INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

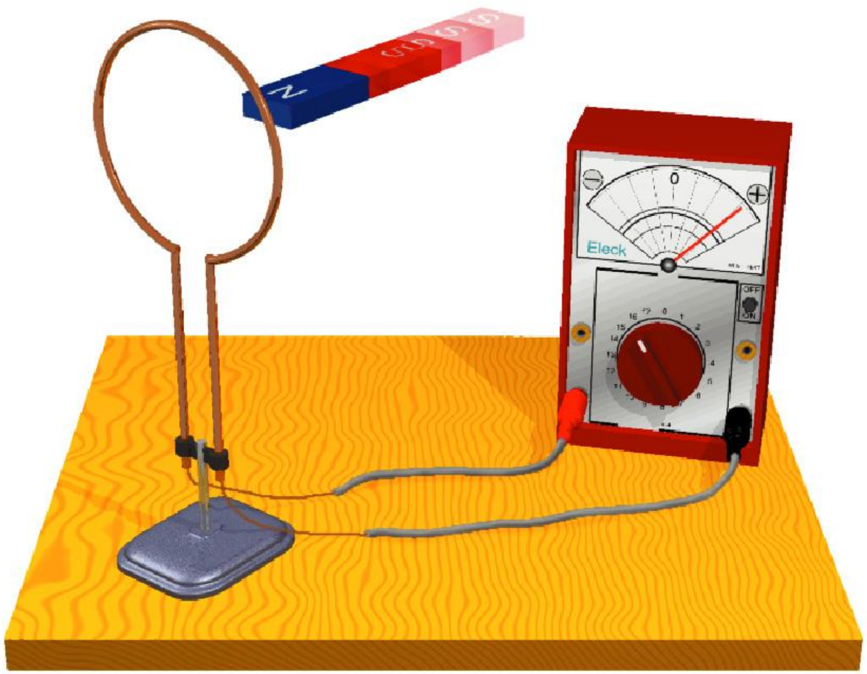
El físico danés Hans Christian Oersted descubrió que una corriente eléctrica es capaz de crear un campo magnético.

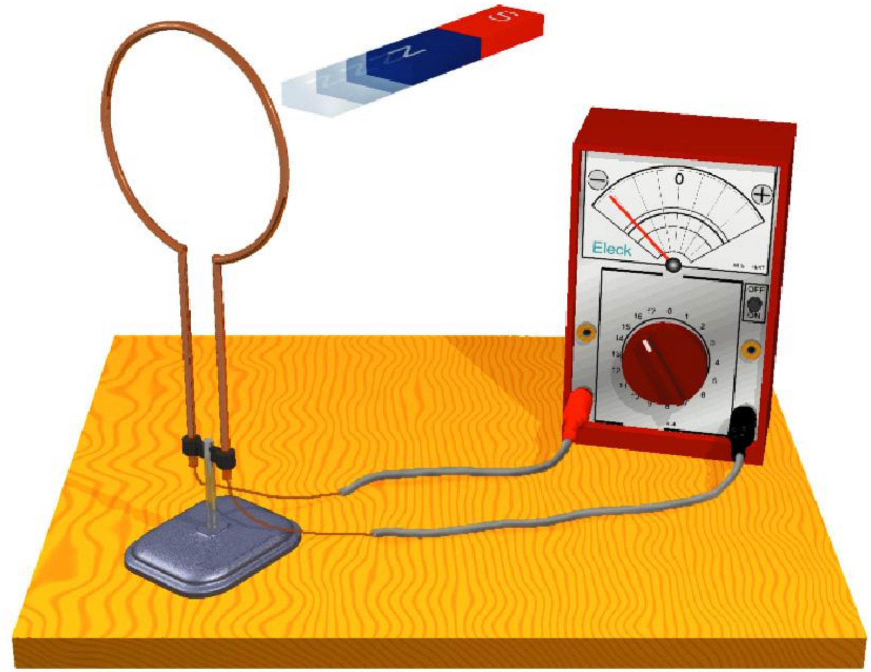
Ahora la pregunta era si un campo magnético podía producir una corriente eléctrica.

En 1831 Michael Faraday diseño una serie de experiencias que demostraron que era posible.
Un año antes el físico estadounidense Joseph Henry había llegado a conclusiones parecidas.

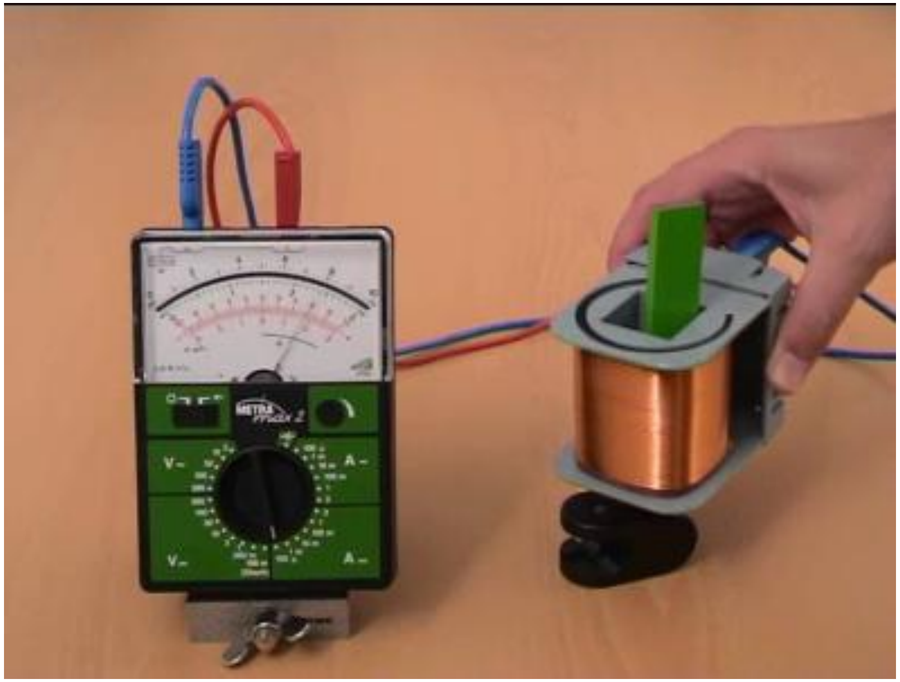
Llamamos ***Inducción Electromagnética*** a la producción de corriente eléctrica por la acción de campos magnéticos.

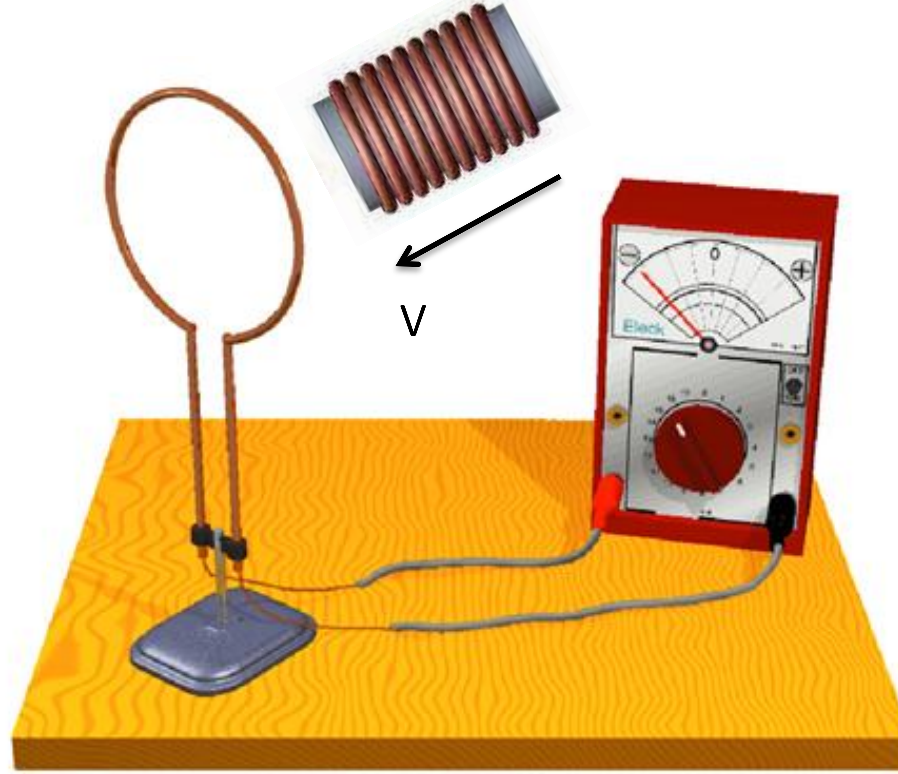
EXPERIENCIAS DE FARADAY



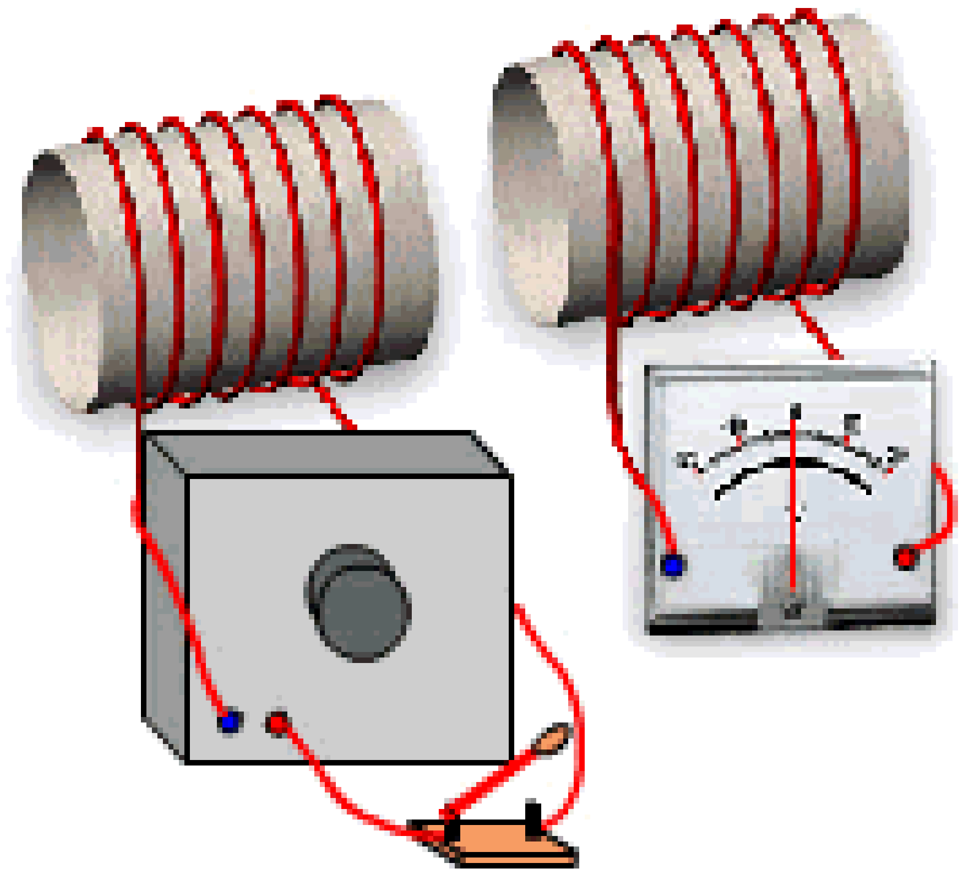


Si se acerca o se aleja un imán a la espira, el galvanómetro detecta el paso de corriente eléctrica por ella mientras el imán está en movimiento. El sentido de la corriente cuando se acerca el imán es opuesto al sentido de la corriente cuando se aleja.

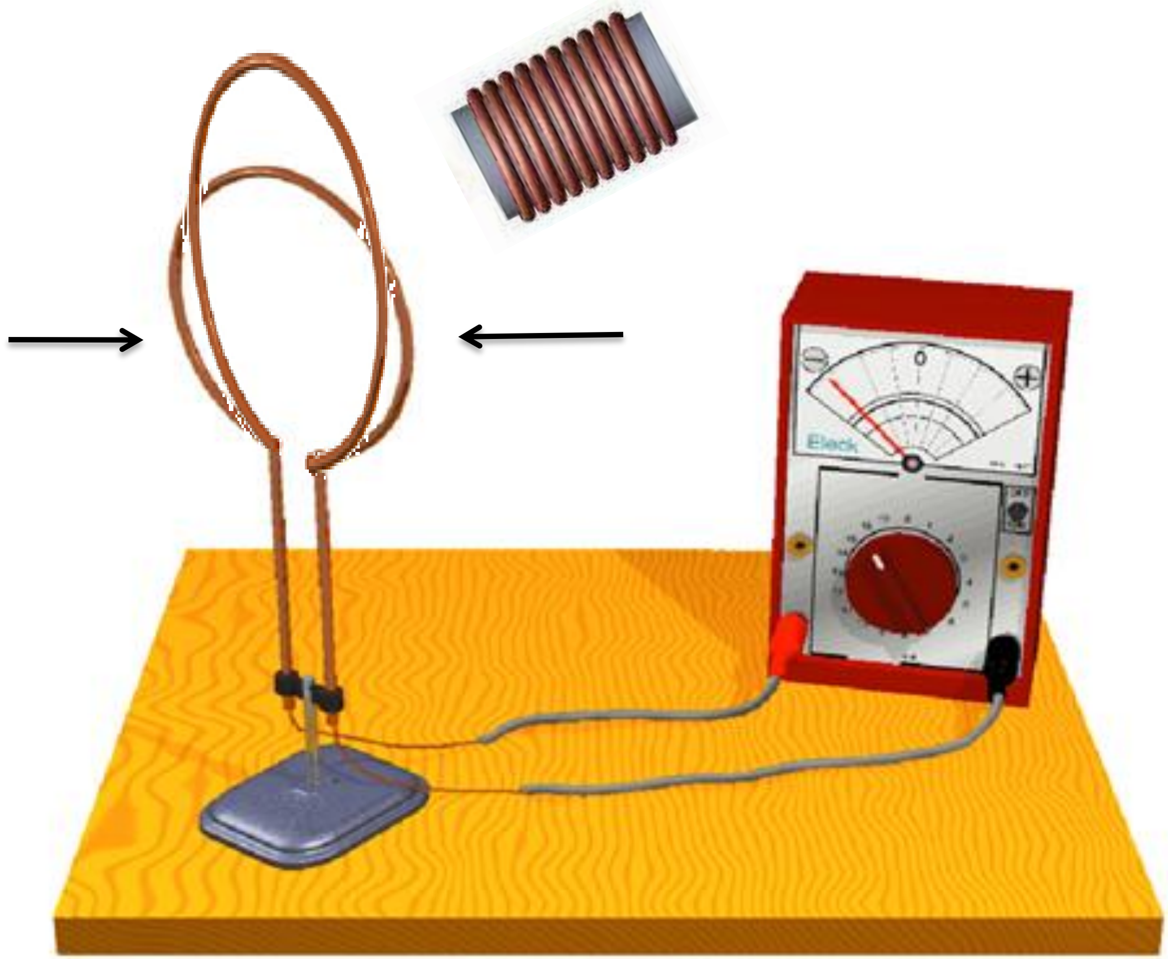




Si se mantiene fijo el imán y se mueve la espira, el resultado es el mismo, aparece una corriente inducida mientras haya un movimiento relativo entre la espira y el imán. Si se sustituye el imán por un solenoide se obtienen los mismos resultados.



Si se mantiene fijos tanto la espira como el solenoide se observa una corriente inducida en ellos al abrir o cerrar el interruptor que controla el paso de la corriente en el solenoide.



Deformamos la espira cambiando el área de la misma.

Si manteniendo fijos la espira y el solenoide, se deforma la espira, también se detecta la existencia de una corriente eléctrica inducida en ella, mientras se está deformando.

En todas las experiencias anteriores se obtiene una corriente eléctrica en el circuito de la espira sin haberla conectado a ninguna pila o batería.

Esto quiere decir que se ha producido en el circuito una fuerza electromotriz (fem) que ha dado lugar a la corriente.

Este fenómeno se llama ***inducción electromagnética***.

Faraday llamó ***inductor*** al elemento que provoca la aparición de la corriente, y llamó ***inducido*** al elemento en el que se genera la corriente.

De su experiencia se deduce lo siguiente:

- Aparece corriente inducida cuando el inductor y el inducido se mueven uno respecto al otro.

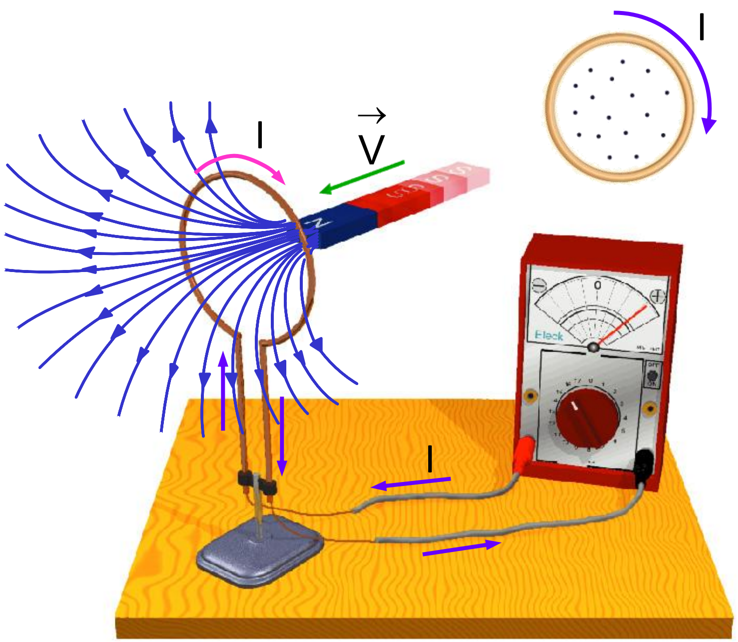
- La intensidad de la corriente inducida es mayor cuanto más rápido es el movimiento relativo entre inductor e inducido.

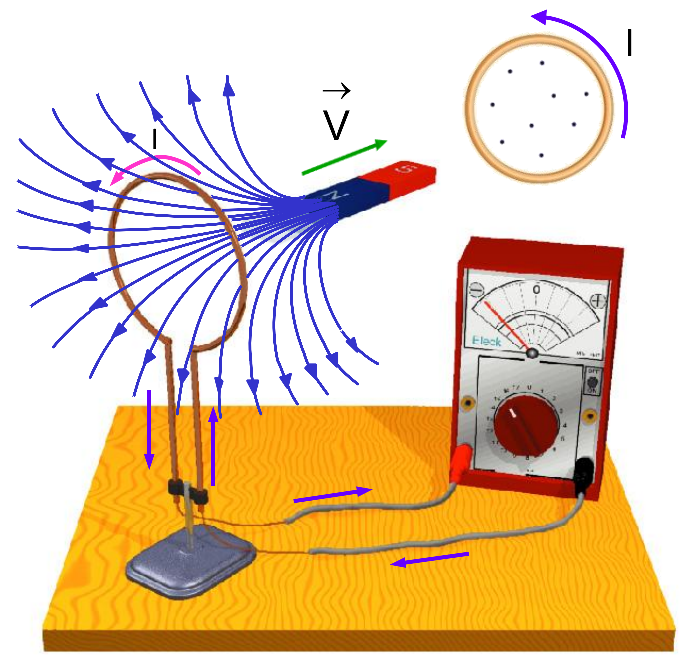
- También aparece corriente inducida cuando se inicia o finaliza el paso de corriente en el inductor.

- La corriente inducida es una corriente alterna.

Causa de la corriente inducida

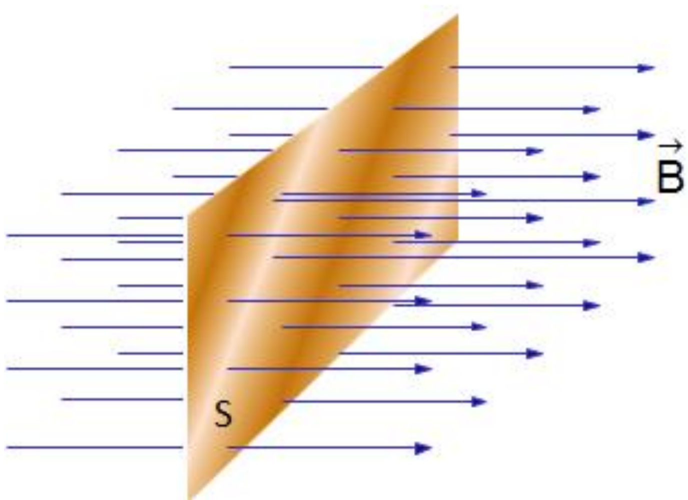
Faraday propuso que la causa de la corriente inducida está en la variación de las líneas de inducción magnética que atraviesan el inducido.





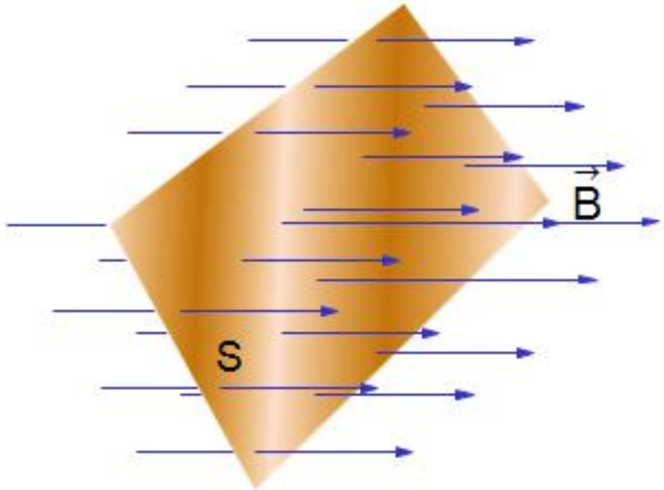
FLUJO MAGNÉTICO

Se define el ***flujo magnético*** $\boldsymbol{\phi_B}$, a través de una superficie, como el número de líneas de inducción que atraviesan la superficie.



Superficie S perpendicular al B
El producto B·S se le denomina flujo magnético y representa el número de líneas que atraviesan la superficie.

$$\phi = B \cdot S$$



Si la superficie S forma un ángulo α con las líneas del campo magnético B, entonces el flujo magnético será:

$$\phi = B \cdot S \cdot \cos\alpha$$

Recordando la definición de producto escalar de dos vectores, podemos escribir

$$\boxed{\phi = \vec{B} \cdot \vec{S}}$$

La unidad de flujo magnético en el S.I. es el Weber (Wb)
Un Weber es un Tesla por metro cuadrado.

Si el campo no es constante a lo largo de toda la superficie, hay que calcular el flujo elemental a través de una superficie elemental

$$d\phi = \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

El flujo a través de toda la superficie será la integral

$$\phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

En el caso del campo magnético que atraviesa una bobina de N espiras, el flujo total será:

$$\phi = N \cdot \vec{B} \cdot \vec{S}$$

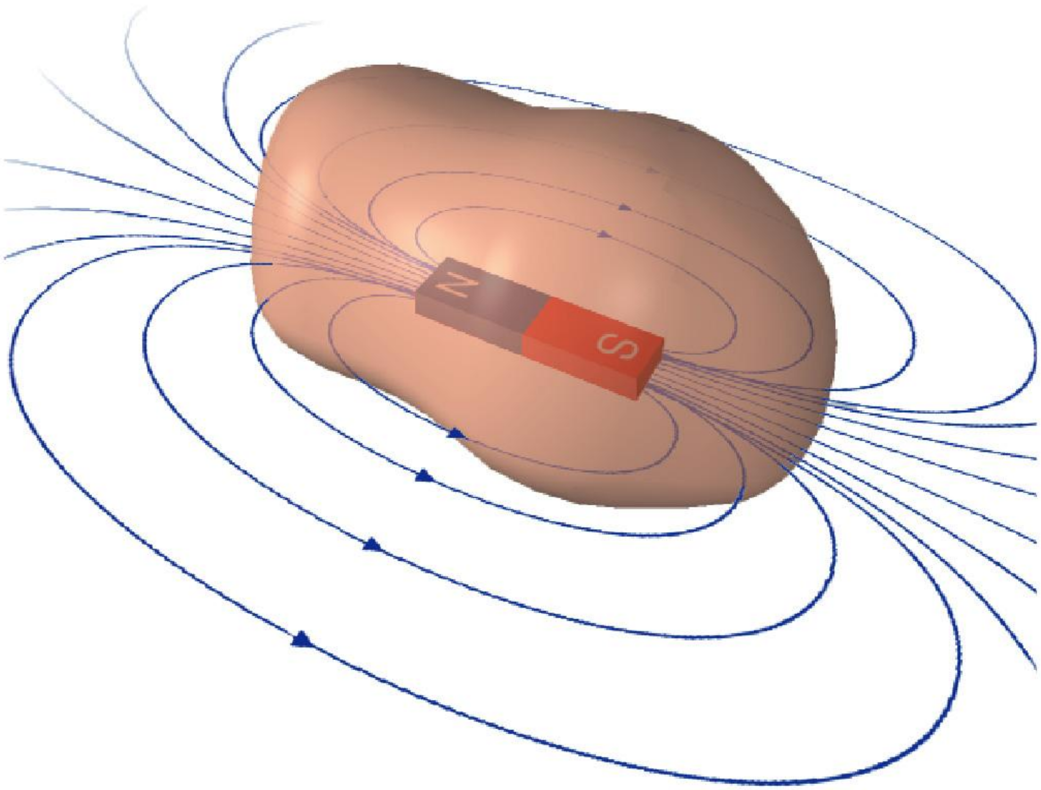
Flujo magnético a través de una superficie cerrada

Las líneas del campo magnético son cerradas

- ✓ En un imán salen del polo norte y entran en el polo sur.

- ✓ En un hilo de corriente son líneas circulares centradas en el hilo.

En cualquier superficie cerrada colocada en un campo magnético entran tantas líneas de campo como salen. Entonces, el flujo magnético neto a través de una superficie cerrada es cero.



El flujo neto a través de la superficie cerrada es cero, salen las mismas líneas de campo que las que entran.

$$\phi = \oint \vec{B} \cdot \, d\vec{S} = 0$$

LEY DE LENZ

Las experiencias de Faraday demostraron que la causa de la aparición de la corriente inducida en la bobina es la variación del flujo magnético que la atraviesa.

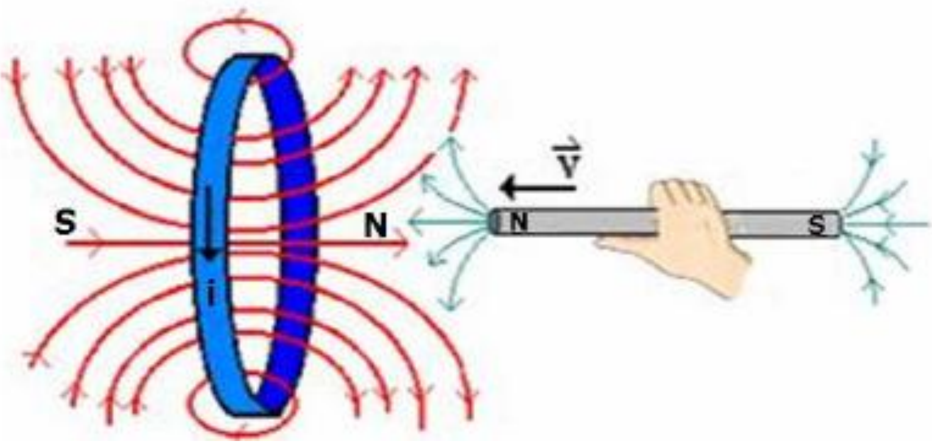
El ruso Heinrich Lenz enunció una ley acerca del sentido de la corriente inducida.

Ley de Lenz: el sentido de la corriente inducida es tal que se opone a la causa que lo originó.

Es decir, el sentido de la corriente inducida se opone a la variación de flujo que la produce.

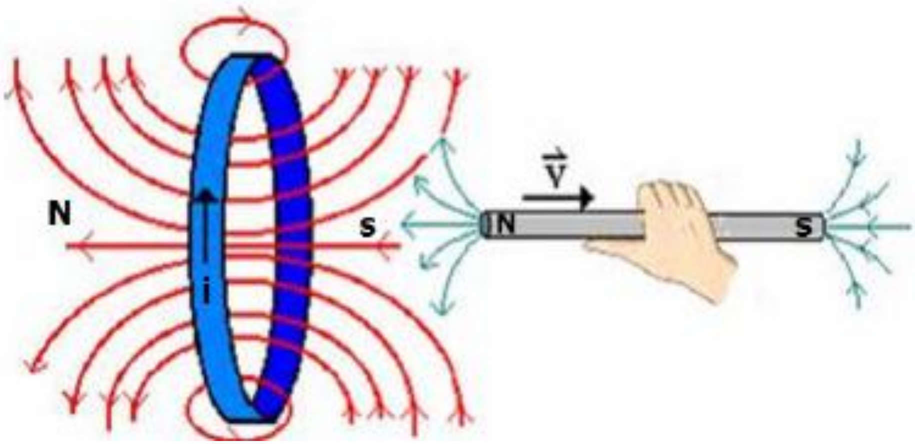
Si la corriente se induce debido a un aumento en el flujo

El sentido de la corriente inducida será el que produzca un campo opuesto al inductor



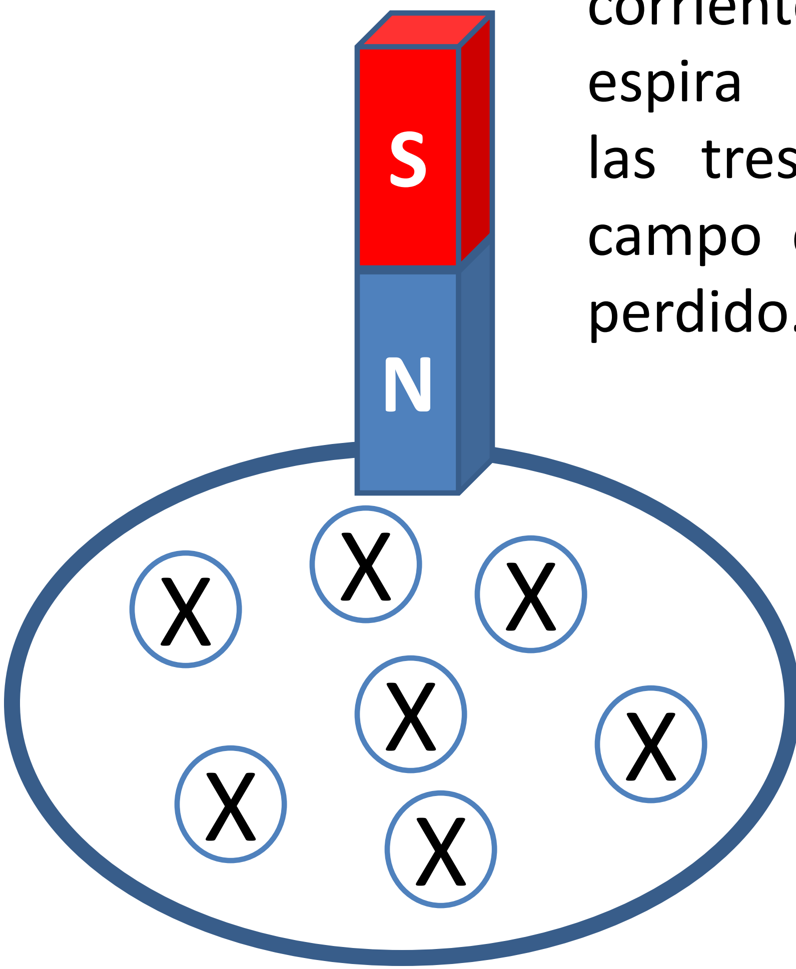
Si la corriente se induce debido a una disminución en el flujo

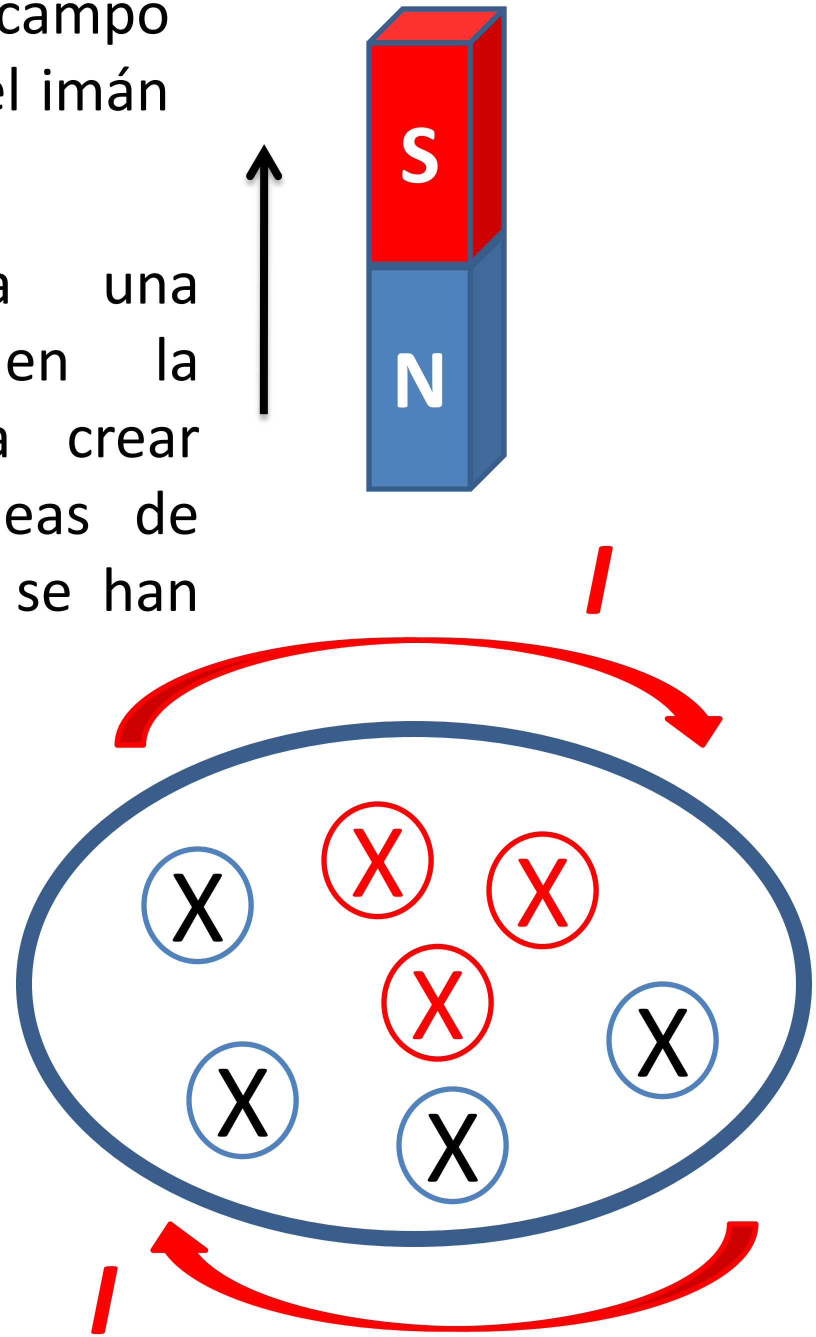
El sentido de la corriente inducida será el que produzca un campo en mismo sentido del inductor



Al inicio el imán genera 7 líneas de campo en el interior de la espira. Al retirar el imán se pierden 3 líneas de campo.

Se genera una corriente en la espira para crear las tres líneas de campo que se han perdido.





LEY DE FARADAY - HENRY

Faraday dio forma matemática a la Ley de Lenz, permitiendo calcular el valor de la corriente inducida.

Ley de Faraday – Henry: la fuerza electromotriz ε inducida en un circuito es igual y de signo contrario a la variación, por unidad de tiempo, del flujo magnético ϕ que lo atraviesa.

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

Obtenida la *fem* inducida, podemos determinar la intensidad de corriente aplicando la ley de Ohm.

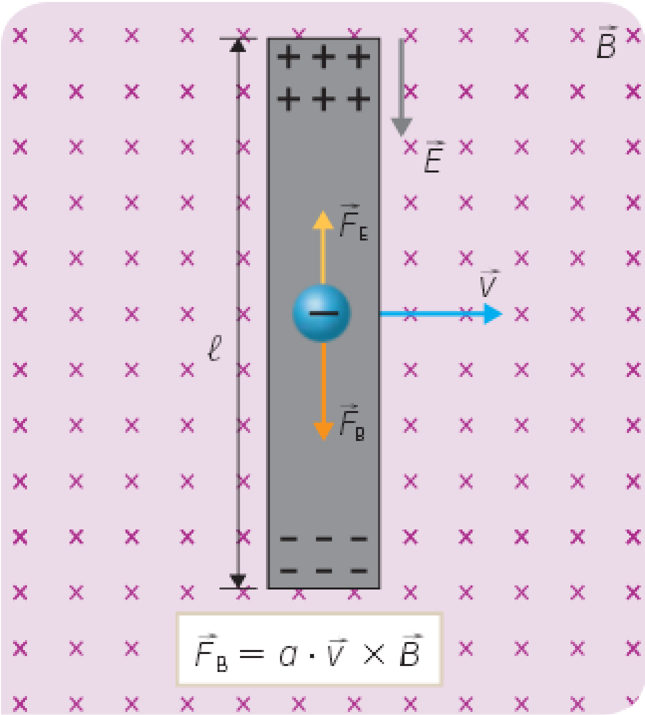
La expresión anterior la podemos poner en forma de variaciones de flujo y de tiempo

$$\varepsilon = -\frac{\Delta \emptyset}{\Delta t}$$

Si podemos calcular el flujo inicial y el flujo final así como la variación de tiempo, podremos aplicar la expresión anterior.

Si lo que tenemos es un flujo variable en el tiempo debido a un campo magnético variable, tendremos que usar la primera expresión y derivar.

FUERZA ELECTROMOTRIZ DE MOVIMIENTO



Supongamos una barra conductora de longitud ℓ que se mueve a una velocidad constante $\vec{v}$ en el seno de un campo magnético $\vec{B}$.

La longitud de la barra, la velocidad y el campo magnético son perpendiculares entre sí.

De acuerdo con la ley de Lorentz, sus electrones se verán sometidos a una fuerza magnética

$$\vec{F} = q \cdot (\vec{v} x \vec{B})$$

La fuerza magnética hace que los electrones se desplacen hacia la parte inferior del conductor.
Debido a la separación de cargas, aparece un campo eléctrico en el conductor que ejercerá una fuerza sobre los electrones, de sentido opuesto al campo eléctrico y sentido opuesto a la fuerza magnética.

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E}$$

Llega un momento en que la acumulación de carga en los extremos de la barra es tal, que la fuerza eléctrica sobre una carga libre contrarresta a la fuerza magnética sobre la misma carga. <u>Se llega al equilibrio entre fuerzas</u>.

$$\vec{F} = \overrightarrow{F_B} + \overrightarrow{F_E} = 0$$

Cuando las fuerzas magnéticas y eléctrica igualan sus módulos se llega a una situación de equilibrio y ya no hay más separación de carga.

$$\left|\overrightarrow{F_B}\right| = \left|\overrightarrow{F_E}\right| \Rightarrow |\cancel{q}| \cdot v \cdot B = |\cancel{q}| \cdot E$$

$$E = v \cdot B$$

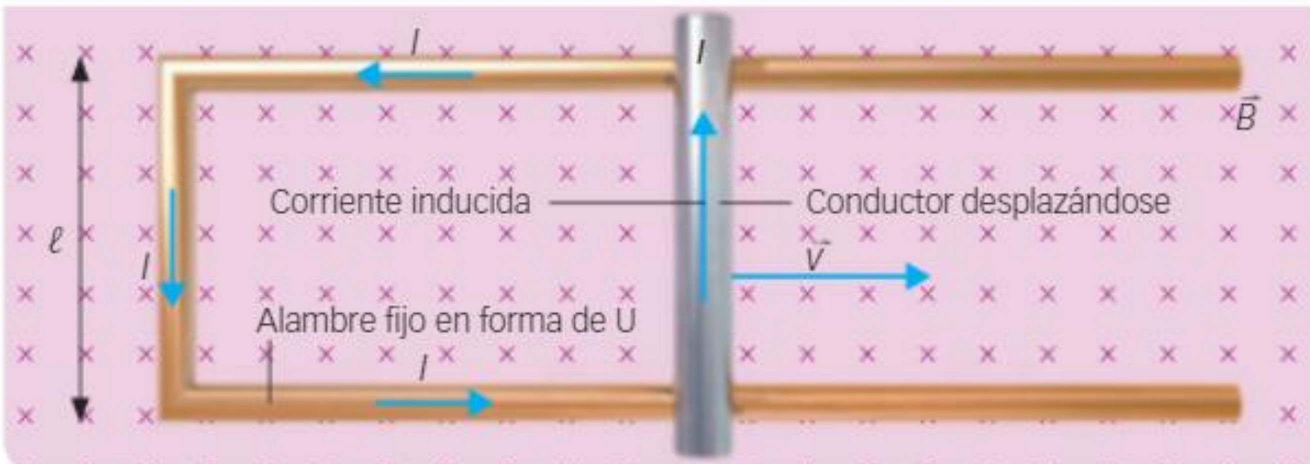
La diferencia de potencial entre los extremos de la barra es igual a la *f.e.m.* de movimiento inducida en ella.

Esta *fem* se puede deducir a partir del campo eléctrico

$$\boxed{\varepsilon = E \cdot l = v \cdot B \cdot l}$$

Una barra conductora que se mueve en un campo magnético experimenta una separación de carga libre. Cuando se establece el equilibrio existe una ***fem de movimiento***.

Si movemos el conductor rectilíneo sobre otro conductor en forma de U, las cargas podrán circular por el circuito que resulta, dando lugar a una corriente inducida.



El sentido de la corriente inducida provoca un campo magnético cuyas líneas se oponen a la variación del flujo en el interior del circuito. Para contrarrestar el flujo magnético entrante en el papel, la corriente inducida provoca un flujo saliente del papel. La corriente circula en sentido antihorario.

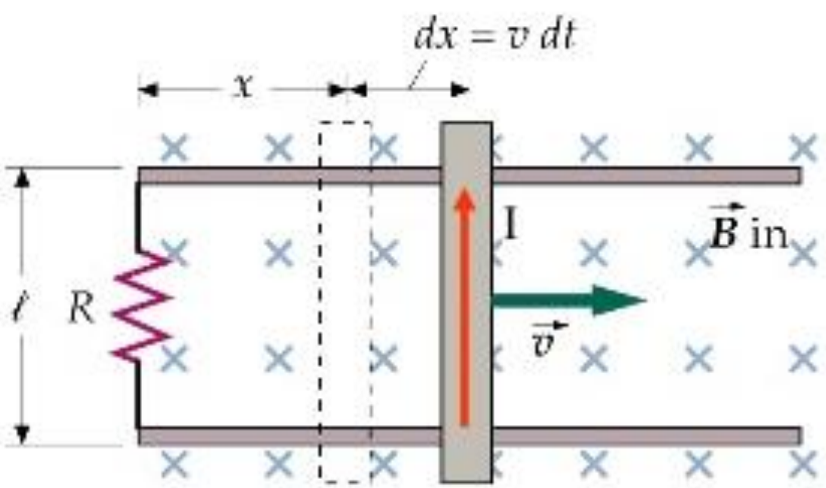
Calculo de la corriente inducida

El cálculo de la corriente inducida lo podemos hacer por medio de la ley de Ohm

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{v \cdot B \cdot l}{R}$$

Otra forma de calcular la fem de movimiento:

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



$$\emptyset = B \cdot S = B \cdot l \cdot x$$

$$\frac{d\emptyset}{dt} = Bl\frac{dx}{dt} = Blv$$

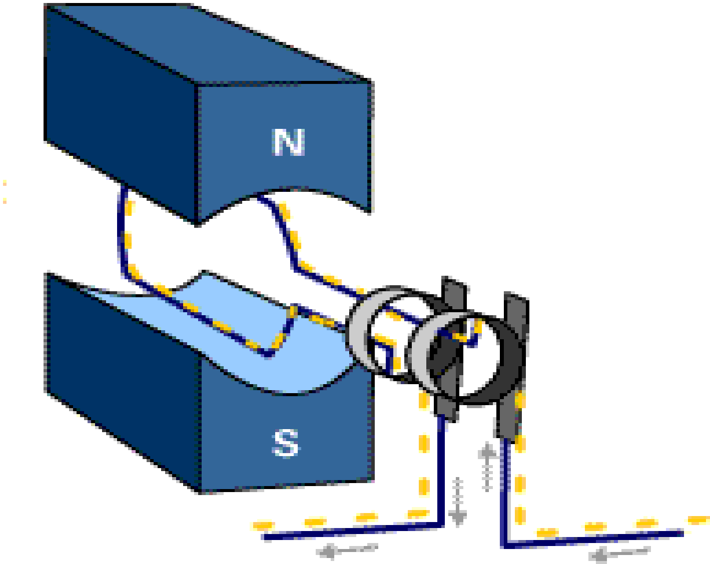
Como $\varepsilon = -\dfrac{d\emptyset}{dt}$ El módulo será $\varepsilon = v \cdot B \cdot l$

GENERADORES DE CORRIENTE ALTERNA

Un ***generador eléctrico*** es un dispositivo capaz de transformar otro tipo de energía en energía eléctrica.

Un ***alternador*** es un generador de corriente alterna. El sentido en que circulan las cargas eléctricas cambia periódicamente.

Un alternador consiste, de manera muy simplificada, en una bobina de N vueltas, donde cada una de ellas encierra una superficie de área S, que rota con velocidad angular constante ω en presencia de un campo magnético uniforme y constante B.



El campo magnético es generado por un electroimán denominado inductor del generador. Por su parte la espira en rotación se llama inducido.

La velocidad angular de giro ω es constante. El ángulo α que forman el vector normal a la espira y el campo magnético varia en el tiempo según la expresión

$$\alpha = \omega \cdot t$$

El flujo magnético a través de la superficie encerrada por la espira es entonces:

$$\emptyset = B \cdot N \cdot S \cdot cos\alpha$$

$$\emptyset = B \cdot N \cdot S \cdot cos\omega t$$

La *fem* inducida en la espira se obtiene aplicando la ley de Faraday

$$\varepsilon = -\frac{d\emptyset}{dt} = -\frac{d}{dt}(B \cdot N \cdot S \cdot cos\omega t)$$

$$\varepsilon = B \cdot N \cdot S \cdot \omega \cdot sen\omega t$$

Una bobina en rotación dentro de un campo magnético genera una fem que varía en el tiempo de forma sinusoidal:

$$\boxed{\varepsilon = \varepsilon_{max} \cdot sen\omega t}$$

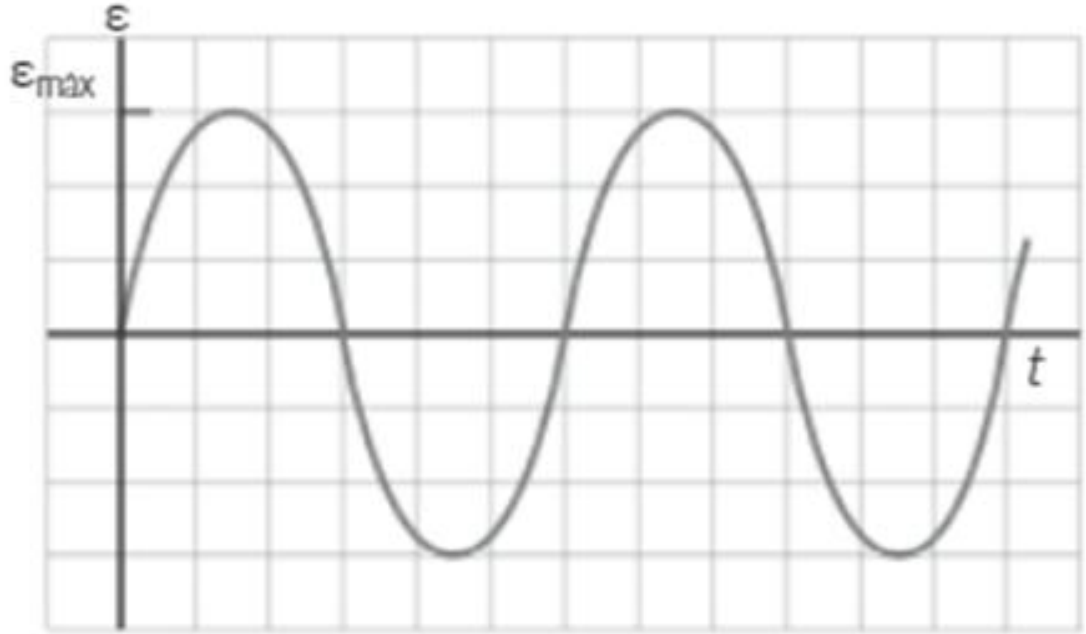
El valor

$$\varepsilon_{max} = B \cdot N \cdot S \cdot \omega$$

se llama amplitud o valor de pico de la *fem* y se mide en voltios. La frecuencia angular ω de la *fem* se mide en rad/s

La frecuencia de la fem, o número de ciclos de la fem por unidad de tiempo es

$$f = \frac{\omega}{2\pi}$$



El valor de la corriente oscila entre un mínimo y un máximo

$$-\varepsilon_{max} \, , +\varepsilon_{max}$$

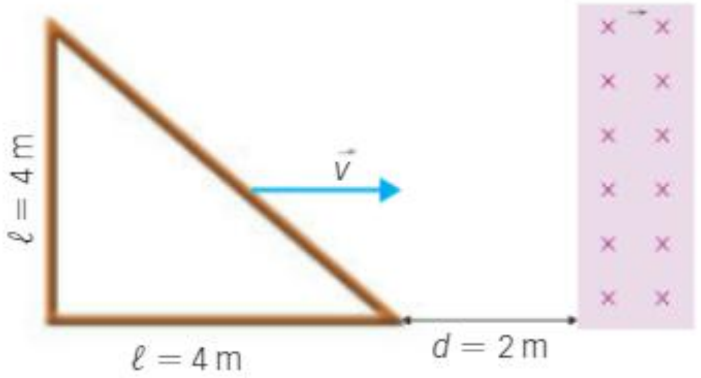
de manera que la polaridad de los terminales cambia en el tiempo: el terminal positivo del generador pasa a ser negativo y el negativo pasa a ser positivo, y así sucesivamente.

EJEMPLO RESUELTO

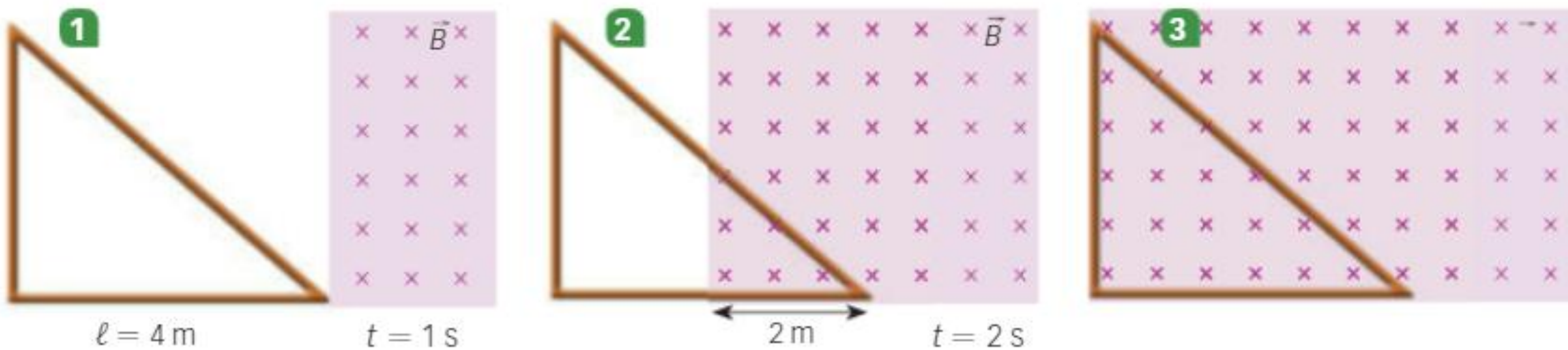
5 Una espira triangular de 4 m de lado se desplaza a 2 m/s hacia una región donde hay un campo magnético $\vec{B}$ perpendicular al plano de la espira como se indica en la figura. Si en $t = 0$ s la espira está a 2 m del campo:

a) Indica la expresión de la fem inducida en la espira cuando penetra en la región del campo magnético. Calcula el valor del campo si en el instante $t = 2$ s la fem inducida es $\varepsilon = 1{,}6$ V.

b) Haz una gráfica de la fem, $\varepsilon(t)$ en función del tiempo, en el intervalo de 0 a 5 s. Indica en cada instante el sentido de la corriente inducida.



Dibuja la posición de la espira con respecto al campo en diferentes instantes:



a) Teniendo en cuenta la ley de Faraday:

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

$$d\phi_B = \vec{B} \cdot d\vec{S} = B \cdot dS \cdot \cos\theta = B \cdot dS$$

La espira está perpendicular al campo, $\cos\theta = 1$.

El campo magnético no varía, ni tampoco la orientación de la espira. La variación del flujo se debe a la variación de la superficie de la espira dentro del campo.

La superficie de la espira que está dentro del campo es función de su velocidad. Por ser una espira con forma de triángulo rectángulo de lados iguales, la velocidad determina el valor de los dos lados de la misma que están dentro del campo magnético.

$$\varepsilon = -\frac{d\phi_B}{dt} = -B \cdot \frac{d(S)}{dt} = -B \cdot \frac{d\left[\frac{1}{2} \cdot (v \cdot t) \cdot (v \cdot t)\right]}{dt} =$$

$$= -\frac{1}{2} \cdot B \cdot \frac{d(v^2 \cdot t^2)}{dt} = -\frac{1}{2} \cdot B \cdot v^2 \cdot 2 \cdot t = -B \cdot v^2 \cdot t$$

Es decir, la fem aumenta linealmente con el tiempo a partir de $t_0 = 1$ s.

Observa en los esquemas la superficie de la espira dentro del campo en $t = 1$ s, $t = 2$ s y $t = 3$ s.

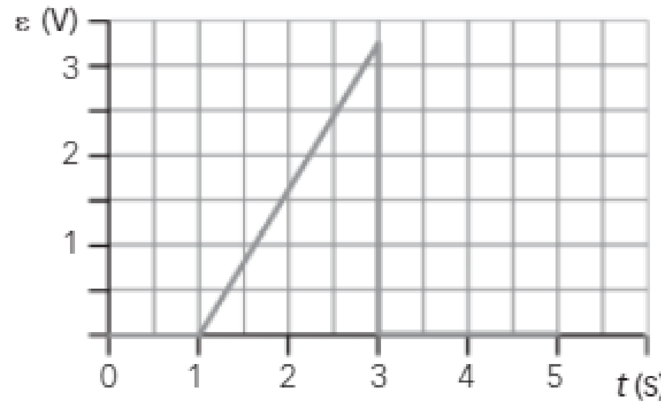
Para $t = 2$ s:

$$|\varepsilon| = B \cdot v^2 \cdot t \rightarrow B = \frac{|\varepsilon|}{v^2 \cdot t} = \frac{1{,}6\ \text{V}}{(2\ \text{m/s})^2 \cdot (2 - 1)\ \text{s}} = \mathbf{0{,}4}$$

b) La fem inducida aumenta desde el segundo 2 al 3 porque aumenta la superficie de la espira que está dentro del campo. Para $t = 3$ s:

$$|\varepsilon| = B \cdot v^2 \cdot t = 0{,}4\ \text{T} \cdot (2\ \text{m/s})^2 \cdot (3 - 1)\ \text{s} = 3{,}2\ \text{V}$$

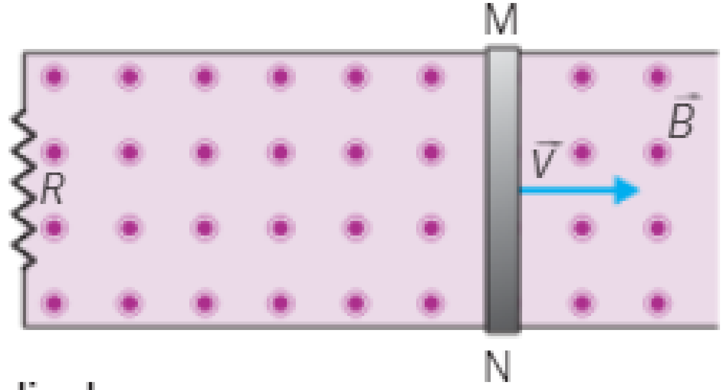
A partir de $t = 3$ s, toda la espira está en el campo. Por tanto, no varía el flujo magnético que la atraviesa.



En todo el proceso en que la espira entra en el campo aumenta en ella el flujo del campo que entra en el papel. La corriente inducida en la espira genera un flujo saliente del papel, para lo cual la corriente inducida en la espira tendrá sentido antihorario.

EJEMPLOS RESUELTOS

7 Sea un circuito en el seno de un campo magnético uniforme de valor 0,4 T. Se introduce una varilla MN que se mueve perpendicular al campo con una velocidad constante de 2 m/s.



a) Calcula la fuerza electromotriz inducida y la intensidad de la corriente que circula en el circuito.

b) La varilla se frena con aceleración constante en el instante $t = 0$ s hasta pararse en $t = 2$ s. Determina la expresión matemática de la fem en función del tiempo, en el intervalo de 0 a 2 s.

Datos: $R = 30\,\Omega$; $\ell = 1{,}2$ m.

a) De acuerdo con la ley de Faraday:

$\vec{B}$ y $\vec{S}$ son perpendiculares

$$\varepsilon = -\frac{d\phi_B}{dt} = -\frac{d(\vec{B}\cdot\vec{S})}{dt} = -\frac{d(B\cdot S)}{dt} =$$

B es cte.

$$= -\frac{B\cdot dS}{dt}$$

La variación en la superficie atravesada por el campo se debe al desplazamiento de la varilla:

$$\varepsilon = -\frac{B \cdot dS}{dt} = -\frac{B \cdot \ell \cdot dx}{dt} = -B \cdot \ell \cdot v$$

Como el campo es perpendicular al circuito:

$$\vec{B} \cdot \vec{S} = B \cdot S$$

Sustituye los datos por sus valores en unidades del SI:

$$\varepsilon = -B \cdot \ell \cdot v = -0{,}4 \cdot 1{,}2 \cdot 2 = \mathbf{-0{,}96\ V}$$

De acuerdo con la ley de Ohm:

$$V = I \cdot R \rightarrow I = \frac{V}{R} = \frac{0{,}96\ \text{V}}{30\ \Omega} = \mathbf{0{,}032\ A}$$

b) La velocidad de la varilla vendrá dada por la expresión:

$$v = v_0 + a \cdot t \rightarrow 0 = 2 + a \cdot 2 \rightarrow a = -1\ \text{m/s}^2$$

En ese intervalo la velocidad viene dada por:

$$v = 2 - t$$

Y la fem inducida será:

$$\varepsilon = -B \cdot \ell \cdot v = \mathbf{-0{,}4 \cdot 1{,}2 \cdot (2 - \mathit{t})\ V}$$