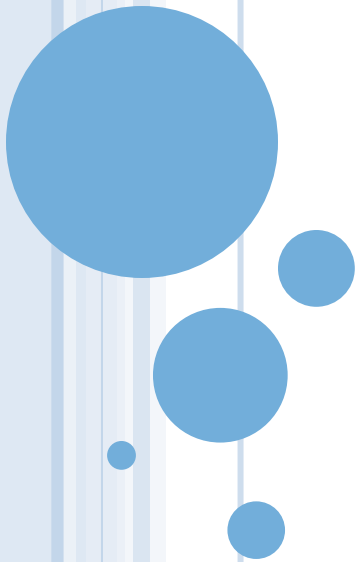
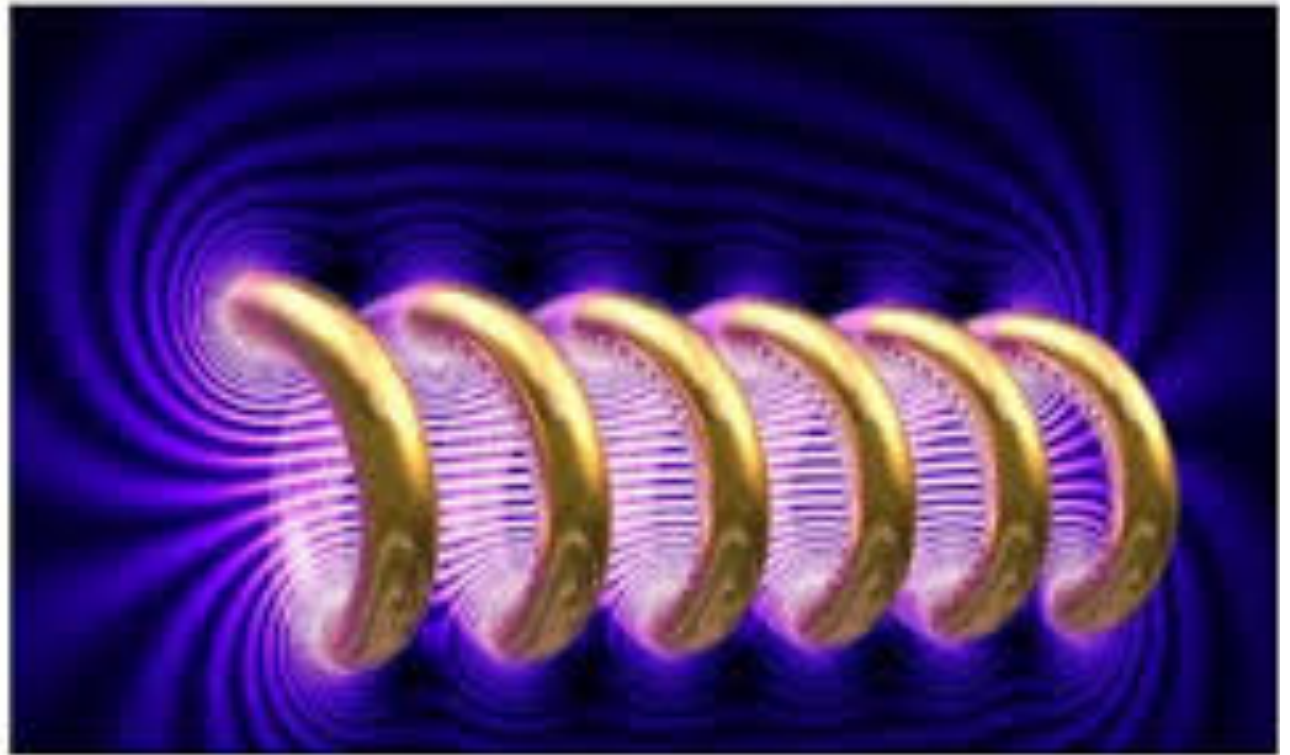


## TEMA 6.- INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA.

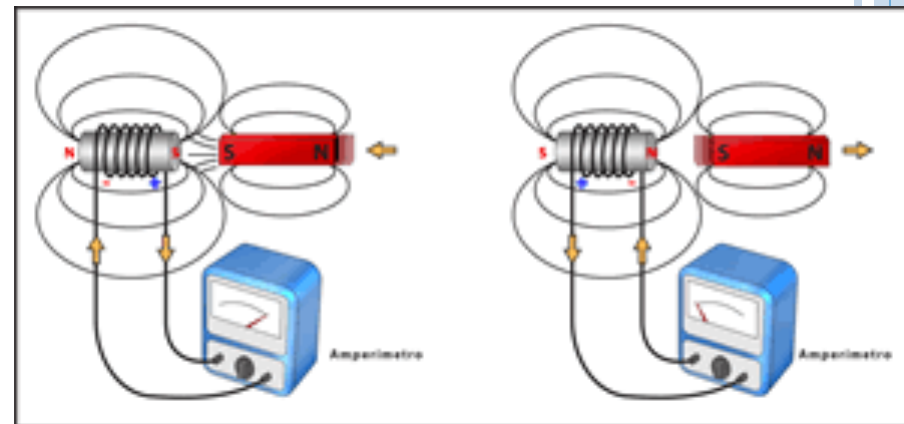


## 6.1.- Inducción de la corriente eléctrica.

- ✚ Las **experiencias de Oersted** han puesto de manifiesto que son las corrientes eléctricas (cargas en movimiento) las responsables de la generación de los campos magnéticos.
- ✚ Nos planteamos entonces la situación inversa: **¿será posible crear una corriente eléctrica a partir de una campo magnético?**
- ✚ La respuesta es que **SÍ**, y da lugar a la **Inducción Electromagnética**: que es la base de gran cantidad de procesos de generación de energía que disponemos en la actualidad.

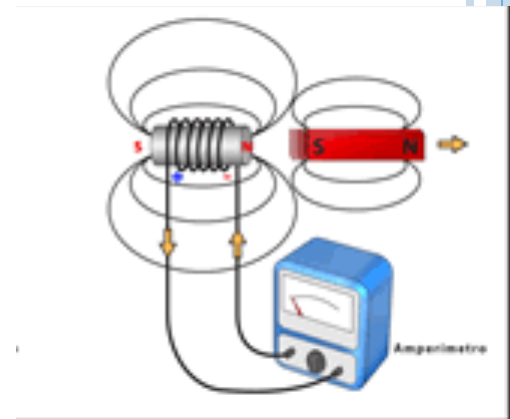
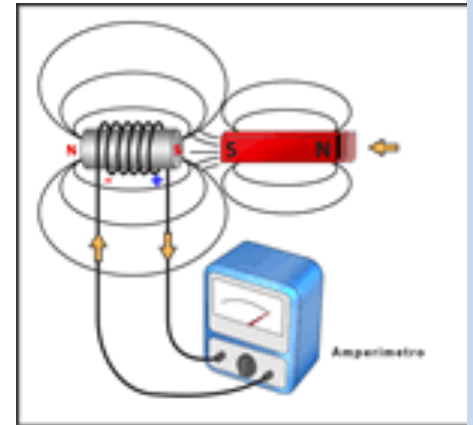
### 6.1.1.- Las experiencias de Faraday.

- ✚ **Primera experiencia de Faraday**: consiste en acercar un imán a una bobina conectada a un amperímetro que detecta si tenemos corriente eléctrica en el circuito.



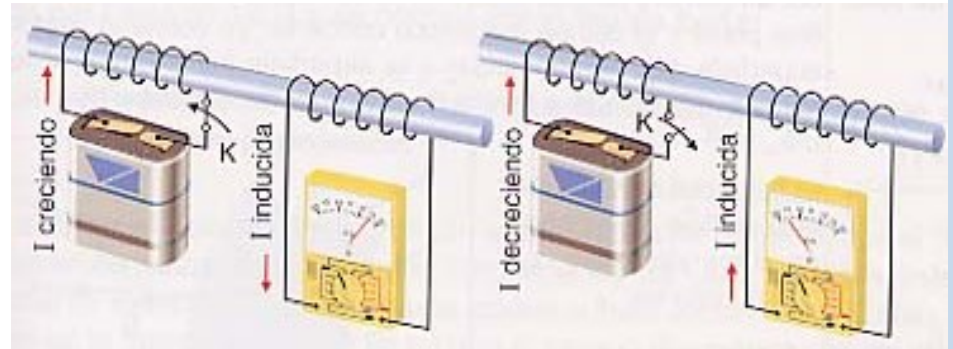
✚ Los **resultados obtenidos** son los siguientes:

- ❖ Al colocar el imán en reposo el amperímetro marca cero. No se detecta ninguna corriente.
- ❖ Al acercar el polo Sur del imán aparece una intensidad en la bobina en sentido horario.
- ❖ Al dejar el imán en reposo dentro de la bobina el amperímetro marca cero. No se detecta ninguna corriente.
- ❖ Al alejar el polo Sur del imán aparece una intensidad de corriente en sentido antihorario.
- ❖ Si cambiamos los polos del imán los resultados obtenidos son similares cambiando el sentido de las corrientes inducidas.
- ❖ El valor de la intensidad inducida depende de la potencia del imán, de la velocidad a la que se mueve y del  $n^{\circ}$  de espiras de la bobina



✚ **Segunda experiencia de Faraday:** consiste en enrollar dos bobinas sobre una barra de Fe. La primera bobina conectada a una pila con un interruptor y la segunda a un amperímetro.

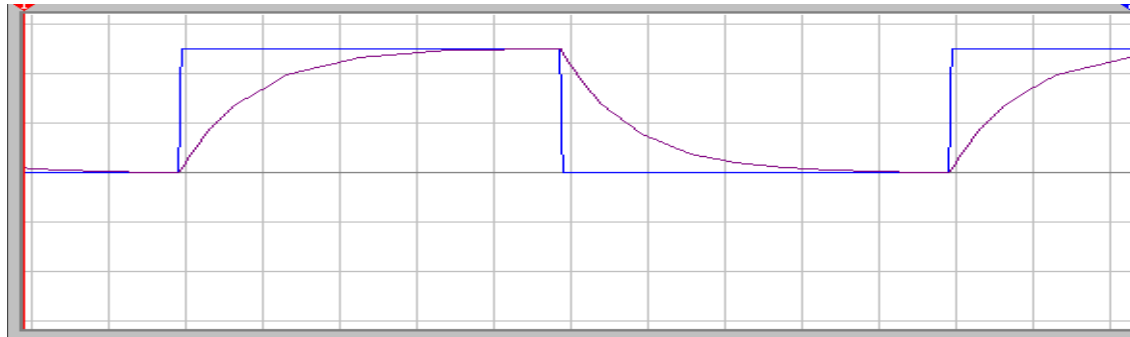
✚ Los **resultados obtenidos** son los siguientes:



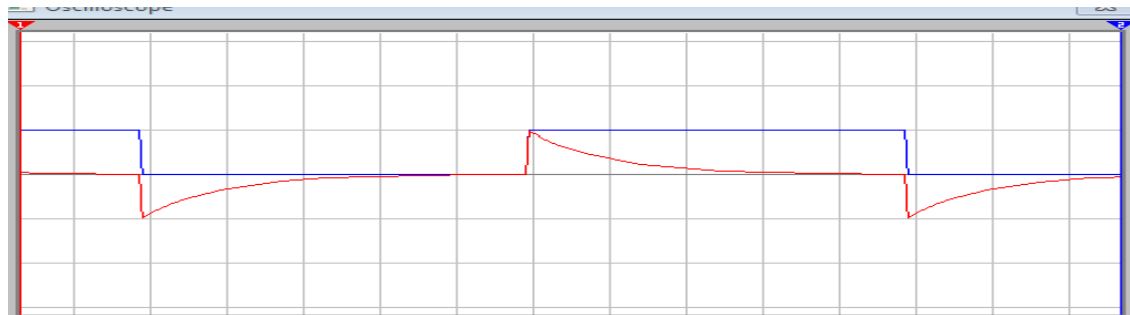
- ❖ Al cerrar el interruptor en la primera bobina aparece una intensidad de corriente  $I_1$  en sentido horario que crece de manera exponencial hasta alcanzar el valor máximo.
- ❖ Durante ese periodo aparece una intensidad  $I_2$  en la segunda bobina en sentido antihorario, que inicialmente tiene un valor máximo, y decrece de forma exponencial.
- ❖ Cuando la intensidad  $I_1$  alcanza su valor máximo y se estabiliza, la intensidad  $I_2$  se hace cero.
- ❖ Al abrir el circuito la intensidad  $I_1$  (sentido horario) disminuye de forma exponencial hasta llegar a cero. Durante ese periodo, aparece una intensidad  $I_2$  en sentido horario en la segunda bobina que inicialmente tiene un valor máximo, pero decrece a cero de forma exponencial.

✚ Veamos la **representación gráfica de ambas intensidades:**

❖ Gráfica de la intensidad  $I_1$  (rojo) y de la fuente de tensión (azul) frente al tiempo:



❖ Gráfica de la intensidad  $I_2$  y de la fuente de tensión frente al tiempo:



✚ La **inducción electromagnética** consiste en la aparición de una **corriente eléctrica inducida** en un circuito cuando **varía el número de líneas de campo magnético** que lo atraviesa.

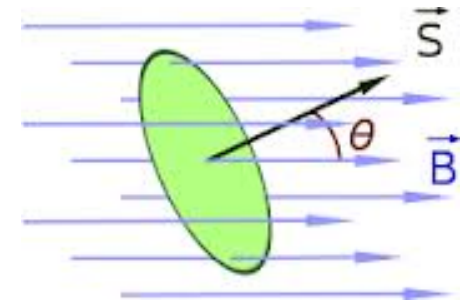
*(Video 1: Las experiencias de Faraday)*

## 6.1.2.- Flujo magnético.

✚ El **flujo magnético**  $\phi_m$  [Wb] a través de una superficie es una medida del número de líneas de campo magnético que lo atraviesa.

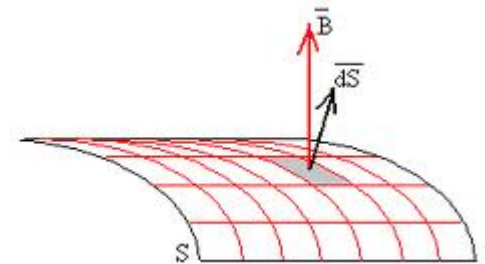
❖ A) Campo B uniforme y superficie plana:

$$\phi_m = B \cdot S \cdot \cos \theta = \vec{B} \cdot \vec{S}$$



❖ B) Campo B variable y superficie no plana:

$$\phi_m = \int \vec{B} \cdot d\vec{S}$$



## 6.1.3.- Ley de Lenz.

✚ El sentido de la corriente inducida es tal que **se opone a la variación** de flujo magnético que la ha producido. Puede ser debido a:

- ❖ Variación de la intensidad del campo magnético (1ª exp. de Faraday).
- ❖ Variación de la superficie del circuito (experiencia de Henry).
- ❖ Variación de la orientación del campo y la superficie (alternador).

✚ **Video 2: espira entrando en un campo magnético.**

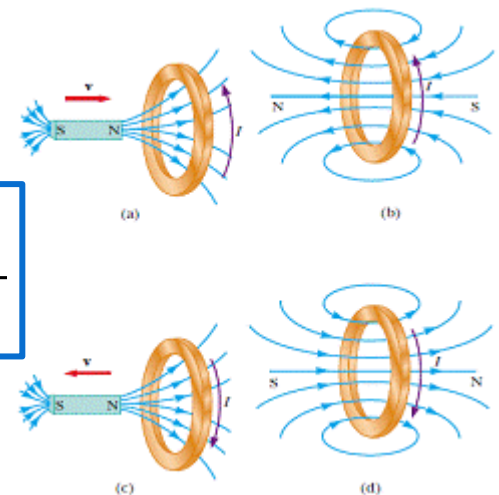
## 6.1.4.- Ley de Faraday.

✚ Formulación matemática operativa de la ley de Lenz:

$$\mathcal{E}_{fem} = -\frac{d\phi_m}{dt} \quad [volt]$$

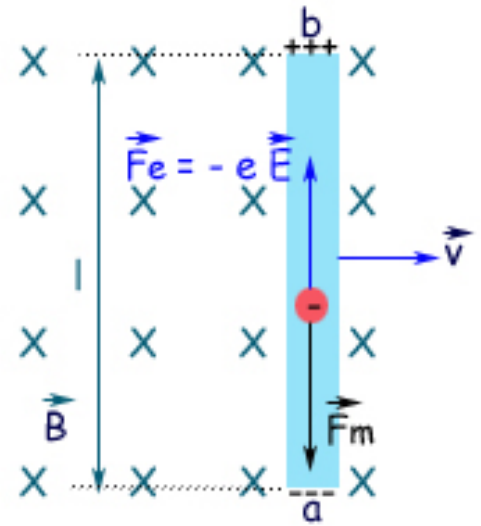
- ❖  $\mathcal{E}_{fem}$  [volt] es la fuerza electromotriz inducida en el circuito y responsable de la intensidad de corriente inducida.
- ❖ “ - ” se opone a la variación del flujo magnético que lo ha producido.
- ❖  $\frac{d\phi_m}{dt}$ : la variación del flujo magnético que produce la inducción.
- ❖ La intensidad de corriente inducida se calcula a partir de la ley de Ohm:

$$V = R \cdot I \quad \longrightarrow \quad I = \frac{V}{R} \quad \longrightarrow \quad I = \frac{\mathcal{E}_{fem}}{R} = -\frac{1}{R} \frac{d\phi_m}{dt}$$



### 6.1.5.- Experiencia de Henry.

✚ Consideremos una barra conductora de longitud  $L$ , moviéndose perpendicularmente a un campo magnético.



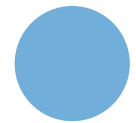
✚ El campo magnético actúa sobre las cargas eléctricas que se pueden mover libremente dentro del conductor de manera que:

- ❖ Aparece una  $F_m$  sobre las cargas positivas:  $\vec{F}_m = +qVxB \hat{j}$
- ❖ Aparece una  $F_m$  sobre las cargas negativas:  $\vec{F}_m = -qVxB \hat{j}$

✚ Se produce entonces una **polarización** de la barra acumulándose carga positiva en la zona superior y negativa en la inferior.

✚ Se genera un campo en el interior de la barra (hacia abajo), que actúa sobre las cargas eléctricas produciendo una fuerza electrostática:

$$\vec{F}_e = -qE \hat{j}$$





- Se alcanza entonces una **situación de equilibrio** entre la  $F_m$  que tiende a separar las cargas eléctricas y la  $F_e$  que tiende a recombinarlas, en la que:

$$\vec{F}_m = \vec{F}_e \quad \longrightarrow \quad qVB = qE \quad \longrightarrow \quad VB = E$$

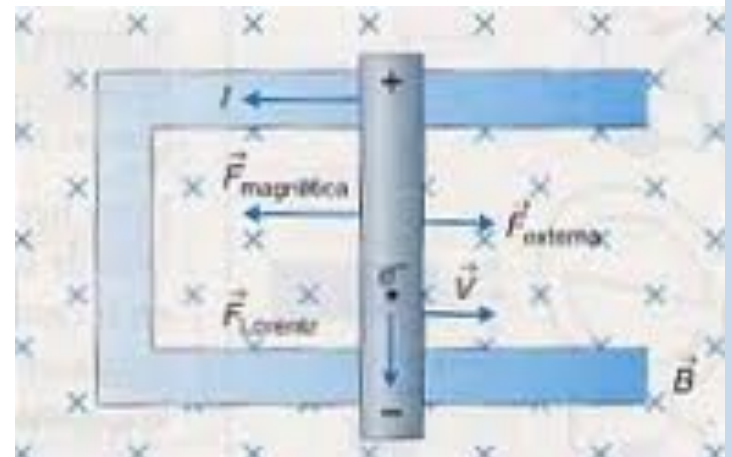
- Aparece entonces una **fem inducida** en los extremos de la barra que se puede determinar a partir de:

$$\varepsilon_{fem} = E \cdot L = VBL$$

- Al colocar la barra sobre un conductor en forma de U, cerramos el circuito y aparece la corriente eléctrica en sentido antihorario.
- Aparece además una  $F_m$  sobre la barra que se opone al movimiento de ésta y que viene dado por la ley de Lorentz:

$$\vec{F}_m = I \cdot \vec{L} \times \vec{B} = -ILB \hat{i}$$

- Video 3: La experiencia de Henry .**



- ✚ Vamos a resolver la experiencia de Henry aplicando la inducción electromagnética. Para ello consideremos que al desplazarse la barra hacia la derecha aumenta la superficie del circuito:

$$S(t) = L_1 x L_2 \quad \longrightarrow \quad S(t) = Lx(V \cdot t) = LVt$$

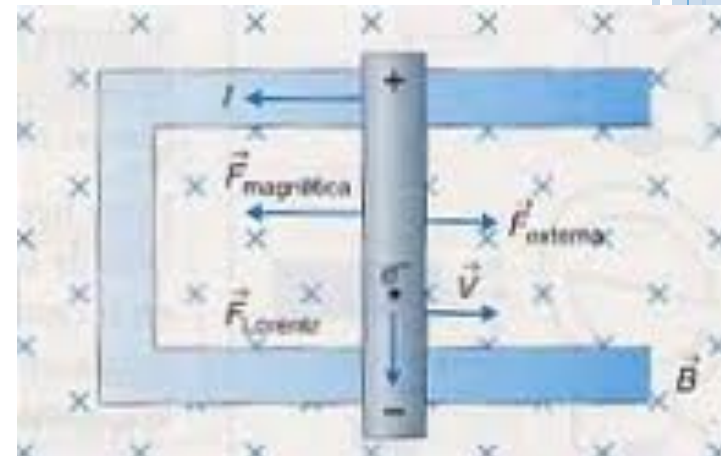
- ✚ Al aumentar la superficie del circuito, aumenta también el flujo magnético:

$$\phi_m(t) = B \cdot S(t) = BLVt$$

- ✚ Aparece entonces una f.e.m inducida en el circuito que viene dada por la ley de Lenz-Faraday:

$$\varepsilon_{fem} = -\frac{d\phi_m(t)}{dt} = -\frac{d(BLVt)}{dt} \quad \longrightarrow \quad \boxed{\varepsilon_{fem} = -BLV}$$

- Misma expresión obtenida anteriormente.
- “-”: se opone al aumento del flujo magnético sentido antihorario de la corriente inducida.



## 6.2.- Aplicaciones de la inducción electromagnética.

### 6.2.1.- Generadores eléctricos.

- ✚ **Un generador eléctrico** es un dispositivo capaz de transformar cualquier tipo de energía en energía eléctrica.
- ✚ **Un receptor eléctrico** es un dispositivo capaz de transformar esa energía eléctrica en cualquier otro tipo de energía: mecánica, cinética, calorífica, luminosa,...
- ✚ **El alternador:** constituido por una espira que gira ( $\omega = \text{cte.}$ ) dentro de un campo magnético  $B$  constante.

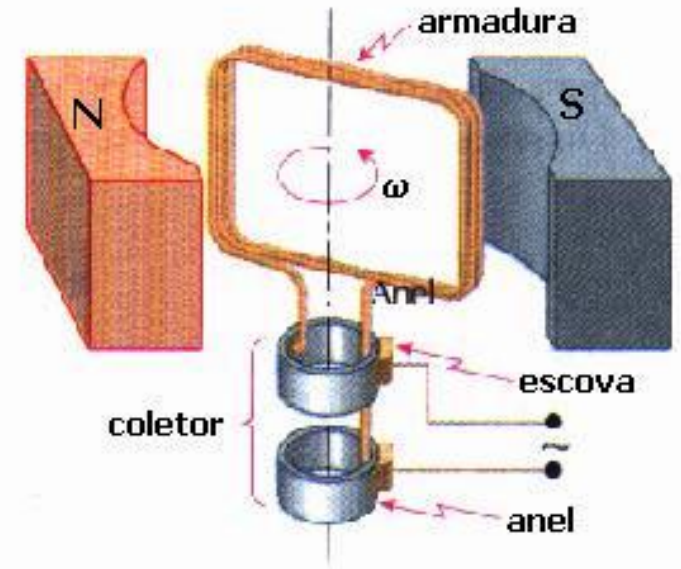
- ❖ El flujo magnético a través de la espira:

$$\phi_m = B \cdot S \cdot \cos\Theta = B \cdot S \cdot \cos(\omega t).$$

- ❖ Aplicando la ley de Lenz-Faraday:

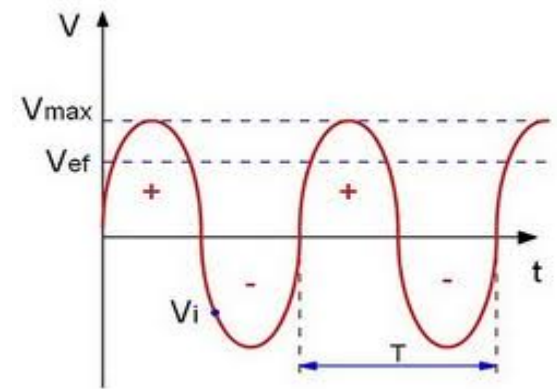
$$\varepsilon_{fem} = - \frac{d\phi_m(t)}{dt} = - \frac{d(BS \cos(\omega t))}{dt}$$

$$\varepsilon_{fem} = +BS\omega \cdot \text{sen}(\omega t) \quad \longrightarrow \quad \varepsilon_{fem} = \varepsilon_{\max} \cdot \text{sen}(\omega t)$$



- Obtenemos una fem inducida en corriente alterna (AC), cuyo valor máximo viene dado por:

$$\varepsilon_{\max} = +BS\omega$$



- El valor eficaz de la corriente alterna no coincide con su valor máximo y viene dado por:

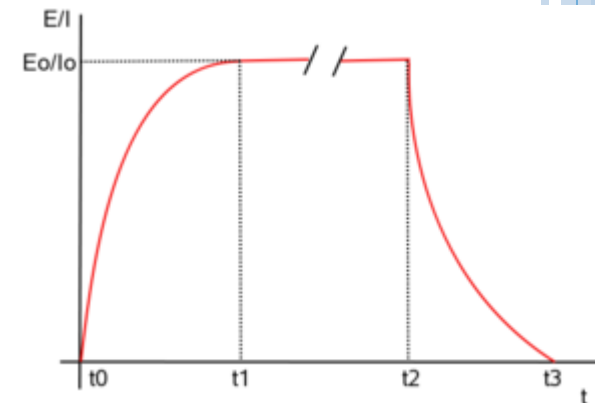
$$\varepsilon_{ef} = \frac{\varepsilon_{\max}}{\sqrt{2}} = \frac{BS\omega}{\sqrt{2}}$$

[Video 4: El alternador.](#)

### 6.2.2.- Autoinducción.

- Hemos comentado anteriormente que la intensidad de corriente que se genera en una bobina no aparece de forma inmediata.

- Tiene un periodo transitorio en la que presenta un crecimiento exponencial hasta alcanzar el valor máximo, donde se alcanza el régimen estacionario.



✚ Esto es debido a un fenómeno que se conoce como autoinducción.

❖ El campo B en la bobina es proporcional a la I que circula por la bobina.

❖ El flujo magnético  $\Phi_m$  es proporcional a la I que circula por la bobina y viene dado por:

$$\text{❖ } \Phi_m = L \cdot I$$

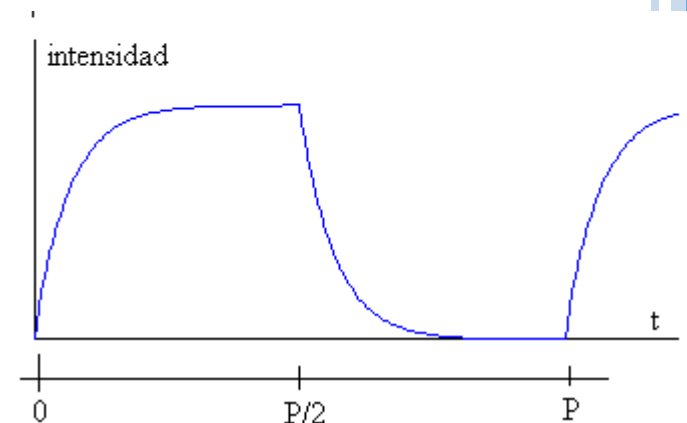
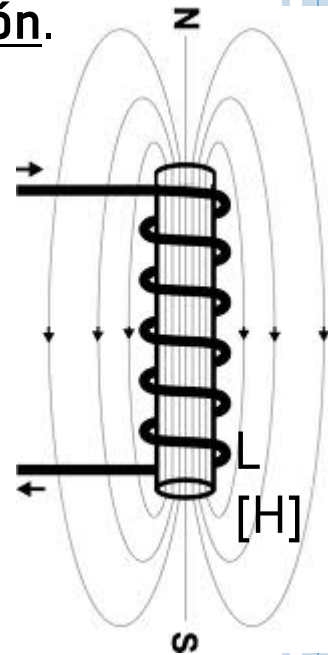
❖ L: coeficiente de autoinducción en la bobina [Henrios: H]

❖ Cuando aparece la I en la bobina, aparece un campo B y un flujo magnético  $\Phi_m$ .

❖ Cuando aumenta la I en la bobina, aumenta el campo B y aumenta el flujo magnético  $\Phi_m$ .

❖ Al aumentar el flujo magnético  $\Phi_m$  se autoinduce un fem en la bobina que se opone al aumento  $\Phi_m$  y retrasa el crecimiento de I. Viene dada por:

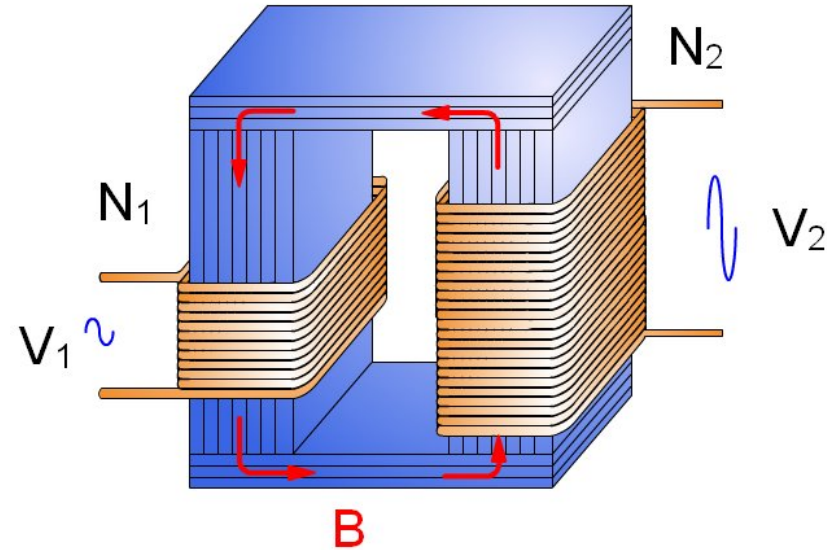
$$\varepsilon_{fem} = -\frac{d\phi_m(t)}{dt} = -\frac{d[LI(t)]}{dt} = -L \frac{dI(t)}{dt}$$



### 6.2.3.- Inducción mutua: el Transformador.

Componente eléctrico constituido por:

- ❖ Núcleo de material ferromagnético.
- ❖ Una bobina primaria con  $n^{\circ}$  de vueltas  $N_1$ .
- ❖ Una bobina secundaria con  $n^{\circ}$  de vueltas  $N_2$ .
- ❖ Un voltaje de entrada  $V_1$  en corriente alterna (AC).



Funcionamiento:

- ❖ El voltaje de entrada en AC genera una corriente  $I(t)$  alterna y un flujo magnético variable  $\Phi_m(t)$  en el enrollamiento primario.
- ❖ Aplicando la ley de Lenz-Faraday tenemos la relación del voltaje  $V_1$  con la variación del flujo magnético:

$$V_1 = -N_1 \frac{d\phi_m(t)}{dt}$$

- ❖ El núcleo de material ferromagnético confina e intensifica las líneas de campo magnético, de manera que todas las líneas de campo magnético que atraviesan la primera espira, lo hacen también en la segunda.
- ❖ El voltaje de entrada en AC genera una corriente  $I$  alterna y un flujo magnético variable en el enrollamiento primario.

- ❖ Aplicando la Ley de Lenz-Faraday en la segunda bobina tenemos una relación similar:

$$V_2 = -N_2 \frac{d\phi_m(t)}{dt}$$

- ❖ Gracias al núcleo, las dos bobinas están en inducción total de manera que la variación de flujo es la misma en las dos bobinas. Tenemos entonces:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\phi_m(t)}{dt} &= -\frac{V_1}{N_1} \\ \frac{d\phi_m(t)}{dt} &= -\frac{V_2}{N_2} \end{aligned} \right\} \quad -\frac{V_1}{N_1} = -\frac{V_2}{N_2} \quad \longrightarrow \quad \boxed{V_2 = \frac{N_2}{N_1} V_1}$$

- ❖ Jugando con los enrollamientos  $N_1$  y  $N_2$  podemos ajustar la tensión de salida en el secundario.

- ❖ Un aumento de  $V_2$  en el secundario se obtiene con una disminución de la intensidad  $I_2$ :  $P = cte \longrightarrow P_1 = P_2 \longrightarrow V_1 I_1 = V_2 I_2$