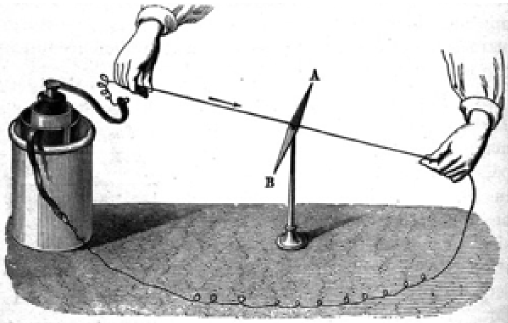
	INTERACCIÓN ELECTROMAGNÉTICA **ELECTROMAGNETISMO**	**IES La Magdalena.** **Avilés. Asturias**

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

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

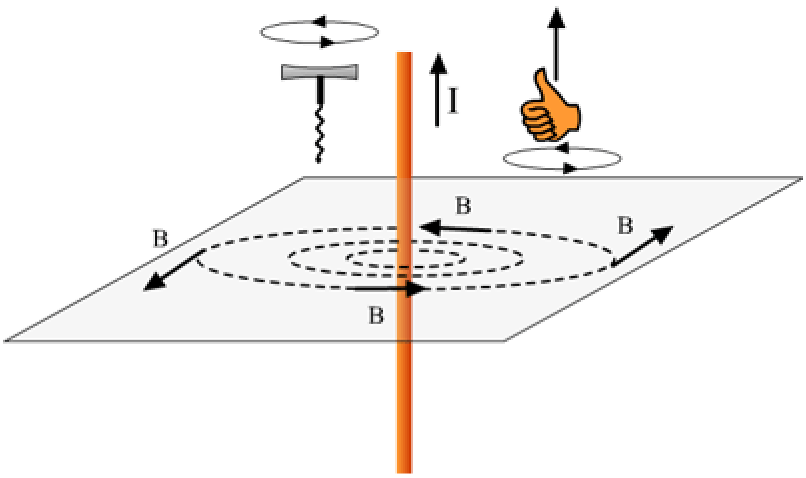
- ***Las líneas de campo son circunferencias*** concéntricas al hilo, situadas en un plano perpendicular al mismo.
- ***El sentido de las líneas de campo*** es el de giro de un sacacorchos que avanza en el sentido de la corriente.
- ***El vector campo magnético*** es tangente a las líneas de campo y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

Sustancias ferromagnéticas

- ***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...

Sustancias paramagnéticas

- ***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, paladio...

Sustancias diamagnéticas

- ***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...

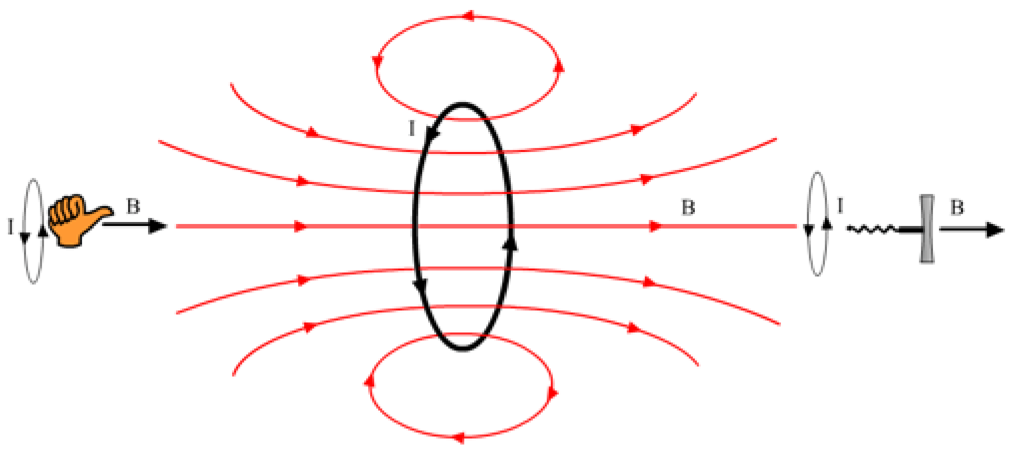
Campo magnético creado por un espira

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:

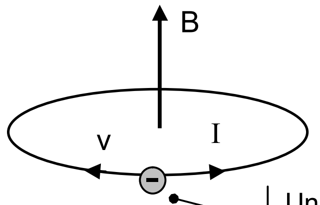
$$B = \frac{\mu\, I}{2} \frac{R^2}{\left(R^2 + x^2\right)^{\frac{3}{2}}}$$

Y en su centro (donde x =0):

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



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.***

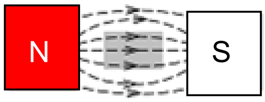


Un electrón girando (carga negativa) equivale a una corriente convencional de sentido contrario al del movimiento, que crea un campo magnético perpendicular al plano de la órbita.

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.

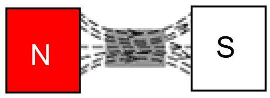
En las sustancias diamagnéticas los átomos o moléculas (debido a su configuración electrónica) no tienen campo magnético neto. Si se someten a la acción de un campo externo ***se induce*** en ellas un campo magnético opuesto. De esta manera el campo aplicado es más débil en su interior y son repelidas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



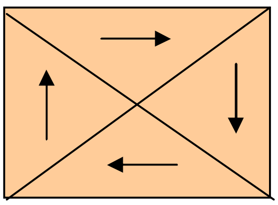
En las sustancias paramagnéticas los átomos o moléculas individuales sí que pueden ser considerados como diminutos imanes, pero como resultado de la agitación molecular (energía cinética) están orientados al azar dando un campo magnético resultante nulo. Si se someten a la acción de un campo magnético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

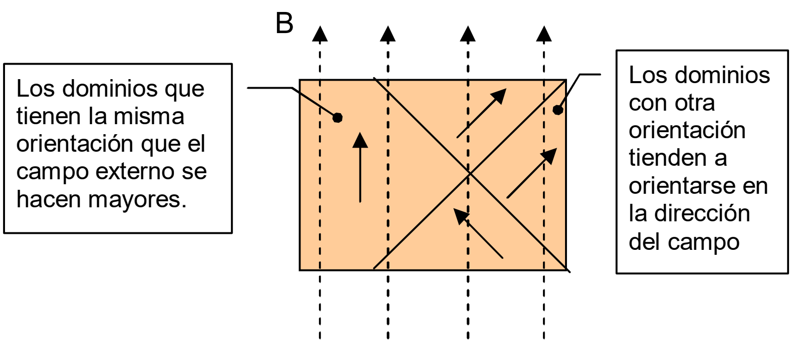
En las sustancias ferromagnéticas se observa una magnetización permanente. A nivel microscópico se pueden distinguir zonas, denominadas ***dominios***, en las cuales los imanes atómicos están orientados en una dirección determinada, aun en ausencia de campos externos. Si se aplica un campo magnético 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

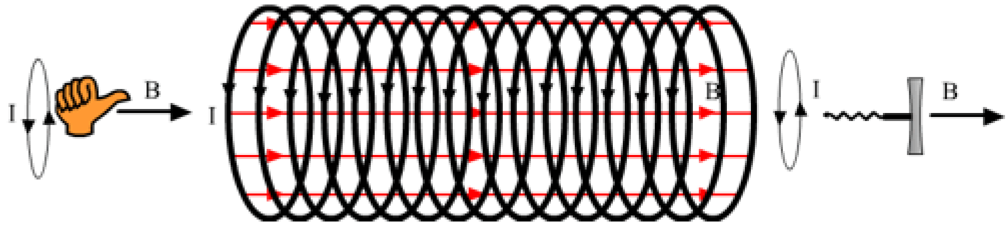


En presencia de un campo magnético externo los dominios tienden a orientarse y se produce un crecimiento de los que tienen la misma orientación que el campo.

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:

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



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?

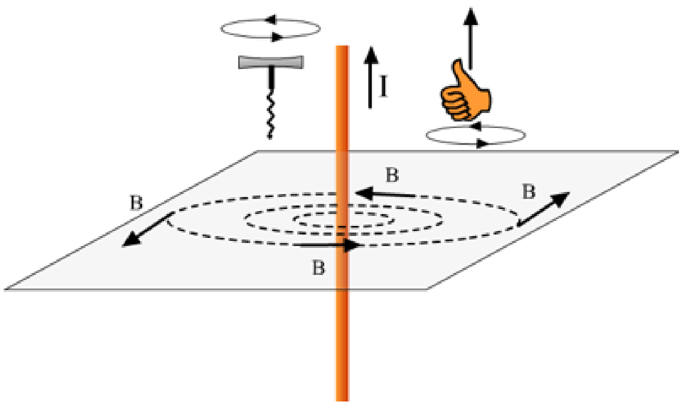
DATO: permeabilidad magnética del vacío: $1{,}26\ 10^{-6}$ N A^{-2}

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.

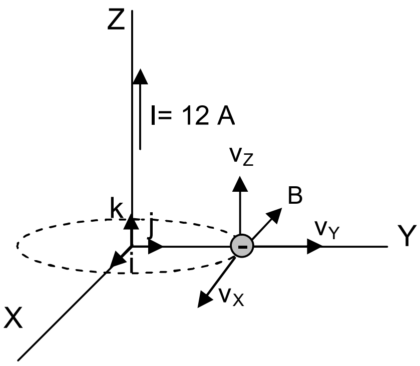
b) Su velocidad es de 1 m/s según la dirección positiva del eje Y.

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:

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

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:

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

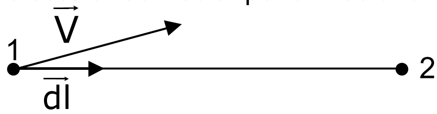
$$\vec{a} = \left(1{,}41\ 10^7\right)\vec{j}$$

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.

Ley de Ampere

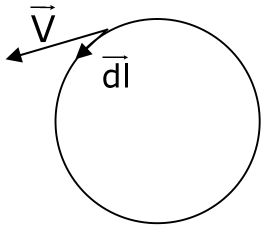
Conceptos previos:

- 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.



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

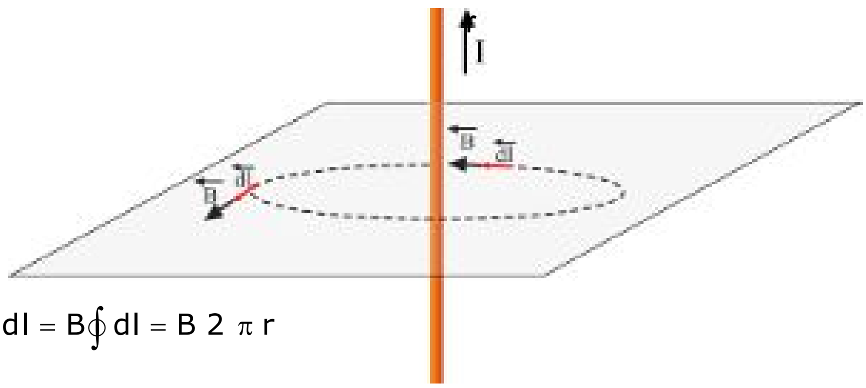
La ***ley de Ampere*** permite el cálculo del campo magnético creado por corrientes ***constantes*** en distribuciones de corriente en las que la simetría sea considerable:

> ***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:

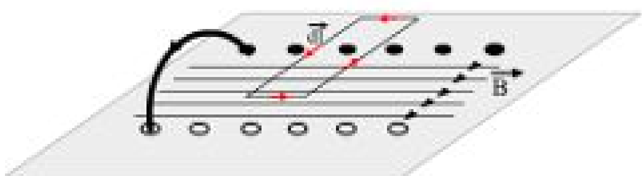


$$\oint \vec{B} \cdot \vec{dl} = \mu_0 I$$

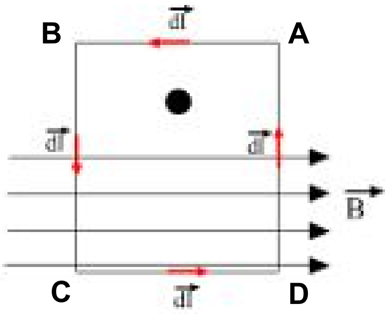
$$\oint \vec{B} \cdot \vec{dl} = \oint B\, dl \cos\alpha = \oint B\, dl = B \oint dl = B\, 2\, \pi\, r$$

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

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:

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

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

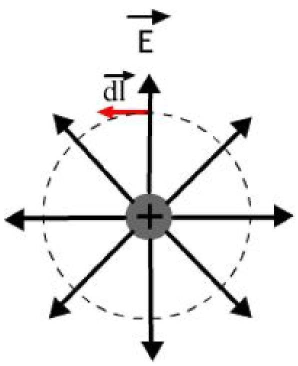
$$\oint \vec{B}\,.\,\vec{dl} = \int_C^D \vec{B}.\,\vec{dl} = \int_C^D B\;\; dl \cos\alpha = B\int_C^D dl = B\,L$$

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

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

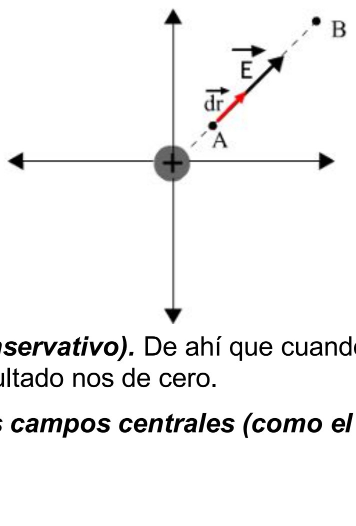


Sin embargo, haciendo el cálculo para el campo eléctrico: $\oint \vec{E}\,.\,\vec{dl} = 0$, ya que el vector campo y el vector desplazamiento son perpendiculares para toda la trayectoria.

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:



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

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

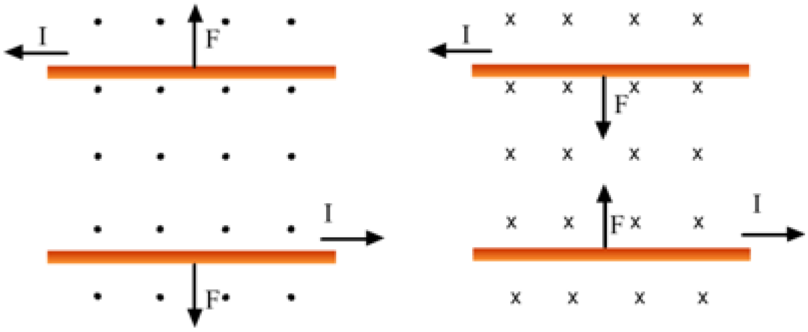
$$\boxed{\int_A^B \vec{E}\,.\,\vec{dl} = V_A - V_B}$$

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

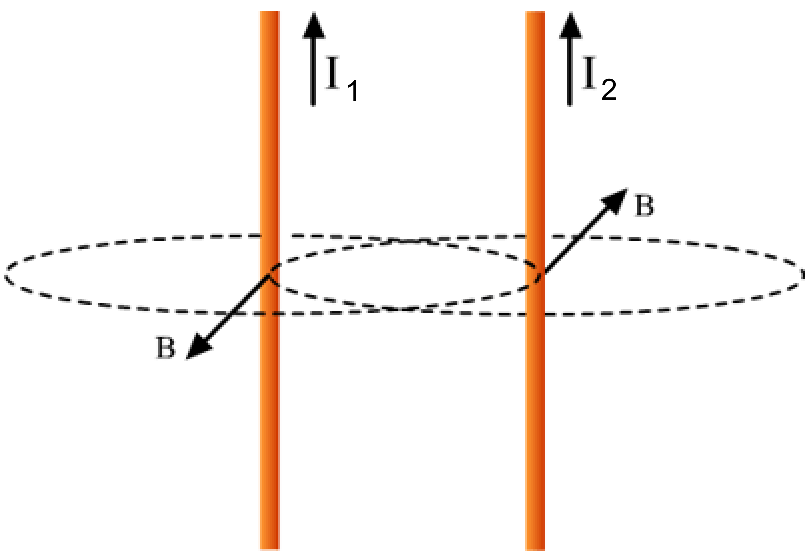
- La fuerza es siempre perpendicular al plano determinado por el conductor y el campo magnético.
- El sentido se puede determinar aplicando la regla del sacacorchos.
- Su módulo depende del ángulo que formen el conductor y el campo. Adquiere el valor máximo cuando el conductor forme un ángulo de 90^0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

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

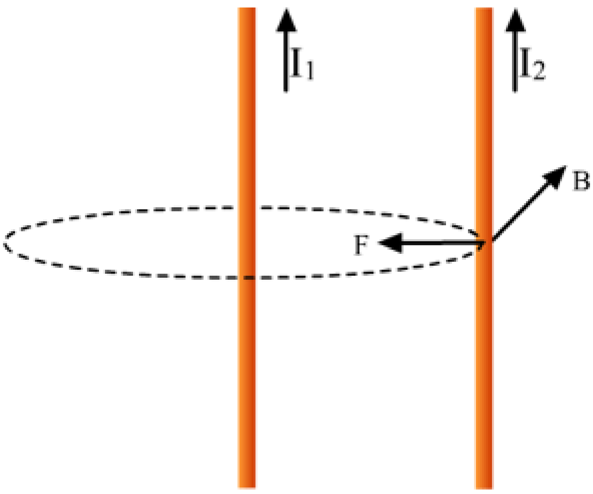


Este campo interaccionará con las cargas en movimiento del otro conductor produciendo una fuerza sobre él de valor:

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

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:

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

> ***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:

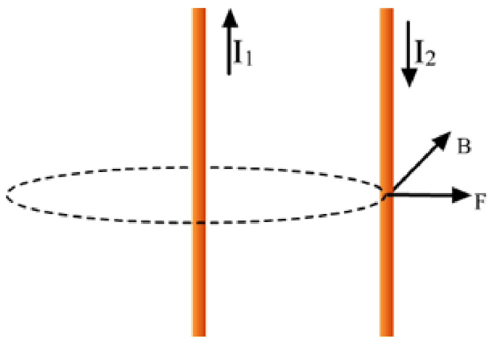
$$F_2 = \left(\frac{\mu\, L}{2\,\pi}\right)\frac{2I_2\ I_1}{2d} = F_1 = 0,20\ N$$

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.

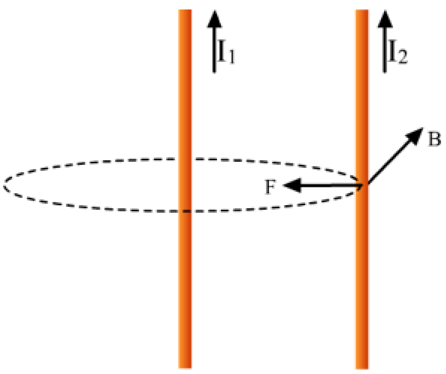
DATO: permeabilidad magnética del aire: $1,26\ 10^{-6}\ N\ A^{-2}$

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:

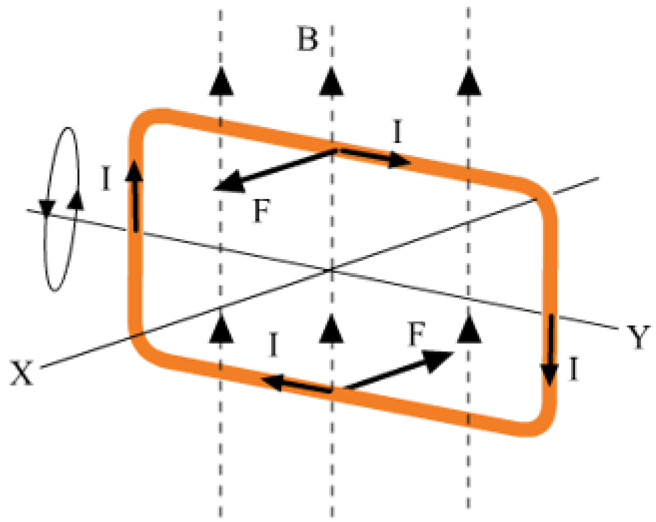
$$F = \left(\frac{\mu\, L}{2\,\pi}\right)\frac{I_2\ I_1}{d} = \left(\frac{1,26\ 10^{-5}\ \frac{N}{\cancel{A^2}}\ 0,30\ \cancel{m}}{2\,\pi}\right)\frac{2,1\ A\ .\ 3,4\ \cancel{A}}{0,14\ \cancel{m}} = 3,07\ 10^{-5}\ N$$

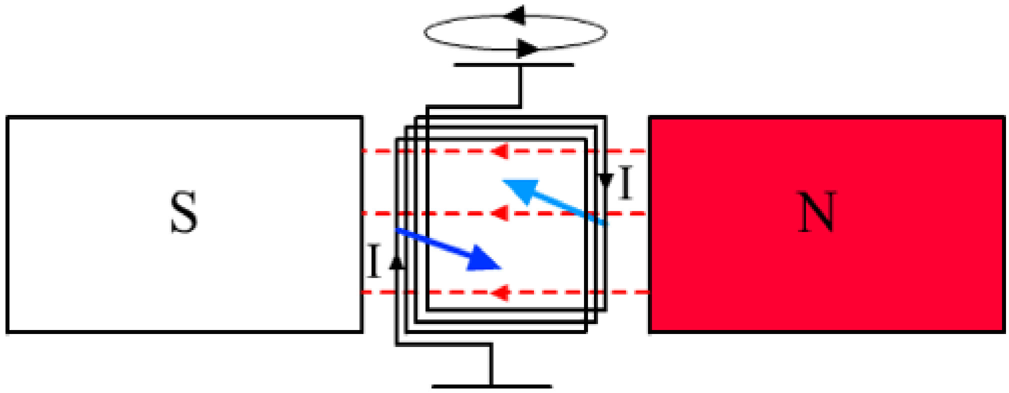


En el caso de que las corrientes tengan el mismo sentido, la fuerza entre ambos conductores sería de atracción. El sentido de la fuerza se aplica aplicando la "regla del sacacorchos".

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.