INTERACCIÓN ELECTROMAGNÉTICA
CAMPO MAGNÉTICO

Desde muy antiguo es conocida la curiosa propiedad del *imán natural* o ***magnetita*** [1] (mineral de hierro integrado, fundamentalmente, por Fe_3O_4) de atraer pequeños trozos de hierro o acero.

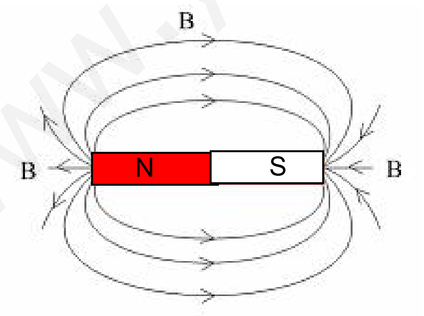
Posteriormente se observó que algunos metales, particularmente el hierro y el acero, podían transformarse en imanes obteniéndose de esta manera los *imanes artificiales.*

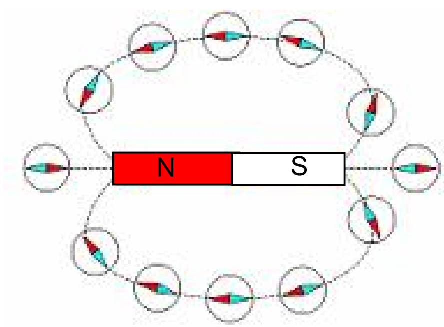
Del estudio de los imanes, y de su efecto asociado, el magnetismo, podemos extraer algunos datos importantes:

- El efecto atractivo es máximo en los extremos de imán, en las zonas denominadas *polos,* y nula en la parte media,o zona denominada como *línea neutra.* Esta afirmación es fácilmente comprobable espolvoreando limaduras de hierro directamente sobre el imán.
- El propio planeta Tierra se comporta como un gigantesco imán, ya que una aguja imantada que pueda girar libremente se orienta en la dirección Norte-Sur (aproximadamente) [2]. Por esta razón el polo del imán que apunta hacia el Norte geográfico se le da el nombre de polo norte (N) y polo sur (S) al contrario.
- Si enfrentamos polos del mismo nombre se repelen y si son de nombre distinto se atraen.
- ***Es imposible obtener polos magnéticos aislados***. No existen partículas fundamentales (tal y como sucede en el caso de la carga eléctrica) a las que puedan asociárseles un tipo de magnetismo N o S. ***Los cuerpos magnetizados siempre presentan ambos polos.***

> Un imán (de forma similar a lo que ocurre con una masa o una carga eléctrica) produce una alteración de las propiedades del medio que lo rodea, de forma tal que si se coloca otro imán en sus proximidades, éste "siente" una acción (fuerza). Podemos entonces decir que origina un ***campo magnético (B).***

- El campo magnético se puede visualizar espolvoreando limaduras de hierro sobre un papel situado sobre un imán u observando la orientación adquirida por una aguja imantada situada en sus proximidades. De estas experiencias concluiremos que:
  - ✓ Las líneas de campo son cerradas.
  - ✓ Salen del polo N y entran por el S.





La orientación de una aguja imantada en las proximidades de un imán nos suministra información acerca de la forma de las líneas del campo magnético.

---

(1) El nombre proviene de ***Magnesia*** (actual Turquía asiática) donde el mineral era muy abundante.

(2) La aguja imantada no apunta exactamente al Norte geográfico, ya que existe una desviación entre este punto y el denominado norte magnético que se conoce como ***declinación magnética***. La declinación varía, entre otras cosas, con la latitud. Para Avilés (Asturias) la declinación magnética vale 2^0 28 ' W, lo que significa que una brújula apunta 2^0 28 ' a la izquierda del Norte (geográfico).

Campo magnético y cargas

Si introducimos una carga eléctrica en el seno de un campo magnético no se detecta acción alguna del campo sobre la carga, pero ***si ésta se mueve en una dirección que no coincida con la del campo magnético,*** su trayectoria se curva evidenciando la acción de una fuerza perpendicular a la dirección de la velocidad.

La fuerza ejercida sobre una carga en movimiento en el seno de un campo magnético es proporcional a la carga, a su velocidad y a la intensidad del campo magnético (a veces llamado *inducción magnética*), B. El vector fuerza viene dado por la expresión:

Velocidad con que se desplaza la carga

Valor del campo magnético

Fuerza ejercida sobre la carga por el campo magnético (fuerza de Lorentz)

$$\vec{F} = q\left(\vec{v} \wedge \vec{B}\right)$$

Valor de la carga

Producto vectorial

El producto vectorial de dos vectores ***es un vector*** definido de la forma siguiente:

Módulo: producto del módulo de ambos vectores por el seno del ángulo que forman.

Dirección: perpendicular al plano definido por ambos vectores.

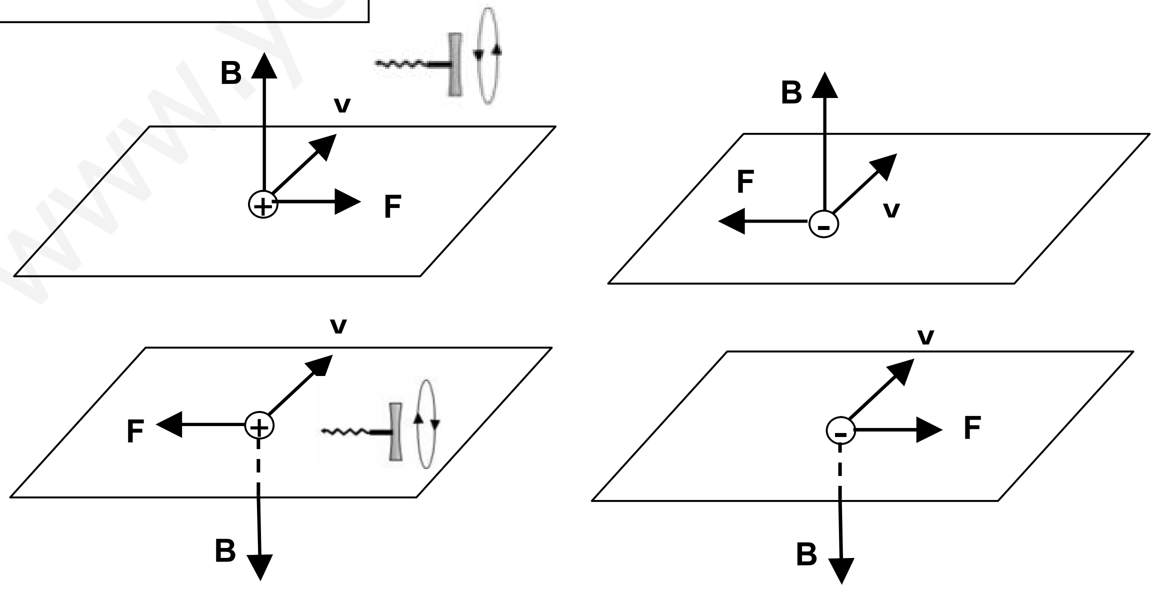
Sentido: el del sacacorchos que gira del primen al segundo vector por el camino más corto.

El módulo de la fuerza viene dado por: $F = q\ v\ B\ \text{sen}\ \alpha$, donde α es el ángulo formado por el vector campo magnético y la velocidad de la carga. Esto implica:

- Que si la carga se desplaza en la misma dirección del campo no experimentará fuerza alguna.
- Que la fuerza adquirirá su máximo valor cuando la carga se mueva en dirección perpendicular al campo (F = q v B)

El vector fuerza, por tanto, es perpendicular al plano determinado por los vectores velocidad y campo magnético.

Su sentido es de un sacacorchos que gira de v a B por el camino más corto, si la carga es positiva. Si la carga es negativa, su sentido es opuesto.

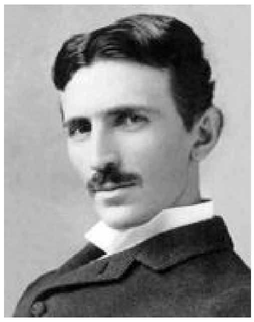


Dirección y sentido del vector fuerza para una carga ***positiva*** que se desplaza con velocidad v

Dirección y sentido del vector fuerza para una carga ***negativa*** que se desplaza con velocidad v

Teniendo en cuenta lo anterior podemos definir la unidad de campo magnético en el S.I. llamada ***tesla (T).***

> ***Un tesla*** es la intensidad de un campo magnético que ejerce una fuerza de 1 N sobre una carga de 1 C que se mueve perpendicularmente al campo con una velocidad de 1 m/s



Nikola Tesla (1856 - 1943)
Ingeniero e inventor serbio-americano que realizó importantes contribuciones al estudio del electromagnetismo

Dimensionalmente (recordar que **I** = q/t):

$$|B| = \frac{|F|}{|q||v|} = \frac{|MLT^{-2}|}{|I\,T||LT^{-1}|} = |MI^{-1}T^{-2}|$$

$$\text{Unidad S.I : Tesla} = \text{kg. } A^{-1}\, s^{-2} = \frac{N}{C\ m/s} = \frac{N}{A\ m}$$

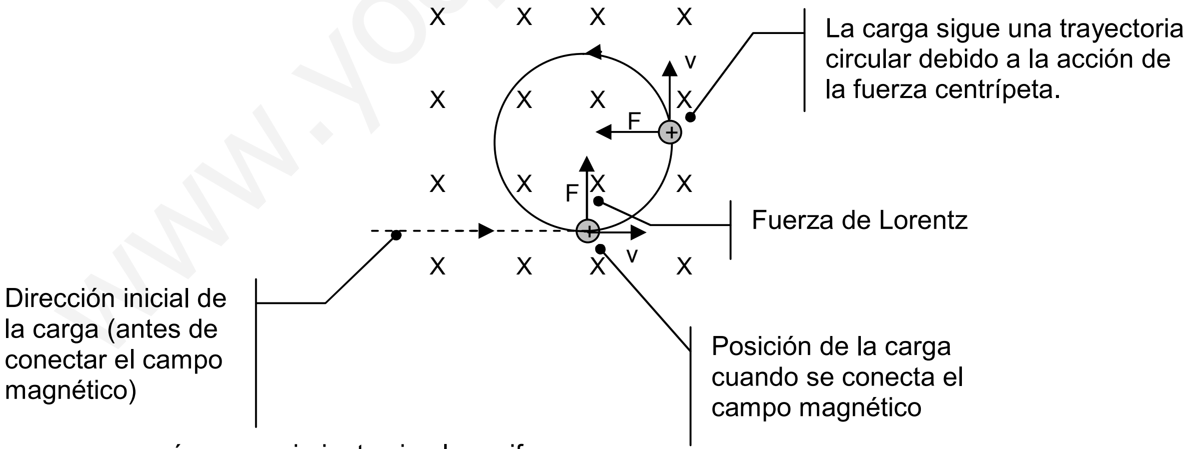
En la práctica el tesla resulta ser una unidad demasiado grande por lo que frecuentemente se emplea el ***gauss (G): 1 T = 10^4 G.***

Según se ha dicho fuerza y velocidad son siempre perpendiculares, por tanto la fuerza variará la dirección del vector velocidad, pero no su módulo. Cuando una carga en movimiento es sometida a la acción de un campo magnético no se produce una conversión de energía potencial en cinética. ***El campo magnético no es conservativo. No obstante, y en ausencia de fuerzas de rozamiento, la energía cinética de la carga permanece invariable.***

Puede ocurrir que en la región considerada exista, además de un campo magnético (B), uno eléctrico (E), en este caso la carga en movimiento interacciona con ambos campos y la fuerza total será:

$$\boxed{F = q\,.\left(\vec{v} \wedge \vec{B} + \vec{E}\right)}$$

Supongamos una partícula con carga positiva que se mueve de izquierda a derecha con velocidad constante. Si se crea un campo magnético perpendicular al plano del papel y dirigido hacia abajo (el campo magnético se representa por aspas), la carga interaccionará con dicho campo ejerciéndose sobre ella una fuerza perpendicular a su velocidad que hará que cambie continuamente de dirección describiendo una circunferencia.

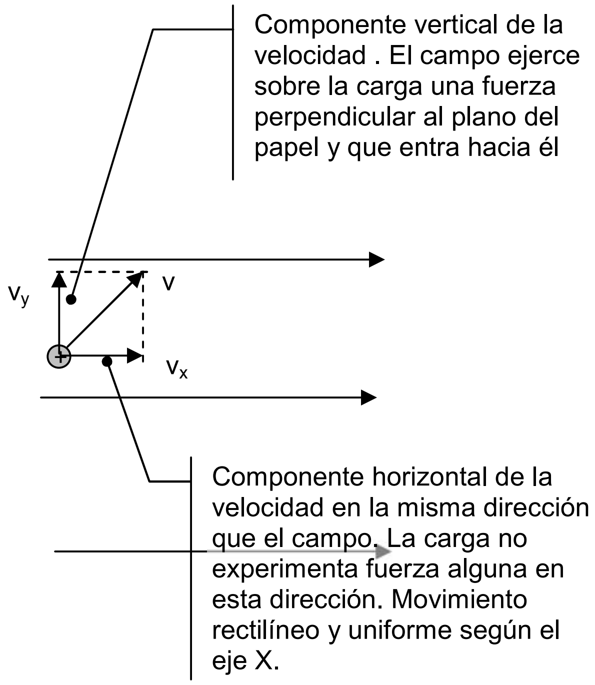


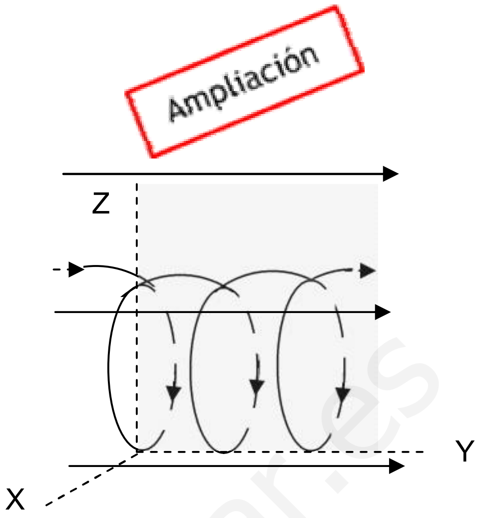
La carga se moverá con movimiento circular uniforme:

$$F_N = m\,a_N$$
$$q\,v\,B = m\,\frac{v^2}{R}$$
$$R = \frac{m\,v}{q\,B} = \left(\frac{m}{q\,B}\right) v$$

$$v = \omega R\ ;\ \omega = \frac{v}{R} = \frac{\frac{R\,q\,B}{m}}{R} = \frac{q\,B}{m}$$
$$\omega = \frac{2\,\pi}{T}\ ;\ T = \frac{2\,\pi}{\omega} = \frac{2\,\pi}{\frac{q\,B}{m}} = \frac{2\,\pi\,m}{q\,B}$$

En el caso general de que la carga penetre en el campo magnético con una velocidad oblicua, podemos considerar las componentes horizontal (en la misma dirección del campo) y vertical (perpendicular) de la velocidad. El movimiento resultante será la composición del movimiento de avance según el eje X y el circular según el eje Y, es decir un movimiento helicoidal.





Movimiento resultante: hélice en el plano XZ

Ejemplo 1 (Oviedo 2009-2010)

De acuerdo con la ley de Lorentz, ¿qué velocidad debería llevar una partícula cargada para que la fuerza máxima que ejerce sobre ella un campo magnético de 0,15 T sea igual a la que produce un campo eléctrico de 2 kN/C?

Solución:

El valor (módulo) de la fuerza de Lorentz depende del ángulo que el vector velocidad forme con el vector campo magnético, siendo su valor máximo cuando el ángulo formado son 90^0:

$$\vec{F} = q\,.\,\vec{v} \wedge \vec{B}$$
$$F = q\,v\,B\,\mathrm{sen}\,\alpha$$
$$F_{MAX} = q\,v\,B$$

El valor de la fuerza debida a la interacción de la carga con el campo eléctrico viene dada por:

$$F_E = q\,E$$

Por tanto:

$$(F_{MAX})_{mag} = F_E$$
$$q\,v\,B = q\,E$$
$$v = \frac{E}{B} = \frac{2\,10^3\,\frac{\cancel{N}}{\cancel{C}}}{0,15\,\frac{\cancel{N}}{\cancel{C}\,m\,s^{-1}}} = 1\,333,3\,\frac{m}{s}$$

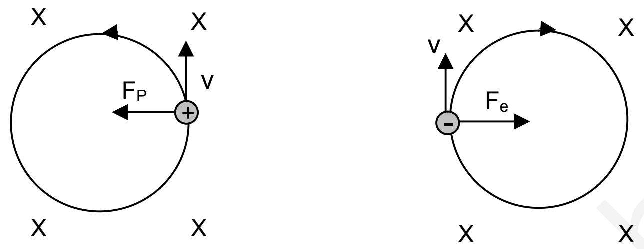
Ejemplo 2 (Oviedo 2006-2007)

En una región del espacio donde existe un campo magnético uniforme, se observa la existencia de un electrón y un protón que tienen trayectorias circulares con el mismo radio. ¿Serán también iguales los módulos de sus velocidades lineales? ¿Recorrerán sus trayectorias con el mismo sentido de giro? Razona tus respuestas.

Datos $Q_P = 1{,}6\ 10^{-19}$ C; $Q_e = 1{,}6\ 10^{-19}$ C; $m_P = 1{,}67\ 10^{-27}$ kg; $m_e = 9{,}1\ 10^{-31}$ kg;

Solución:

Aplicando la expresión que nos da la fuerza de Lorentz: $F = q\ \vec{v} \wedge \vec{B}$, deducimos que para que la trayectoria sea circular la velocidad y el campo magnético han de ser perpendiculares. Además, y debido a que tienen carga de signo opuesto, las trayectorias del protón y del electrón deberán curvarse en sentido contrario:



El radio de la trayectoria lo obtendremos aplicando la ecuación que regula la dinámica del movimiento circular uniforme:

$$F_N = m\ a_N = m\ \frac{v^2}{R}$$

$$q\ v\ B = m\ \frac{v^2}{R}$$

$$R = \left(\frac{m}{q\ B}\right) v$$

Por tanto si ambos radios son iguales tendremos, y teniendo en cuenta que sus cargas son (en valor absoluto) iguales, tendremos:

$$\left.\begin{array}{l} R_P = \left(\dfrac{m_P}{q_P\ B}\right) v_p \\ R_e = \left(\dfrac{m_e}{q_e\ B}\right) v_e \end{array}\right\} \frac{m_P}{q_P\ B} v_p = \frac{m_e}{q_e\ B} v_e$$

$$v_p\ m_P = v_e\ m_e$$

$$v_p = \frac{m_e}{m_P}\ v_e = \frac{9{,}1\ 10^{-31}\ kg}{1{,}67\ 10^{-27}\ kg} v_e = 5{,}5\ 10^{-4}\ v_e$$

$$v_p = 5{,}5\ 10^{-4}\ v_e$$

Ejemplo 3 (Oviedo 2003-2004)

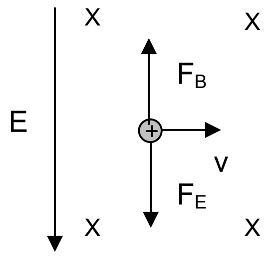
En una región del espacio coexisten un campo eléctrico y otro magnético, ambos uniformes y con líneas de campo perpendiculares entre sí, cuyas magnitudes respectivas son E = 3,4 10^{4} V/m y B = 2 10^{-2} T. Si en esta región se observa que una carga Q que se mueve con velocidad constante v y con una trayectoria perpendicular a las líneas de campo magnético, se pide:

a) Representar gráficamente las orientaciones relativas de los vectores E, v y B.

b) Calcular la velocidad de la carga

Solución:

Suponemos que la carga considerada tiene signo positivo. Para que mantenga una trayectoria rectilínea en el seno de un campo eléctrico y otro magnético cruzados, deberá de cumplirse que las fuerzas resultantes de la interacción con ambos campos sean iguales y de sentidos contrarios:



$$F_B = F_E$$

$$q\,v\,B = q\,E$$

$$v = \frac{E}{B} = \frac{3{,}4\;10^{4}\;\frac{\cancel{N}}{\cancel{C}}}{2\;10^{-2}\;\frac{\cancel{N}}{\cancel{C}\;m\;s^{-1}}} = 1{,}7\;10^{6}\;\frac{m}{s}$$

Ejemplo 4 (Oviedo 2001)

Un protón de masa 1,67 10^{-27} kg y carga 1,6 10^{-19} C se mueve según una trayectoria circular estable debido a la acción de un campo magnético de 0,4 T. Deducir la expresión de la frecuencia de dicho movimiento circular y calcular su valor numérico en este caso.

Solución:

El campo magnético suministra la fuerza centrípeta necesaria para que exista una trayectoria circular:

$$F_N = m\,a_N = m\,\frac{v^2}{R}$$

$$q\,v\,B = m\,\frac{v^2}{R}$$

$$v = \frac{q}{m}\,R\,B$$

Para un movimiento circular uniforme:

$$v = \omega\,R\;;\;\omega = \frac{v}{R} = \frac{\frac{q\,R\,B}{m}}{R} = \frac{q}{m}\,B$$

Como :

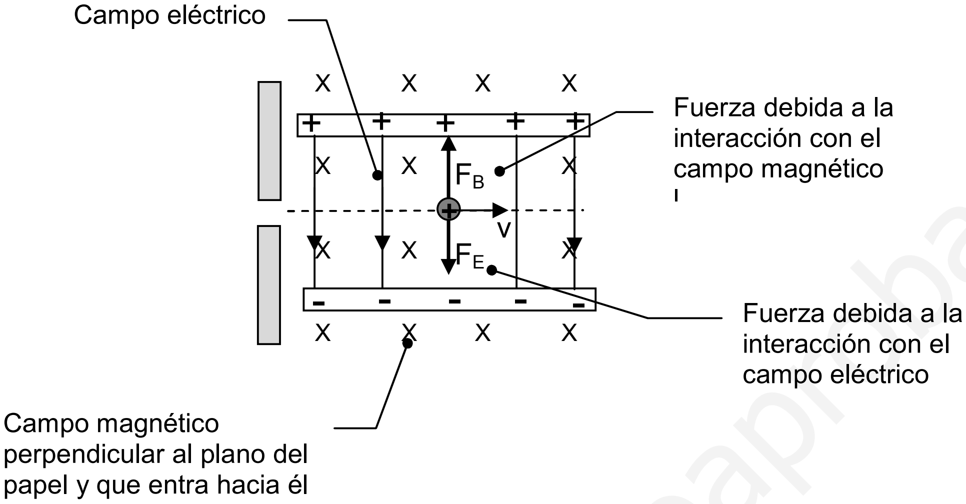
$$\omega = 2\,\pi\,f\;;\;f = \frac{\omega}{2\,\pi} = \frac{\frac{q}{m}\,B}{2\,\pi} = \frac{q\,B}{2\,\pi\,m}$$

$$f = \frac{q\,B}{2\,\pi\,m} = \frac{1{,}60\;10^{-19}\;\cancel{C}\;0{,}4\;\frac{N}{\cancel{C}\;m\;s^{-1}}}{2\,\pi\,1{,}67\;10^{-27}\;kg} = 3{,}83\;10^{7}\,s^{-1} = 3{,}83\;10^{7}\,Hz$$

Selector de velocidades

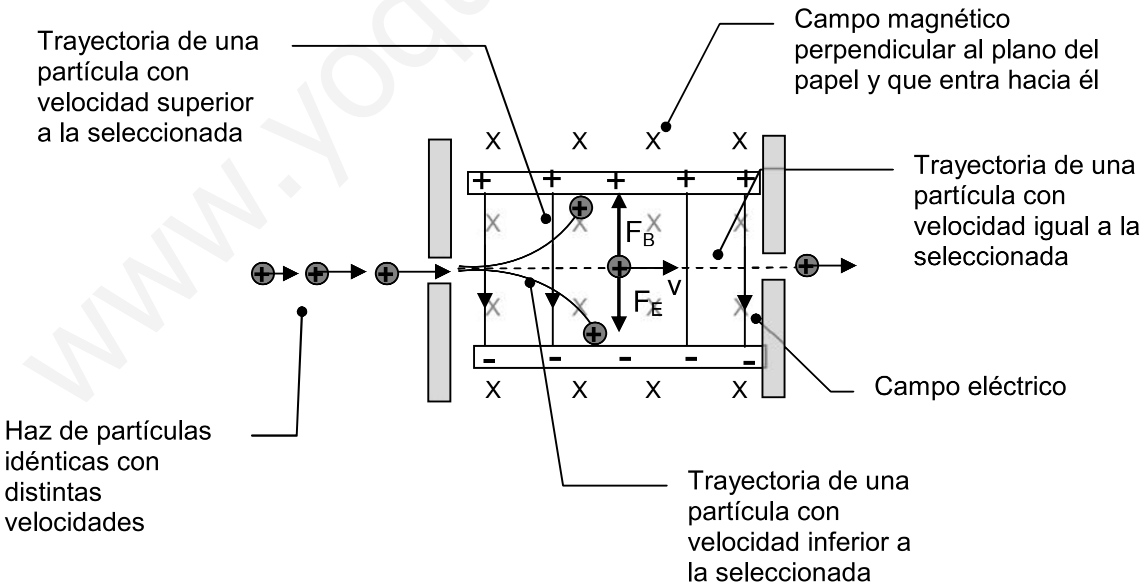
Como su propio nombre indica el selector de velocidades es un aparato que permite seleccionar haces de partículas con idéntica velocidad.

Su funcionamiento se basa en la interacción de las partículas con campos eléctricos y magnéticos cruzados (perpendiculares). Como se observa en la figura el campo eléctrico ejerce una fuerza hacia abajo y el magnético en sentido justamente opuesto a él. Si regulamos el valor del campo magnético y del eléctrico de forma que F_E y F_B sean iguales la carga seguirá una trayectoria recta



$$F_B = F_E$$
$$q\,v\,B = q\,E$$
$$\boxed{v = \frac{E}{B}}$$

Si la velocidad de la partícula es superior a la seleccionada la fuerza magnética será superior a la eléctrica y la trayectoria se curvará hacia arriba. Si ocurre los contrario la trayectoria se curva hacia abajo impidiendo que estas partículas emerjan del selector.



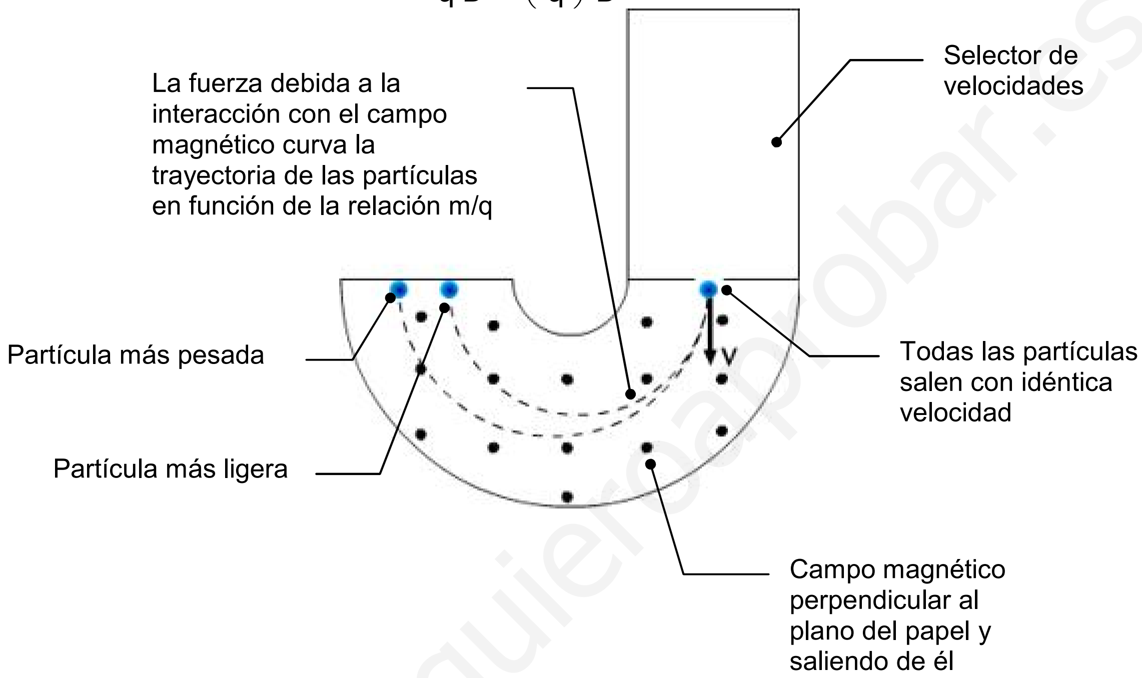
Espectrógrafo de masas

El espectrógrafo de masas permite separar partículas con idéntica carga y distinta masa (por ejemplo) aprovechando la interacción de las partículas cargadas con un campo magnético perpendicular:

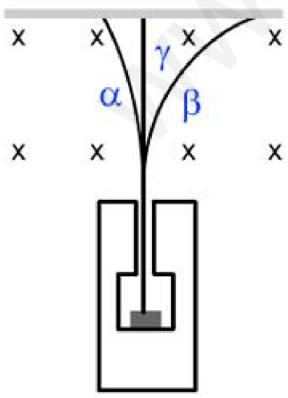
$$F_N = m\, a_N = m\,\frac{v^2}{R}$$

$$q\, v\, B = m\,\frac{v^2}{R}$$

$$R = \frac{m\, v}{q\, B} = \left(\frac{m}{q}\right)\frac{v}{B}$$



El espectrógrafo de masas permite evaluar masas atómicas con gran precisión y la separación de isótopos de un mismo elemento.



Dispositivo usado por Rutherford (en 1903) para analizar la emisión radiactiva del radio.

La aplicación de un campo magnético permitió resolver la radiación en tres tipos distintos que fueron denominados como ***radiación alfa, beta y gamma.***

La radiación alfa estaba formada por partículas pesadas y con carga positiva (núcleos de He)

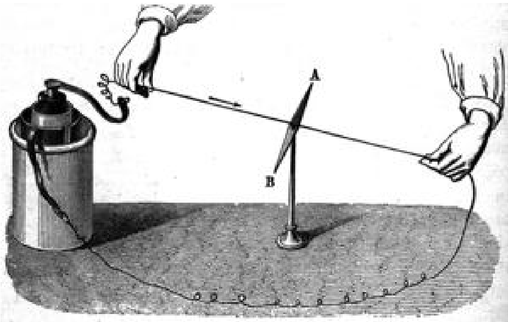
La radiación beta consistía en un chorro de partículas muy ligeras y con carga negativa (electrones)

La radiación gamma no poseía ningún tipo de carga, ya que no eran desviadas por el campo magnético

INTERACCIÓN ELECTROMAGNÉTICA
ELECTROMAGNETISMO

Hans Christian Oersted
(1777 - 1851)

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

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 ***(Ley de Biot-Savart)***:

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

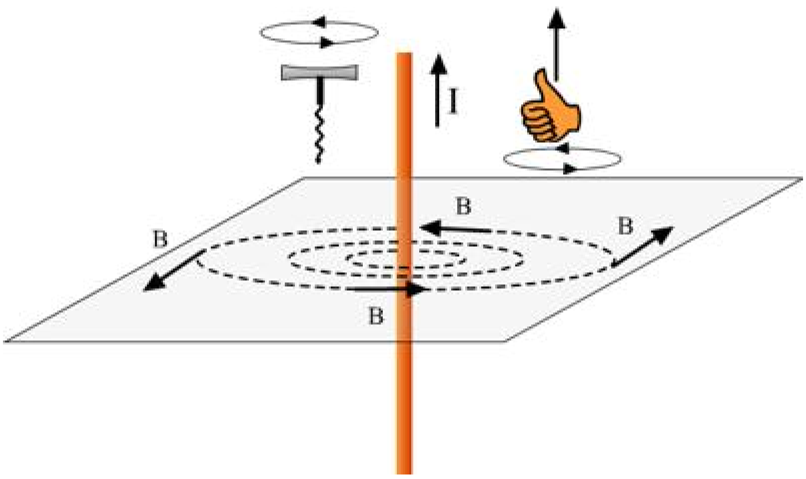
- ***Las líneas de campo son circunferencias*** concéntricas al hilo, situadas en un plano perpendicular al mismo.
- ***El sentido de las líneas de campo*** es el de giro de un sacacorchos que avanza en el sentido de la corriente.
- ***El vector campo magnético*** es tangente a las líneas de campo y 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 comportamientos magnético como:

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

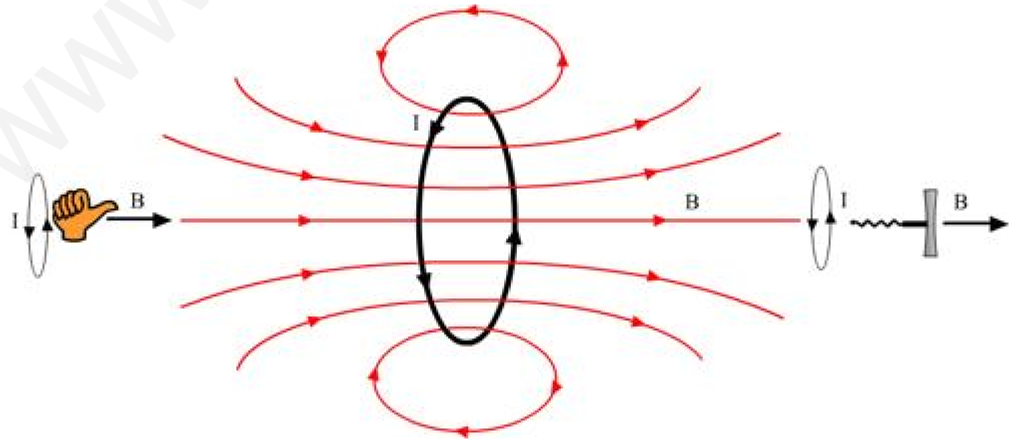
Campo magnético creado por un espira

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:

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

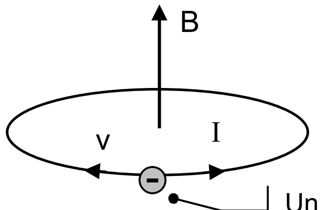
Y en su centro (donde x =0):

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



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.

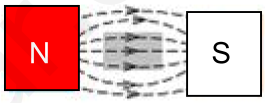
Si consideramos un único electrón (carga eléctrica negativa) orbitando alrededor del núcleo tendremos el equivalente a una diminuta corriente eléctrica circular (espira) que generará su correspondiente campo magnético.



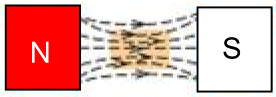
Un electrón girando (carga negativa) equivale a una corriente de sentido contrario al del movimiento que crea un campo magnético perpendicular al plano de la órbita.

Si consideramos átomos más complejos (con varios electrones situados en varias capas) la situación puede ser mucho más complicada y el campo magnético total [3] 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).



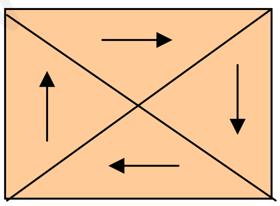
En las sustancias paramagnéticas los átomos o moléculas individuales sí que pueden ser considerados como diminutos imanes, pero como resultado de la agitación molecular (energía cinética) están orientados al azar dando un campo magnético resultante nulo. Si se someten a la acción de un campo magnético 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.



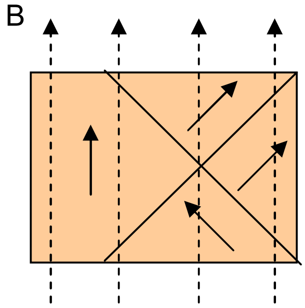
De todo lo dicho se desprende que la magnetización será mayor cuanto más intenso sea el campo magnético externo o más baja la temperatura. Esta dependencia con la temperatura fue observada por Pierre Curie. La ***ley de Curie*** relaciona la magnetización de una sustancia con el campo magnético aplicado 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 los dominios tienden a orientarse y se produce un crecimiento de los que tienen la misma orientación que el campo.

[3] Realmente se habla de ***momento magnético***, un vector definido en la forma siguiente: El vector unitario se define como perpendicular a la superficie (órbita) y sentido el del sacacorchos que gire en el mismo sentido que el de la intensidad.

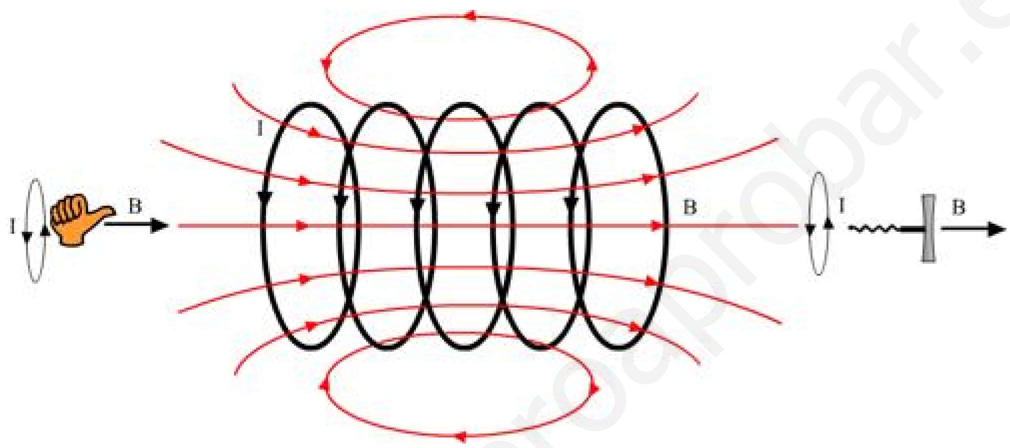
Campo magnético creado por un solenoide

Un solenoide de longitud L crea un campo resultante de la suma del de las N espiras que lo componen. En el interior del solenoide y para puntos situados sobre su eje:

$$\boxed{B = \frac{N\,\mu\,I}{L}}$$

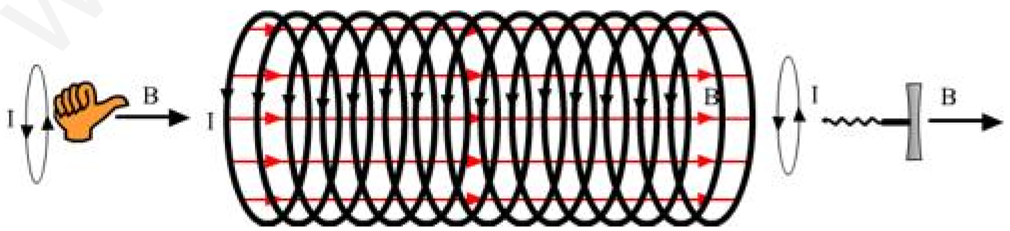
Ampliación

Para el centro del solenoide y en sus extremos: $\boxed{B = \frac{N\,\mu\,I}{2\,L}}$



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.

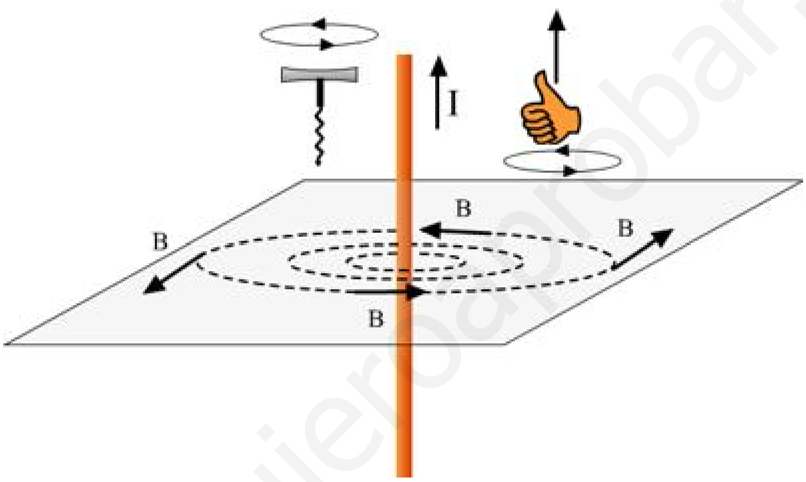
b) Determinar el módulo del campo magnético en el citado punto.

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)



b) 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:

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

c) 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:

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

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

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.

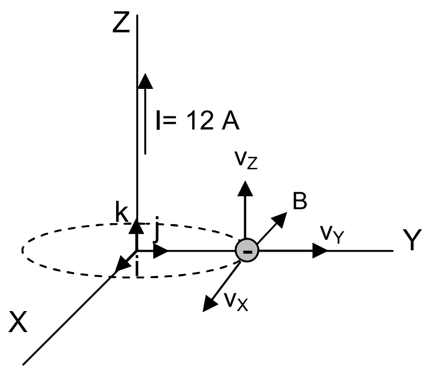
b) Su velocidad es de 1 m/s según la dirección positiva del eje Y.

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:

$$\vec{F}_B = q\ \ \vec{v} \wedge \vec{B}$$

$$F_B = q\ v\ B\ \text{sen}\alpha\ ;\ \ (\text{sen } 90^0 = 1)$$

$$F_B = q\ v\ B = 1,6\ 10^{-19} C\ 1\frac{m}{s}\ 8,0\ 10^{-5} T = 1,28\ 10^{-23} N$$

Luego :

$$\vec{F}_B = -\left(1,28\ 10^{-23}\right)\vec{k}$$

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:

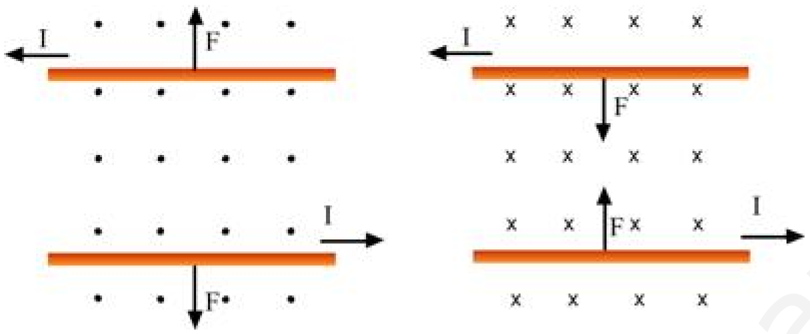
$$\vec{F}_B = \left(1,28\ 10^{-23}\right)\ \vec{j}$$

$$\vec{a} = \left(1,41\ 10^{7}\right)\ \vec{j}$$

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.

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

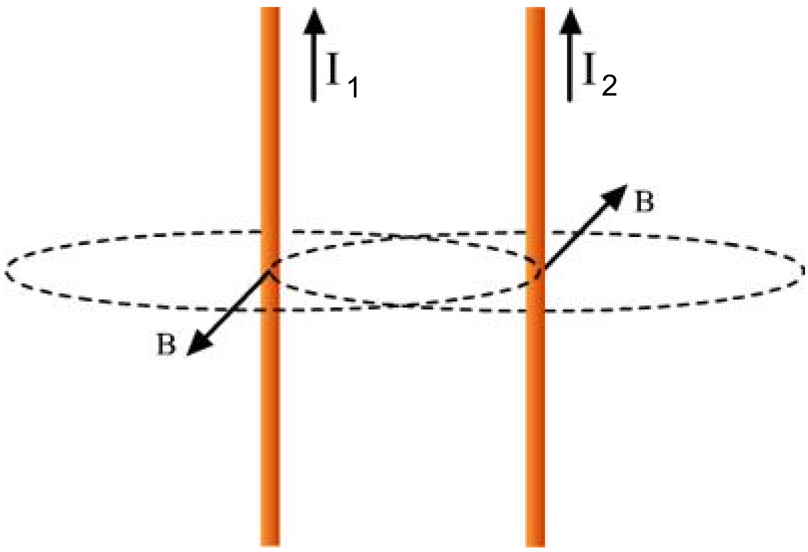
Vector de modulo igual a la intensidad y que tiene la dirección y sentido de ésta

- 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) .

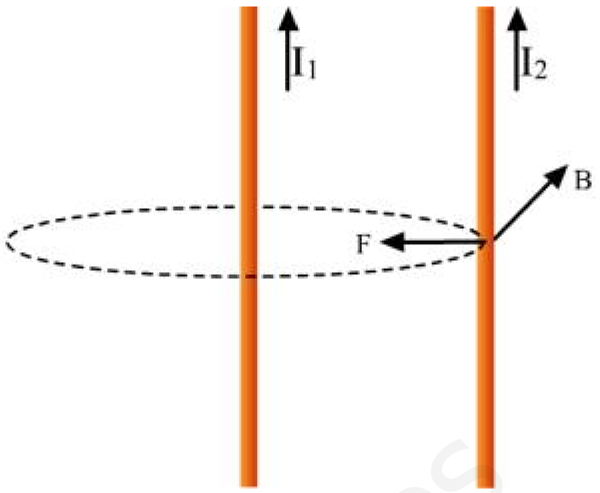


Para el caso de dos conductores de la misma longitud, paralelos y separados por una distancia d, el campo magnético creado por uno de ellos (por ejemplo el situado a la izquierda en la figura) a la distancia que se encuentra el otro valdrá:

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

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:

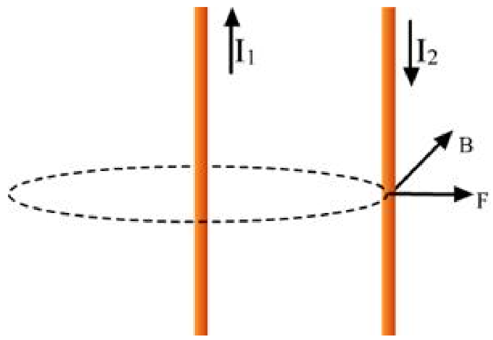
$$F_2 = \left(\frac{\mu\, L}{2\,\pi}\right)\frac{2I_2\; I_1}{2d} = F_1 = 0,20\ N$$

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.

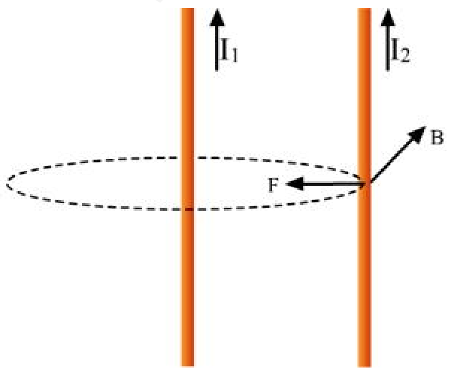
DATO: permeabilidad magnética del aire: 1,26 10^{-6} N A^{-2}

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:

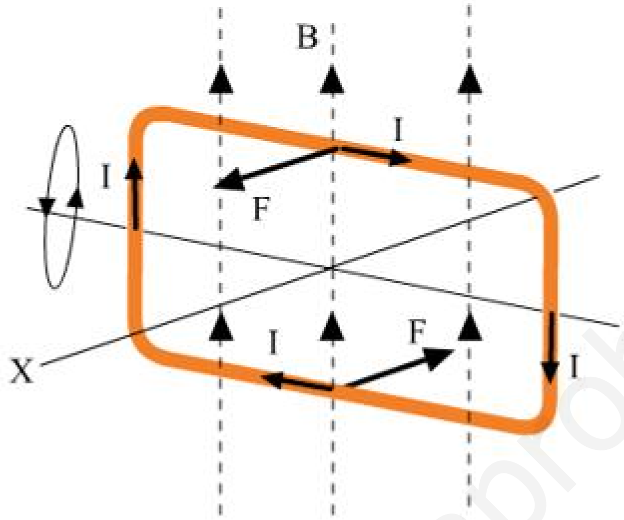
$$F = \left(\frac{\mu\, L}{2\,\pi}\right)\frac{I_2\; I_1}{d} = \left(\frac{1,26\ 10^{-5}\ \frac{N}{A^{\cancel{2}}}\ 0,30\ \cancel{m}}{2\ \pi}\right)\frac{2,1\ A\ .\ 3,4\ \cancel{A^2}}{0,14\ \cancel{m}} = 3,07\ 10^{-5}\ N$$

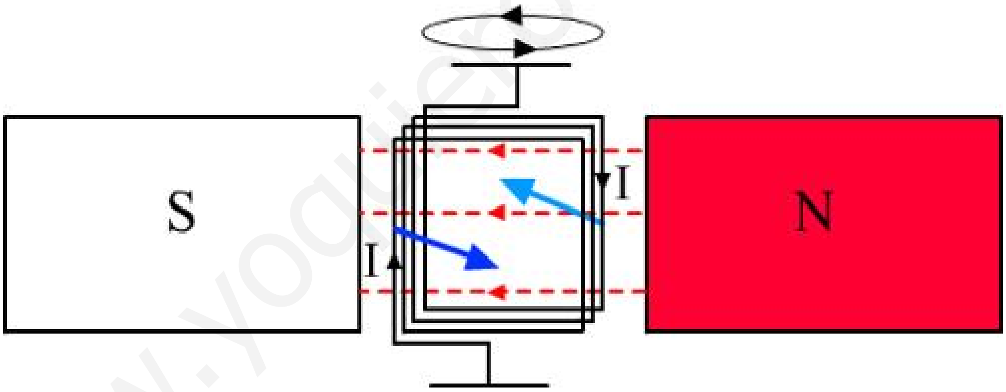


En el caso de que las corrientes tengan el mismo sentido, la fuerza entre ambos conductores sería de atracción. El sentido de la fuerza se aplica aplicando la "regla del sacacorchos".

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.

INTERACCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

INDUCCIÓN

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.***

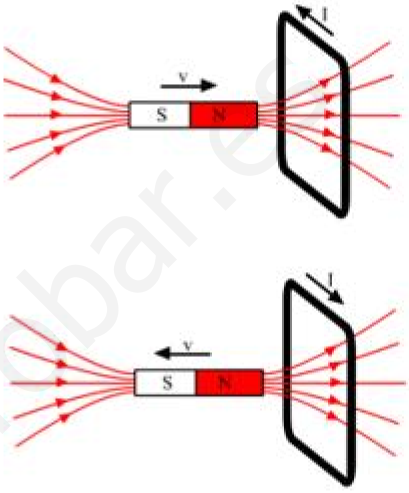
Michael Faraday (1791-1867) y ***Joseph Henry*** (1797-1878) llevaron a cabo diversos experimentos (hacia 1830) que permitieron dar respuesta a esta pregunta.

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.



Experiencia de Faraday

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

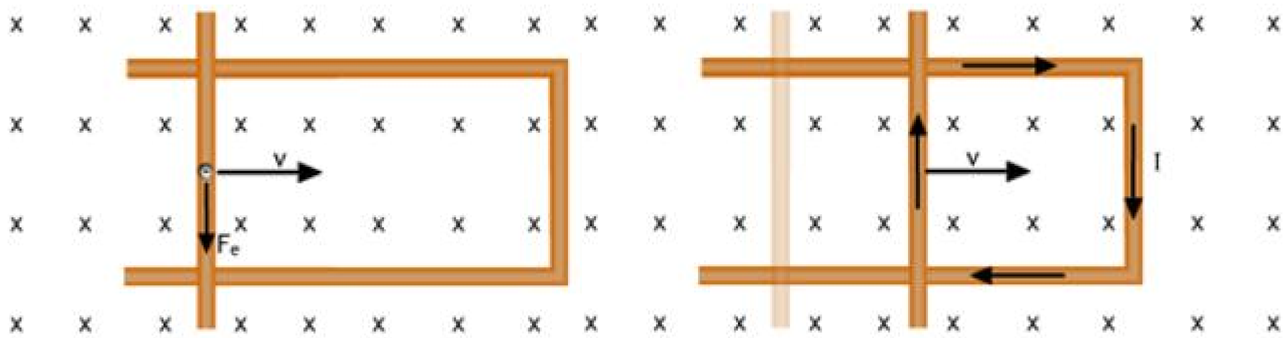
Otro dato experimental importante es que ***la intensidad de la corriente inducida depende de lo rápido que se mueva el imán respecto de la espira***. Esto indica una dependencia con ***la rapidez de variación del campo magnético.***

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.



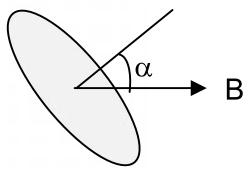
Comparando ambas experiencias podemos llegar a la conclusión de que ***lo que varía en ambas es la cantidad de líneas de campo que atraviesan el circuito en el que se induce la corriente.***

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.

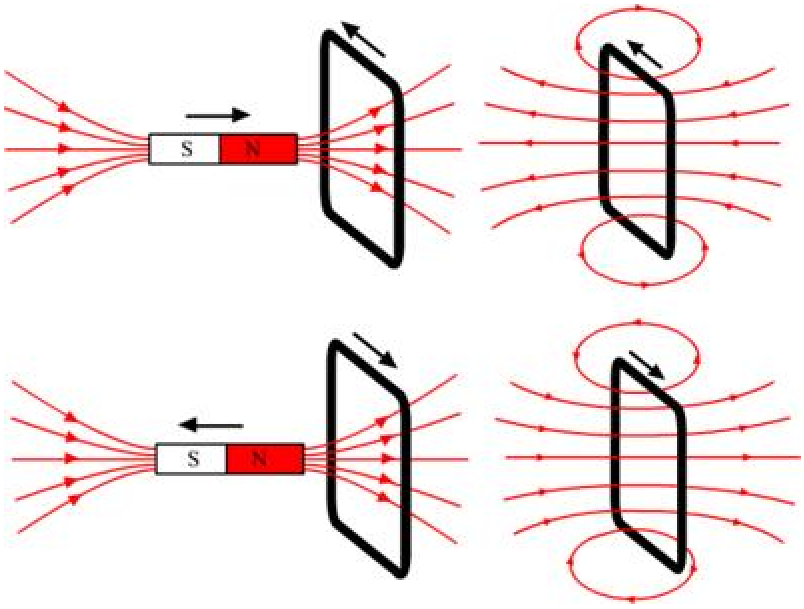
En 1833 ***Heinrich Lenz (1804-1865)*** hizo una nueva contribución para la comprensión del fenómeno al descubrir la regla ***(Ley de Lenz)*** que permite establecer el sentido de la corriente inducida.

Ley de Lenz

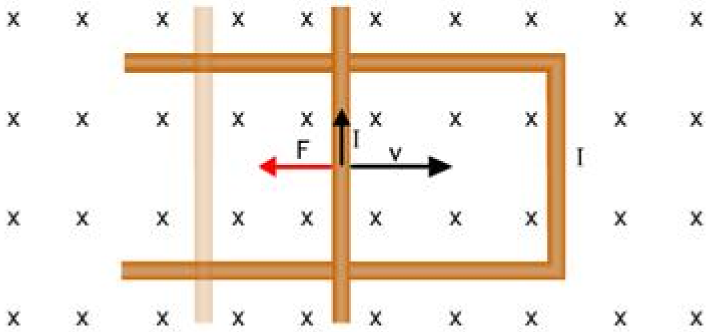
El sentido de la corriente inducida es tal que se opone a la causa que la origina

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:

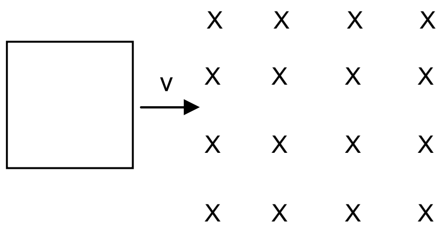
El sentido de la corriente inducida es tal que siempre ***se opone a la variación del flujo que la produce.*** Esto es:

- 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

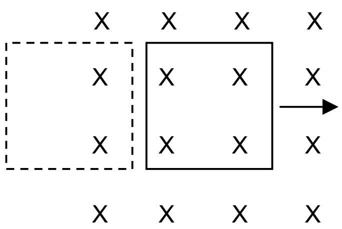
Una espira cuadrada se desplaza hacia una zona donde hay un campo magnético uniforme perpendicular al plano de la espira (ver figura). ¿Cuál será el sentido de la corriente inducida en la espira:

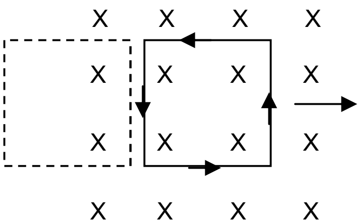
a) Si entra en la zona donde está el campo magnético.
b) Si sale de la zona donde está el campo magnético



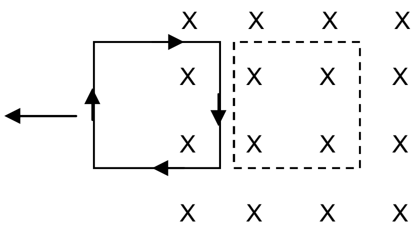
Solución:

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)



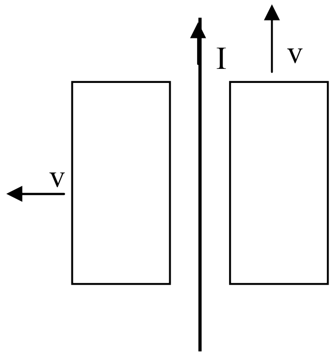


b) Si la espira sale del campo magnético se produce una ***disminución del flujo.*** Ahora se inducirá una corriente que refuerce el campo inductor. La corriente recorrerá la espira en ***el sentido de las agujas del reloj*** (creando un campo magnético que entra en el plano del papel).



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.

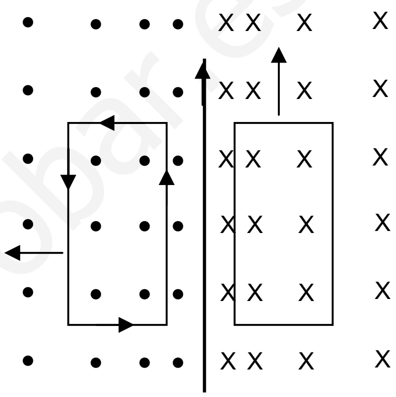


Solución:

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.

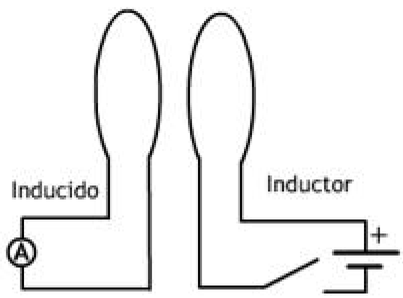
La espira que se mueve de abajo arriba (y considerando que la longitud del hilo es indefinida) se mueve en el seno de un campo magnético, pero el flujo que atraviesa el circuito permanece constante, luego no se inducirá corriente alguna.

Ejemplo 3

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

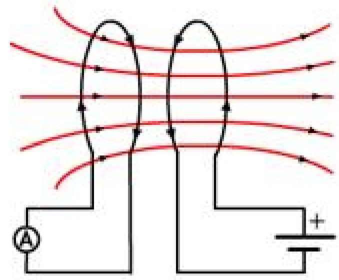
a) Con ambas espiras muy juntas se cierra el interruptor en el inductor

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

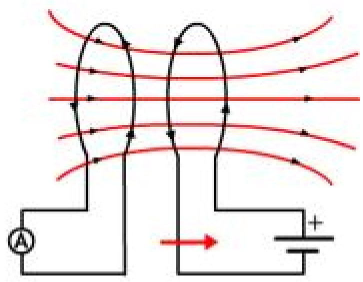


Solución:

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.

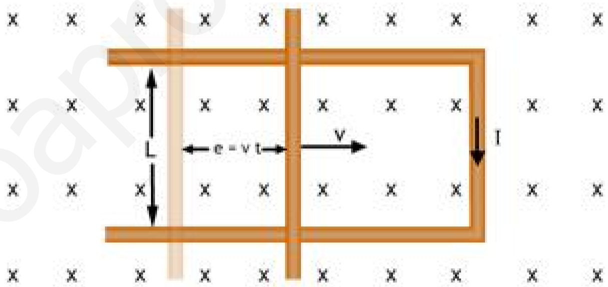
$$\boxed{\varepsilon = -\frac{\Delta\phi}{\Delta t}}$$

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:

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

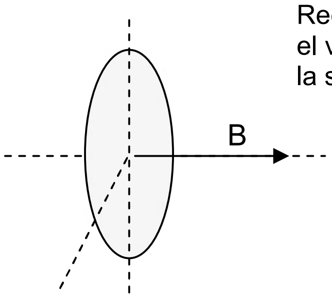
Ejemplo 3 (Oviedo 2006)

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:

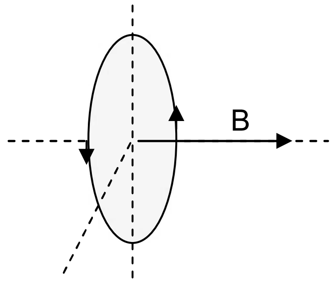
$$\phi = B\,.\,S$$
$$\Delta\phi_A = \phi_2 - \phi_1 = (B_2 - B_1)\,S = \Delta B\,.\,S$$
$$\varepsilon_A = -\frac{\Delta\phi_A}{\Delta t} = -\frac{\Delta B\,.\,S}{t} = -\frac{(0 - 0,5)\ T\ S\ (m^2)}{10^{-3}\,s} = 500\ (S)\ V$$

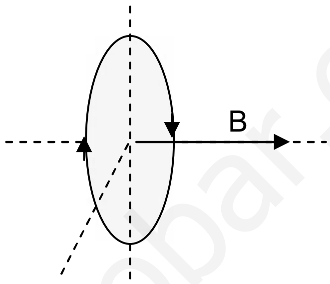
Para el segundo caso la f.e.m será:

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

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)





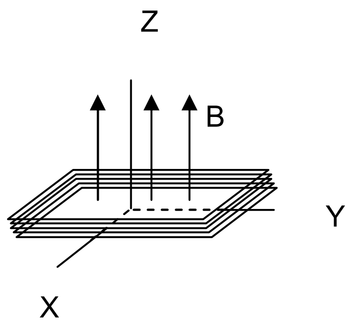
Comparando por tanto los valores absolutos de ambas, vemos que la f.e.m es mayor en el primer caso:

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

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:

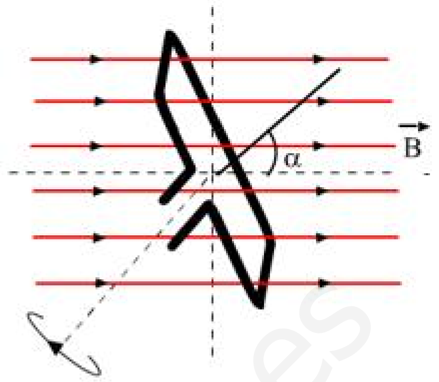
$$\phi = B \,.\, S.\ \cos\alpha = B.\ S$$
$$\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1 = (B_2 - B_1)S = \Delta B \,.\, S$$
$$\varepsilon = -\ N\frac{\Delta\phi}{\Delta t} = -\ N\frac{\Delta B \,.\, S}{t} = -\ 5\ \ \frac{(0{,}2 - 0{,}5)\ T\ 2{,}5\ 10^{-3}\ (m^2)}{0{,}1\ s} = 3{,}75\ 10^{-2}\ V$$

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.***



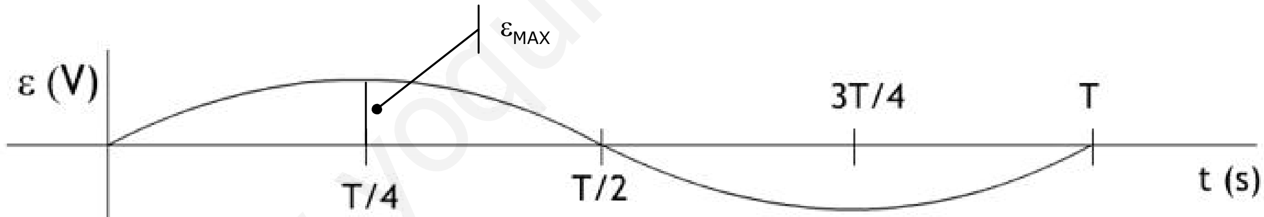
En la figura de la derecha se ve una espira que gira con velocidad angular constante en el seno de un campo magnético. El flujo que atraviesa la espira variará en función del ángulo que forme con el campo magnético. Si suponemos que para t =0 la espira está perpendicular al campo ($\alpha = 0$) :

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

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):

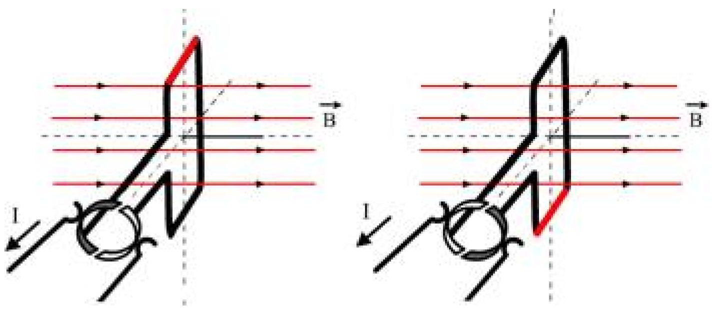
$$\omega = 2\,\pi\,f\ ;\ \ f = \frac{\omega}{2\,\pi}$$



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

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:

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



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

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

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)
$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt} = 1,51.10^{-4}(100\pi)\ \mathrm{sen}(100\pi\ t) = 4,74\ 10^{-2}\ \mathrm{sen}(100\pi\ t)$$

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

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

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.:

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

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

Aplicando lo anterior para los dos casos del enunciado tenemos:

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

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