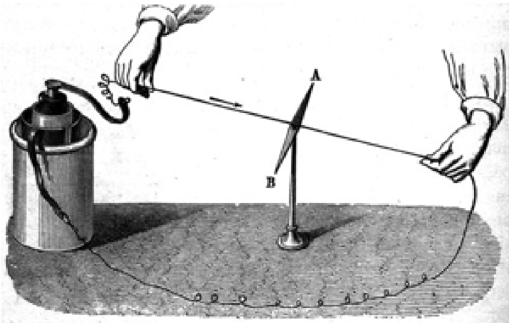
	INTERACCIÓN ELECTROMAGNÉTICA **ELECTROMAGNETISMO**	**IES La Magdalena.** **Avilés. Asturias**

La unión electricidad-magnetismo tiene una fecha: 1820. Ese año Oersted realizó su famoso experimento (ver figura) en el cual hacía circular una corriente eléctrica por un conductor cerca del cual se colocaba una aguja imantada. La aguja se desviaba mostrando que ***una corriente eléctrica crea un campo magnético a su alrededor.***



Experiencia de Oersted (1820) mostrando como una corriente eléctrica desvía una aguja imantada

Hans Christian Oersted (1777 - 1851)

Campo magnético creado por un conductor

El valor del campo magnético creado por un hilo por el que circula una corriente de intensidad I en un punto situado a una distancia r viene dado, por ***(fórmula de Biot-Savart)***:

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

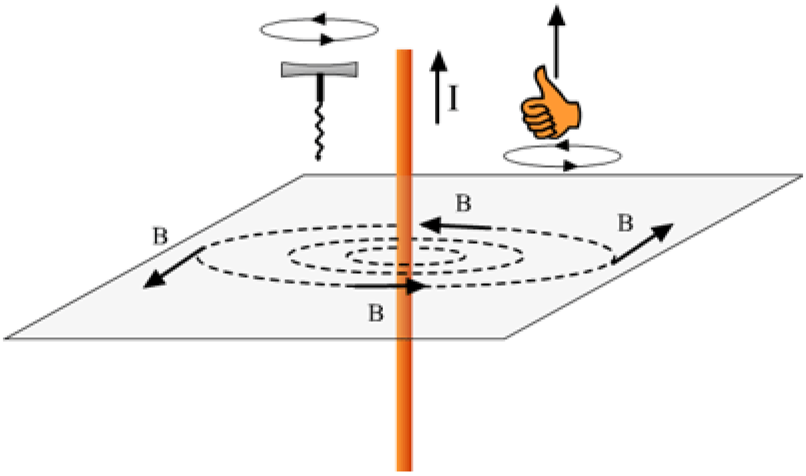
- ***Las líneas de campo son circunferencias*** concéntricas al hilo, situadas en un plano perpendicular al mismo.
- ***El sentido de las líneas de campo*** es el de giro de un sacacorchos que avanza en el sentido de la corriente.
- ***El vector campo magnético*** es tangente a las líneas de campo y de su mismo sentido.
- ***La intensidad del campo magnético*** es directamente proporcional a la intensidad que circula e inversamente proporcional a la distancia al conductor.

μ es la ***permeabilidad*** magnética del medio. Recoge la mayor o menor facilidad del medio para transmitir el campo magnético. Para el vacío o el aire el valor es el mismo:

$$\mu_0 = 4\pi\ 10^{-7}\ \frac{T\ m}{A} = 4\pi\ 10^{-7}\ \frac{N}{A^2}$$

Para otros medios es muy frecuente expresar la permeabilidad como ***permeabilidad relativa:***

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}\ ;\qquad \mu = \mu_r\ \mu_0$$



Podemos clasificar los distintos materiales de acuerdo con su permeabilidad magnética en:

Sustancias ferromagnéticas	Sustancias paramagnéticas	Sustancias diamagnéticas
• ***Su permeabilidad es muy superior a la del vacío:*** $\mu_r >> 1$	• ***Su permeabilidad es algo superior a la del vacío:*** $\mu_r \geq 1$	• ***Su permeabilidad es inferior a la del vacío:*** $\mu_r \leq 1$
• Son fuertemente atraídas por los imanes.	• Son débilmente atraídas por los imanes.	• Son débilmente repelidas por los imanes.
• Son fácilmente imantables y mantienen sus propiedades magnéticas durante cierto tiempo. A veces (caso del acero) se convierten en imanes permanentes.	• Aunque son imantables no mantienen sus propiedades magnéticas una vez que se suprime el campo magnético exterior.	• No son imantables.
• Si se someten a un campo magnético externo el campo en su interior es mayor que el externo.	• Si se someten a un campo magnético externo el campo en su interior es prácticamente igual que el externo	• Si se someten a un campo magnético externo el campo magnético en su interior es menor que el externo.
• Ejemplos: hierro, acero, cobalto, níquel, neodimio...	• Ejemplos: aluminio, platino, paladio...	• Ejemplos: mercurio, plata, cobre, bismuto, agua...

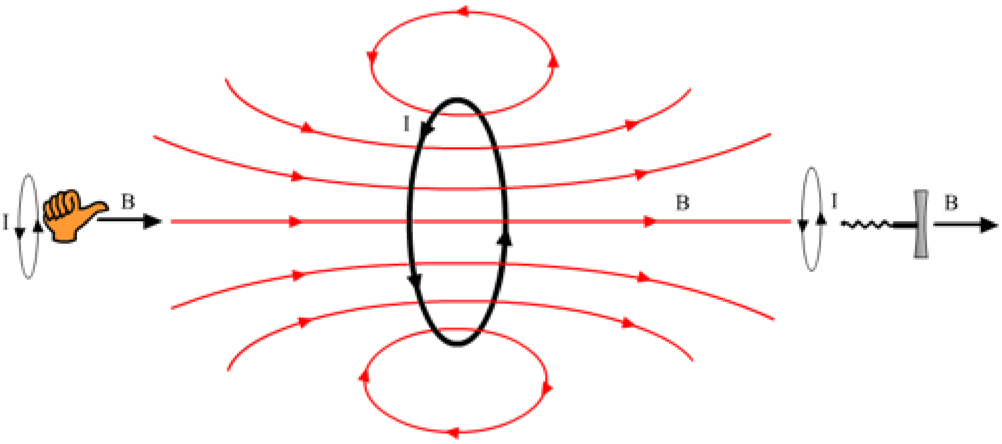
Campo magnético creado por un espira

Una espira crea un campo magnético tal como el de la figura. En los puntos situados en el eje de la espira el campo vale:

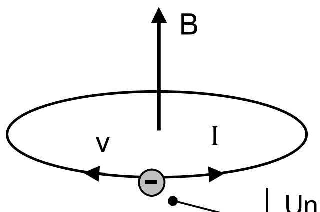
$$B = \frac{\mu\, I}{2} \frac{R^2}{\left(R^2 + x^2\right)^{\frac{3}{2}}}$$

Y en su centro (donde x =0):

$$\boxed{B = \frac{\mu\ I}{2\ R}}$$



El hecho de que una corriente eléctrica genere un campo magnético ***permite explicar el magnetismo natural como consecuencia de la existencia de diminutos imanes de tamaño atómico.***

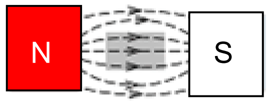


Un electrón girando (carga negativa) equivale a una corriente convencional de sentido contrario al del movimiento, que crea un campo magnético perpendicular al plano de la órbita.

Si consideramos un único electrón (carga eléctrica negativa) orbitando alrededor del núcleo tendremos el equivalente a una diminuta corriente eléctrica circular (espira) que generará su correspondiente campo magnético.

Si consideramos átomos más complejos (con varios electrones situados en varias capas) la situación puede ser mucho más complicada y el campo magnético total sería el resultante de la suma del de todos los electrones, que puede dar un valor nulo. Una situación similar se produce cuando tratamos con moléculas.

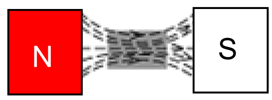
En las sustancias diamagnéticas los átomos o moléculas (debido a su configuración electrónica) no tienen campo magnético neto. Si se someten a la acción de un campo externo ***se induce*** en ellas un campo magnético opuesto. De esta manera el campo aplicado es más débil en su interior y son repelidas por los imanes (Faraday ya observó en 1846 que el bismuto era repelido por un imán).



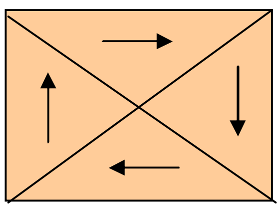
En las sustancias paramagnéticas los átomos o moléculas individuales sí que pueden ser considerados como diminutos imanes, pero como resultado de la agitación molecular (energía cinética) están orientados al azar dando un campo magnético resultante nulo. Si se someten a la acción de un campo magnético externo se orientan en parte y presentan propiedades magnéticas mientras actúe el campo. Si éste cesa, los imanes microscópicos vuelven a desordenarse. La magnetización no es permanente.

De todo lo dicho se desprende que la magnetización será mayor cuanto más intenso sea el campo magnético externo o más baja la temperatura. Esta dependencia con la temperatura fue observada por Pierre Curie. La ***ley de Curie*** relaciona la magnetización de una sustancia con el campo magnético aplicado y la temperatura absoluta, aunque deja de ser válida para campos magnéticos muy grandes o temperaturas muy bajas.

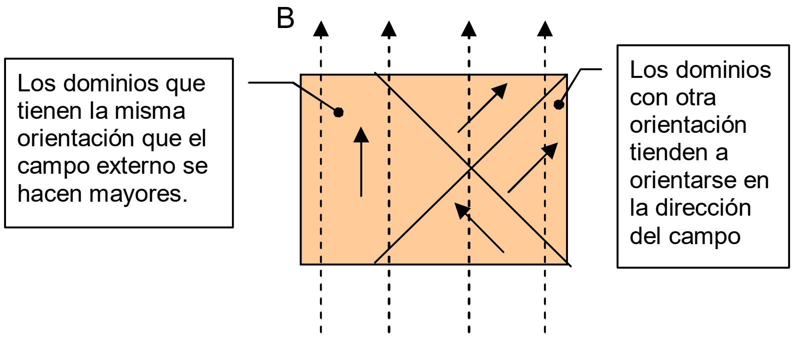
En las sustancias ferromagnéticas se observa una magnetización permanente. A nivel microscópico se pueden distinguir zonas, denominadas ***dominios***, en las cuales los imanes atómicos están orientados en una dirección determinada, aun en ausencia de campos externos. Si se aplica un campo magnético externo aquellos dominios que están orientados según el campo aplicado crecen a expensas de los que no poseen esa orientación, a la vez que se produce una rotación en la orientación de los dominios en la dirección del campo magnético externo. Todo ello hace que se produzca un refuerzo considerable del campo magnético en el interior de la sustancia.



La agitación térmica tiende a desordenar los dominios, por eso existe una temperatura ***(temperatura de Curie***) por encima de la cual la sustancia pierde sus propiedades ferromagnéticas y se convierte en paramagnética.



Dominios magnéticos sin una orientación preferente. Sustancia no magnetizada

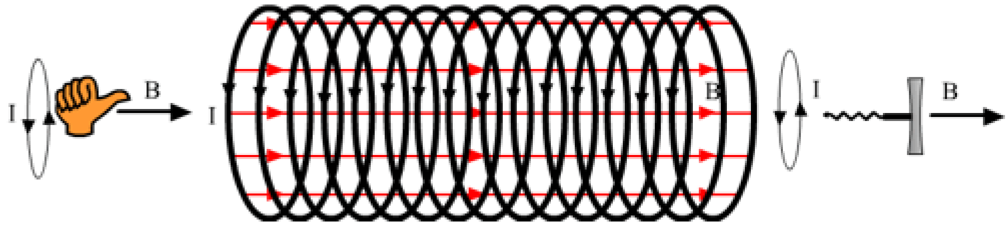


En presencia de un campo magnético externo los dominios tienden a orientarse y se produce un crecimiento de los que tienen la misma orientación que el campo.

Campo magnético creado por un solenoide

Si consideramos un solenoide largo y con las espiras lo suficientemente juntas, podemos considerar que el campo en el exterior es nulo y uniforme en su interior:

$$\boxed{B = \frac{N\,\mu\,I}{L} \qquad B = n\,\mu\,I \quad \left(\text{Donde } n = \frac{N}{L}\right)}$$



Ejemplo 1 (Oviedo 2010-2011)

Por un hilo rectilíneo muy largo circula una corriente de 0,50 A.

a) Describir la dirección y sentido del campo magnético en un punto situado a 2,0 m del hilo.

b) Determinar el módulo del campo magnético en el citado punto.

c) ¿Cuál será el valor del nuevo campo magnético si la corriente se duplica y la distancia se reduce a la mitad?

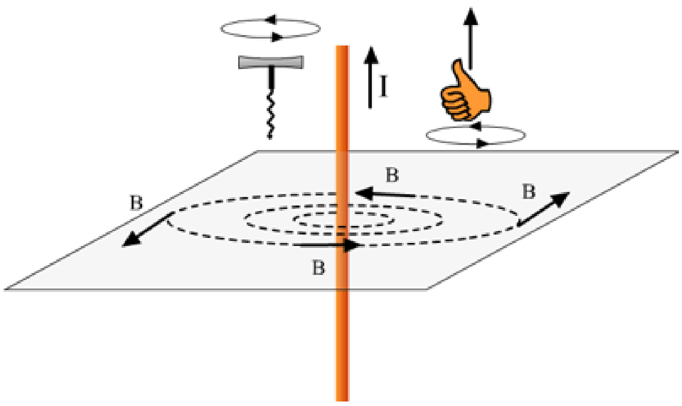
DATO: permeabilidad magnética del vacío: $1,26\ 10^{-6}\ N\ A^{-2}$

Solución:

a) Un hilo crea un campo magnético cuyas líneas de fuerza son circunferencias concéntricas al hilo y situadas en un plano perpendicular al conductor El campo magnético es tangente a estas circunferencias. Su sentido es el de un sacacorchos que avanza en el sentido de la corriente (ver figura)

El campo magnético de un hilo se calcula a partir de la ecuación:

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



Para este caso valdrá:

$$B = \frac{\mu}{2\,\pi}\,\frac{I}{r} = \frac{1,26\ 10^{-6}\ \frac{N}{\cancel{A^2}}\ 0,50\ \cancel{A}}{2\,\pi\ 2,0\ m} = 5,0\ 10^{-8}\ T$$

b) Si llamamos B_1 al valor del campo para r = 2,0 m y duplicamos la intensidad y reducimos la distancia a la mitad, obtendremos que el nuevo valor del campo, B_2, valdrá:

$$B_1 = \frac{\mu}{2\,\pi}\,\frac{I}{r} \qquad B_2 = \frac{\mu}{2\,\pi}\,\frac{2I}{\frac{r}{2}} = 4\,\frac{\mu}{2\,\pi}\,\frac{I}{r} = 4\,B_1$$

Ejemplo 2

Por un hilo rectilíneo muy largo circula una corriente de 12 A. El hilo define el eje Z de coordenadas y la corriente fluye en el sentido positivo. Un electrón se encuentra situado en el eje Y a una distancia de 3,0 cm. Calcular el vector aceleración instantánea que experimenta dicho electrón sí

a) Se encuentra en reposo.

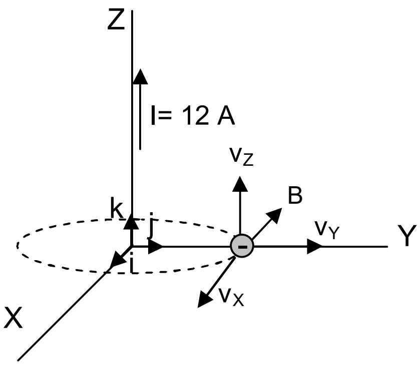
b) Su velocidad es de 1 m/s según la dirección positiva del eje Y.

c) Su velocidad es de 1 m/s según la dirección positiva del eje Z.

d) Su velocidad es de 1 m/s según la dirección positiva del eje X.

DATOS: $\mu_0 = 4\pi\ 10^{-7}\ \frac{N}{A^2}$; $Q_e = 1{,}6\ 10^{-19}$ C; $m_e = 9{,}1\ 10^{-31}$ kg;

Solución:



a) Si el electrón se encuentra en reposo no interacciona con el campo magnético. Por tanto: F_B =0 y permanecerá en reposo.

El módulo de campo a una distancia de 3,0 cm, será:

$$B = \frac{\mu}{2\ \pi}\frac{I}{r} = \frac{4\ \pi\ 10^{-7}\ \frac{N}{A^{\cancel{2}}}\ 12\ \cancel{A}}{2\ \pi\ 0{,}03\ m} = 8{,}0\ 10^{-5}\ T$$

b) Si se mueve a lo largo del eje Y (ver figura), aplicando la fórmula de Lorentz, la fuerza ejercida apunta en la dirección negativa del eje Z (el electrón tiene carga negativa) y tiene de módulo:

$$\vec{F}_B = q\ \ \vec{v} \wedge \vec{B}$$
$$F_B = q\ v\ B\ \text{sen}\alpha\ ;\ \ (\text{sen}\ 90^0 = 1)$$
$$F_B = q\ v\ B = 1{,}6\ 10^{-19} C\ 1\frac{m}{s}\ 8{,}0\ 10^{-5} T = 1{,}28\ 10^{-23} N$$
$$\text{Luego :}$$
$$\vec{F}_B = -\left(1{,}28\ 10^{-23}\right)\vec{k}$$
$$\text{Por tanto la aceleración valdrá :}$$
$$F = m\ a\ ;\ a = \frac{F}{m} = \frac{1{,}28\ 10^{-23} N}{9{,}1\ 10^{-31} kg} = 1.41\ 10^{7}\ \frac{m}{s^2}$$
$$\vec{a} = -\left(1.41\ 10^{7}\right)\vec{k}$$

c) Si se mueve según la dirección positiva del eje Z, la fuerza tendrá idéntico módulo pero ahora apunta en la dirección positiva del eje Y:

$$\vec{F}_B = \left(1{,}28\ 10^{-23}\right)\ \vec{j}$$
$$\vec{a} = \left(1{,}41\ 10^{7}\right)\ \vec{j}$$

d) Si el electrón se mueve según la dirección positiva del eje X la fuerza actuante es nula ya que la velocidad y el campo forman un ángulo de 180 ^{0} (sen (180^0) = 0), luego continuará moviéndose con movimiento rectilíneo y uniforme.

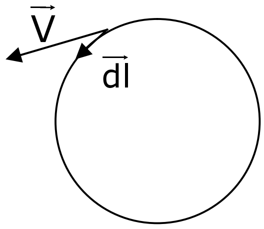
Ley de Ampere

Conceptos previos:

- Se denomina ***integral de línea entre dos puntos de un vector*** $\vec{V}$ a la integral, entre ambos puntos, del producto escalar del vector por un vector diferencial situado sobre la línea considerada:

$$\int_1^2 \vec{V} \cdot \vec{dl}$$

- Si la línea es cerrada, la integral de línea se denomina ***circulación***. El vector diferencial, en el caso de un trayectoria curva, apunta en la dirección de la tangente a la curva en cada punto.



$$\oint \vec{V} \cdot \vec{dl}$$

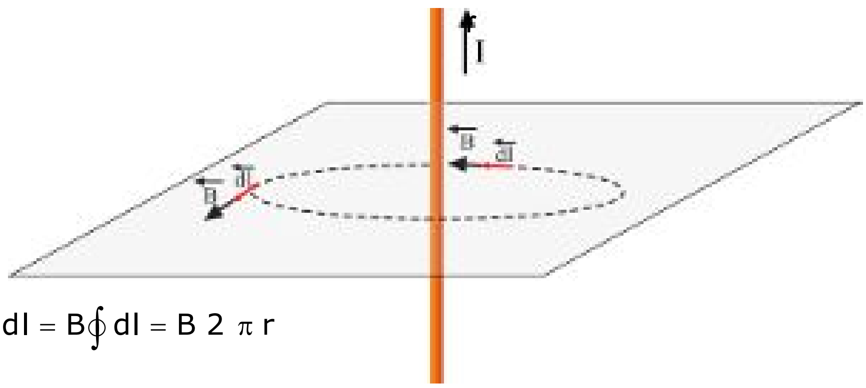
La ***ley de Ampere*** permite el cálculo del campo magnético creado por corrientes ***constantes*** en distribuciones de corriente en las que la simetría sea considerable:

> ***La integral de línea del campo magnético a lo largo de cualquier trayectoria cerrada (circulación) es igual al producto de la permeabilidad magnética del medio por la intensidad de corriente que atraviesa el plano definido por la trayectoria considerada.***
>
> *Para el vacío o el aire:* $\oint \vec{B} \cdot \vec{dl} = \mu_0 I$

La ley de Ampere relaciona el campo magnético con la corriente eléctrica. Podemos afirmar que las fuentes del campo magnético son las corrientes eléctricas.

Aplicando la ley de Ampere es muy sencillo calcular el campo magnético creado por un hilo.

Tomemos como línea cerrada una circunferencia situada a una distancia r del conductor (ver figura) y apliquemos el teorema de Ampere:

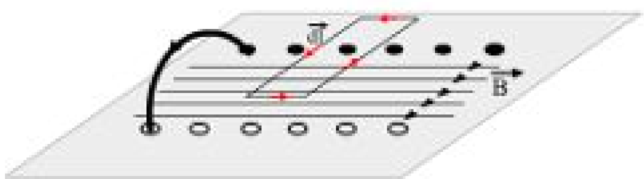


$$\oint \vec{B} \cdot \vec{dl} = \mu_0 I$$

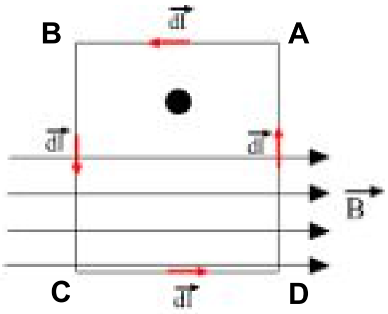
$$\oint \vec{B} \cdot \vec{dl} = \oint B\, dl \cos\alpha = \oint B\, dl = B \oint dl = B\, 2\, \pi\, r$$

$$B\, 2\, \pi\, r = \mu_0 I\ ; \quad \boxed{B = \frac{\mu_0 I}{2\, \pi\, r}}$$

Si queremos calcular el campo magnético en el interior de un solenoide largo (campo en el interior uniforme y nulo en el exterior) seleccionaremos una de las espiras y trazaremos un rectángulo con el conductor situado en su interior (ver figura).



Aplicamos ahora a la trayectoria cerrada considerada el teorema de Ampere y lo hacemos sumando el valor de las integrales de línea para los tramos A-B, B-C, C-D y D- A:



- $\int_A^B \vec{B}\,.\,\vec{dl} = 0$, ya que el campo magnético es nulo en el exterior.
- $\int_B^C \vec{B}\,.\,\vec{dl} = 0$, ya que $\vec{B}$ y $\vec{dl}$ son perpendiculares.
- $\int_D^A \vec{B}\,.\,\vec{dl} = 0$, ya que $\vec{B}$ y $\vec{dl}$ son perpendiculares.

Por tanto:

$$\oint \vec{B}\,.\,\vec{dl} = \mu_0 I$$

$$\oint \vec{B}\,.\,\vec{dl} = \int_A^B \vec{B}.\,\vec{dl} + \int_B^C \vec{B}.\,\vec{dl} + \int_C^D \vec{B}.\,\vec{dl} + \int_D^A \vec{B}.\,\vec{dl} = 0 + 0 + \int_C^D \vec{B}.\,\vec{dl} + 0$$

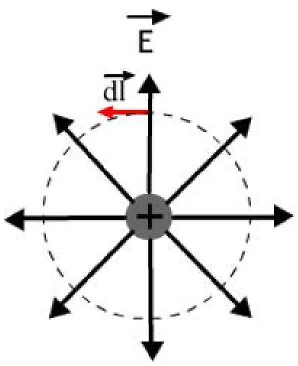
$$\oint \vec{B}\,.\,\vec{dl} = \int_C^D \vec{B}.\,\vec{dl} = \int_C^D B \;\; dl \cos\alpha = B \int_C^D dl = B\,L$$

$$B\,L = \mu_0 I\;;\;\; B = \frac{\mu_0 I}{L} \;\;\text{Para N espiras :}\; \boxed{B = N\frac{\mu_0 I}{L}}$$

La diferente naturaleza del campo eléctrico (conservativo) y el campo magnético (no conservativo) se puede apreciar también si recurrimos a la descripción matemática de ambos.

Consideremos primero las fuentes del campo eléctrico (cargas) y las del campo magnético (corrientes), tracemos una línea cerrada alrededor de ambas (por ejemplo una circunferencia) y calculemos la circulación de ambos campos a lo largo de esa línea.

En el caso del campo magnético (ley de Ampere) la circulación no es nula y vale: $\oint \vec{B}\,.\,\vec{dl} = \mu_0 I$

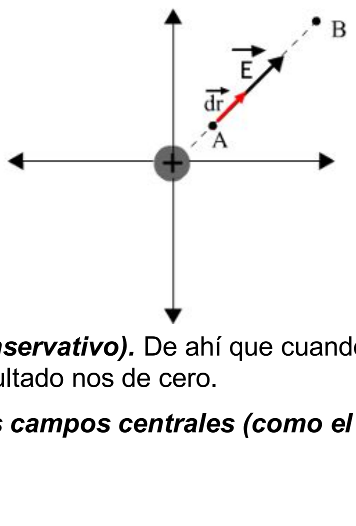


Sin embargo, haciendo el cálculo para el campo eléctrico: $\oint \vec{E}\,.\,\vec{dl} = 0$, ya que el vector campo y el vector desplazamiento son perpendiculares para toda la trayectoria.

El cálculo de la circulación de un vector a lo largo de una línea (cerrada) , nos indica si el vector considerado tiene tendencia a señalar en un sentido de giro determinado alrededor de dicha línea, con preferencia al opuesto. Esto es lo que sucede con el campo magnético, en el que las líneas de campo son cerradas y el vector campo es tangente a dichas líneas. En el campo eléctrico, sin embargo, esto no sucede.

El hecho de que la circulación del campo eléctrico sea nula a lo largo de una trayectoria cerrada tiene que ver con su carácter de campo conservativo.

Consideremos dos puntos A y B situados sobre una línea de campo:



$$\int_A^B \vec{E}\,.\,\vec{dl} = \int_A^B E\,dr\cos\alpha = \int_A^B E\,dr = \int_A^B k\frac{Q}{r^2}dr =$$

$$= k\,Q\left(-\frac{1}{r}\right)_A^B = k\,Q\left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B}\right) = \left(\frac{kQ}{r_A} - \frac{kQ}{r_B}\right) = V_A - V_B$$

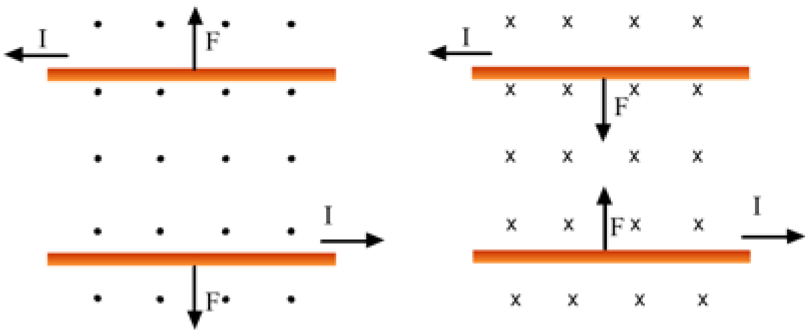
$$\boxed{\int_A^B \vec{E}\,.\,\vec{dl} = V_A - V_B}$$

El resultado de la integral es igual a la diferencia de potencia entre ambos puntos y, por tanto, será independiente del camino (campo conservativo). De ahí que cuando hacemos el cálculo a lo largo de una trayectoria cerrada VA = VB, el resultado nos de cero.

Los campos centrales (como el campo eléctrico o el gravitatorio) son conservativos.

Fuerzas sobre conductores rectilíneos

Tal y como se ha estudiado, el campo magnético interacciona con cargas eléctricas que se muevan en su seno. Como la corriente eléctrica es debida al movimiento de cargas en los conductores, es razonable suponer que si se sitúa un conductor eléctrico en el seno de un campo magnético, y hacemos que circule por él una corriente eléctrica, se producirá una interacción con el campo y aparecerá una fuerza sobre el conductor:



La fuerza magnética que actúa sobre el conductor se puede obtener a partir de la siguiente expresión:

$$\boxed{\vec{F} = L\,(\vec{I} \wedge \vec{B})}$$

Longitud del conductor

Vector de modulo igual a la intensidad y que tiene la dirección y sentido de ésta

- La fuerza es siempre perpendicular al plano determinado por el conductor y el campo magnético.
- El sentido se puede determinar aplicando la regla del sacacorchos.
- Su módulo depende del ángulo que formen el conductor y el campo. Adquiere el valor máximo cuando el conductor forme un ángulo de 90^0 con el vector campo

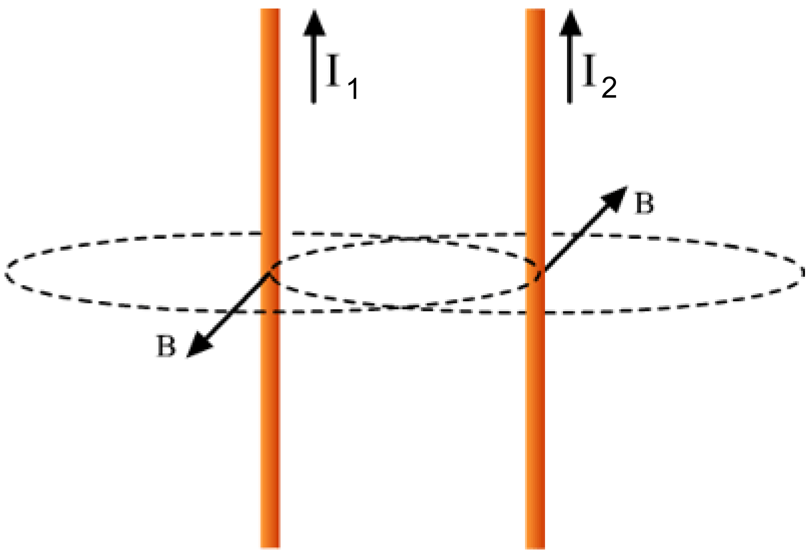
$$F = L\,I\,B \text{ sen } \alpha$$

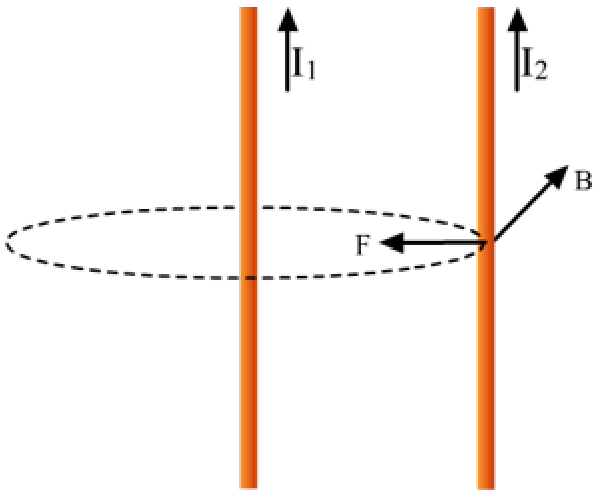
$$F_{MAX} = L\,I\,B \qquad (\text{sen } 90^0 = 1)$$

Un efecto importante se produce cuando se tienen ***dos conductores por los que circula corriente***, ya que entonces se crearan campos magnéticos alrededor de ambos conductores que interaccionarán con las cargas del otro (ver figura) .

Para el caso de dos conductores de la misma longitud, paralelos y separados por una distancia d, el campo magnético creado por uno de ellos (por ejemplo el situado a la izquierda en la figura) a la distancia que se encuentra el otro valdrá:

$$B = \frac{\mu}{2\,\pi}\,\frac{I_1}{d}$$





Este campo interaccionará con las cargas en movimiento del otro conductor produciendo una fuerza sobre él de valor:

$$F = L\, I_2\, B$$

Si sustituimos el valor obtenido para el campo magnético, tenemos:

$$\boxed{F = L\, I_2 \left(\frac{\mu}{2\,\pi}\,\frac{I_1}{d}\right) = \left(\frac{\mu\, L}{2\,\pi}\right)\frac{I_2\, I_1}{d}}$$

El resultado es una fuerza de atracción sobre el otro conductor.

Si repetimos el proceso intercambiando los conductores llegaríamos a un resultado análogo, luego:

Dos corrientes paralelas del mismo sentido se atraen con una fuerza directamente proporcional a las intensidades que circulan por los conductores e inversamente proporcional a la distancia que los separa. ***Si las intensidades tienen sentido contrario la fuerza entre los conductores es repulsiva.***

La fuerza ejercida entre dos conductores paralelos por los que circula idéntica intensidad sirvió para establecer la definición del amperio:

Dos conductores iguales por los que circulan corrientes del mismo sentido y con idéntica intensidad se atraerán con una fuerza:

$$F = \left(\frac{\mu\, L}{2\,\pi}\right)\frac{I^2}{d}$$

La fuerza por unidad de longitud vendrá dada por:

$$\frac{F}{L} = \left(\frac{\mu}{2\,\pi}\right)\frac{I^2}{d}$$

Si suponemos que por ambos circula una intensidad de 1 A y que la distancia entre los conductores es 1 m, la fuerza de atracción por unidad de longitud entre ambos valdrá:

$$\frac{F}{L} = \left(\frac{\mu}{2\,\pi}\right)\frac{I^2}{d} = \frac{4\,\pi\,10^{-7}\,\frac{N}{\cancel{A^2}}}{2\,\pi}\,\frac{1\,\cancel{A^2}}{1{,}0\ m} = 2\ 10^{-7}\,\frac{N}{m}$$

Se define el amperio internacional (A) como la intensidad de corriente que debe circular por dos conductores rectilíneos, paralelos e indefinidos, para que separados por una distancia de 1 m ejerzan entre ellos una fuerza de 2 10^{-7} N/m

Ejemplo 3 (Oviedo 2010-2011)

Dos corrientes eléctricas paralelas separadas 1,0 cm se ejercen una fuerza magnética de 0,20 N. Si se separan hasta 2,0 cm y aumentamos la intensidad de la segunda corriente al doble de su valor inicial (manteniendo constante la primera), razonando la respuesta, ¿cuál es la fuerza que se ejercen?

Solución:

La fuerza ejercida por uno de los conductores sobre el otro vale:

$$F_1 = \left(\frac{\mu\, L}{2\, \pi}\right)\frac{I_2\, I_1}{d} = 0,20\ N$$

Si ahora aumentamos la distancia de separación al doble y, al mismo tiempo, doblamos una de las intensidades, la fuerza ejercida pasará a valer:

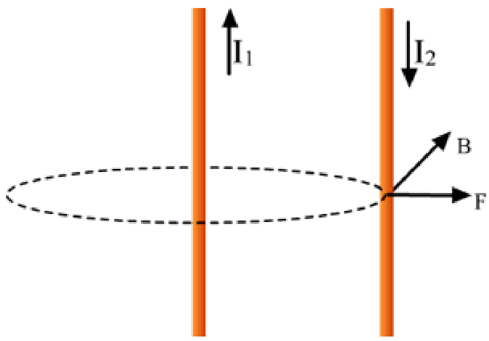
$$F_2 = \left(\frac{\mu\, L}{2\, \pi}\right)\frac{2I_2\, I_1}{2d} = F_1 = 0,20\ N$$

Ejemplo 4 (Oviedo 2008-2009)

Dos hilos rectilíneos de 30 cm de longitud, colocados paralelos entre sí, transportan sendas corrientes de 2,1 A y 3,4 A en sentido contrario. Los hilos están separados 14,0 cm. Determinar la fuerza magnética existente entre ambos conductores, explicando si es atractiva o repulsiva.

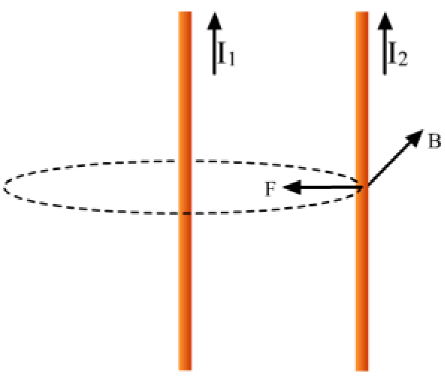
DATO: permeabilidad magnética del aire: $1,26\ 10^{-6}\ N\ A^{-2}$

Solución:



Aplicando la regla de la mano derecha (o del sacacorchos) se deduce que en este caso la fuerza ha de ser ***repulsiva*** y de módulo:

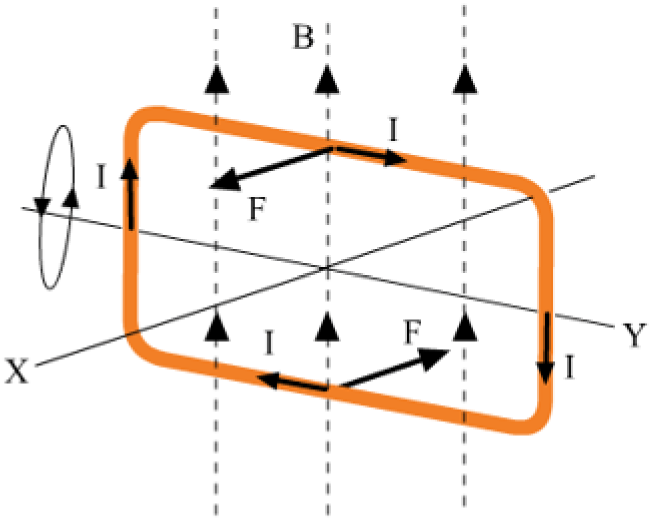
$$F = \left(\frac{\mu\, L}{2\, \pi}\right)\frac{I_2\, I_1}{d} = \left(\frac{1,26\ 10^{-5}\ \frac{N}{A^{\cancel{2}}}\ 0,30\ \cancel{m}}{2\ \pi}\right)\frac{2,1\ A\ .\ 3,4\ \cancel{A}}{0,14\ \cancel{m}} = 3,07\ 10^{-5}\ N$$

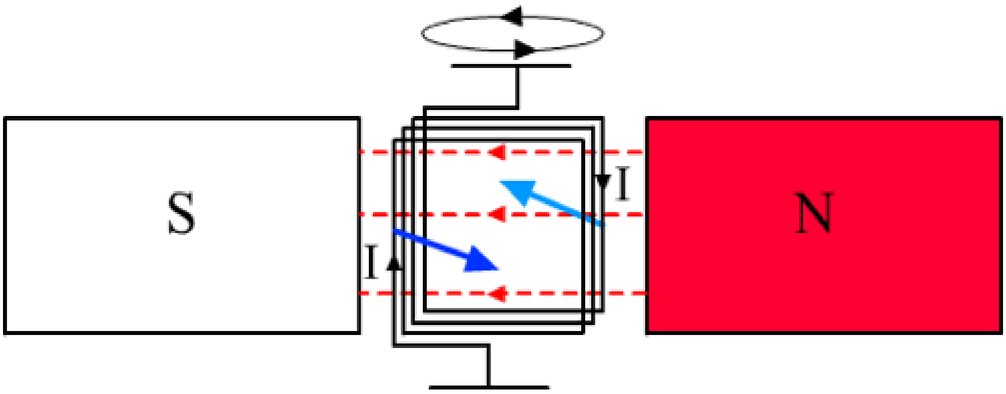


En el caso de que las corrientes tengan el mismo sentido, la fuerza entre ambos conductores sería de atracción. El sentido de la fuerza se aplica aplicando la "regla del sacacorchos".

Fuerzas sobre una espira cuadrada

Si situamos una espira rectangular en un campo magnético (ver figura) aparecerán sendas fuerzas sobre los lados opuestos que tienden a hacerla girar. Este es un fenómeno de singular importancia, ya que en él se apoya la construcción de motores eléctricos o de galvanómetros (aparatos destinados a medir el paso de la corriente eléctrica: amperímetros y voltímetros).





Esquema de un galvanómetro.

Si circula corriente por la espira, ésta gira un cierto ángulo. Como el ángulo girado es proporcional a la intensidad de corriente puede servir para su medida.

Dpto. Física y Química	**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.

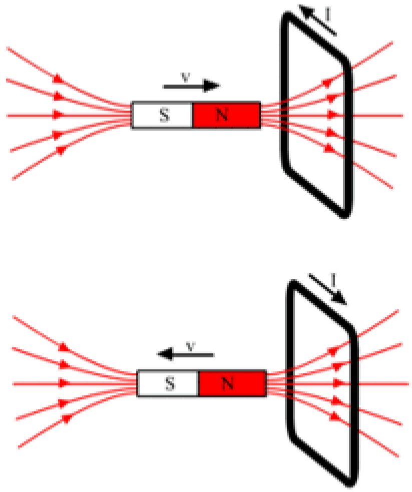
Experiencia de Faraday

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

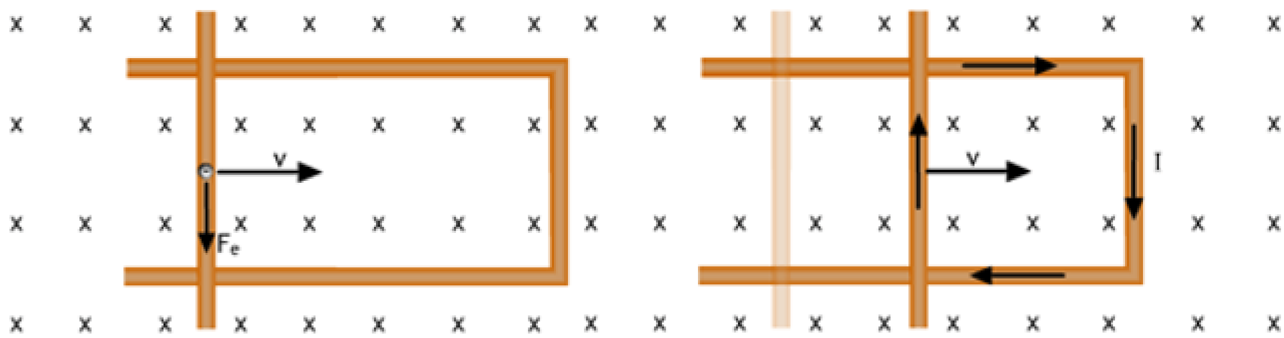
Al acercar o alejar un imán a una espira se induce en ésta una corriente eléctrica

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.



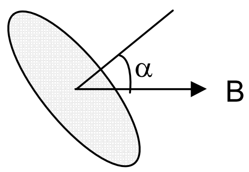
Comparando ambas experiencias podemos llegar a la conclusión de que ***lo que varía en ambas es la cantidad de líneas de campo que atraviesan el circuito en el que se induce la corriente.***

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: $\dfrac{\Delta\phi}{\Delta t}$ En forma diferencial (variación infinitesimal del tiempo): $\dfrac{d\phi}{dt}$

Utilizando el concepto de flujo, podremos decir:

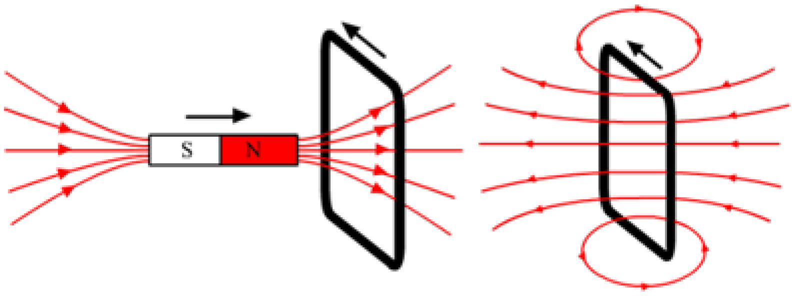
Se induce una corriente eléctrica en un circuito si este es atravesado por un flujo magnético variable.

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.

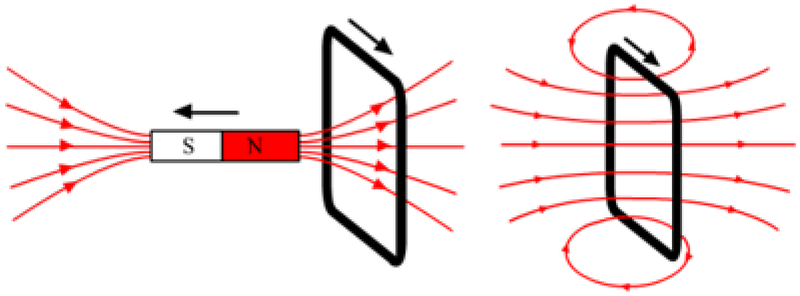
Ley de Lenz

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

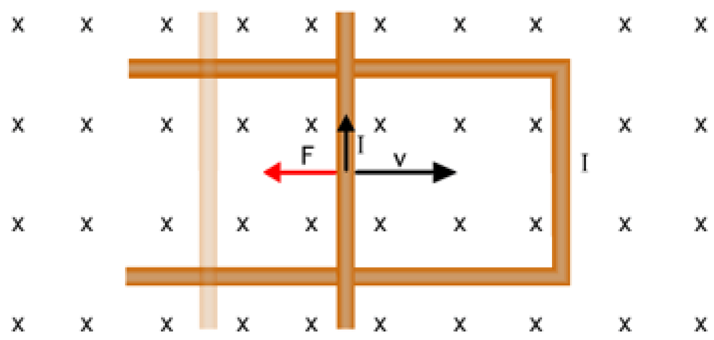
En la experiencia de Faraday la causa que produce la corriente inducida cuando se acerca el imán es el ***aumento de la intensidad del campo magnético***. En este caso la corriente inducida es tal que tiende a crear ***un campo magnético contrario***, que hace que disminuya el campo inductor.



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)



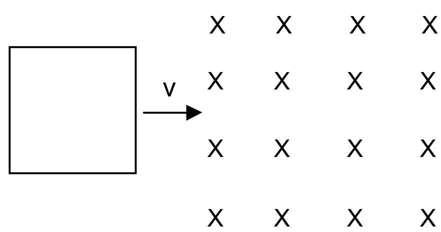
La Ley de Lenz puede reformularse, teniendo en cuenta el concepto de flujo, en la forma siguiente:

> 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

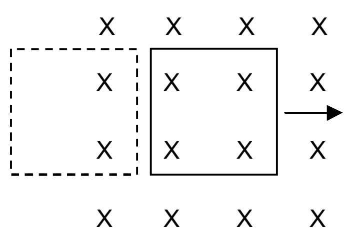
Una espira cuadrada se desplaza hacia una zona donde hay un campo magnético uniforme perpendicular al plano de la espira (ver figura). ¿Cuál será el sentido de la corriente inducida en la espira:

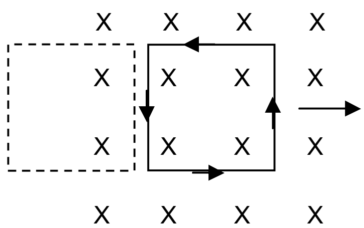
a) Si entra en la zona donde está el campo magnético.
b) Si sale de la zona donde está el campo magnético



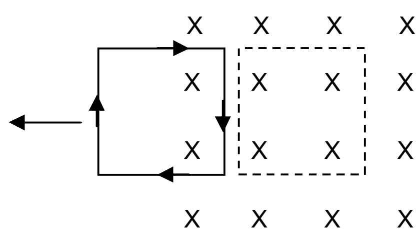
Solución:

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)

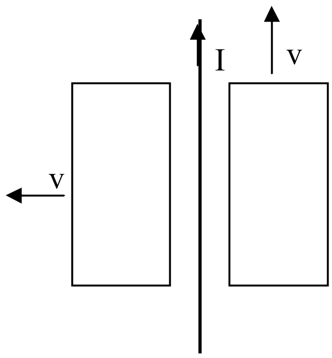




b) Si la espira sale del campo magnético se produce una ***disminución del flujo.*** Ahora se inducirá una corriente que refuerce el campo inductor. La corriente recorrerá la espira en ***el sentido de las agujas del reloj*** (creando un campo magnético que entra en el plano del papel).



Ejemplo 2



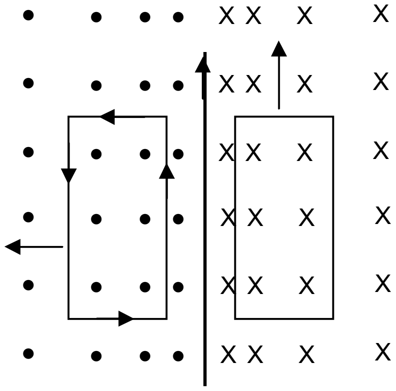
Por un hilo vertical indefinido circula una corriente eléctrica de intensidad I. Si dos espiras se mueven una con velocidad paralela al hilo y otra con velocidad perpendicular, ¿se inducirá corriente en alguna de ellas? Razona la respuesta.

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.

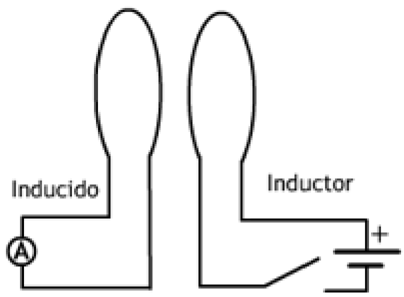
La espira que se mueve de abajo arriba (y considerando que la longitud del hilo es indefinida) se mueve en el seno de un campo magnético, pero el flujo que atraviesa el circuito permanece constante, luego no se inducirá corriente alguna.

Ejemplo 3

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

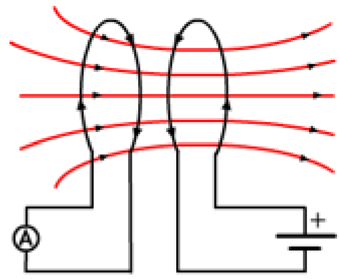
a) Con ambas espiras muy juntas se cierra el interruptor en el inductor

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

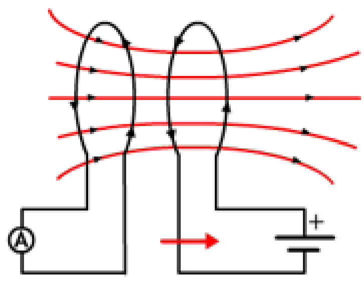


Solución:

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.

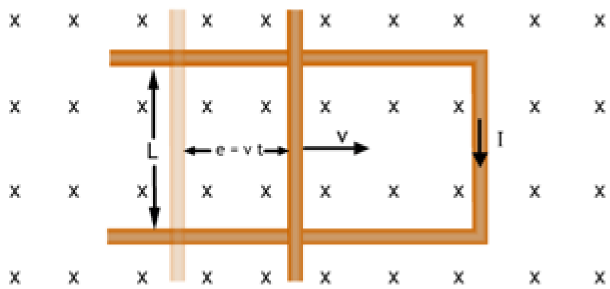
$$\varepsilon = -\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

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

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

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:

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

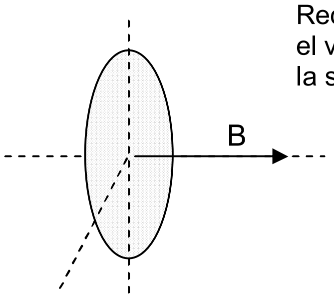
Ejemplo 3 (Oviedo 2006)

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:

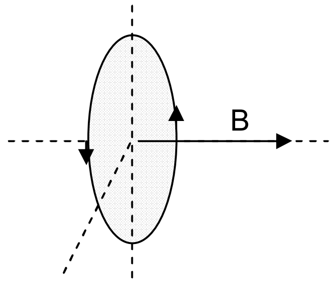
$$\phi = B\,.\,S$$
$$\Delta\phi_A = \phi_2 - \phi_1 = (B_2 - B_1)S = \Delta B\,.\,S$$
$$\varepsilon_A = -\frac{\Delta\phi_A}{\Delta t} = -\frac{\Delta B\,.\,S}{t} = -\frac{(0 - 0,5)\ T\ S\ (m^2)}{10^{-3}\,s} = 500\ (S)\ V$$

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:

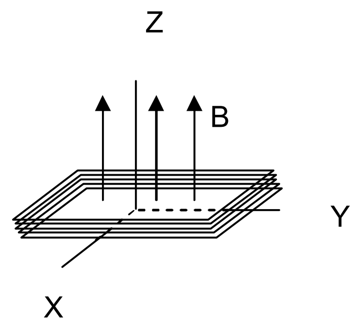
$$\frac{\varepsilon_A}{\varepsilon_B} = \frac{500\ \cancel{S}}{200\ \cancel{S}} = 2,5\ ;\quad \varepsilon_A = 2,5\ \varepsilon_B$$

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:

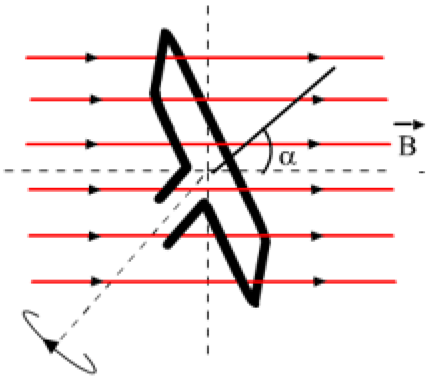
$$\phi = B \,.\, S.\cos\alpha = B.\, S$$
$$\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1 = (B_2 - B_1) S = \Delta B \,.\, S$$
$$\varepsilon = -N\frac{\Delta\phi}{\Delta t} = -N\frac{\Delta B \,.\, S}{t} = -5\ \frac{(0,2-0,5)\ T\ 2,5\ 10^{-3}\ (m^2)}{0,1\ s} = 3,75\ 10^{-2}\ V$$

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 ($\alpha = 0$) :

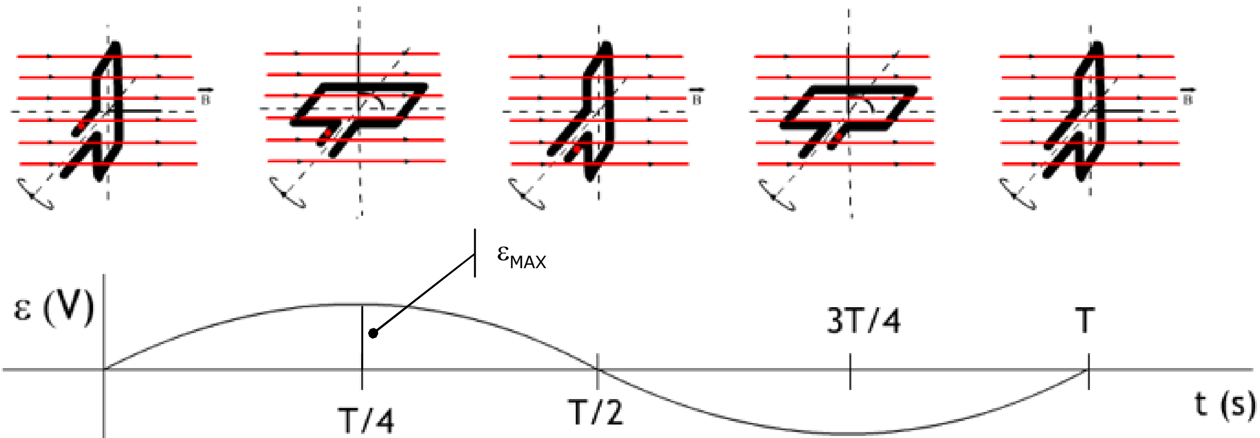
$$\left.\begin{array}{l}\phi = B\,S\cos\alpha \\ \alpha = \omega\, t\end{array}\right\}\phi = B\,S\cos(\omega\, t) = \phi_{MAX}\cos(\omega\, t)$$

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):

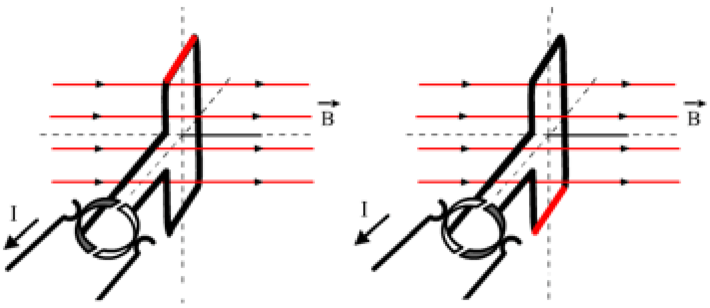
$$\omega = 2\,\pi\, f\ ;\ \ f = \frac{\omega}{2\,\pi}$$



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

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)
$$\left.\begin{matrix}\phi = B\ S\cos\alpha \\ \alpha = \omega\ t\end{matrix}\right\}\phi = B\ S\cos(\omega\ t) = \phi_{MAX}\cos(\omega\ t)$$
$$\phi = 0,12\ T\ (\pi\ 0,02^2\ m^2)\cos\left(\frac{2\pi}{0,02}\ t\right) = 1,51\,.10^{-4}\cos(100\pi\ t)$$
$$\phi = 1,51\,.10^{-4}\cos(100\pi\ t)$$

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:

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

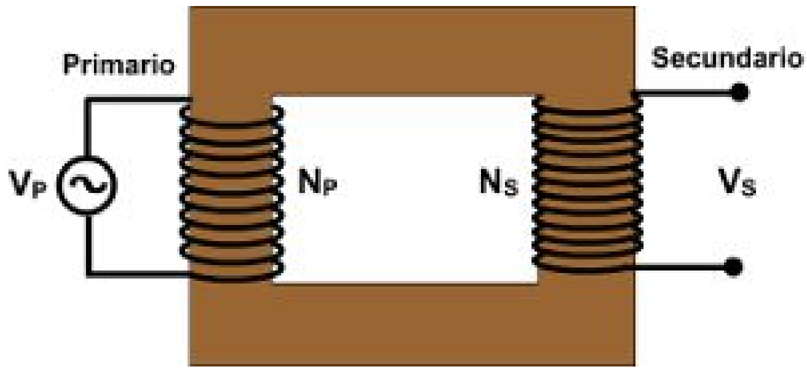
$$(\varepsilon_{MAX})_2 = (\varepsilon_{MAX})_1\frac{B_2\ f_2}{B_1\ f_1} = 0,12\ V\ \frac{\frac{\cancel{B_1}}{2}\ 3\ \cancel{f_1}}{\cancel{B_1}\ \cancel{f_1}} = \frac{3}{2}0,12\ V = 0,18\ V$$

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

	INTERACCIÓN ELECTROMAGNÉTICA **ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS**	**IES La Magdalena. Avilés. Asturias**

Según se ha visto en los temas anteriores las fuentes del campo eléctrico son las cargas eléctricas, mientras que las corrientes eléctricas originan campos magnéticos.

El estudio de los campos eléctricos y magnéticos estacionarios (no variables) puede reducirse a sólo cuatro ecuaciones que permiten el cálculo de los campos correspondientes si se conoce la distribución de cargas o las corrientes eléctricas.

Estas ecuaciones, no obstante, no recogen el hecho de que los campos eléctricos y magnéticos estás relacionados, ya que, como se ha visto, es posible obtener corrientes eléctricas a partir de campos magnéticos.

Ecuaciones para los campo eléctricos y magnéticos estacionarios		
Ley	**Forma integral**	**Significado**
Ley Gauss campo eléctrico	$\oint_S \vec{E}\,.\,d\vec{S} = \frac{q}{\varepsilon_0}$	Las cargas son las fuentes del campo eléctrico. Las cargas interaccionan según la ley de Coulomb.
Ley Gauss campo magnético	$\oint_S \vec{B}\,.\,d\vec{S} = 0$	No existen fuentes del campo magnético. No es posible aislar los polos magnéticos (no existe el denominado "monopolo magnético")
Circulación campo eléctrico	$\oint_L \vec{E}\,.\,d\vec{l} = 0$	Las líneas de fuerza del campo eléctrico no son cerradas. El campo eléctrico es conservativo.
Circulación campo magnético. Ley de Ampere	$\oint_L \vec{B}\,.\,d\vec{l} = \mu_0\, I$	Las líneas de fuerza del campo magnético son cerradas. El campo magnético no es conservativo.

James Clerk Maxwell (1831-1879)

De lo estudiado podríamos concluir que las cargas eléctricas son sensibles tanto a la interacción eléctrica como a la magnética. Además, las corrientes eléctricas generan campos magnéticos y los campos magnéticos variables pueden generar corrientes eléctricas (campos eléctricos), lo que demuestra que ambas interacciones están relacionadas. Podemos hablar de la ***interacción electromagnética*** o ***campo electromagnético.*** La electricidad y el magnetismo, por tanto, no son más que manifestaciones del campo electromagnético

Fue ***James Clerk Maxwell*** quien unificó en una teoría consistente (síntesis que muchas veces se compara con la realizada en la Mecánica por Newton doscientos años antes) los conocimientos existentes hasta la fecha sobre electricidad y magnetismo.

Maxwell publicó sus ya famosas ecuaciones en 1865 en un trabajo titulado ***A Dynamical Theory the Electromagnetic Field***.

Las ecuaciones, en la publicación original, no estaban escritas en la forma actual y constituían un conjunto de veinte ecuaciones que fueron posteriormente reducidas a trece por el propio Maxwell. La formulación actual se debe a Heaviside y Gibbs y data de 1885.

Las ecuaciones de Maxwell son compatibles con la Teoría de la Relatividad de Einstein, sin embargo dejan de tener validez en el dominio atómico, donde la electrodinámica clásica ha de ser reemplazada por la electrodinámica cuántica.

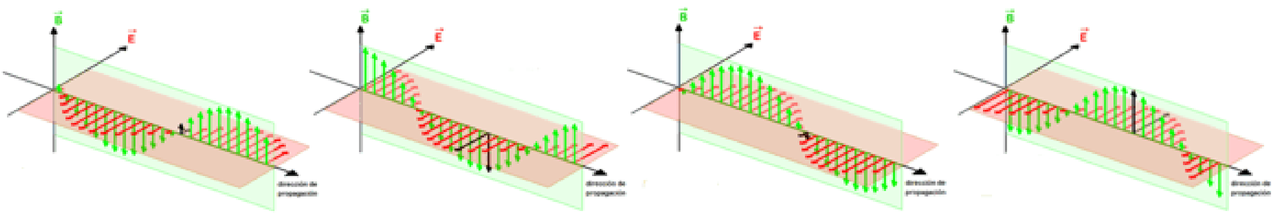
Ecuaciones de Maxwell para el campo electromagnético		
Ley	**Forma integral**	**Significado**
I Ley de Maxwell. Ley Gauss para el campo eléctrico	$\oint_S \vec{E}\cdot d\vec{S} = \frac{q}{\varepsilon_0}$	Las cargas son las fuentes del campo eléctrico. Las cargas interaccionan según la ley de Coulomb.
II Ley de Maxwell. Ley Gauss para el campo magnético	$\oint_S \vec{B}\cdot d\vec{S} = 0$	No existen fuentes del campo magnético. No es posible aislar los polos magnéticos (no existe el denominado "monopolo magnético")
III Ley de Maxwell Ley de Faraday-Henry	$\oint_L \vec{E}\cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -\frac{d}{dt}\oint_S \vec{B}\cdot d\vec{S}$	Un campo magnético variable con el tiempo implica la existencia de un campo eléctrico también variable.
IV Ley de Maxwell Ley de Ampere-Maxwell	$\oint_L \vec{B}\cdot d\vec{l} = \mu_0\, I + \varepsilon_0\, \mu_0 \frac{d}{dt}\oint \vec{E}\cdot d\vec{S}$	Si suprimimos el segundo sumando del segundo miembro obtenemos la ley de Ampere (una corriente eléctrica genera un campo magnético). El segundo sumando (introducido por Maxwell) establece que un campo eléctrico variable genera un campo magnético también variable.

Del estudio de las ecuaciones de Maxwell pueden extraerse las siguientes conclusiones:

- Un campo eléctrico oscilante: $E = E_0 \text{ sen }(kx - \omega t)$, induciría en un punto del espacio otro campo magnético, también oscilante, perpendicular y en fase con él : $B = B_0 \text{ sen }(kx - \omega t)$.
- Del estudio de las ecuaciones se deduce que ***ambos campos se propagan de forma análoga a como lo hacen las ondas,*** con una velocidad que para el vacío o el aire vale:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{4\pi\, 9.10^9} \frac{\cancel{C^2}}{\cancel{N}\, m^2} 4\pi.10^{-7} \frac{\cancel{N}\, s^2}{\cancel{C^2}}}} = 3.10^8 \frac{m}{s}$$

- Las ondas predichas consisten en campos eléctricos y magnéticos oscilantes y mutuamente perpendiculares que se propagan, incluso en el vacío, a una velocidad igual a la de la luz y fueron bautizadas con el nombre de ***ondas electromagnéticas.***
- El hecho de que las ondas electromagnéticas se propagaran con idéntica velocidad que la luz llevó a la consideración de que ***la luz misma no es más que una onda electromagnética***. La teoría de Maxwell unificaba así óptica y electromagnetismo.

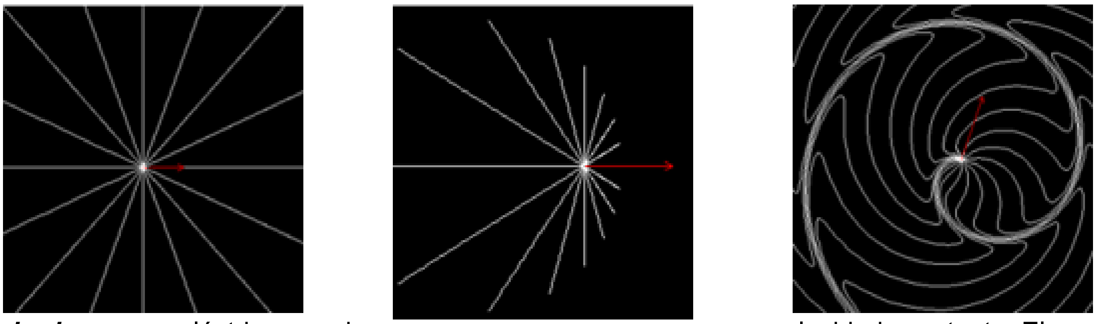


Secuencia de una onda electromagnética propagándose hacia la derecha. Consta de campos eléctricos y magnéticos oscilantes, en fase, y mutuamente perpendiculares.

Captura de pantalla de Educaplus Autor: Jesús Peña Cano
http://www.educaplus.org/play-321-Onda-electromagn%C3%A9tica.html

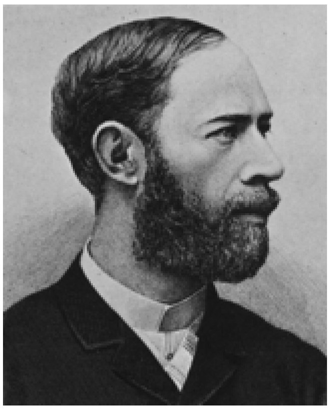
- ***Una carga acelerada irradia energía en forma de ondas electromagnéticas.***

  Si la carga no se mueve con velocidad constante, sino que acelera, producirá un campo eléctrico variable (ver figura). Como consecuencia, se inducirá un campo magnético también variable en fase con el primero y perpendicular a él. Esto es, una onda electromagnética. Por tanto, una carga acelerada irradia energía en forma de ondas electromagnéticas.



I***zquierda:*** campo eléctrico creado por una carga que se mueve con velocidad constante. El campo eléctrico es uniforme.
Centro: campo eléctrico creado por una carga que se mueve hacia la derecha con aceleración. El campo eléctrico no es uniforme. Muestra una mayor intensidad (líneas más juntas) en la zona anterior que en la posterior.
Derecha: campo creado por una carga que se mueve con movimiento circular uniforme. El campo eléctrico es más complejo y también variable.

Captura de pantalla de:
http://www.cco.caltech.edu/~phys1/java/phys1/MovingCharge/MovingCharge.html



Heinrich Hertz
(1857-1894)

Hertz confirmó las predicciones teóricas realizadas por Maxwell sobre las ondas electromagnéticas al lograr producir y detectar este tipo de ondas en 1888.

Hertz obtuvo como valor para la velocidad de propagación para las ondas electromagnéticas (desde entonces también llamadas hertzianas) el valor *predicho por Maxwell: 3.10^8 m/s.*

"He repetido los experimentos con el mayor cuidado.

Me ha parecido detectar ondas electromagnéticas continuas por reflexión en la sala" (Diario de H. Hertz, marzo de 1888)

Existen una gran variedad de ondas electromagnéticas que van desde los rayos gamma, muy energéticos y fuertemente ionizantes (son capaces de arrancar electrones de los átomos produciendo iones), hasta las ondas de radio en el extremo opuesto del espectro (ver página siguiente).

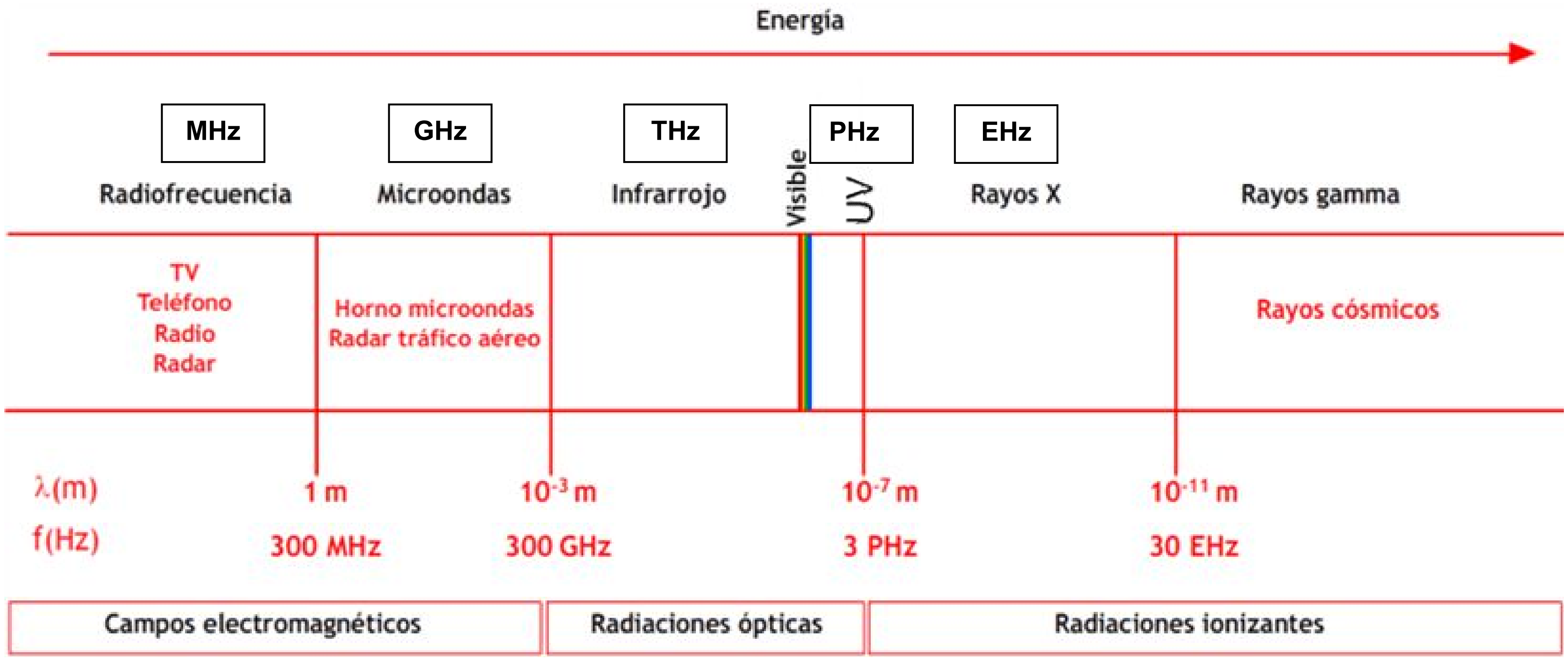
La zona del espectro que el ojo humano es capaz de percibir es una franja muy estrecha (la llamada *zona visible* del espectro) con una longitud de onda comprendida entre los 400 y 700 nm, aproximadamente. Por encima de los 700 nm se sitúa el infrarrojo y por debajo de los 400 nm, comienza el ultravioleta.

La energía de las radiaciones electromagnéticas (y por tanto su peligrosidad para la salud) aumenta con su frecuencia, aunque hay que ser cautos con las exposiciones a ondas electromagnéticas de frecuencia baja durante un periodo de tiempo prolongado.

Ondas electromagnéticas más comunes

Tipo	Frecuencia
Wifi	246 MHz
Microondas	245 MHz
Teléfono móvil	900 - 1800 MHz
Radio (FM)	100 MHz
Lu z visible (amarillo)	500 THz
Rayos UVA	7 500 - 1 000 THz

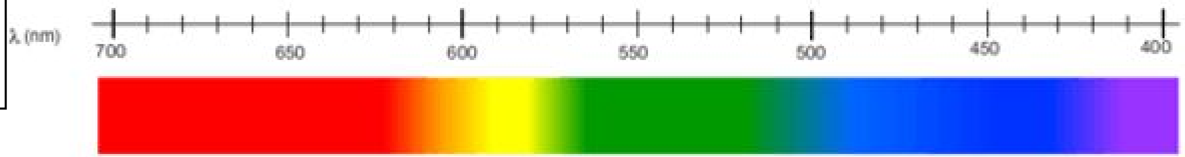
Espectro electromagnético



Prefijos

Mega (M) = 10^6
Giga (G) = 10^9
Tera (T) = 10^{12}
Peta (P) = 10^{15}
Exa (E) = 10^{18}

Espectro visible (700 - 400 nm)



Región de radiofrecuencia (MHz)

El límite superior se sitúa en 1 m de longitud de onda y en los 300 MHz de frecuencia. Es la banda dell espectro utilizada en comunicaciones: radio, TV, radar… etc.

Algunos valores son:

Radio: 10 THz – 10 kHz.

Las radios comerciales que emiten en FM (frecuencia modulada) tienen unas frecuencias entre 87,5 MHz y 108 MHz. Las que emiten en AM (amplitud modulada) emiten en el rango 153 kHz (onda larga) – 30 MHz (onda corta).

La longitud de onda de las ondas de radio comerciales van desde los aproximadamente 3 m de la FM a los casi 2 km de AM (onda larga).

TV: La emisión de TV analógica ocupa de 30 – 300 MHz para el VHF y de 300 – 3000 MHz para el UHF.

Región de radiofrecuencia (GHz)

En esta región opera la telefonía móvil con frecuencias de 800 MHz, 900 MHz, 1800 MHz (1,8 GHz), 2100 MHz (2,1 GHz) y 2600 MHz (2,6 GHz).

Hornos microondas y wifi: 2, 5 GHz.

Región infrarroja (THz)

Radiación térmica, emitida por cualquier cuerpo caliente (por encima de 0 K). se divide en tres regiones:

Infrarrojo próximo (800 nm – 2500 nm). Frecuencia media de 300 THz.

Infrarrojo medio (2,5 μm – 50 μm). Frecuencia media de 10 THz.

Infrarrojo lejano (50 μm – 1000 μm). Frecuencia media de 1 THz.

Región visible (10^2THz)

Luz roja (700 nm) a luz violeta (400 nm). Lo que se corresponde con unas frecuencias de 400 tHz a 700 THz

Ultravioleta (PHz)

Ultravioleta próximo (400 nm – 200 nm). Frecuencia media de 1 PHz.

El ultravioleta próximo se subdivide en otras tres regiones:

UVA: (400 nm – 315 nm). Luz negra, no es absorbida por la atmósfera.

UVB (315 nm – 280 nm). El 90% es absorbida por la atmósfera.

UVC (280 nm – 100 nm). Se absorbe prácticamente toda por la atmósfera.

La frecuencia de los rayos UVA es inferior a 1 PHz (frecuencia que se corresponde con una longitud de onda de 300 nm).

La UVB, y sobre todo las UVC, ya están en el rango de 1 PHz y la energía correspondiente a los fotones de esta frecuencia es del orden de unos pocos eV:

$$E = h\,f = 6{,}6\,10^{-34}\,J\,s\,.\,10^{15}\,s^{-1} = 6{,}6\,10^{-19}\ J$$

$$6{,}6\,10^{-19}\ \cancel{J}\ \frac{1\,eV}{1{,}6\,10^{-19}\ \cancel{J}} = 4{,}1\,eV$$

Las energías de ionización de los elementos están muy próximas a este valor (C: 11,3 eV; H: 13,6 eV; O: 13,6 eV; N: 14,5 eV), por tanto estas radiaciones ***son ya capaces de ionizar los átomos y romper los enlaces*** (un enlace covalente típico tiene una energía de 6 eV), por lo que puede producir daños importantes a nivel molecular.

Ultravioleta lejano (200 nm – 10 nm). Frecuencia media de 3 PHz (energía de los fotones: 12,3 eV)

Rayos X (EHz)

Radiaciones ionizantes. Sus efectos biológicos dependen en gran medida de la dosis. Se recomienda evitar dosis equivalentes superiores a los 5 mSv (0,5 rem)/año.

Rayos gamma

Radiaciones ionizantes. Se utilizan para tratamiento de ciertos tipos de cáncer.

Los rayos gamma también se utilizan en Medicina nuclear para realizar diagnósticos.