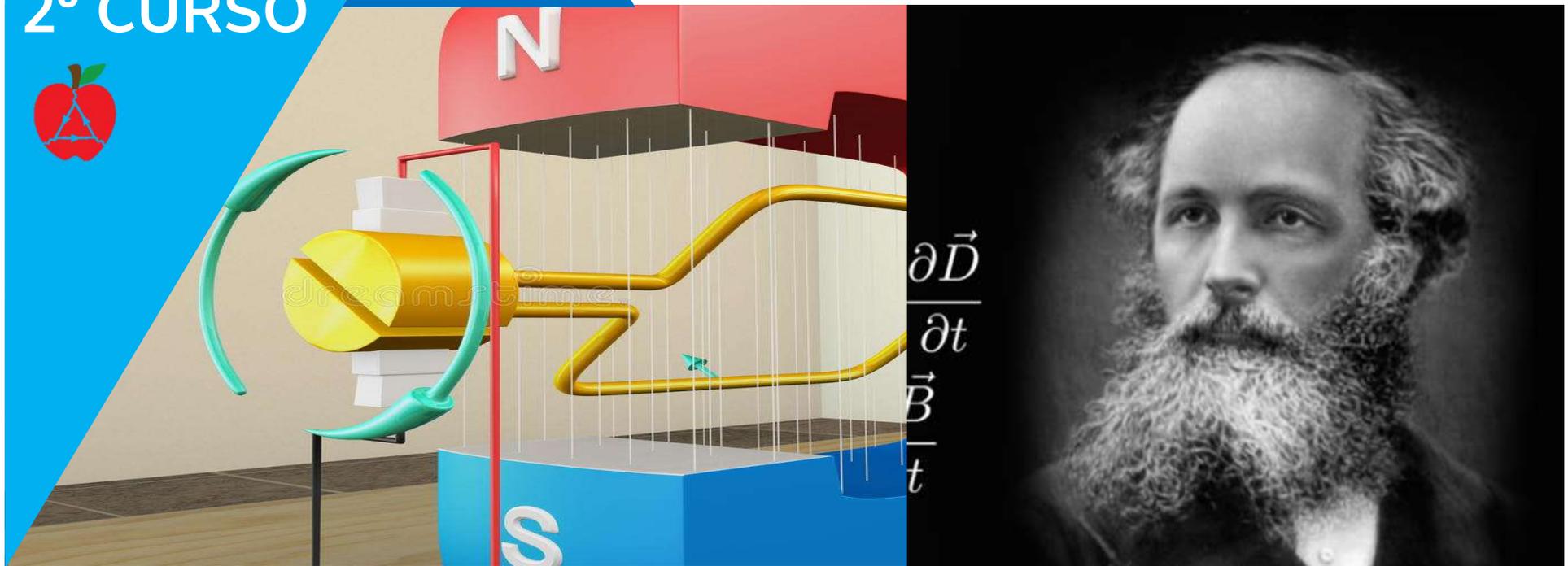


FÍSICA

2º CURSO



BLOQUE 2: CAMPO ELECTROMAGNÉTICO 04. INDUCCIÓN MAGNÉTICA



Se organiza alrededor de los conceptos de campos eléctrico y magnético, con el estudio de sus fuentes y de sus efectos, además de los fenómenos de inducción y las ecuaciones de Maxwell.

**1. Inducción electromagnética**

1.1. Experiencias de Faraday.

1.2. Ley de Faraday en términos de flujo magnético.

1.3. Ley de Lenz.

1.4. Formas de inducir la corriente.

2. El fenómeno de la autoinducción

2.1. La inductancia, L , como medida de la autoinducción.

3. Aplicaciones del fenómeno de autoinducción

3.1. Generadores de corriente alterna.

3.2. Generadores de corriente continua.

3.3. Motores eléctricos.

3.4. Transformadores.

4. La unificación de Maxwell**5. El magnetismo natural**



Michael Faraday (1791-1867)

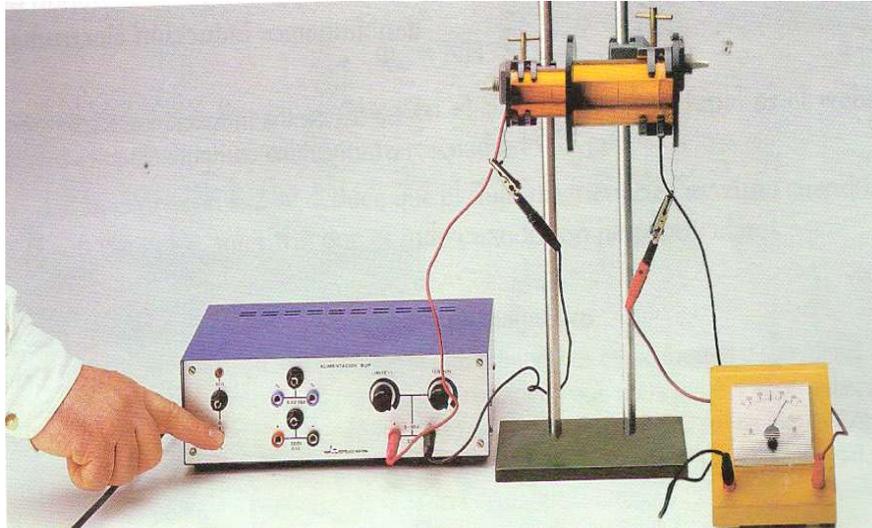


Joseph Henry (1816 -1887)

“Si de la electricidad surgía magnetismo, ¿por qué motivo el magnetismo no habría de generar a su vez electricidad?”

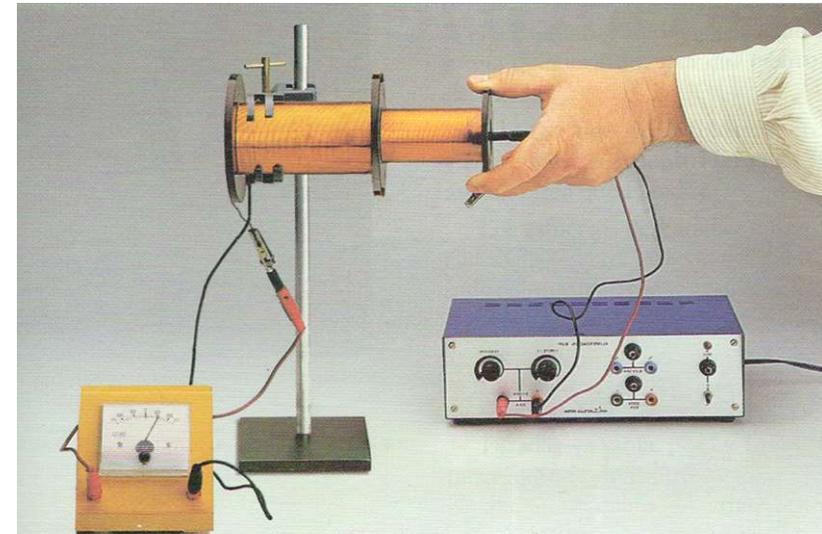


1.1. Experiencias de Faraday



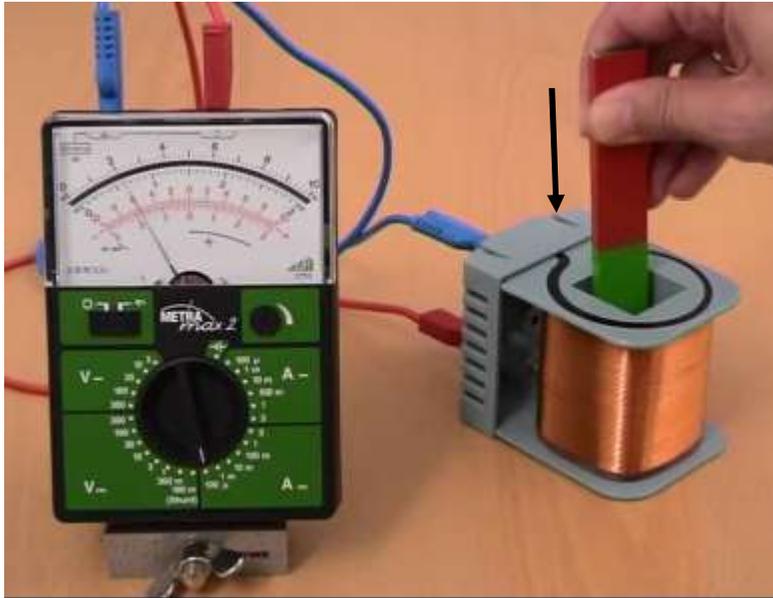
Al conectar y desconectar la batería, se induce corriente.

La variación del campo magnético de la primera bobina era lo que inducía la corriente eléctrica momentánea en la segunda.

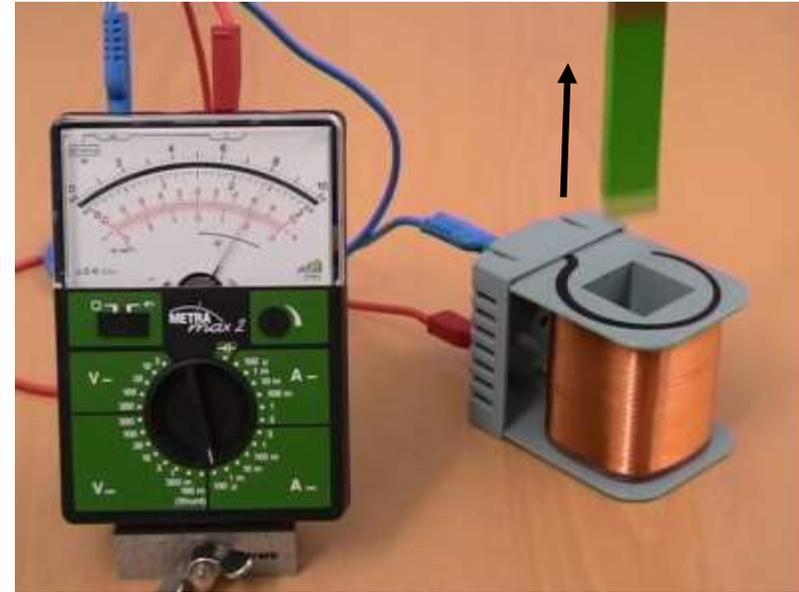


El movimiento de las bobinas induce corriente eléctrica

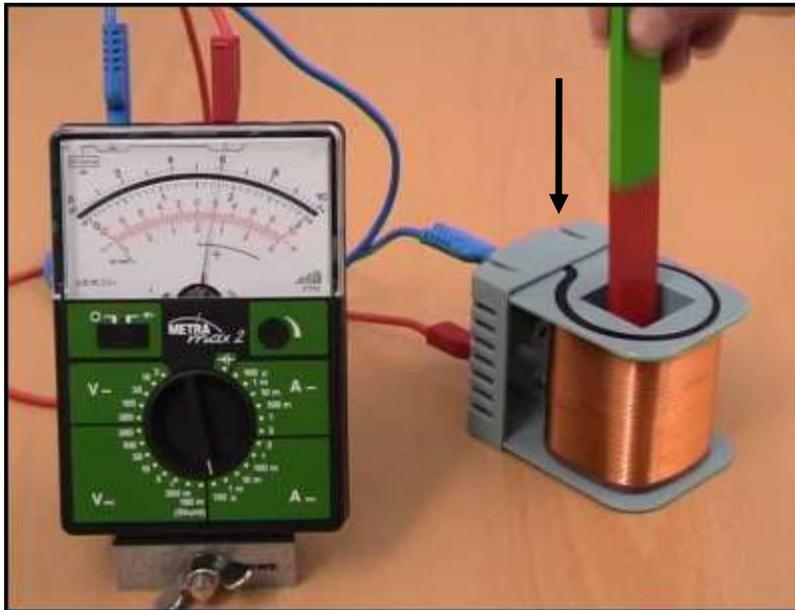
La variación del campo magnético de la primera bobina, que atraviesa la segunda, era lo que inducía la corriente eléctrica momentánea en la segunda.



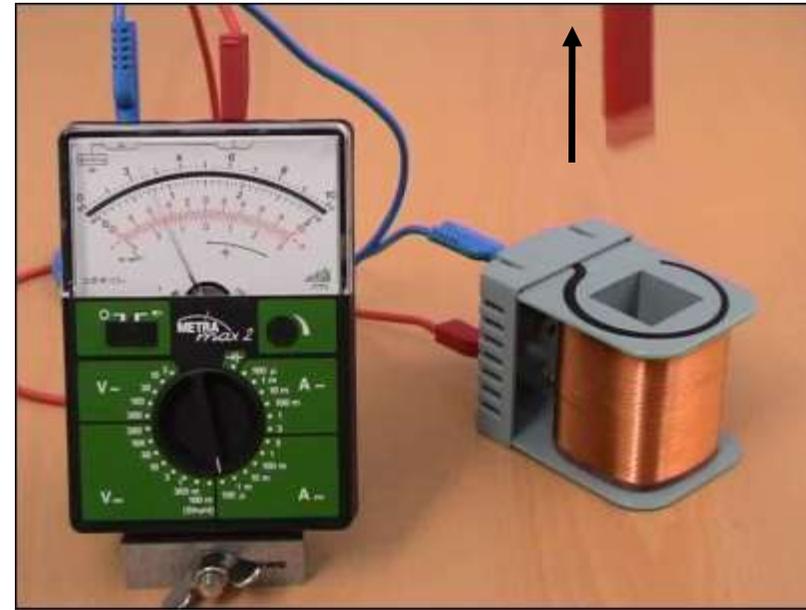
Al introducir el imán en la bobina conectada al galvanómetro, la aguja volvía a indicar inducción de corriente.



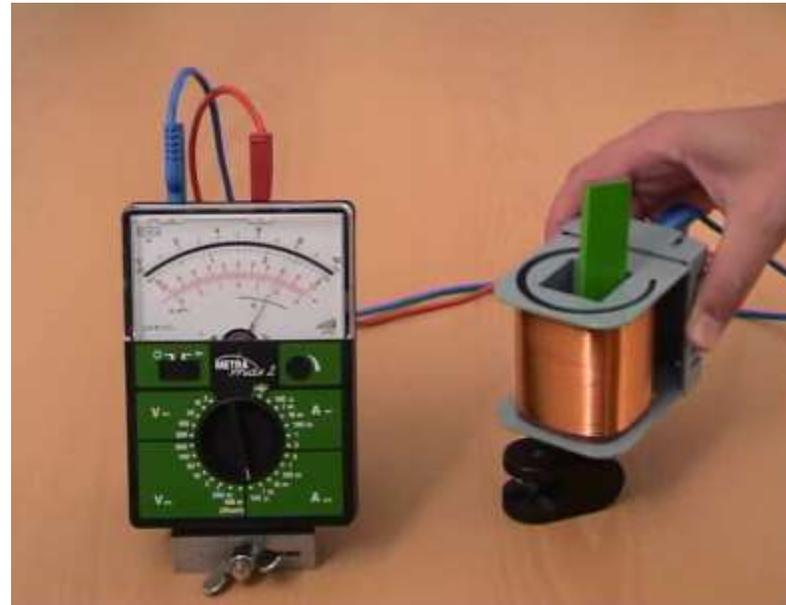
Al sacar el imán de la bobina conectada al galvanómetro, la aguja volvía a indicar inducción de corriente pero en sentido contrario



Al **cambiar la polaridad** del imán, al introducir el imán en la bobina conectada al galvanómetro, la aguja volvía a indicar inducción de corriente en sentido contrario



Al sacar el imán de la bobina conectada al galvanómetro, la aguja vuelve a indicar inducción de corriente pero en sentido contrario



Igual sucede si en lugar del imán movemos la bobina.

Se denomina **inducción electromagnética** al fenómeno consistente en provocar o inducir una corriente eléctrica mediante un campo magnético variable.



1.2. Ley de Faraday en términos de flujo magnético

► Flujo magnético

El **flujo magnético** es el número de líneas del campo magnético que atraviesan una superficie dada.

$$d\Phi = \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad \Rightarrow \quad \Phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

En el caso de una espira y de un campo magnético uniforme:

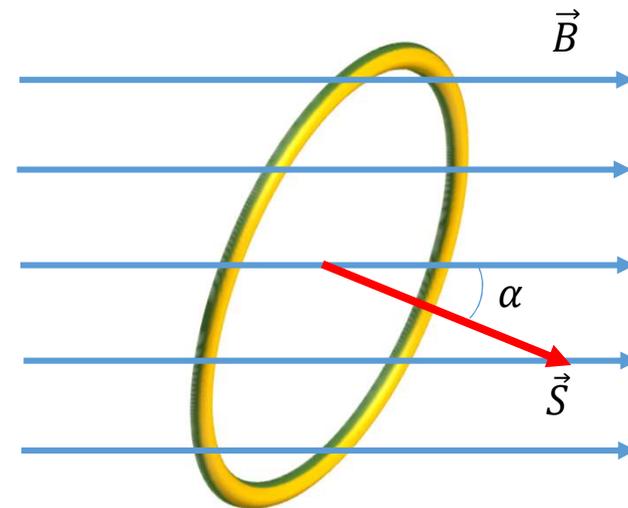
$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S} = BS\cos\alpha$$

En una bobina de N espiras:

$$\Phi = N\vec{B} \cdot \vec{S} = NBS\cos\alpha$$

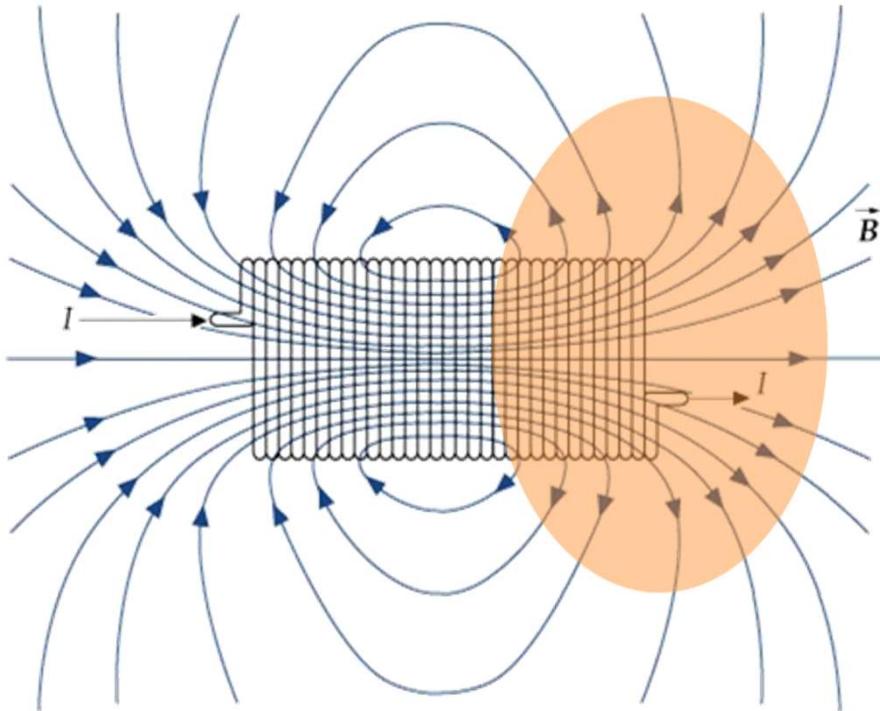
La unidad de flujo en el SI es el **weber** (Wb):

$$1 \text{ Wb} = 1 \text{ T} \cdot 1 \text{ m}^2$$





► Teorema de Gauss aplicado al campo magnético



La probable inexistencia de monopolos magnéticos nos obliga a considerar que las líneas de campo magnético son cerradas.

$$\Phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$



ACTIVIDADES

1. Una espira circular de 5 cm de radio está situada perpendicularmente a un campo magnético uniforme de $0,4\text{ T}$. Calcula: i) El flujo magnético que atraviesa la espira en esa situación; ii) El flujo magnético que atraviesa la espira si esta gira 30° alrededor de un eje que pase por su centro y sea perpendicular a \vec{B} .

Sol: i) $\phi_0 = 3,14 \cdot 10^{-3}\text{ Wb}$; ii) $\phi = 2,72 \cdot 10^{-3}\text{ Wb}$

2. Una bobina circular está formada por un conductor de 15 cm que se enrolla en 3 vueltas. La bobina está situada en el plano YZ. En la región hay un campo magnético $\vec{B} = (0,15\hat{i} - 0,35\hat{j})\text{ mT}$. Determina el flujo magnético a través de la bobina.

Sol: $\phi = 2,98 \cdot 10^{-8}\text{ Wb}$

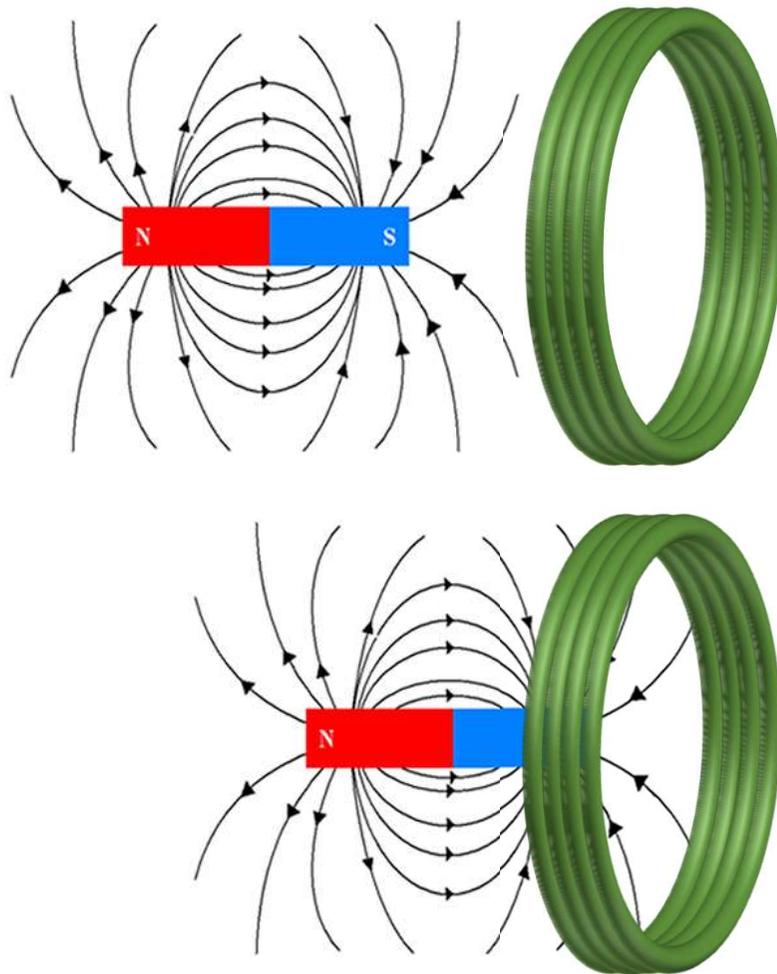
3. Un solenoide de 1300 vueltas por metro tiene una sección transversal de 15 cm^2 y una longitud de 30 cm . El solenoide está situado en el seno de un campo magnético uniforme de $0,35\text{ T}$ cuya dirección forma un ángulo de 20° con el vector normal a la sección transversal del solenoide. Determina el flujo magnético a través del solenoide.

Sol: $\phi = 0,19\text{ Wb}$



1.2. Ley de Faraday en términos de flujo magnético

▶ Ley de Faraday



La corriente eléctrica es inducida por la variación del flujo magnético

Ley de Faraday:

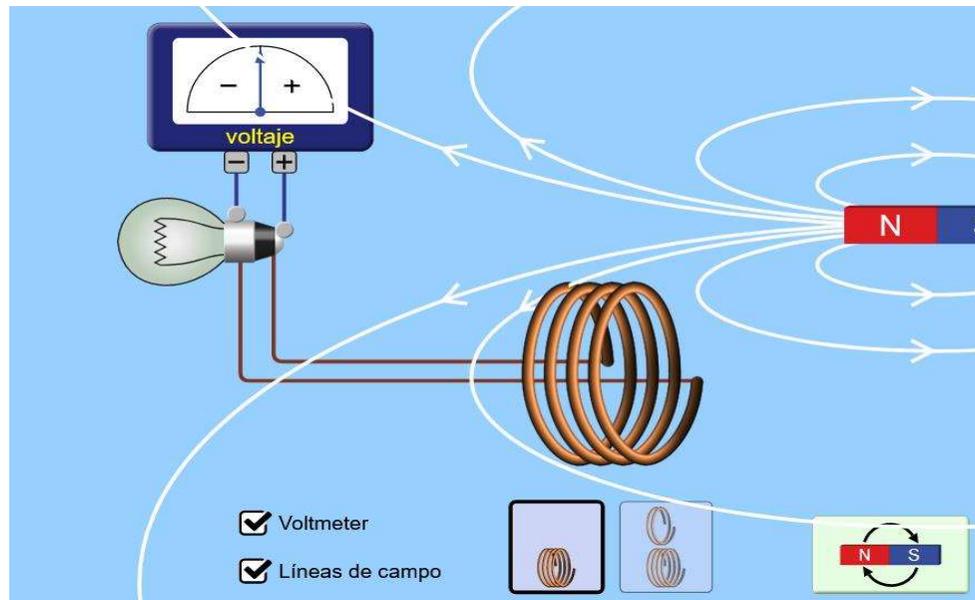
La **fuerza electromotriz** que da lugar a la corriente eléctrica inducida en un circuito es igual a la rapidez con que varía el flujo magnético a través del mismo:

$$\varepsilon_{inducida} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \Rightarrow \varepsilon_{inducida} = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

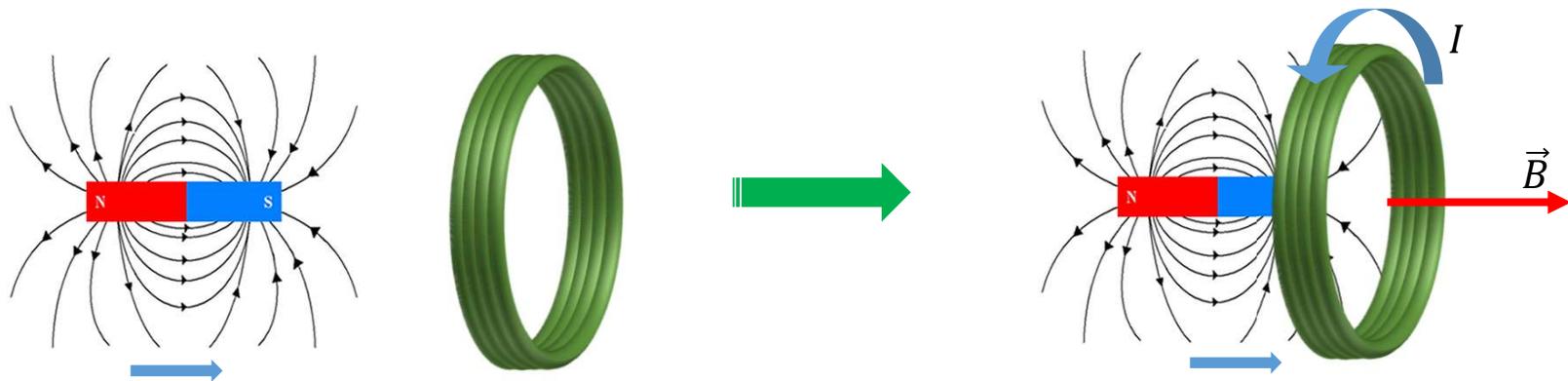
$$\varepsilon_{inducida} = -\frac{d\Phi}{dt} \Rightarrow \varepsilon_{inducida} = -N \frac{d\Phi}{dt}$$



1.3. Ley de Lenz



El **sentido de la corriente inducida** es tal que el campo magnético creado por dicha corriente tiende a oponerse a la variación del flujo magnético que la ha originado.





ACTIVIDADES

4. Una bobina constituida por 100 espiras circulares de 1 *cm* de radio se halla en el seno de un campo magnético uniforme de 0,5 *T*, de modo que el plano de las espiras es perpendicular al campo. i) ¿Cuál es el valor de la diferencia de potencial inducida al girar la bobina 90° en una milésima de segundo?; ii) Si duplicamos el número de espiras, ¿en cuánto tiempo deberíamos girar 90° la bobina para conseguir la misma fuerza electromotriz?

Sol: i) $\varepsilon = 15,7 \text{ V}$; ii) $t = 2 \cdot 10^{-3} \text{ s}$

5. Una espira de 100 *cm*² de superficie se encuentra orientada de forma perpendicular a un campo magnético cuya magnitud aumenta uniformemente desde 0,2 *T* hasta 1,4 *T* en 0,25 *s*. Determina: i) La fem inducida en la espira; ii) La intensidad de corriente si la resistencia de la espira es de 3 Ω .

Sol: i) $\varepsilon = -0,048 \text{ V}$; ii) $I = -0,016 \text{ A}$

6. Una bobina circular de 50 espiras de 5 *cm* de radio se sitúa en dirección perpendicular a un campo magnético uniforme de 1,2 *T*. Calcula la fuerza electromotriz inducida en la bobina si se gira bruscamente 180° en 0,2 *s*. ¿Qué intensidad de corriente inducida circula si la resistencia en la bobina es de 20 Ω .

Sol: $\varepsilon = 4,71 \text{ V}$; $I = 0,235 \text{ A}$



1.4. Formas de inducir la corriente

$$\Phi = BS\cos\alpha$$

Podemos variar el flujo:

- **Variando el campo** magnético.
- **Variando la superficie.**
- **Variando la orientación** del circuito en el campo al hacerlo girar.

► Fuerza electromotriz inducida al variar el campo magnético

$$\varepsilon_{inducida} = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -NS \frac{\Delta B}{\Delta t} \quad \Rightarrow \quad \varepsilon_{inducida} = -NS \frac{dB}{dt}$$



ACTIVIDADES

7. Una bobina de 100 espiras circulares de 2 cm de radio se sitúa con sus espiras perpendiculares a un campo magnético cuyo valor varía según $B = 1,5 \cdot e^{0,2t} T$. i) ¿Cómo varía la fuerza electromotriz inducida con el tiempo?; ii) ¿Cuál será el valor de dicha fuerza electromotriz inducida a los 10 s?

Sol: i) $\varepsilon = -0,0377 \cdot e^{0,2t} V$; ii) $\varepsilon = -0,279 V$

8. Una bobina de 50 espiras circulares de 3 cm de radio está situada perpendicularmente a un campo magnético unidireccional cuyo valor varía según $B = 0,2 + 0,005 t^2 T$. ¿Cuánto valdrá la fem inducida al cabo de 10 s? Si la resistencia total de la bobina es de 2 Ω , ¿cuál es la intensidad que circula al cabo de ese tiempo?

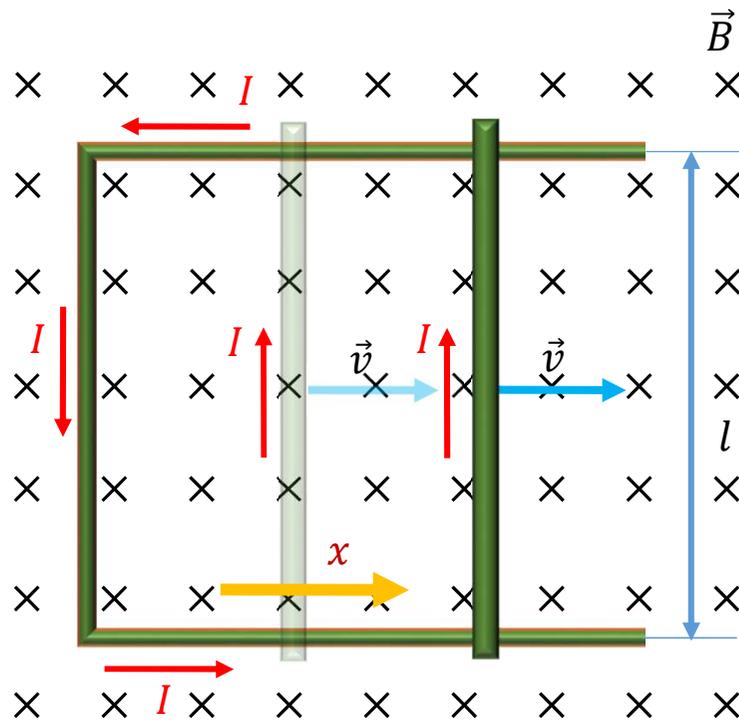
Sol: i) $\varepsilon = -0,014 V$; ii) $I = -0,007 A$

9. A una espira circular de 5 cm de radio, que descansa en el plano XY, se le aplica durante el intervalo de tiempo de $t = 0$ a $t = 5 s$ un campo magnético $\vec{B} = 0,1 t^2 \hat{k} T$, donde t es el tiempo en segundos. i) Calcule el flujo magnético que atraviesa la espira y represente gráficamente la fuerza electromotriz inducida en la espira en función del tiempo. ii) Razone cómo cambiaría la fuerza electromotriz inducida en la espira si la espira estuviera situada en el plano XZ.

Sol: $\phi = 7,85 \cdot 10^{-4} t^2 Wb$; $\varepsilon = 0 V$



► Fuerza electromotriz inducida al variar el tamaño de la superficie



$$\varepsilon_{inducida} = -\frac{d\Phi}{dt} = -B \frac{dS}{dt} =$$

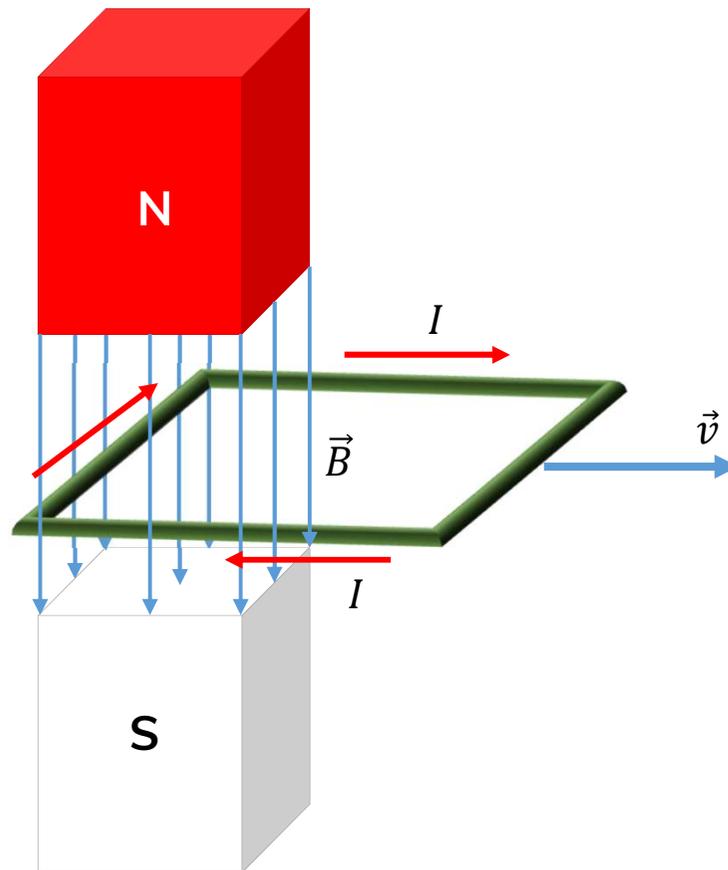
$$= -B \frac{d(lx)}{dt} = -Bl \frac{dx}{dt}$$

$$\varepsilon_{inducida} = -Blv$$

Es la fuerza electromotriz por movimiento



► Fuerza electromotriz inducida al variar el tamaño de la superficie

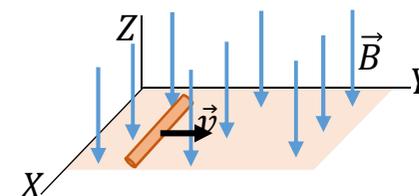


Al sacar o introducir la espira en el campo magnético, se induce una fuerza electromotriz proporcional a la velocidad con la que varía superficie atravesada por el campo



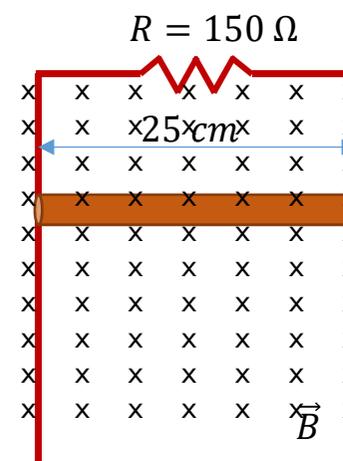
ACTIVIDADES

10. La varilla de la figura tiene una longitud de 35 cm y se mueve con una velocidad de $0,17\text{ m s}^{-1}$ en la dirección y sentido mostrados, en presencia de un campo magnético de 85 mT . i) Indica mediante un dibujo qué extremo de la varilla se cargará positivamente y cuál lo hará negativamente; ii) Determina la fem inducida en la varilla.



Sol: ii) $\varepsilon = 0,005\text{ V}$

11. Un par de raíles conductores muy largos se colocan en paralelo en posición vertical, unidos por su parte superior por una resistencia de $150\ \Omega$. Se deja caer libremente entre los raíles un avarilla conductora de 25 cm de longitud y 71 g de masa en presencia de un campo magnético de 12 T ortogonal al plano de los raíles. Al cabo de un cierto tiempo, se observa que la barra cae a una velocidad aproximadamente constante. En ese momento: i) calcula la velocidad constante de la varilla; ii) Determina la fem inducida en la varilla y la corriente que atraviesa la resistencia.

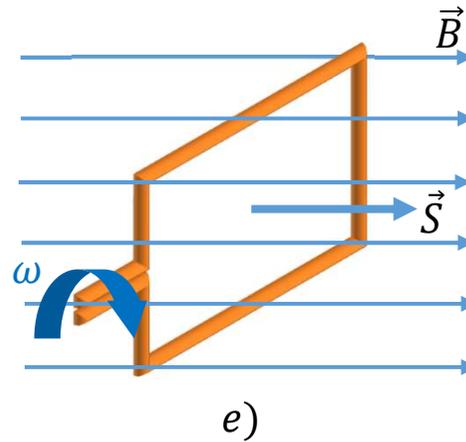
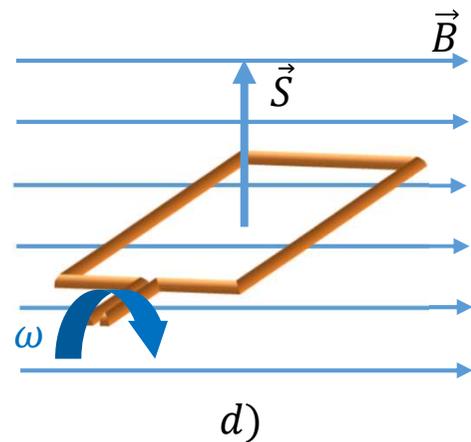
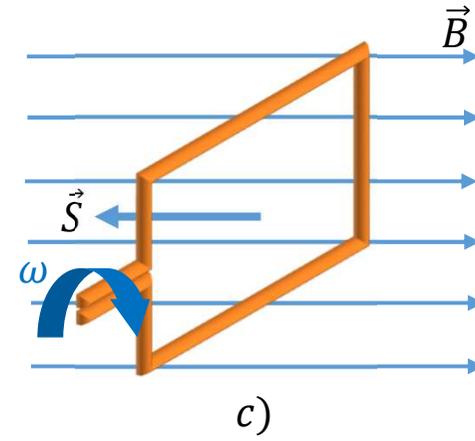
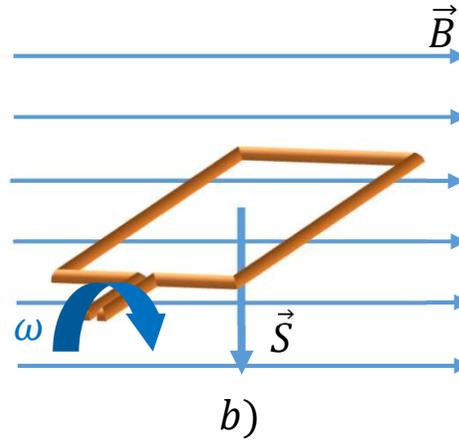
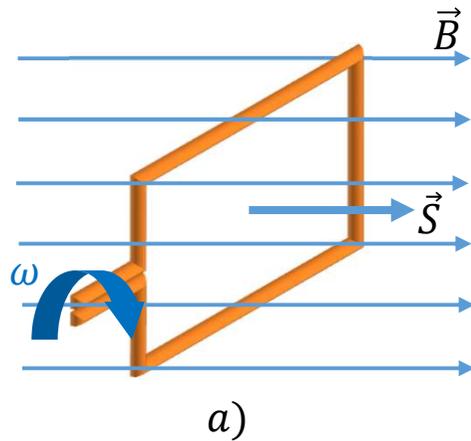


Dato: $g = 9,8\text{ m s}^{-2}$

Sol: i) $v = 12\text{ m s}^{-1}$; ii) $\varepsilon = 36\text{ V}$; $I = 0,24\text{ A}$



► Fuerza electromotriz inducida al variar la orientación. Corriente alterna



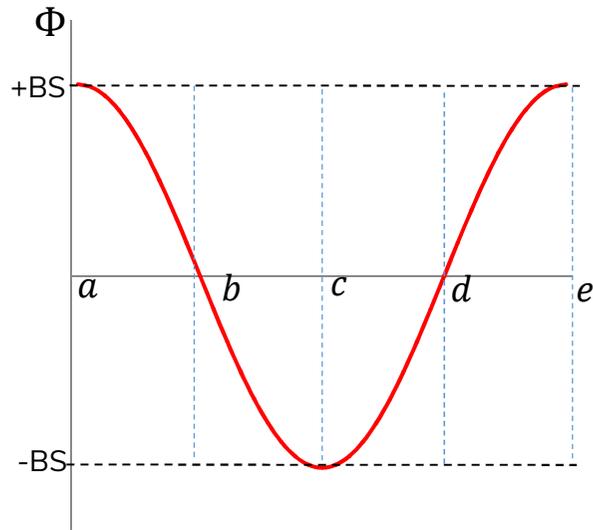
$$\Phi = BS \cos \alpha = BS \cos \omega t$$

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi}{dt} = BS \omega \sin \omega t$$

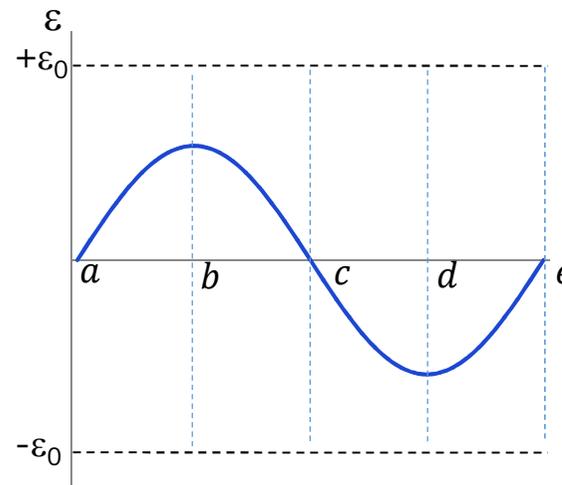
$$\varepsilon = \varepsilon_0 \sin \omega t \quad \varepsilon_0 = BS \omega$$

$$\varepsilon_0 = NBS \omega$$

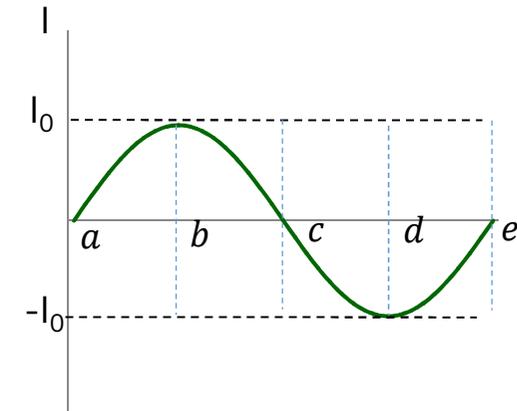
$$I = I_0 \sin \omega t \quad I_0 = \frac{NBS \omega}{R}$$



$$\Phi = BS \cos \omega t$$



$$\varepsilon = \varepsilon_0 \sin \omega t$$



$$I = I_0 \sin \omega t$$

- Este tipo de corriente se denominado **corriente alterna**.
- El dispositivo que hace girar la espira se denomina **generador de corriente alterna** o **alternador**.



ACTIVIDADES

12. Un alternador consta de una bobina de 40 espiras cuadradas de 5 *cm* de lado y una resistencia total de 16 Ω . La bobina gira con una frecuencia de 100 *Hz* en un campo magnético constante de 0,8 *T*. Determinar: i) La fuerza electromotriz máxima que se induce, ii) El valor máximo de la intensidad inducida; iii) Una expresión para la fuerza electromotriz y la intensidad inducida en función del tiempo. Traza las representaciones gráficas de estas dos magnitudes.

Sol: i) $\varepsilon_{m\acute{a}x} = 50,26 \text{ V}$; ii) $I_{m\acute{a}x} = 3,14 \text{ A}$; iii) $\varepsilon = 50,26 \text{ sen}(200\pi t) \text{ V}$;
 $I = 3,14 \text{ sen}(200\pi t) \text{ A}$

13. Una bobina de 10 espiras circulares de cobre de 0,5 *cm* de radio y resistencia 0,2 Ω gira en torno a un eje diametral en la dirección *X* con una velocidad angular de 3 $\pi \text{ rad s}^{-1}$. La bobina se encuentra inmersa en una región donde existe un campo magnético $\vec{B} = 0,6 \hat{k} \text{ T}$. Considerando que en $t = 0$ las espiras estaban orientadas en el plano *XY*, halla: i) La expresión para la fem inducida en función del tiempo. ii) La intensidad máxima de la corriente que circula por la espira y el tipo de corriente que se obtiene.

Sol: i) $\varepsilon = 0,0044 \text{ sen}(3\pi t) \text{ V}$; $I_{m\acute{a}x} = 0,022 \text{ A}$



ACTIVIDADES

14. Una espira circular de 5 *cm* de radio, inicialmente horizontal, gira a 60 *rpm* en torno a uno de sus diámetros en un campo magnético vertical de 0,2 *T*. i) Dibuje en una gráfica el flujo magnético a través de la espira en función del tiempo entre los instantes $t = 0$ s y $t = 2$ s e indique el valor máximo de dicho flujo; ii) Escriba la expresión de la fuerza electromotriz inducida en la espira en función del tiempo e indique su valor en el instante $t = 1$ s.

Sol: i) $\phi_{m\acute{a}x} = 0,00157$ *Wb*; ii) $\varepsilon = 0,00987 \text{ sen}(2\pi t)$ *V*; $\varepsilon(1) = 0$ *V*

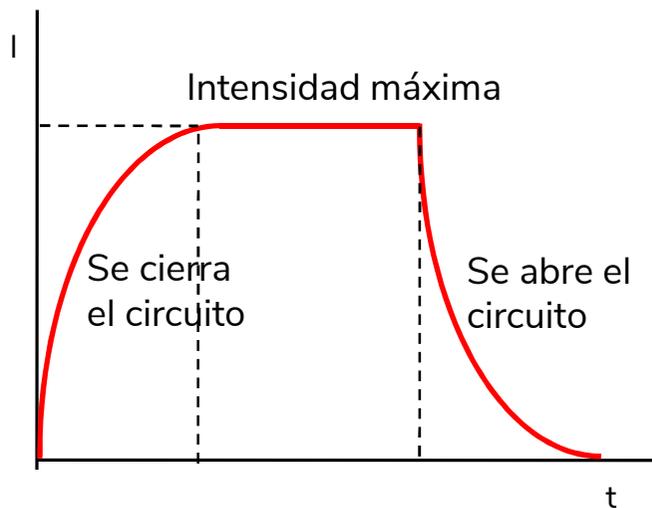
15. Una espira de 0,1 *m* de radio gira a 50 *rpm* alrededor de un diámetro en un campo magnético uniforme de 0,4 *T* y dirección perpendicular al diámetro. En el instante inicial el plano de la espira es perpendicular al campo. i) Escriba la expresión del flujo magnético que atraviesa la espira en función del tiempo y determine el valor de la fem. inducida; ii) Razone cómo cambiarían los valores máximos del flujo magnético y de la f.e.m. inducida si se duplicase la frecuencia de giro de la espira.

Sol: i) $\phi = 0,013 \text{ cos}(5\pi t/3)$ *Wb*; $\varepsilon = 0,0658 \text{ sen}(5\pi t/3)$ *V*; ii) $\phi_{M\acute{a}x} = 0,013$ *Wb*;
 $\varepsilon_{M\acute{a}x} = 0,1316$ *V*

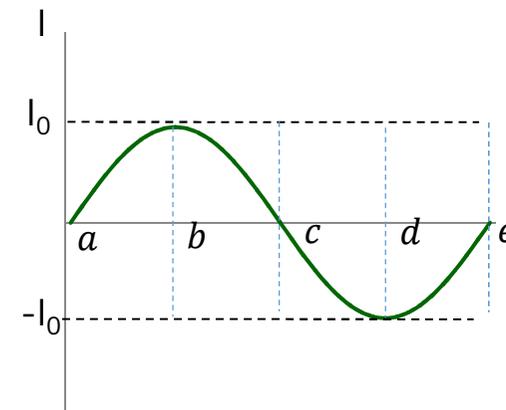


Toda corriente de intensidad variable que circule por un conductor induce una fuerza electromotriz en el propio conductor que se opone a la variación que la produce. Este fenómeno se denomina **autoinducción**.

La autoinducción aparece en:



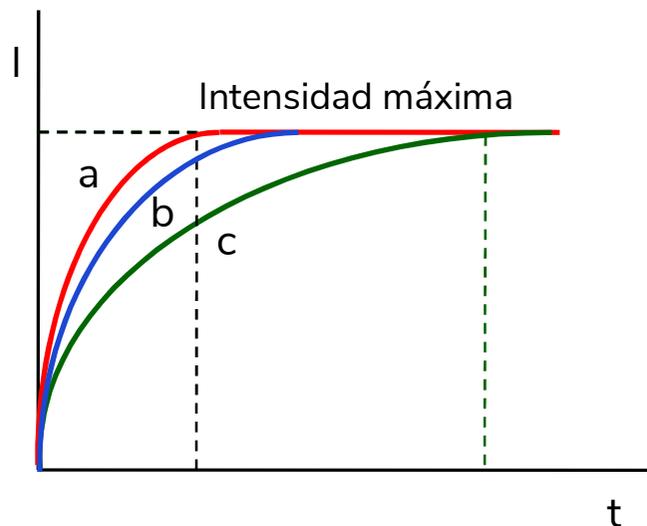
Al **cerrar un circuito** de corriente continua o al **abrir un circuito** de corriente continua



En un circuito de **corriente alterna**



El fenómeno de autoinducción se intensifica con una bobina arrollada sobre un núcleo de hierro, y, como consecuencia, la intensidad máxima se alcanza con más demora.



a) Alambre rectilíneo

b) Bobina en espiral

c) Bobina en espiral arrollada sobre un núcleo de hierro



2.1. La inductancia, L , como medida de la autoinducción

- Como el flujo magnético es proporcional al campo, y este, en el caso de ser producido por una corriente, es proporcional a la intensidad, podemos concluir que:

$$\Phi_m = LI$$

El coeficiente L se denomina **inductancia del circuito** o **coeficiente de autoinducción del circuito**.

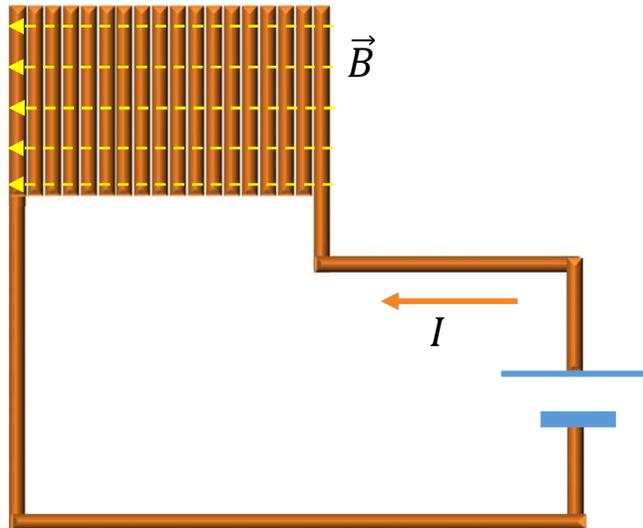
$$\varepsilon_{autoinducida} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad \Rightarrow \quad \varepsilon_{autoinducida} = -L \frac{dI}{dt}$$

- La unidad de inductancia en el SI es el **henrio** (H):

$$L = -\frac{\varepsilon_{autoinducida}}{dI/dt} \quad \Rightarrow \quad 1 H = \frac{1 V}{1 A/1 s} = \frac{1 Wb}{1 A}$$



► Cálculo de la inductancia de un solenoide



$$B = \mu_0 I \frac{N}{l}$$

$$\Phi_m = NBS = \mu_0 IS \frac{N^2}{l}$$

$$L = \frac{\Phi_m}{I} = \frac{\mu_0 SN^2}{l}$$

Solo depende de las características estructurales del solenoide.



ACTIVIDADES

16. Un solenoide de 500 espiras apretadas tiene una longitud de 30 *cm* y un radio de 1 *cm*. Por él circula una corriente de 4 *A*. Determina: i) El valor del campo magnético en un punto de la región central de su eje; ii) El flujo magnético a través del solenoide, si *B* es constante en su interior; iii) La inductancia del solenoide; iv) La fuerza electromotriz autoinducida en el solenoide cuando la intensidad varía a razón 180 $A s^{-1}$.

Dato: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} N A^{-2}$

Sol: i) $B = 0,0084 T$; ii) $\phi = 0,0013 Wb$; iii) $L = 0,00033 H$; iv) $\varepsilon = -059 V$

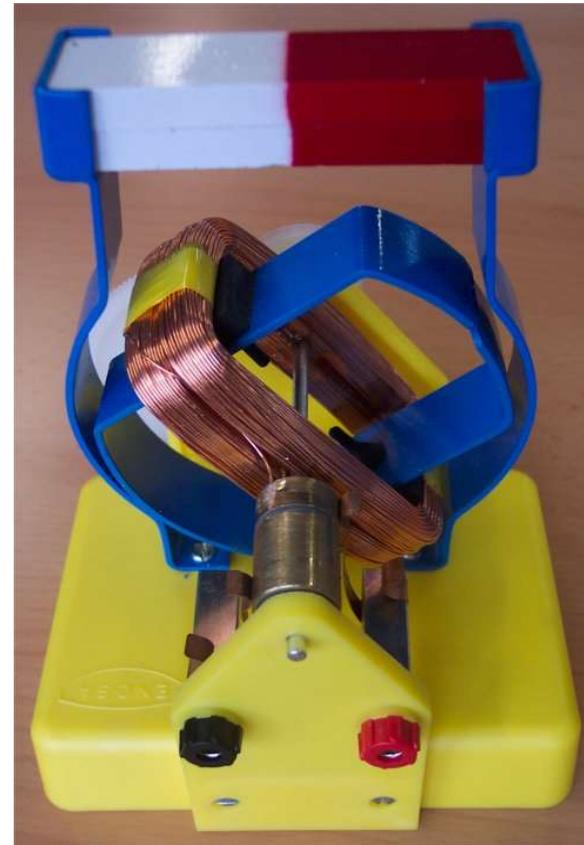
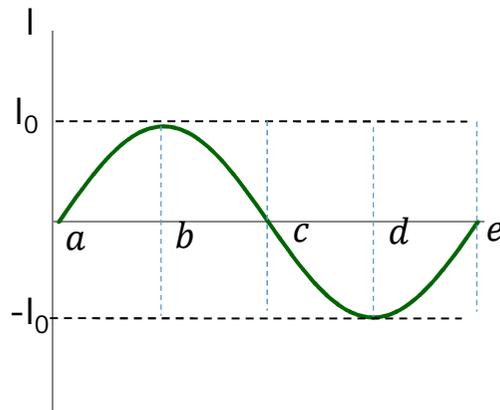
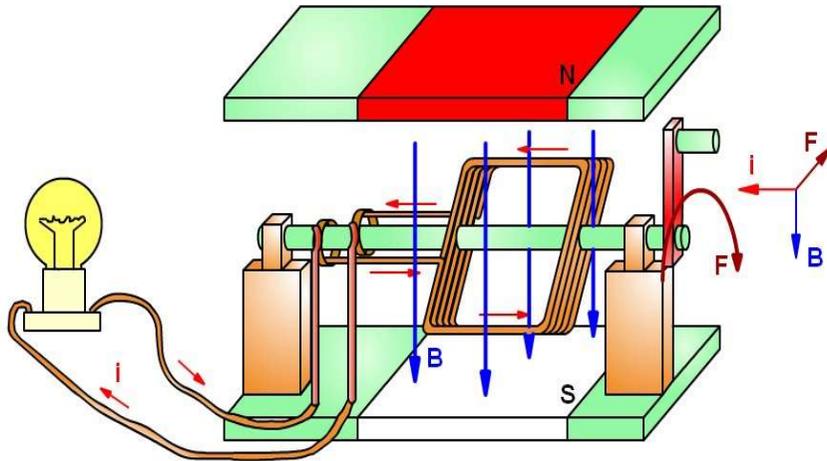
17. Calcula la inductancia de un solenoide de 40 *cm* de longitud, de 400 espiras y 5 cm^2 de sección. ¿Qué fem autoinducida tendrá si la intensidad disminuye a 30 $A s^{-1}$?

Dato: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} N A^{-2}$

Sol: $L = 2,5 \cdot 10^{-4} H$; $\varepsilon = 7,5 \cdot 10^{-3} V$



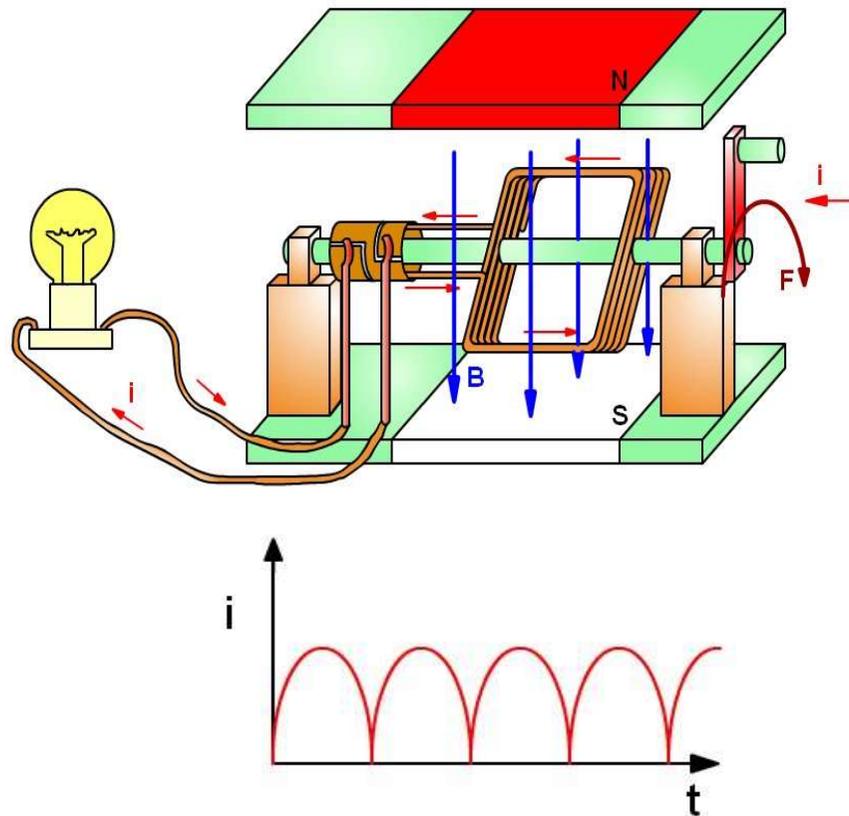
3.1. Generadores de corriente alterna



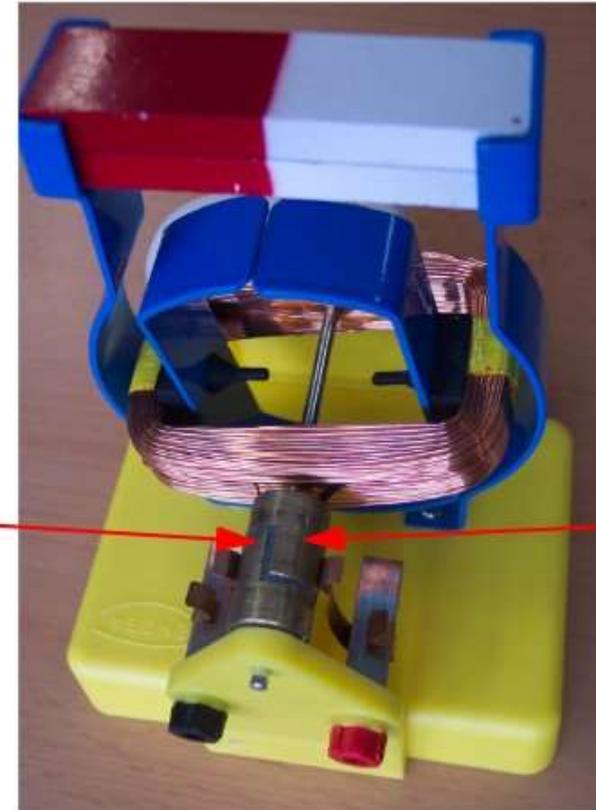
Un generador de corriente transforma energía mecánica en energía eléctrica



3.2. Generadores de corriente continua



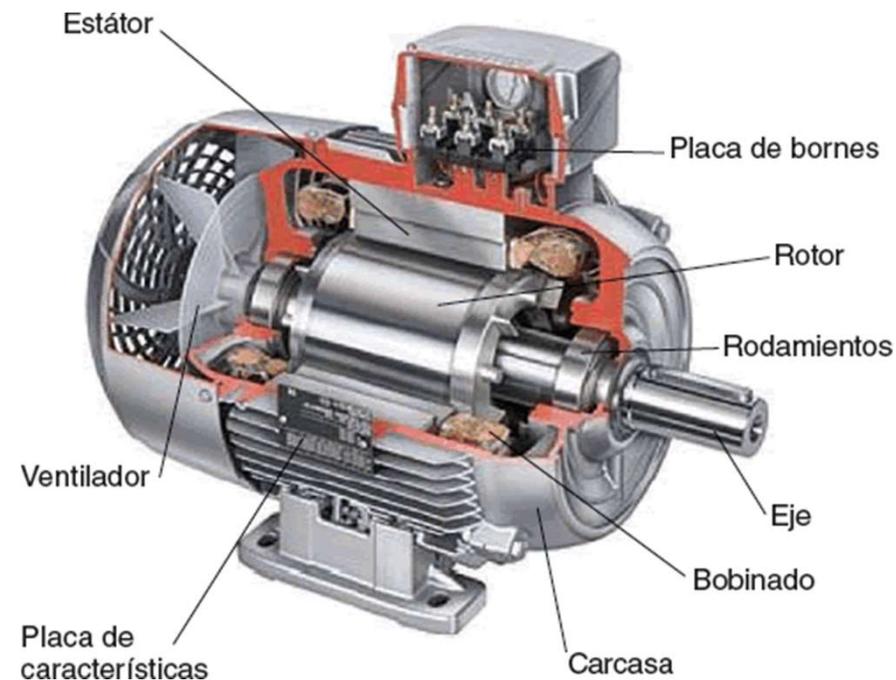
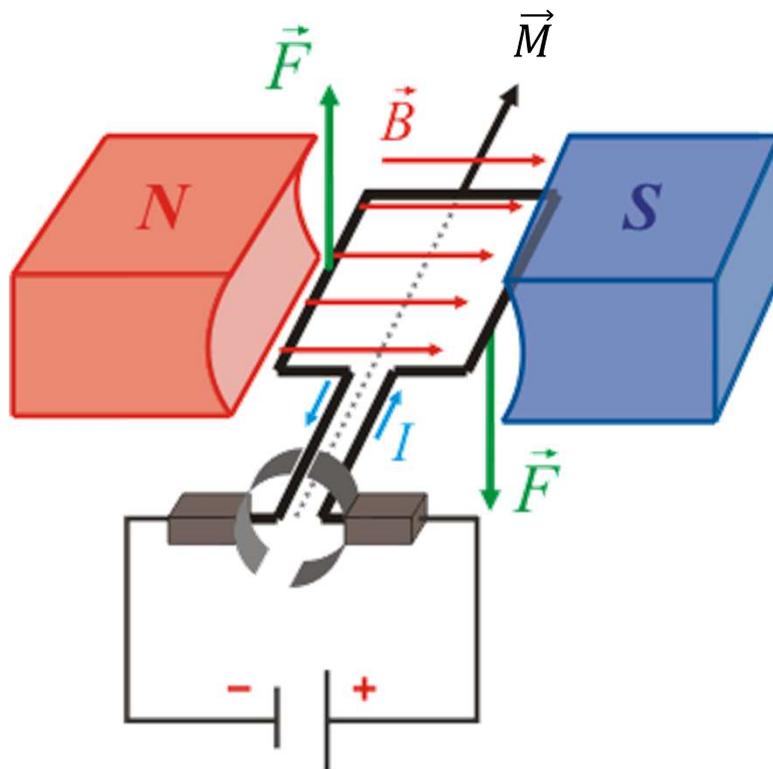
Delgas



Un generador de corriente transforma energía mecánica en energía eléctrica



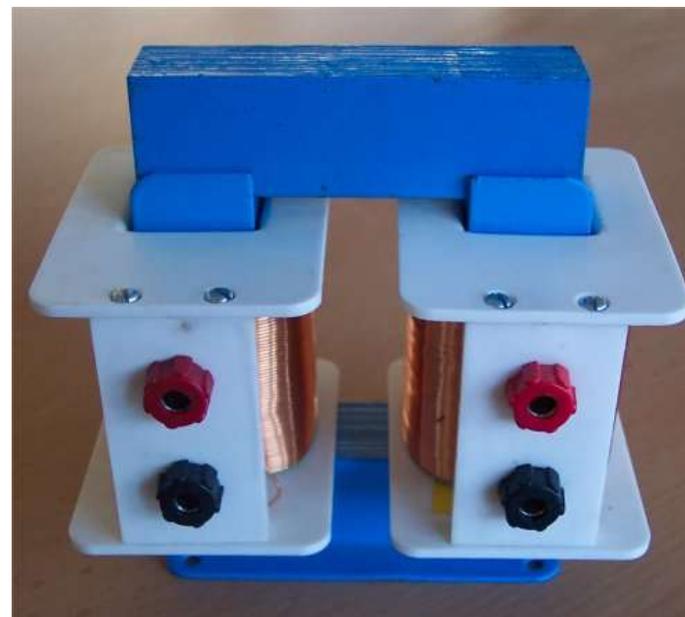
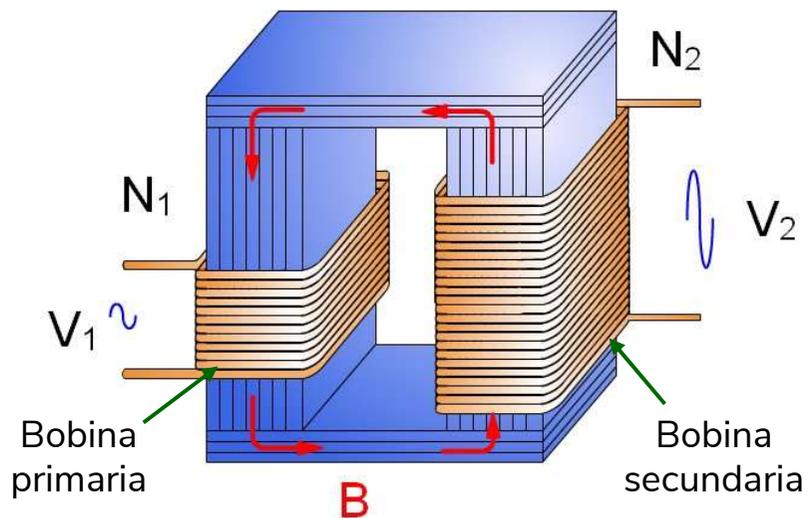
3.3. Motores eléctricos



Un motor al contrario que un generador transforma energía eléctrica en energía mecánica



3.4. Transformadores



$$V_1 = -N_1 \frac{d\Phi_m}{dt} \qquad V_2 = -N_2 \frac{d\Phi_m}{dt}$$

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} \qquad \begin{array}{l} \text{Si } N_2 > N_1 \text{ elevador} \\ \text{Si } N_2 < N_1 \text{ reductor} \end{array}$$

- Si no hay pérdidas:

$$P = V_1 I_1 = V_2 I_2$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$$



ACTIVIDADES

18. Un generador de corriente alterna (AC) está formado por una bobina de 23 espiras de $0,05 \text{ m}^2$ de área que giran en un campo magnético de $0,6 \text{ T}$ con una frecuencia de 50 Hz . Si la resistencia total de la bobina es de 20Ω , determinar: i) La fuerza electromotriz máxima inducida; ii) La intensidad máxima inducida.

Sol: i) $\varepsilon_{m\acute{a}x} = 216,77 \text{ V}$; ii) $I_{m\acute{a}x} = 10,84 \text{ A}$

19. Un aparato funciona a 9 V y con $0,5 \text{ A}$ mediante un transformador cuya bobina primaria tiene 3000 espiras. Si la tensión de entrada es de 220 V : i) ¿Cuántas espiras debe tener la bobina secundaria?; ii) ¿Cuál es la intensidad, en mA, que circula por la primaria?

Sol: i) $N_2 = 123$; ii) $I_1 = 0,0205 \text{ A}$

20. Un transformador consta de una bobina primaria de 200 espiras y de una bobina secundaria de 50 espiras. i) ¿Cuál será su función: elevar o reducir el voltaje?; ii) Si la tensión de entrada es de 125 V , ¿cuál es la de salida?; iii) Si la corriente en la bobina primaria es de 50 mA , ¿cuánto valdrá en la secundaria?

Sol: ii) $\varepsilon_2 = 31,3 \text{ V}$; iii) $I_2 = 200 \text{ mA}$



James Clerk Maxwell
(1831-1879)

- **Unificó** las teorías de la electricidad y el magnetismo.
- Las **cuatro ecuaciones** junto a la **fuerza generalizada de Lorentz** describen los fenómenos electromagnéticos desde el *punto de vista clásico*

- **1ª Ley: Teorema de Gauss** para el campo eléctrico:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{q_{int}}{\epsilon_0}$$

- **2ª Ley: Teorema de Gauss** para el campo magnético

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

- **3ª Ley: Ley de Faraday** sobre inducción

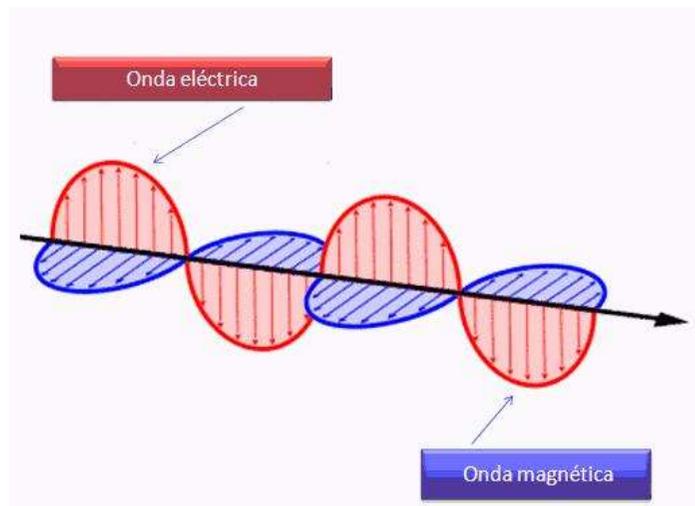
$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi_m}{dt}$$

- **4ª Ley: Teorema de Ampère** extendida a campos eléctricos variables

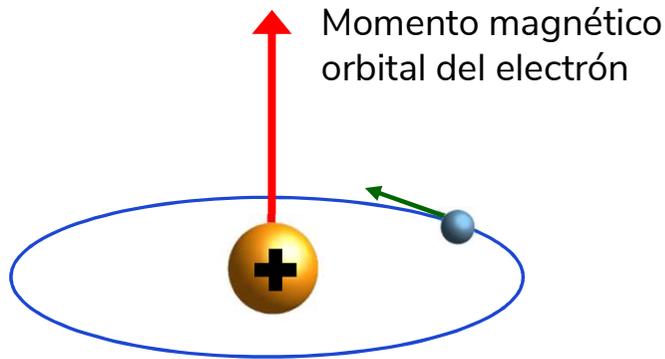
$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_{eléctrico}}{dt}$$



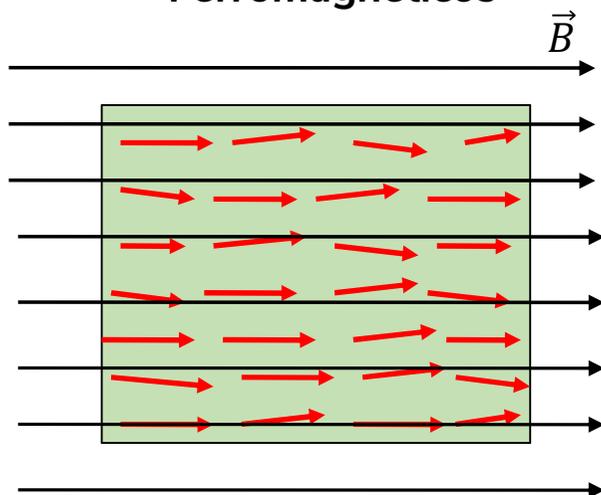
- La tercera ecuación de Maxwell va más allá de lo expuesto hasta ahora: **“Un campo magnético variable induce otro eléctrico proporcional a la rapidez con que cambia el flujo magnético y perpendicular a él”**.
- En la cuarta ecuación: **“un campo eléctrico variable induce otro magnético proporcional a la rapidez con que cambia el flujo del campo eléctrico y perpendicular a él”** (no es necesaria la presencia de corrientes eléctricas).
- Desaparece la idea de fuerza a distancia y es sustituida la de propagación de la interacción en el medio en forma de onda electromagnética.



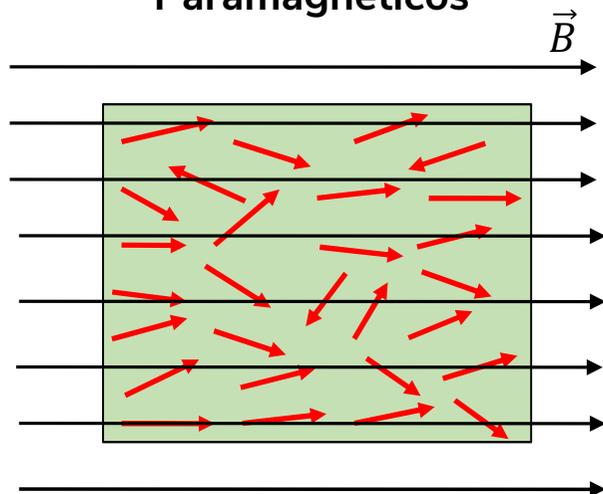
- La velocidad de propagación de dichas ondas es igual a la de la luz: **“la luz es, en realidad, una perturbación electromagnética que se propaga por el campo”**. Así se unificó la teoría electromagnética con la óptica.



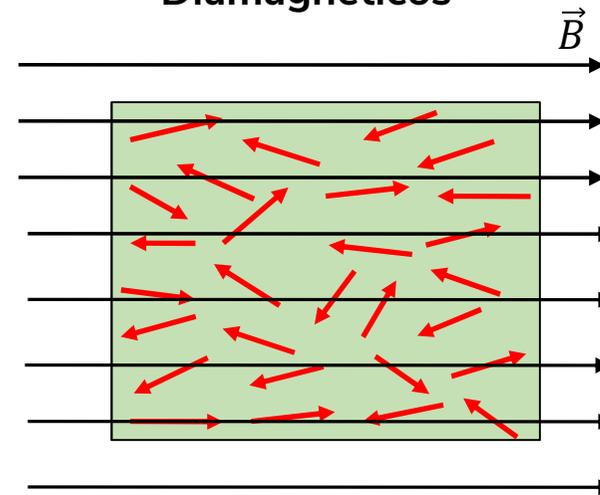
- Un electrón en su órbita constituye una **corriente eléctrica** y por tanto crea un campo magnético.
- Podemos caracterizar el movimiento de los electrones por su **momento magnético**.
- Los materiales responde de forma distinta ante un campo magnético externo o ante un cambio de temperatura y según su comportamiento se clasifican en: **ferromagnéticos**, **paramagnéticos** y **diamagnéticos**.

**Ferromagnéticos**

Hierro, cobalto,
níquel, gadolinio,
disprosió y algunas
aleaciones

Paramagnéticos

Aluminio, sodio,
platino, uranio,
oxígeno

Diamagnéticos

Bismuto, cobre, plomo,
sal, azufre, mercurio,
cuarzo, plata, grafito,
diamante y la mayoría de
los compuestos
orgánicos



5.1. Magnetización y temperatura

- La magnetización de las sustancias ferromagnéticas y paramagnéticas disminuye con la temperatura.

La temperatura crítica a la que un material ferromagnético se convierte en paramagnético debido a la desorientación térmica se denomina **temperatura de Curie**.

Material	Temperatura Curie (K)
Fe	1043
Co	1388
Ni	627
Gd	292
Dy	88



Información de Contacto

 Rafael Artacho Cañadas

 Granada

 artacho1955@gmail.com