inductancia



Mientras la corriente aumenta de 0 a su valor máximo V/R , el flujo magnético debido a esta corriente a través de la espira del circuito, también aumenta.



Este flujo creciente genera una fem (auto) inducida en el circuito. Según la ley de Lenz, la dirección de la **fem autoinducida** es en sentido opuesto a la dirección de la fem de la batería → **Autoinducción**

$$i(t) \rightarrow B(t) \rightarrow \Phi_B(t) \quad \varepsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt} \propto \frac{di}{dt}$$

$$\boxed{\varepsilon_L = -L \frac{di}{dt}} \quad [L] = \frac{Tm^2}{A} = H(\text{Henry})$$

L : inductancia, es una cantidad escalar positiva, depende de la geometría de la espira y del medio que la rodea. Mide la oposición al cambio de la corriente.

Inductancia de un solenoide

Para una bobina de N espiras, con el mismo área, atravesada por Φ_B , se induce una fem en **todas** las espiras. Las espiras están en serie \rightarrow sus fem se suman:

$$\mathcal{E}_L = -N \frac{d\Phi_B}{dt} = -L \frac{di}{dt}$$

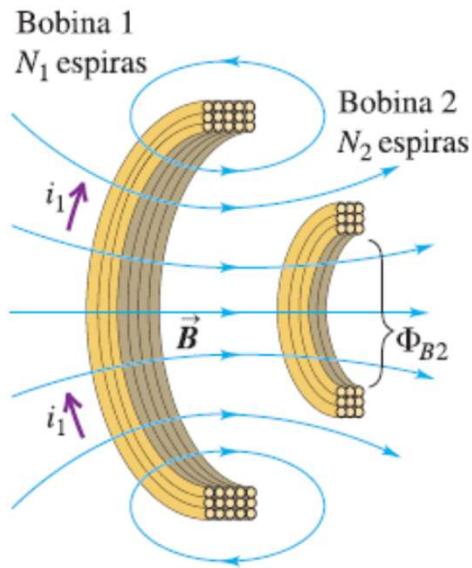
$$N\Phi_B = Li \quad \rightarrow \quad L = \frac{N\Phi_B}{i}$$

El flujo magnético a través de cada vuelta de área A en el solenoide es:

$$\Phi_B = BA = \mu_0 niA = \mu_0 \frac{N}{l} iA$$

$$L = \frac{N\Phi_B}{i} = \mu_0 \frac{N^2}{l} A$$

Inductancia mutua



Φ_{B2} : flujo magnético a través de cada espira de la bobina 2 causado por la corriente i_1 en la bobina 1

Cuando i_1 cambia, Φ_{B2} cambia $\rightarrow \varepsilon_2 = -N_2 \frac{d\Phi_{B2}}{dt} = -M_{21} \frac{di_1}{dt}$

M_{21} : **inductancia mutua** de las dos bobinas $\rightarrow M_{21} = N_2 \Phi_{B2} / i_1$

Φ_{B1} : flujo magnético a través de cada espira de la bobina 1 causado por la corriente i_2 en la bobina 2

Cuando i_2 cambia, Φ_{B1} cambia $\rightarrow \varepsilon_1 = -N_1 \frac{d\Phi_{B1}}{dt} = -M_{12} \frac{di_2}{dt}$

$$M_{12} = N_1 \Phi_{B1} / i_2$$

La fem inducida en una bobina es proporcional a la rapidez con la cual cambia la corriente de la otra bobina. Además, se puede demostrar que $M_{21} = M_{12} = M$

$$\varepsilon_2 = -M \frac{di_1}{dt} \quad \varepsilon_1 = -M \frac{di_2}{dt} \quad [M] = \frac{Tm^2}{A} = H(\text{Henry})$$

Inductancia mutua

Es una cantidad **escalar positiva**, depende del **medio** donde están inmersos los conductores, de la **geometría** de los mismos y de su posición relativa.

Desventajas

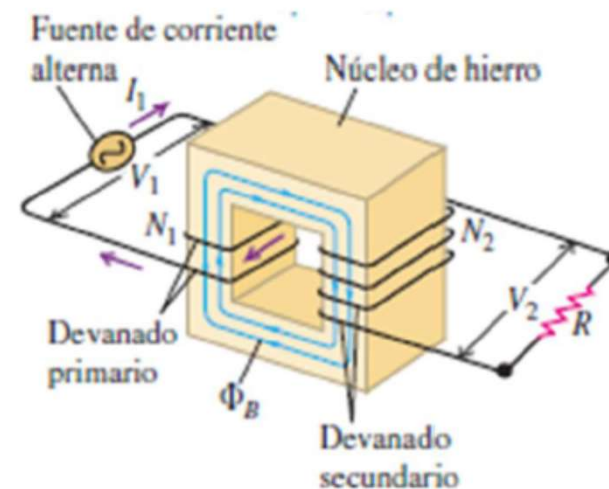
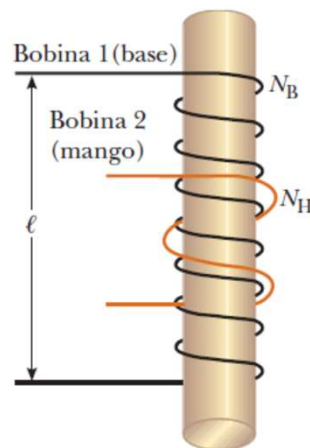
Las variaciones de corriente en un circuito inducen fem no deseadas en otros circuitos cercanos. En un mismo circuito dos bobinas podrían colocarse muy alejadas o con sus planos perpendiculares

Usos

El transformador usado en circuitos de corriente alterna para subir o bajar voltajes

El cargador de batería inalámbrico

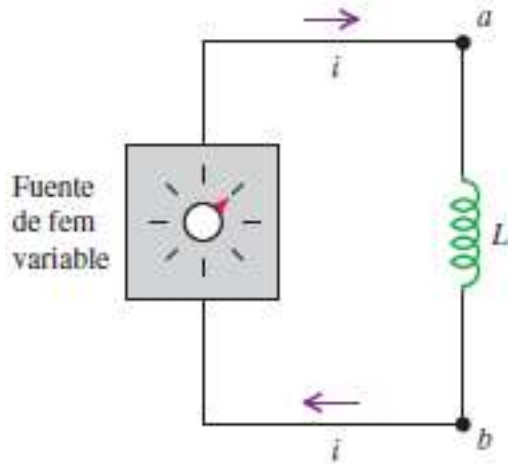
Sistemas de comunicación



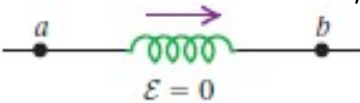
Inductores

Inductor: es un dispositivo diseñado para tener una inductancia particular. Al igual que los resistores y capacitores, se encuentran entre los elementos indispensables de los circuitos electrónicos.

$$V_{ba} = V_b - V_a = -L \frac{di}{dt}$$

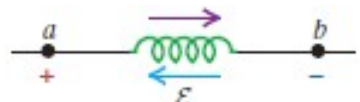


i constante: $di/dt = 0$



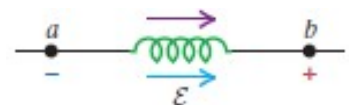
$$V_{ba} = -L \frac{di}{dt} = 0$$

i creciente: $di/dt > 0$



$$V_{ba} = -L \frac{di}{dt} < 0$$

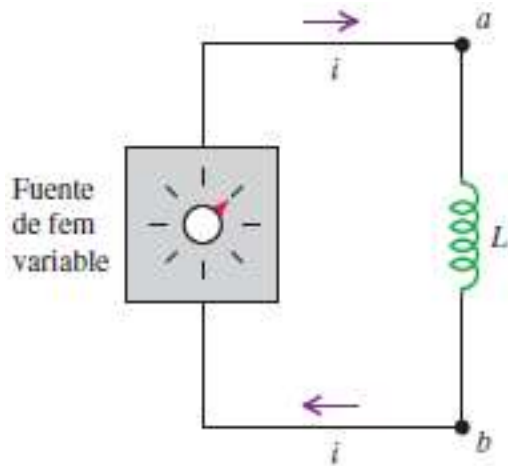
i decreciente: $di/dt < 0$



$$V_{ba} = -L \frac{di}{dt} > 0$$

El inductor hace que el circuito sea lento en reaccionar a los cambios de voltaje

Energía almacenada en un campo magnético



Suponemos un inductor de resistencia nula

$$i \text{ creciente: } di/dt > 0 \rightarrow V_{ab} = V_a - V_b = L \frac{di}{dt}$$

$$\text{Potencia instantánea suministrada por la fuente} \rightarrow P = iV_{ab} = Li \frac{di}{dt}$$

$$dU = Pdt = Lidi$$

$$U = L \int_0^i i' di' = \frac{1}{2} Li^2$$



Energía total suministrada mientras la corriente aumenta de cero al valor final i . Cuando la corriente disminuye de i a cero, el inductor suministra la misma cantidad de energía al circuito.

$$\text{Para un solenoide: } L = \mu_0 \frac{N^2}{l} A = \mu_0 n^2 (Al) \text{ y } B = \mu_0 ni$$

$$U = \frac{1}{2} Li^2 = \frac{1}{2} \mu_0 n^2 (Al) \left(\frac{B}{\mu_0 n} \right)^2 = \frac{B^2}{2\mu_0} (Al) \rightarrow u = \frac{U}{Al} = \frac{B^2}{2\mu_0}$$

Densidad de energía magnética