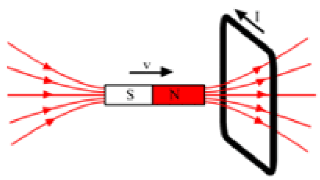
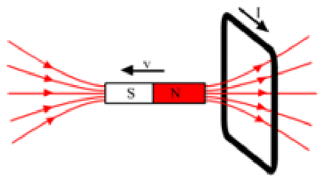
CAMPO MAGNÉTICO E INDUCCIÓN
INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

Con el nombre de inducción electromagnética se hace referencia a la posibilidad de que un campo magnético pueda inducir, producir, un campo eléctrico. Este fenómeno tiene una importancia capital para la sociedad, no en vano, gracias a la inducción, las centrales eléctricas son capaces de producir energía o podemos comunicarnos a distancia mediante telefonía móvil.
(Recuerda la luz que produce la dinamo de una bicicleta)
Hemos visto antes que una corriente eléctrica crea un campo magnético.
Podríamos preguntarnos si es posible el proceso inverso, esto es: crear una corriente eléctrica a partir de un campo magnético.
Michael Faraday (1791-1867) y *Joseph Henry* (1797-1878) llevaron a cabo diversos experimentos (hacia 1830) que permitieron dar respuesta a esta pregunta.

Experiencia de Faraday

Fue Faraday quien comprobó que al acercar un imán a una espira en ésta se origina una corriente que invierte su sentido cuando el imán se aleja (ver figura).
Un dato importante es que ***la corriente aparece sólo cuando el imán está en movimiento respecto de la espira (puede moverse el imán o la espira, es igual) y cesa una vez que cesa el movimiento***.
El origen de la corriente eléctrica, por tanto, no es la presencia de un campo magnético, ***sino la <u>variación</u> del campo que atraviesa la espira.***

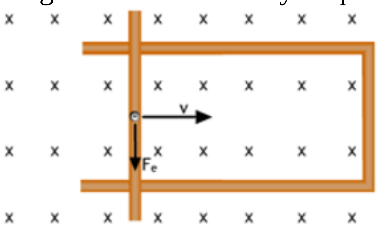


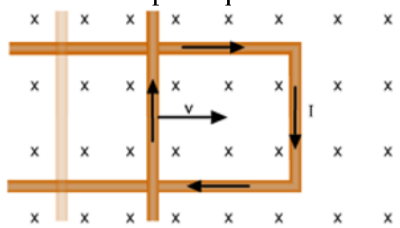


Como se puede ver en la figura las líneas de fuerza del campo del imán están más juntas cerca de los polos (mayor intensidad), y más separadas (menor intensidad) a medida que nos alejamos de ellos, con lo que al acercar o separar el imán de la espira se produce una variación del campo magnético que la atraviesa.
Otro dato experimental importante es que ***la intensidad de la corriente inducida depende de lo rápido que se mueva el imán respecto de la espira***. Esto indica una dependencia con ***la rapidez de variación del campo magnético.***

Experiencia de Henry

Henry realizó, de forma simultánea con Faraday, una experiencia que permitió una mejor comprensión del fenómeno de la inducción de una corriente eléctrica a partir de un campo magnético.
La experiencia de Henry consistió en deslizar un conductor móvil sobre otro doblado en forma de U (ver figura), situado en el seno de un campo magnético constante y perpendicular a la dirección del movimiento.
Como consecuencia del movimiento (y de la presencia del campo magnético) ***aparece una fuerza de Lorenz sobre las cargas libres del conductor (electrones)***. Por tanto, las cargas negativas se desplazan hacia el extremo derecho del conductor móvil, mientras que en el izquierdo se acumularán las positivas creándose una diferencia de potencial entre ambos extremos que hará que comience a circular una corriente por el circuito.
En la experiencia de Henry se induce una corriente de forma un tanto diferente a la de Faraday. Ahora el campo magnético es uniforme y lo que varía es el tamaño de "la espira" que forma el circuito.





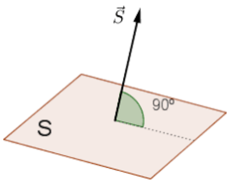
Conclusión: Para que se produzca una corriente eléctrica debe haber una variación del campo magnético, si no cambia, no se produce.

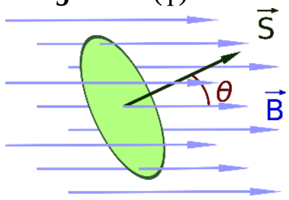
Comparando ambas experiencias podemos llegar a la conclusión de que ***lo que varía en ambas es la cantidad de líneas de campo que atraviesan el circuito en el que se induce la corriente.***
Tratemos ahora de dar una formulación matemática a la conclusión que hemos extraído.
Por convenio ***la intensidad del campo magnético se hace igual al número de líneas de campo que atraviesan la unidad de superficie colocada perpendicularmente a ellas.***

Flujo del campo magnético

Si queremos saber el número de líneas que atraviesan la superficie S, perpendicular a las líneas de campo, bastará multiplicar la intensidad por la superficie. Esta magnitud recibe el nombre de ***flujo del campo magnético*** (ϕ):

ϕ_B = B . S (B y S perpendiculares)





En general y para otros ángulos que formen B y S:

ϕ_B = ***B*** . ***S*** = B . S . cos α (producto escalar)

El vector ***S*** siempre es perpendicular a la superficie que representa.

α es el ángulo que forman el vector ***B*** y el vector ***S***

La unidad S.I. de flujo magnético es el tesla por metro cuadrado (T.m2) y recibe el nombre de weber (Wb) *en honor de* ***Wilhem Weber*** *(1804-1891)*

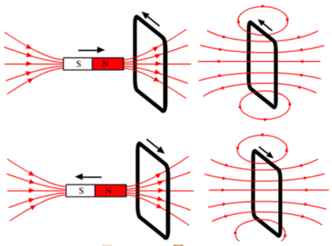
La rapidez con que varía el flujo magnético a través de una superficie se puede poner en la forma:

$\Delta\phi_B / \Delta t$ o bien en forma diferencial $d\phi_B / dt$

Utilizando el concepto de flujo, podremos decir: ***Se induce una corriente eléctrica en un circuito si este es atravesado por un flujo magnético variable (aumento o disminución)***

Ley de Lenz

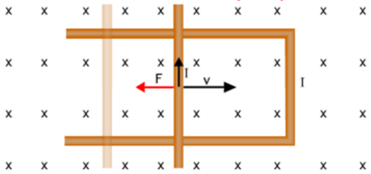
En 1833 ***Heinrich Lenz (1804-1865)*** hizo una nueva contribución para la comprensión del fenómeno al descubrir la regla ***(Ley de Lenz)*** que permite establecer el sentido de la corriente inducida.



"El sentido de la corriente inducida es tal que se opone a la causa que la origina"

En la experiencia de Faraday la causa que produce la corriente inducida cuando se acerca el imán es el *aumento de la intensidad del campo magnético*. En este caso la corriente inducida es tal que tiende a crear *un campo magnético contrario*, que hace que disminuya el campo inductor.

Cuando alejamos el imán se produce una *disminución en la intensidad del campo*. La corriente que se induce tiene un sentido tal que *origina un campo que refuerza al campo inductor*.



En la experiencia de Henry la causa que produce la corriente inducida es el *desplazamiento del conductor* (hacia la derecha en la figura) . En este caso la corriente inducida es tal que el campo magnético ejerce sobre las cargas que circulan por el conductor móvil u*na fuerza que tiene a dificultar su desplazamiento* (hacia la izquierda en la figura)

La Ley de Lenz puede reformularse, teniendo en cuenta el concepto de flujo, en la forma siguiente:

El sentido de la corriente inducida es tal que siempre ***se opone a la variación del flujo que la produce.*** Esto es:

- Si la corriente se induce debido a ***un aumento del flujo magnético,*** el sentido de la corriente será el que genere ***un campo magnético opuesto al campo inductor*** (produciendo de esta manera un campo más pequeño y una disminución del flujo).
- Si la corriente se induce debido a ***una disminución del flujo magnético,*** el sentido de la corriente será el que genere ***un campo magnético del mismo sentido que el campo inductor*** (produciendo de esta manera un reforzamiento del campo y un aumento del flujo).

Ley de Faraday-Henry

La relación matemática entre la fuerza electromotriz inducida y la variación del flujo magnético que atraviesa el circuito se recoge en la ***ley de Faraday-Henry*** :

La fuerza electromotriz inducida $\mathcal{E}$ es igual, y de signo contrario, a la rapidez con que varía el flujo magnético.

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

La fuerza electromotriz $\mathcal{E}$ (f.e.m) es la manifestación, en términos de diferencia de potencial eléctrico, de la corriente eléctrica, Voltios)

Para una variación de flujo no uniforme la fuerza electromotriz viene dada por menos la derivada del flujo respecto del tiempo:

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

(El signo "menos" recoge la ley de Lenz)

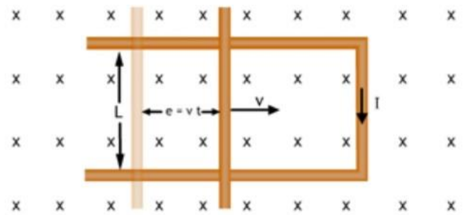
$\varphi_1 = B\,S_1$

$\varphi_2 = B\,S_2 = B\left[S_1 - L\,(v\,t)\right]$

$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = B\left[S_1 - L\,(v\,t)\right] - B\,S_1 = -B\,L\,(v\,t)$

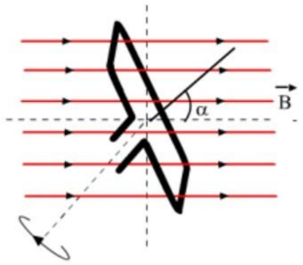
$\dfrac{\Delta\varphi}{\Delta t} = -\dfrac{B\,L\,(v\,t)}{t} = -B\,L\,v$

$\varepsilon = -\dfrac{\Delta\varphi}{\Delta t} = B\,L\,v$



Aplicando la ley de Ohm generalizada podemos obtener la intensidad que circula. Suponiendo que la resistencia del circuito es R:

$$V_A - V_B = \Sigma\, I\,(R + r) - \Sigma\, \varepsilon$$
$$0 = IR - \varepsilon$$
$$I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{B\,L\,v}{R}$$



La manera más corriente de producir una corriente eléctrica es haciendo girar una espira (realmente una bobina) en un campo magnético. El flujo variable que atraviesa la espira produce una corriente eléctrica que cambia continuamente su polaridad. El dispositivo recibe el nombre de ***alternador.***

En la figura de la derecha se ve una espira que gira con velocidad angular constante en el seno de un campo magnético. El flujo que atraviesa la espira variará en función del ángulo que forme con el campo magnético. Si suponemos que para t =0 la espira está perpendicular al campo ($\alpha = 0$) :

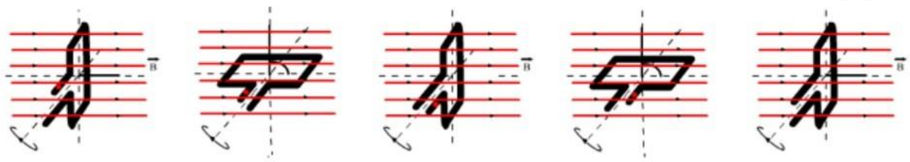
$$\left.\begin{aligned}\varphi &= B\,S\cos\alpha\\ \alpha &= \omega\,t\end{aligned}\right\}\ \varphi = B\,S\cos(\omega\,t) = \varphi_{MAX}\cos(\omega\,t)$$

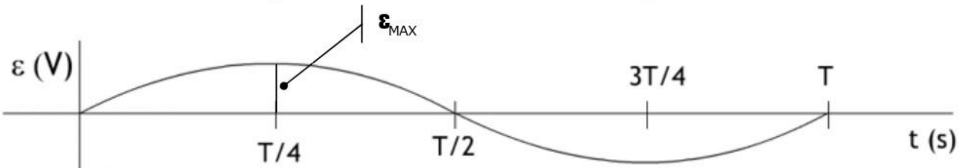
Aplicando la ley de Faraday-Henry la f.e.m. valdrá:

$$\boxed{\varepsilon = -\frac{d\varphi}{dt} = B\,S\,\omega\,\mathrm{sen}(\omega t) = \varepsilon_{MAX}\ \mathrm{sen}(\omega t)}$$

La f.e.m. varía senoidalmente desde el valor cero inicial hasta su valor máximo ($\varepsilon_{MAX} = B\,S\,\omega$) para disminuir nuevamente hasta cero, tomar valores negativos y volver a anularse. La intensidad cambia de sentido continuamente ***(corriente alterna)*** siendo su frecuencia (en Hz):

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

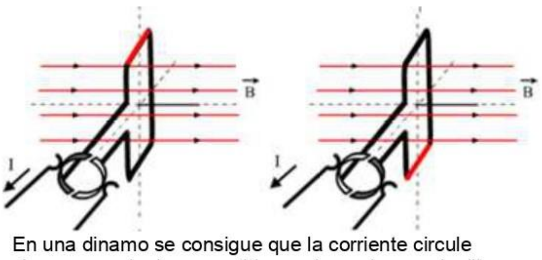




$\alpha = 0$	$\alpha = 90^0$	$\alpha = 180^0$	$\alpha = 270^0$	$\alpha = 0$
$\varphi = \varphi_{MAX}$	$\varphi = 0$	$\varphi = -\varphi_{MAX}$	$\varphi = 0$	$\varphi = \varphi_{MAX}$
$\varepsilon = 0$	$\varepsilon = \varepsilon_{MAX}$	$\varepsilon = 0$	$\varepsilon = -\varepsilon_{MAX}$	$\varepsilon = 0$

La intensidad que circula por la espira se puede calcular si aplicamos la ley de Ohm generalizada al circuito Si suponemos que la resistencia es R:

$$V_A - V_B = \Sigma\, I(R + r) - \Sigma\, \varepsilon$$
$$0 = I\,R - \varepsilon$$
$$\boxed{I = \frac{\varepsilon}{R}}$$



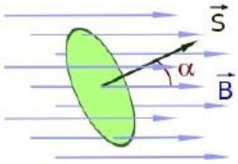
En una dinamo se consigue que la corriente circule siempre en el mismo sentido gracias a dos semianillos partidos llamados ***conmutadores***

Un alternador se puede modificar para que la corriente obtenida sea continua, en este caso recibe el nombre de ***dinamo.***

Lo veremos en los problemas.

Recuerda

INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA



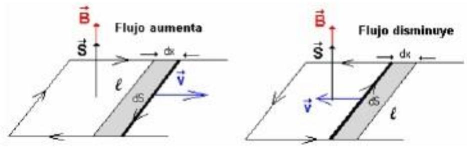
- **Flujo** magnético (campo uniforme y superficie plana):

$$\boxed{\boldsymbol{\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S} = B \cdot S \cdot cos\alpha}}$$ **U.S.I.: Wb**

- Ley de Faraday:

$\boxed{\boldsymbol{\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt}}}$; Si hay N espiras: $\varepsilon = -N\frac{d\Phi}{dt}$; Si Φ varía uniformemente: $\varepsilon = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$;

- f.e.m. inducida en un conductor móvil:



$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d(B \cdot S)}{dt} = -B \cdot \frac{l \cdot dx}{dt} = \boldsymbol{-B \cdot l \cdot v};$$

- f.e.m inducida en una bobina (N espiras) que gira dentro de un campo magnético:

$$\varepsilon = -N\frac{d\Phi}{dt} = -N\frac{d(B \cdot S \cdot cosa)}{dt} = -N \cdot B \cdot S\frac{d(cos\,\omega \cdot t)}{dt} = \boldsymbol{N \cdot B \cdot S \cdot \omega \cdot sen(\omega \cdot t)}$$

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

EJEMPLOS RESUELTOS

1. Una espira circular de 20 cm de radio está situada perpendicularmente a un campo magnético de 0,02 T. Calcula el flujo que lo atraviesa. Si giramos la espira 90 de forma que se coloque paralela al campo magnético, ¿cuánto valdría ahora el flujo?

El flujo que atraviesa la espira se calcula a partir del valor del campo magnético y de la superficie de la espira (depende del número de líneas de campo magnético que atraviesan la espira). Si la espira está orientada perpendicularmente al campo magnético, entonces el vector que define la superficie y el campo magnético son paralelos. Por tanto, el flujo magnético será máximo:

$\phi_B = \boldsymbol{B}.\boldsymbol{S} = B.S.\cos\alpha = B.S.\cos 0 = B.S = B.(\pi R^2) = 0{,}02\ (\pi.0{,}02^2) = 2{,}51.10^{-3}$ Wb

Si ahora giramos la espira 90º, el vector que define la superficie de la espira y el campo magnético serán perpendiculares, por lo que el flujo será nulo (mínimo flujo magnético):

$\phi_B = \boldsymbol{B}.\boldsymbol{S} = B.S.\cos\alpha = B.S.\cos 90 = 0$

2. Una bobina compuesta por 400 espiras circulares de 40 cm de diámetro gira con una frecuencia de 100 Hz en un campo magnético uniforme de 0,4 T. Determina el flujo magnético que atraviesa la bobina, en función del tiempo.

El flujo que atraviesa la espira se calcula a partir del valor del campo magnético y de la superficie total atravesada.

Si suponemos que inicialmente las espiras están orientadas perpendicularmente al campo magnético, entonces el vector que define la superficie de cada espira y el campo magnético son paralelos. Por tanto, el flujo será máximo:

$\phi_B = \boldsymbol{B}.\boldsymbol{S} = B.S_0.\cos\alpha = B.S_0.\cos 0 = B.S_0 = B.(\pi R^2) = 0{,}4\ N\ (\pi.0{,}4^2) =$ (se multiplica por N, nº de espiras)

$= 0{,}4\ 400\ (\pi.0{,}4^2) = 80{,}38$ Wb

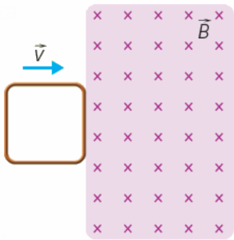
Como la bobina va girando, el flujo magnético que la atraviesa va variando:

$\phi_B = \boldsymbol{B}.\boldsymbol{S} = B.\ N.\ S_t.\ \cos\alpha$

La velocidad angular $\omega = \alpha / t \quad \alpha = \omega.t = 2\pi.f.t$

$\phi_B = BNS_t\cos\alpha = B.N.S_t.\cos(2\pi\ f\ t) = B.400.(\ \pi\ R^2).\cos(2\pi ft) = 0{,}4.400.\pi.0{,}4^2.\cos(2\pi\ 100\ t) = 80{,}38\ \cos(2\pi\ 100\ t)$ Wb

3. Una espira cuadrada se desplaza hacia una región del espacio donde existe un campo magnético uniforme perpendicular al plano del papel, como se muestra en la figura. Indica el sentido de la corriente inducida en la espira cuando penetra en la región del campo magnético.



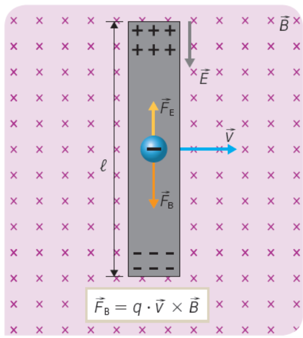
Cuando la espira penetra en la región donde existe el campo magnético, varía el flujo magnético que la atraviesa. Por tanto, se induce en ella una corriente eléctrica. Como mientras la espira está entrando en la región donde existe el campo el flujo magnético va aumentando, en la espira se induce una corriente que produce un campo magnético que se opone al campo magnético existente; es decir, un campo magnético que sale del papel.

Es decir, en el dibujo, en la espira se genera una corriente en sentido opuesto al de las agujas del reloj, tal y como se señala en el esquema.

4. Una barra metálica de 50 cm se mueve perpendicularmente a un campo magnético uniforme con una velocidad de 4 m/s. Se observa que entre los extremos de la barra hay una diferencia de potencial de 0,8 V.

a) Calcula la intensidad del campo magnético en la zona.

b) Si la barra metálica se moviese en la misma dirección del campo, ¿cuánto valdría la intensidad del campo magnético?



a) Como la barra se mueve en el seno de un campo magnético, aparecerá una fuerza de Lorentz sobre las cargas del conductor. Esta fuerza depende del valor del campo magnético y de la velocidad de las cargas, es decir, de la velocidad de la barra. Como la barra se mueve perpendicularmente al campo, la velocidad de las cargas y el campo magnético son perpendiculares, y entonces podemos escribir:

$\boldsymbol{F_B} = q\ (\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B}) = q\ (\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B})\ \text{sen}\ \alpha = q\ v\ B$

La fuerza magnética provoca que los electrones se acumulen en un lado del conductor.

Aparece, entonces, un campo eléctrico debido a la acumulación de cargas positivas en un lado de la barra y de cargas negativas en el otro lado. El equilibrio se alcanza cuando la fuerza eléctrica y la fuerza magnética se igualan, es decir, en módulos:

$q\ v\ B = E\ q \qquad B = E/v$

Como el campo eléctrico es constante, puesto que el campo magnético y la velocidad también lo son, podemos escribir: $\Delta V = E.\Delta x = E\ L \qquad E = \Delta V/L$

Como $B = E/v \qquad B = E/v = (\Delta V/L)/v = \Delta V/\ L\ v = 0{,}8 / (0{,}5\ .\ 4) = 0{,}4$ T

b) Si la barra se mueve en la misma dirección del campo magnético, entonces la velocidad y el campo magnético son paralelos y su producto vectorial es nulo, por lo que no aparecerá una fuerza de Lorentz sobre las cargas del conductor. De este modo no aparecerá el campo eléctrico y, por consiguiente, no existirá diferencia de potencial entre los extremos de la barra.

5. Sea una bobina circular y plana de 2,5 cm de radio construida con 25 espiras cuyo eje es paralelo a un campo magnético uniforme de 0,1 T. Calcula la fem inducida entre los extremos de la bobina si durante Δt = 10 ms y de forma lineal se duplica el campo magnético ¿Cuánto valdría la fem si en ese intervalo Δt hubiésemos invertido el sentido del campo?

La fuerza electromotriz inducida depende de la variación del flujo magnético sobre la bobina. Podemos escribir:

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

El campo magnético se duplica, por lo que podemos escribir:

$\mathcal{E} = - \Delta B.S/\Delta t = - (B_f - B_0).S/\Delta t = - (2B_0 - B_0)\ S / \Delta t = - B_0\ S / \Delta t = 0{,}1\ .\ 25\ \pi\ .\ 0{,}025^2 / (10.10^{-3}) = - 0{,}49$ V

La fuerza electromotriz inducida es constante en este caso.

Si en ese intervalo de tiempo modificamos el campo hasta invertirlo de sentido, procediendo análogamente:

$\mathcal{E} = - \Delta B.S/\Delta t = - (B_f - B_0).S/\Delta t = - (-B_0 - B_0)\ S / \Delta t = 2B_0\ S / \Delta t = 2.0{,}1\ .\ 25\ \pi\ .\ 0{,}025^2 / (10.10^{-3}) = 0{,}98$ V

6. Una espira circular de 20 cm de radio se encuentra en un campo magnético uniforme perpendicular a la superficie de la espira cuya intensidad varía con el tiempo según la expresión:
***B* (*t*)= 1,8 sen (8 *t*) (en unidades del SI).**
a) Calcula el flujo magnético que atraviesa la espira en función del tiempo.
b) Calcula la fuerza electromotriz inducida máxima.

a) Como el campo magnético es perpendicular a la espira, el flujo magnético que cruza la espira es máximo y viene dado por la expresión:

$\phi_B = \boldsymbol{B_{(t)}}.\boldsymbol{S} = B_{(t)}.S.\cos\alpha = B_{(t)}.S_0.\cos 0 = B_{(t)}.S = 1{,}8\ \text{sen}(8t).(\pi R^2) = 1{,}8\ \text{sen}(8t).(\pi.0{,}2^2) = 0{,}226\ \text{sen}(8t)$ Wb

b) La fuerza electromotriz se calcula a partir de la variación del flujo magnético con el tiempo:

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

$\mathcal{E} = - \phi_B / dt = - d(\boldsymbol{B}.\boldsymbol{S}) / dt = - d(B.S) / dt = - d(1{,}8\ \text{sen}(8t)S) / dt = - d(0{,}226\text{sen}(8t)) / dt =$

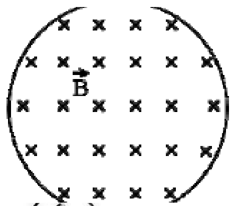
módulo de $\mathcal{E} = d(0{,}226\text{sen}(8t))/dt = 0{,}0226\cos(8t)\ 8 = 1{,}808\cos(8t)$

La fem será máxima cuando la función trigonométrica sea 1, es decir: $\mathcal{E}$ = 1,808 V

7.

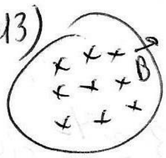
BLOQUE IV – CUESTIÓN

Una espira conductora, con forma circular, está situada en el seno de un campo magnético perpendicular al plano del papel, como muestra la figura. El módulo del campo magnético aumenta con el tiempo. Indica el sentido de la corriente inducida en la espira y justifica la respuesta basándote en las leyes que explican este fenómeno.



4

3 (2013)



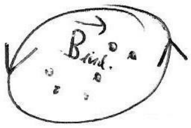
B aumenta

Según la ley de Faraday - Lenz sobre la espira se inducirá una corriente si varía el flujo magnético que la atraviesa.

$\Phi = \vec{B}\cdot\vec{S} = B\cdot S\cdot\cos\alpha$, nos dicen que B varía (aumenta) luego Φ varía y se produce una corriente inducida.

La ley de LENZ dice que el sentido de esa corriente debe ser tal que se oponga a la variación del flujo (signo $\ominus$) que la ha producido. Si B aumenta, el campo es cada vez más ENTRANTE, por lo que la corriente inducida tendrá que crear en el interior de la espira un campo SALIENTE que COMPENSE la variación

El sentido debe ser ANTIHORARIO
(Regla de la mano derecha).

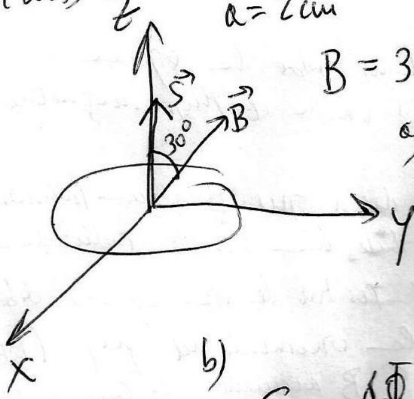


11

En el plano XY se tiene una espira circular de radio *a = 2 cm*. Simultáneamente se tiene un campo magnético uniforme cuya dirección forma un ángulo de *30°* con el semieje Z positivo y cuya intensidad es $B = 3\,e^{-t/2}$ *T*, donde *t* es el tiempo en segundos.

1. Calcula el flujo del campo magnético en la espira, y su valor en *t = 0 s*. (0,8 puntos)
2. Calcula la fuerza electromotriz inducida en la espira en *t = 0 s*. (0,8 puntos)
3. Indica, mediante un dibujo, el sentido de la corriente inducida en la espira. Razona la respuesta. (0,4 puntos)

(24) (2003)



$a = 2\,cm$

$B = 3 \cdot e^{-t/2}$ (unid.)

a) $\Phi_i(t=0) = B \cdot S \cdot \cos\alpha = 3 \cdot \cancel{e^{-t/2}}^{\,1} \cdot \pi (0{,}02)^2 \frac{\sqrt{3}}{2} =$

$= 3{,}26 \cdot 10^{-3}$ Wb.

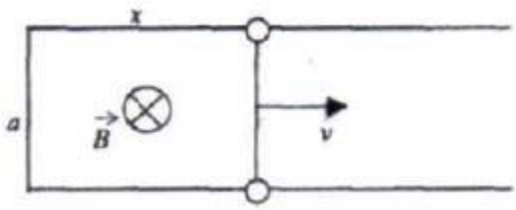
b)

$$\underset{t=0}{\mathcal{E}} = \frac{-d\Phi}{dt} = -\,3{,}26 \cdot 10^{-3} \cdot \cancel{e^{-t/2}}^{\,1} \left(-\frac{1}{2}\right) = 1{,}63 \cdot 10^{-3}\ V.$$

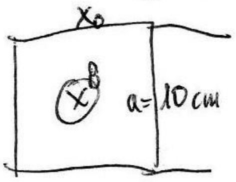
c) B decrece con el tiempo, corriente inducida tal que el campo aumente → sentido antihorario.

12

La espira rectangular mostrada en la figura, uno de cuyos lados es móvil, se encuentra inmersa en el seno de un campo magnético uniforme, perpendicular al plano de la espira y dirigido hacia dentro del papel. El módulo del campo magnético es $B=1\ T$. El lado móvil, de longitud $a=10\ cm$, se desplaza con velocidad constante $v = 2\ m/s$. Se pide calcular la fuerza electromotriz inducida en la espira.



(29) (2001)



$\alpha = 180°$

$B = 1\,T$

$v = 2\,m/s$

$S_0 = x_0 \cdot a = x_0 \cdot 0{,}10$

$S_t = a \cdot x = 0{,}10(x_0 + 2t) =$

$x \to x_0 + v \cdot t$ $\quad = 0{,}1 \cdot x_0 + 0{,}2t$

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d(B \cdot S \cdot \cos\alpha)}{dt} = -\frac{d[1 \cdot (0{,}1x_0 + 0{,}2t) \cdot \cos 180]}{dt} = + K + 0{,}2t = \boxed{0{,}2\,V}$$