	INTERACCIÓN ELECTROMAGNÉTICA **INDUCCIÓN**	**IES La Magdalena. Avilés. Asturias**

En el tema dedicado al electromagnetismo se ha visto 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.

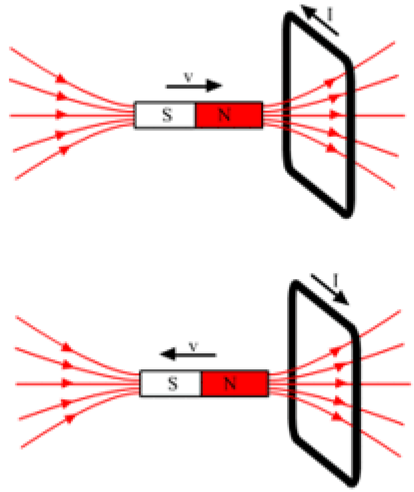
Experiencia de Faraday

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 variación 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 Faraday

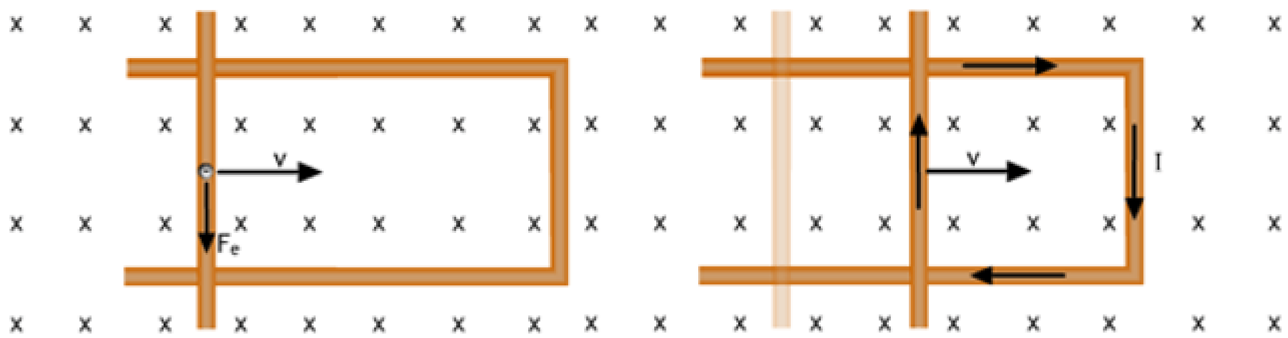
Al acercar o alejar un imán a una espira se induce en ésta una corriente eléctrica

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.



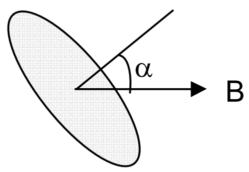
Comparando ambas experiencias podemos llegar a la conclusión de que ***lo que varía en ambas es la cantidad de líneas de campo que atraviesan el circuito en el que se induce la corriente.***

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.***
- 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 nueva magnitud recibe el nombre de ***flujo del campo magnético*** (ϕ_B):

$$\boxed{\phi_B = B \, . \, S}$$

- Si la superficie no está colocada perpendicularmente a las líneas de campo, sino que forma con ellas cierto ángulo, el flujo magnético a través de esa superficie viene dado por:



$$\boxed{\phi_B = B \, . \, S \, . \cos\alpha}$$

El ángulo es el formado por el vector campo magnético y la perpendicular a la superficie.

- ***La unidad S.I. de flujo magnético es el tesla por metro cuadrado ($T.m^2$) 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: $\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$ En forma diferencial (variación infinitesimal del tiempo): $\frac{d\phi}{dt}$

Utilizando el concepto de flujo, podremos decir:

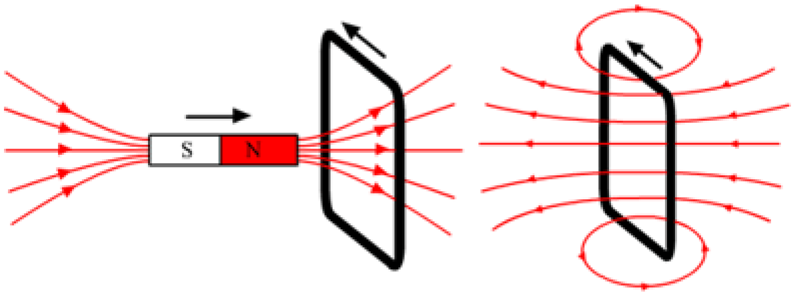
Se induce una corriente eléctrica en un circuito si este es atravesado por un flujo magnético variable.

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.

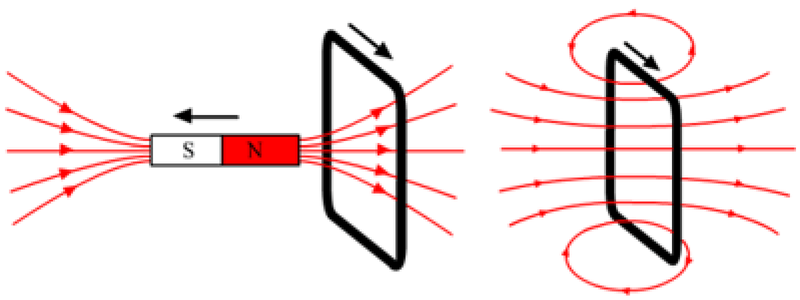
Ley de Lenz

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

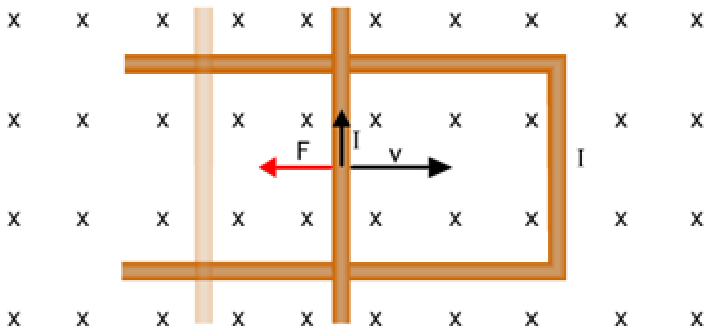
En la experiencia de Faraday la causa que produce la corriente inducida cuando se acerca el imán es el ***aumento de la intensidad del campo magnético***. En este caso la corriente inducida es tal que tiende a crear ***un campo magnético contrario***, que hace que disminuya el campo inductor.



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:

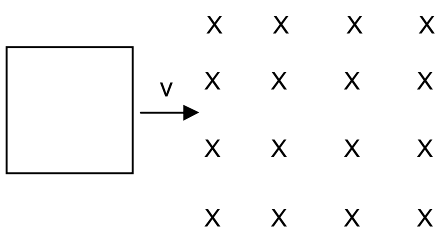
El sentido de la corriente inducida es tal que siempre ***se opone a la variación del flujo que la produce.*** Esto es:

- 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).

Ejemplo 1

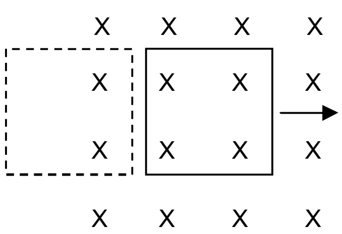
Una espira cuadrada se desplaza hacia una zona donde hay un campo magnético uniforme perpendicular al plano de la espira (ver figura). ¿Cuál será el sentido de la corriente inducida en la espira:

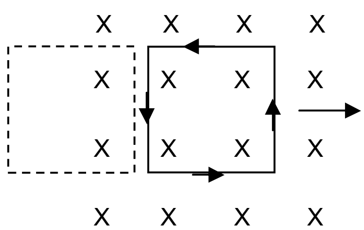
a) Si entra en la zona donde está el campo magnético.
b) Si sale de la zona donde está el campo magnético



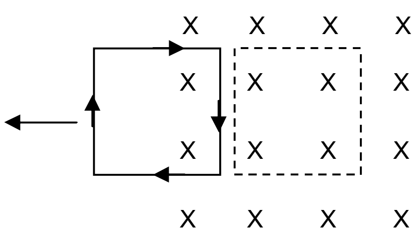
Solución:

a) A medida que la espira penetra en el campo magnético se produce un ***aumento del número de líneas que la atraviesan. Esto es, el flujo aumenta***. Según la Ley de Lenz se inducirá en la espira una corriente eléctrica que creará un campo magnético que se oponga al campo inductor (disminuyendo de esta manera el flujo). La corriente inducida recorrerá la espira en ***sentido contrario al de las agujas del reloj*** (produciendo de esta forma un campo magnético que sale del plano del papel)



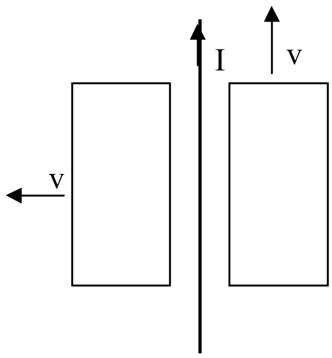


b) Si la espira sale del campo magnético se produce una ***disminución del flujo.*** Ahora se inducirá una corriente que refuerce el campo inductor. La corriente recorrerá la espira en ***el sentido de las agujas del reloj*** (creando un campo magnético que entra en el plano del papel).



Ejemplo 2

Por un hilo vertical indefinido circula una corriente eléctrica de intensidad I. Si dos espiras se mueven una con velocidad paralela al hilo y otra con velocidad perpendicular, ¿se inducirá corriente en alguna de ellas? Razona la respuesta.

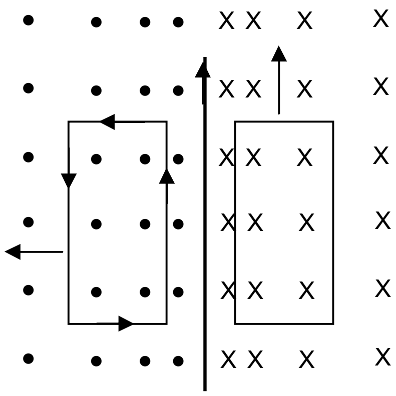


Solución:

Un hilo crea un campo magnético situado en un plano perpendicular a la corriente (al plano del papel en este caso) cuyas líneas de campo son circunferencias concéntricas al hilo y cuya intensidad decrece a medida que nos alejamos del hilo:

$$B = \frac{\mu}{2\,\pi}\,\frac{I}{r}$$

En este caso el campo creado penetra en el plano del papel a la derecha del hilo (aspa en el esquema) y sale a la izquierda (punto en el esquema). Además, como la intensidad del campo disminuye a medida que nos alejamos del hilo, se han representado las líneas de fuerza más espaciadas a medida que nos alejamos.



En el esquema se puede apreciar que la espira que se mueve hacia la izquierda avanza en el seno de un campo magnético de intensidad decreciente. El flujo a su través disminuye, luego se inducirá una corriente tal que genere un campo magnético que refuerce al campo inductor. La corriente circulará por la espira en sentido contrario a las agujas del reloj.

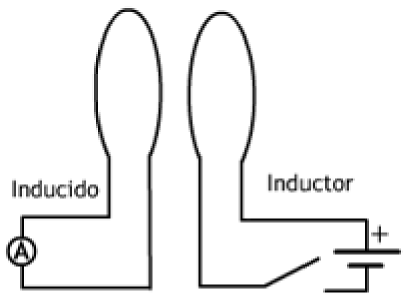
La espira que se mueve de abajo arriba (y considerando que la longitud del hilo es indefinida) se mueve en el seno de un campo magnético, pero el flujo que atraviesa el circuito permanece constante, luego no se inducirá corriente alguna.

Ejemplo 3

Indica cómo es la corriente inducida en la espira de la izquierda (inducido) en los siguientes casos:

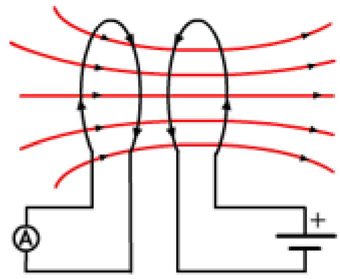
a) Con ambas espiras muy juntas se cierra el interruptor en el inductor

b) Ambas espiras están juntas. Se cierra el interruptor en el inductor y se alejan ambas espiras.

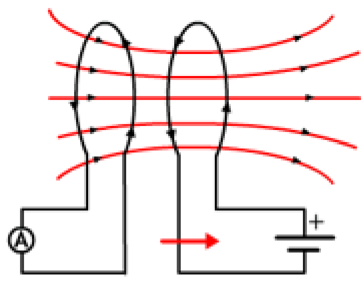


Solución:

a) Al cerrar el interruptor en el inductor la corriente aumenta creando un campo creciente que producirá en el inducido un flujo creciente. La corriente inducida será tal que el campo creado por ella se opone al campo inductor (sentido de las agujas del reloj)



b) Si ambas espiras se alejan el flujo decrece en el inducido. La corriente inducida será tal que el campo creado por ella refuerza al campo inductor (sentido contrario a las agujas del reloj)



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*** :

Ley de Faraday-Henry

La fuerza electromotriz inducida es igual, y de signo contrario, a la rapidez con que varía el flujo magnético.

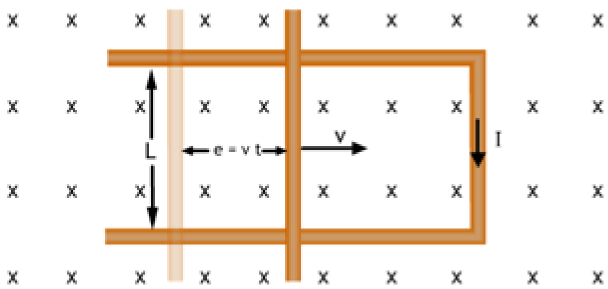
$$\boxed{\varepsilon = -\frac{\Delta\phi}{\Delta t}}$$

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

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

En el caso del experimento de Henry, suponiendo que el conductor se desplaza con una velocidad constante, v, la variación de flujo podría calcularse de la forma siguiente:

$$\phi_1 = B\,S_1$$
$$\phi_2 = B\,S_2 = B\left[S_1 - L\,(v\,t)\right]$$
$$\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1 = B\left[S_1 - L\,(v\,t)\right] - B\,S_1 = -B\,L\,(v\,t)$$
$$\frac{\Delta\phi}{\Delta t} = -\frac{B\,L\,(v\,t)}{t} = -B\,L\,v$$
$$\varepsilon = -\frac{\Delta\phi}{\Delta t} = B\,L\,v$$



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

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

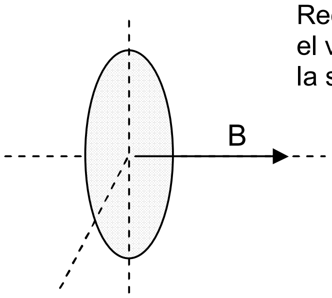
Ejemplo 3 (Oviedo 2006)

Un anillo conductor se coloca perpendicularmente a un campo magnético uniforme B ¿En qué caso será mayor la fuerza electromotriz inducida en el anillo?

a) Si B disminuye linealmente con el tiempo pasando de 0,5 T a 0 T en 1 ms

b) Si B aumenta linealmente con el tiempo pasando de 1,0 T a 1,2 T en 1 ms

Solución:



Recordando la definición de flujo, y teniendo en cuenta que desconocemos el valor de la superficie del anillo, podemos calcular la f.e.m. en función de la superficie S:

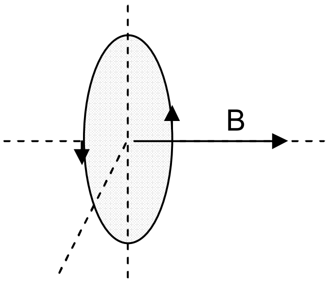
$$\phi = B\,.\,S$$
$$\Delta\phi_A = \phi_2 - \phi_1 = \left(B_2 - B_1\right)S = \Delta B\,.\,S$$
$$\varepsilon_A = -\frac{\Delta\phi_A}{\Delta t} = -\frac{\Delta B\,.\,S}{t} = -\frac{(0 - 0,5)\ T\ S\ \left(m^2\right)}{10^{-3}\,s} = 500\ (S)\ V$$

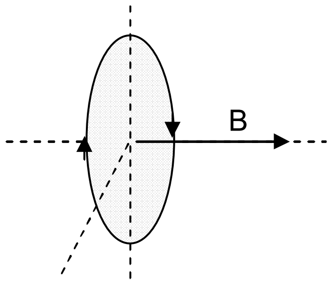
Para el segundo caso la f.e.m será:

$$\phi = B \,.\, S$$
$$\Delta\phi_B = \phi_2 - \phi_1 = (B_2 - B_1)S = \Delta B \,.\, S$$
$$\varepsilon_B = -\frac{\Delta\phi_B}{\Delta t} = -\frac{\Delta B \,.\, S}{t} = -\frac{(1{,}2 - 1{,}0)\ T\ S\ (m^2)}{10^{-3} s} = -\ 200\ (S)\ V$$

En el primer caso como el flujo disminuye, la corriente circulará en el sentido de reforzar el campo inductor (sentido contrario a las agujas del reloj en este caso).

En el segundo caso el flujo aumenta con lo que el sentido de la corriente inducida será aquel que produzca un campo magnético contrario al campo inductor (sentido de las agujas del reloj)





Comparando por tanto los valores absolutos de ambas, vemos que la f.e.m es mayor en el primer caso:

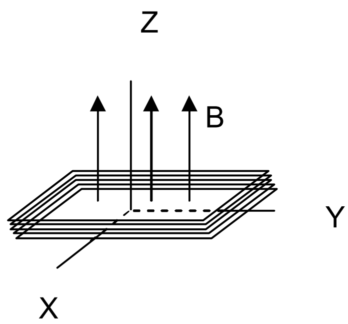
$$\frac{\varepsilon_A}{\varepsilon_B} = \frac{500\ \cancel{S}}{200\ \cancel{S}} = 2{,}5\ ;\quad \varepsilon_A = 2{,}5\ \varepsilon_B$$

Ejemplo 4

Una bobina cuadrada y plana (S= 25 cm^2) consta de cinco espiras y se encuentra situada en el plano XY (ver figura)

a) Calcula la f.e.m. inducida si se aplica un campo magnético en la dirección del eje Z que varía desde 0,5 T a 0,2 T en 0,1 s.

b) Calcula la f.e.m. media inducida si el campo tiene ahora un valor constante de 0,5 T y la bobina gira hasta colocarse en el plano XZ en 0,1 s.



Solución:

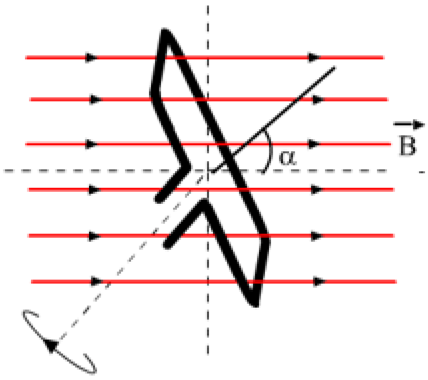
$$\phi = B \,.\, S.\cos\alpha = B.\, S$$
$$\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1 = (B_2 - B_1)S = \Delta B \,.\, S$$
$$\varepsilon = -N\frac{\Delta\phi}{\Delta t} = -N\frac{\Delta B \,.\, S}{t} = -5\ \frac{(0{,}2 - 0{,}5)\ T\ 2{,}5\ 10^{-3}\ (m^2)}{0{,}1\ s} = 3{,}75\ 10^{-2}\ V$$

b) Cuando la espira se sitúa en el plano XZ el flujo que la atraviesa es nulo. La variación de flujo en este caso será:

$$\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1 = 0 - B\ S = -\ B\ \ S$$
$$\varepsilon = -N\frac{\Delta\phi}{\Delta t} = -N\frac{(-\ B\ S)}{t} = 5\ \frac{0{,}5\ T\ .\ 2{,}5\ 10^{-3}\ m^2}{0{,}1\ s} = 6{,}25\ 10^{-2}\ V$$

Generadores de corriente eléctrica. Alternadores y dinamos

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 ($\alpha = 0$) :

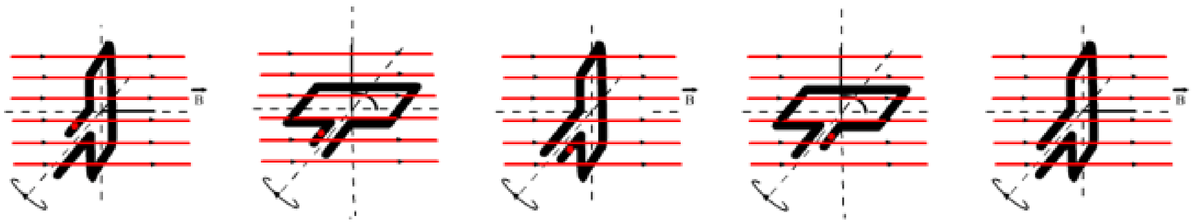
$$\left.\begin{array}{l}\phi = B\,S\cos\alpha \\ \alpha = \omega\, t\end{array}\right\}\phi = B\,S\cos(\omega\, t) = \phi_{MAX}\cos(\omega\, t)$$

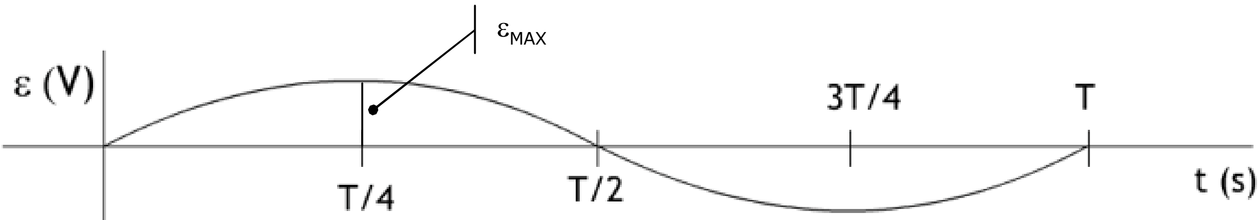
Aplicando la ley de Faraday-Henry la f.e.m. valdrá:

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

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):

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

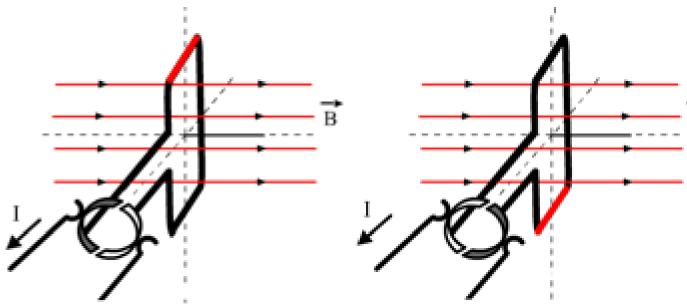




$\alpha = 0$	$\alpha = 90^0$	$\alpha = 180^0$	$\alpha = 270^0$	$\alpha = 0$
$\phi = \phi_{MAX}$	$\phi = 0$	$\phi = -\phi_{MAX}$	$\phi = 0$	$\phi = \phi_{MAX}$
$\varepsilon = 0$	$\varepsilon = \varepsilon_{MAX}$	$\varepsilon = 0$	$\varepsilon = -\varepsilon_{MAX}$	$\varepsilon = 0$

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.***

Ejemplo 5 (Oviedo 2010-2011)

Una espira de 2,0 cm de radio gira uniformemente con un periodo de 0,02 s en el seno de un campo magnético de 0,12 T. Determinar:

a) La frecuencia de la corriente inducida en la espira.

b) Cómo varía el flujo del campo magnético a través de la espira con el tiempo.

c) El valor máximo de la f.e.m. inducida en la espira.

Solución:

Para una espira que gira con velocidad angular constante en un campo magnético constante la fuerza electromotriz varía de forma senoidal:

a)
$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0,02\ s} = 50\ s^{-1} = 50\ Hz$$

b)
$$\left.\begin{array}{l}\phi = B\ S\ \cos\alpha \\ \alpha = \omega\ t\end{array}\right\}\phi = B\ S\ \cos(\omega\ t) = \phi_{MAX}\cos(\omega\ t)$$

$$\phi = 0,12\ T\ (\pi\ 0,02^2\ m^2)\ \cos\left(\frac{2\pi}{0,02}\ t\right) = 1,51 . 10^{-4}\cos(100\pi\ t)$$

$$\phi = 1,51 . 10^{-4}\cos(100\pi\ t)$$

c)
$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt} = 1,51 . 10^{-4}(100\pi)\ sen(100\pi\ t) = 4,74\ 10^{-2}\ sen(100\pi\ t)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_{MAX}\ sen(\omega t) = 4,74\ 10^{-2}\ sen(100\pi\ t)$$

$$\varepsilon_{MAX} = 4,74\ 10^{-2}\ V$$

Ejemplo 6 (Oviedo 2009-2010)

En un pequeño generador eléctrico por inducción electromagnética una espira gira en un campo magnético constante con una frecuencia f y genera una f.e.m. de 0,12 V. Si la espira la hacemos rotar con una frecuencia triple que la anterior en un campo magnético que vale la mitad que el original determine la nueva fuerza electromotriz

Solución:

Si se hace girar una espira en un campo magnético se produce una f.e.m. variable. Suponiendo que en el enunciado se habla del valor máximo de la f.e.m.:

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt} = B\ S\ \omega\ sen(\omega t) = \varepsilon_{MAX}\ sen(\omega t)$$

$$\varepsilon_{MAX} = B\ S\ \omega = B\ S\ (2\ \pi\ f)$$

Aplicando lo anterior para los dos casos del enunciado tenemos:

$$\left.\begin{array}{l}(\varepsilon_{MAX})_1 = B_1\ S\ (2\ \pi\ f_1) \\ (\varepsilon_{MAX})_2 = B_2\ S\ (2\ \pi\ f_2)\end{array}\right\}\frac{(\varepsilon_{MAX})_1}{(\varepsilon_{MAX})_2} = \frac{B_1\ f_1}{B_2\ f_2}$$

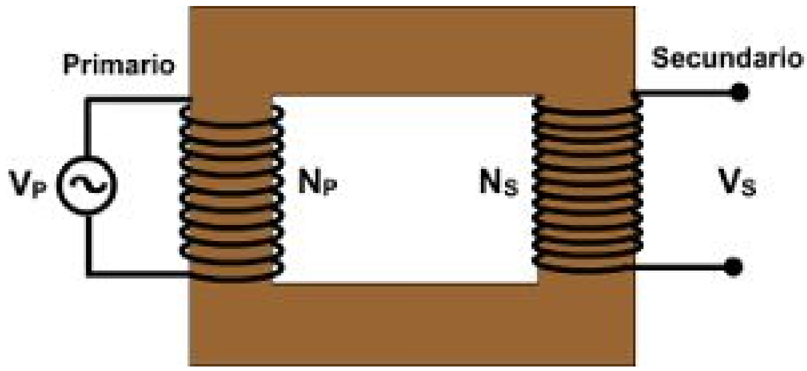
$$(\varepsilon_{MAX})_2 = (\varepsilon_{MAX})_1\frac{B_2\ f_2}{B_1\ f_1} = 0,12\ V\ \frac{\frac{\cancel{B_1}}{2}3\ \cancel{f_1}}{\cancel{B_1}\ \cancel{f_1}} = \frac{3}{2}0,12\ V = 0,18\ V$$

Transformadores

El transformador es un aparato que se emplea para modificar el voltaje.

Los transformadores que proporcionan en la salida un voltaje superior al de entrada se llaman “elevadores” y los que proporcionan un voltaje de salida inferior al de entrada se llaman “reductores”.

Están formados por dos bobinados (el de entrada se llama ***primario*** y el de salida **secundario)** dispuestos sobre un núcleo de hierro (que normalmente se lamina para reducir las corrientes parásitas o corrientes de Foucault) y cuya misión es reforzar el campo magnético producido y “conducir” las líneas de campo para que atraviesen el secundario.



La resistencia de los bobinados es muy baja, pudiendo considerarse que la fuerza electromotriz es prácticamente igual a la diferencia de potencial ($\varepsilon = V$).

Si conectamos el primario a una fuente de corriente alterna se producirá un campo magnético variable que producirá una fem inducida en el primario de valor:

$$\varepsilon_P = V_P = -N_P \frac{d\phi}{dt}$$

Si suponemos que no existe ninguna pérdida de flujo en el núcleo de hierro, el mismo flujo atravesará el secundario y, por tanto, su variación será idéntica. Podemos, entonces escribir para el secundario:

$$\varepsilon_S = V_S = -N_S \frac{d\phi}{dt}$$

Dividiendo ambas expresiones llegamos a las relaciones:

$$\boxed{\frac{\varepsilon_P}{\varepsilon_S} = \frac{V_P}{V_S} = \frac{N_P}{N_S}\ ;\ V_s = V_P \frac{N_S}{N_P}}$$

Por tanto si $N_S > N_P$ tenemos un elevador y si $N_S < N_P$ un reductor.

La potencia en el primario viene dada por $P = V_P\ I_P$, y considerando un transformador ideal (no existen pérdidas de potencia), tendríamos esa misma potencia en el secundario, donde se cumplirá: $P = V_S\ I_S$

Por tanto: $\boxed{V_P\ I_P = V_S\ I_S\ ;\ \frac{V_P}{V_S} = \frac{I_S}{I_P}}$