



Bolilla 10: Magnetismo



Bolilla 10: Magnetismo

La **fuerza magnética** es una de las fuerzas fundamentales de la naturaleza. Si bien algunos efectos magnéticos simples fueron observados y descritos desde la antigüedad, como por ejemplo las fuerzas de interacción entre imanes o entre imanes y algunos metales, la asociación entre electricidad y magnetismo nace en la primera mitad del siglo pasado a partir de las experiencias de Hans Oersted y la formalización teórica de Michael Faraday y Joseph Henry.



Durante la resonancia magnética (IRM), una mesa angosta desliza al pacientea través de una estructura similar a un túnel, que crea un campo magnético a través del cual se envían ondas radiales, lo que produce una imagen tridimensional de las estructuras internas



Entre partículas cargadas en reposo existen fuerzas eléctricas, cuando estas partículas están en movimiento la fuerza eléctrica continúa, pero aparece la **fuerza magnética**. Por ejemplo una corriente eléctrica (cargas en movimiento) genera efectos magnéticos a su alrededor, diremos que ha generado un **campo magnético**. Éste, a su vez, afectará el movimiento de cualquier partícula cargada que se mueva en su zona de influencia.

La unificación de estas dos interacciones, la eléctrica y la magnética, estudiadas por separado inicialmente y aparentemente diversas, fue uno de los progresos teóricos mas trascendentales. Puede resumirse en el siguiente concepto: **una carga en movimiento produce un campo magnético y la variación de un campo magnético produce un campo eléctrico.**



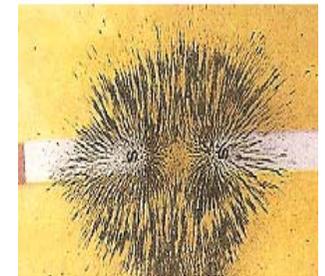
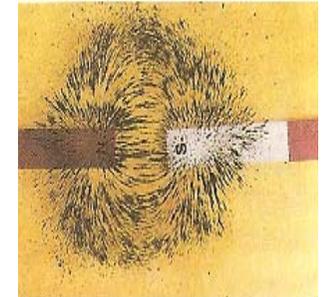
10.1 Campos Magnéticos

Un **campo magnético** es una región del espacio donde existe una fuerza sobre una carga en movimiento, aparte de la fuerza eléctrica.

Son fuentes de campos magnéticos los imanes naturales y las corrientes eléctricas. Así como explorar campos eléctricos utilizábamos una carga de prueba positiva, para explorar un campo magnético utilizamos una aguja magnética o brújula, que se orienta en presencia de dicho campo.

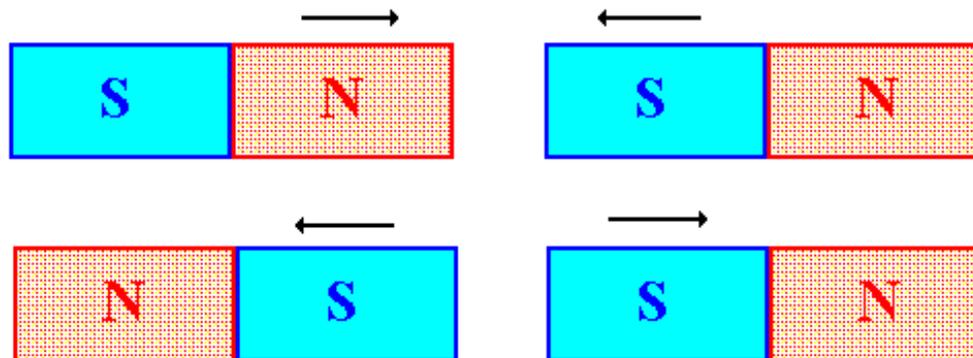
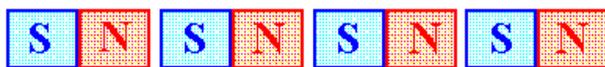
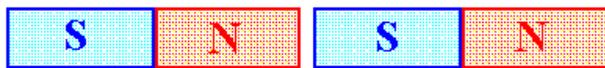
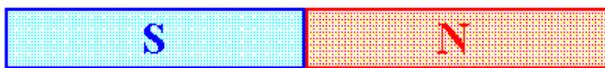
Un **imán** o **barra imanada** posee la propiedad de que en la vecindad de sus extremos o polos, pequeños trozos de hierro son atraídos o repelidos, manteniendo esta propiedad magnética un tiempo indefinido.

Los polos de un imán, denominados **norte** y **sur**, interactúan con los polos de otro imán. Polos iguales se repelen, polos diferentes se atraen.



Limaduras de hierro alrededor de un imán

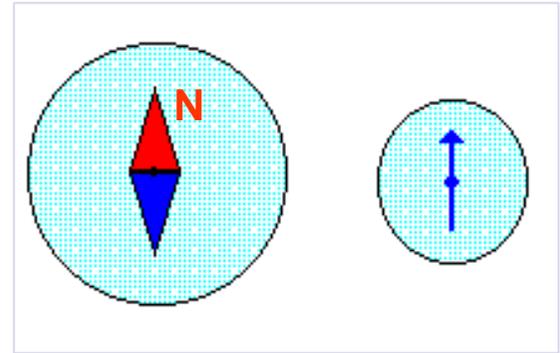
Imposibilidad de separar polos magnéticos



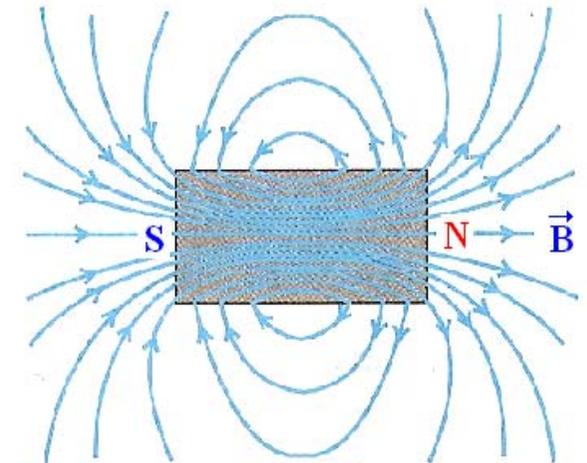
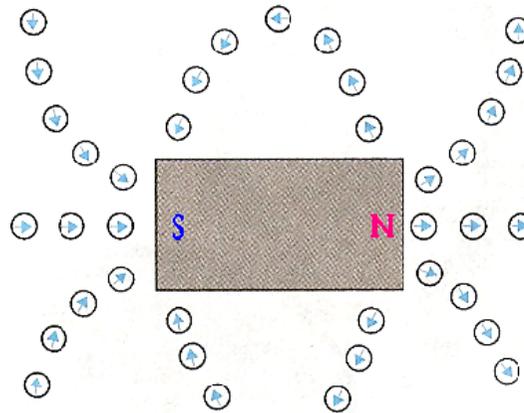
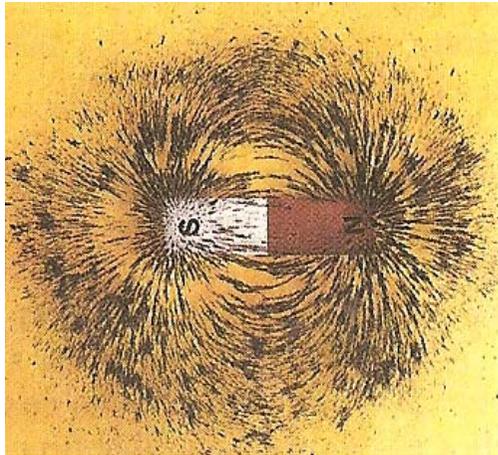


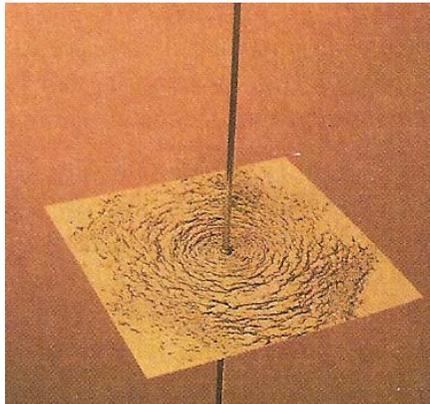
Una aguja magnética o brújula es un imán pequeño que puede girar libremente alrededor de su centro. Constituye una herramienta eficaz para explorar **'el campo magnético'** en una región del espacio

Una brújula se orienta en la proximidad de un imán natural y, en consecuencia, ayuda a encontrar una representación del campo magnético generado por el imán mediante líneas de campo. Por convención las líneas salen del polo norte y entran por el polo sur.



Aguja Magnética o Brújula

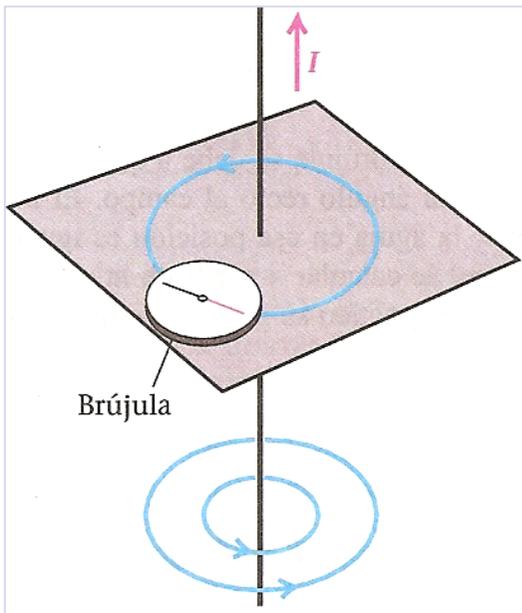
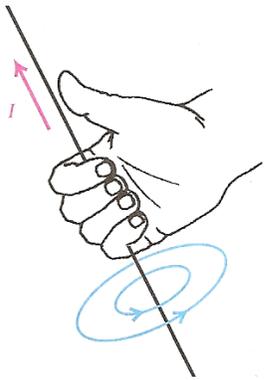




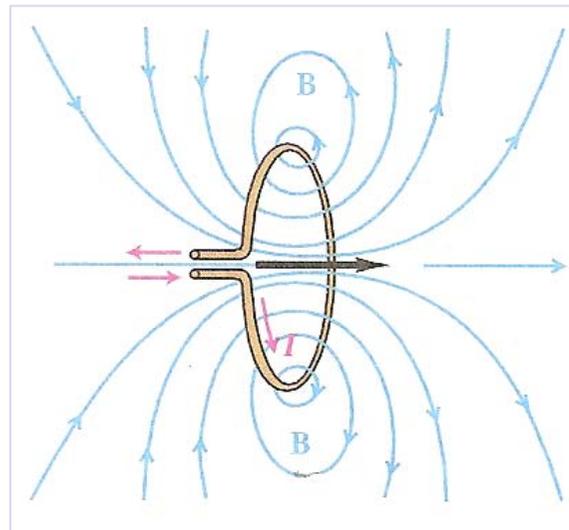
Del mismo modo, podemos considerar la orientación de una brújula alrededor de una corriente eléctrica.

En este caso las líneas de campo magnético son circulares con centro en el conductor.

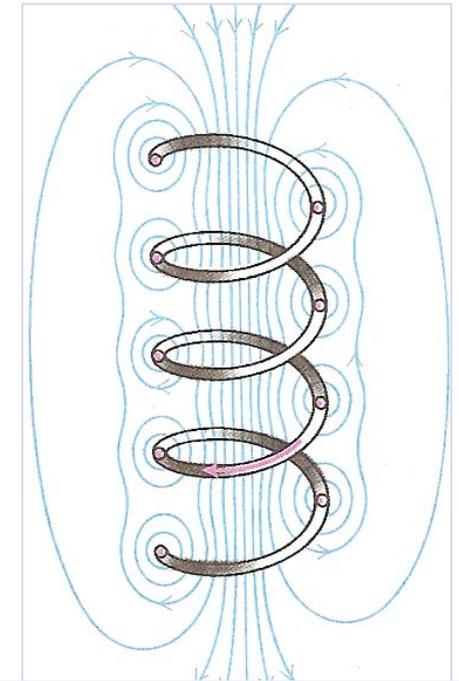
La unidad de campo magnético es el **Tesla** (T) y un submúltiplo es el **Gauss** (G), $1 \text{ G} = 10^{-4} \text{ T}$. El modulo del campo magnético terrestre es de unos 0.5 G.



Campo magnético generado por conductor rectilíneo



Campo magnético generado por una espira circular



Campo magnético generado por un solenoide



10.2 Fuerza sobre una Carga en Movimiento

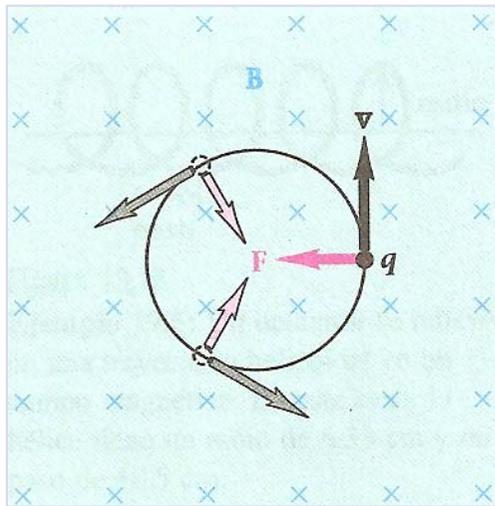
Si una carga q se desplaza con velocidad \vec{v} en un campo magnético \vec{B} , experimentará una fuerza \vec{F} , cuya expresión es la siguiente:

$$\vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B}$$

El módulo de la fuerza es:

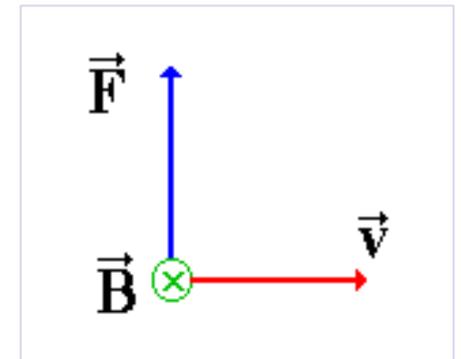
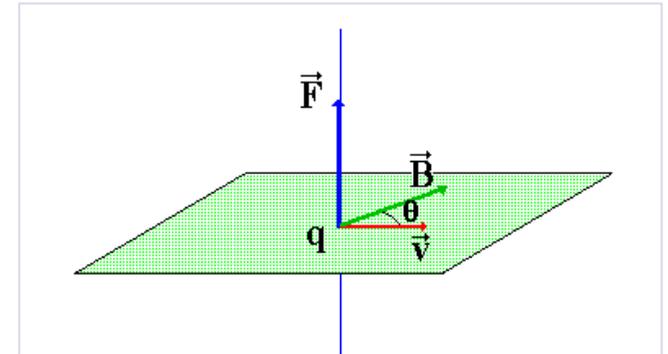
$$F = q v B \sin \theta$$

donde θ es el ángulo formado por los vectores \vec{v} y \vec{B} . La fuerza es máxima si θ es 90° y nula en el caso que sea 0° ó 180° .



La Fuerza Magnética es perpendicular al movimiento, cambia la dirección en la cual se mueve la partícula.

El Trabajo realizado por la Fuerza Magnética sobre la partícula es cero, por lo tanto su Energía Cinética no cambia y, en consecuencia, el módulo de la velocidad permanece inalterado.





10.3 Fuerza sobre una Corriente Eléctrica

Fuerza sobre un Conductor Rectilíneo

Supongamos un conductor recto que transporta una corriente \mathbf{i} colocado en un campo magnético $\vec{\mathbf{B}}$.

Una carga $d\mathbf{q}$ se desplaza con una velocidad media \mathbf{v} en el mismo sentido de la corriente:

$$i = \frac{dq}{dt} \Rightarrow dq = idt$$

La fuerza magnética asociada a $d\mathbf{q}$ es:

$$d\vec{\mathbf{F}} = dq \vec{\mathbf{v}} \times \vec{\mathbf{B}}$$

Reemplazando $d\mathbf{q}$, se obtiene:

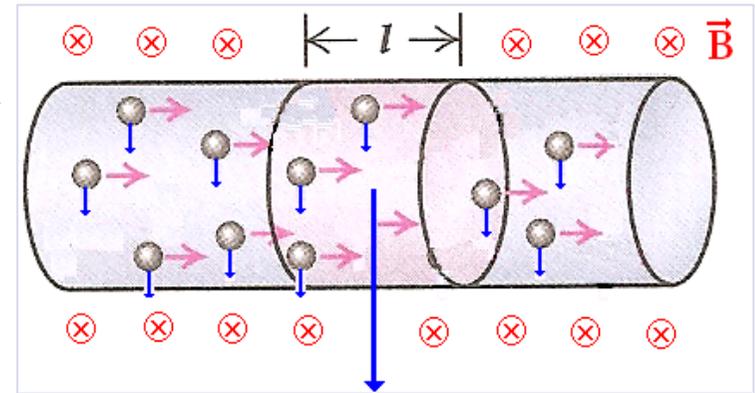
$$d\vec{\mathbf{F}} = i dt \vec{\mathbf{v}} \times \vec{\mathbf{B}}$$

Definimos el vector \mathbf{l} del siguiente modo:

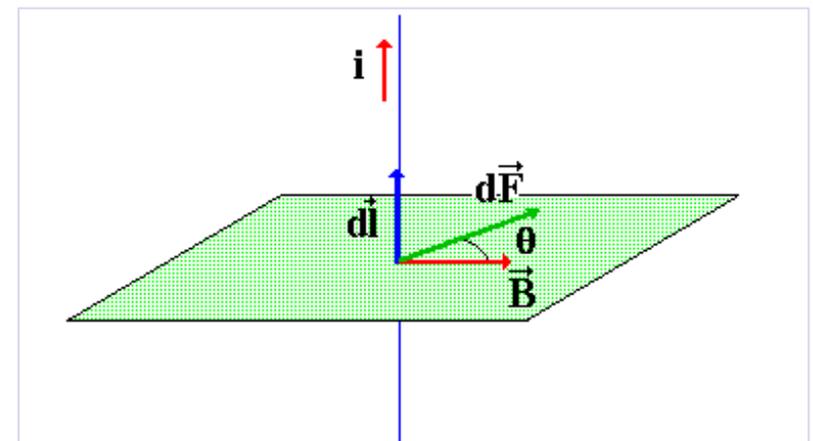
Módulo: la longitud del conductor.

Dirección: la recta de la cual forma parte el conductor.

Sentido: el de la corriente eléctrica.



Fuerza magnética sobre cargas en movimiento en un conductor y Fuerza Resultante sobre el conductor





Si se tiene en cuenta que:

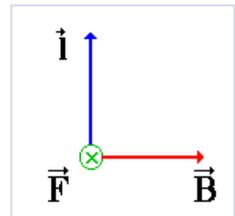
$$d\vec{l} = v dt$$

el vector \vec{dF} puede ser escrito:

$$d\vec{F} = i d\vec{l} \times \vec{B}$$

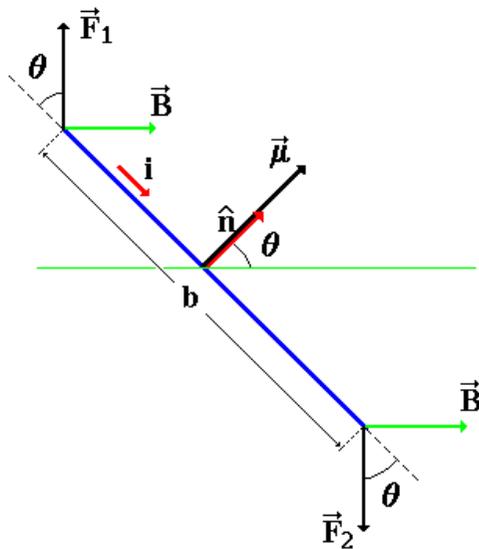
Integrando esta expresión para el conductor la **fuerza magnética** sobre el conductor será:

$$\vec{F} = i \vec{l} \times \vec{B}$$

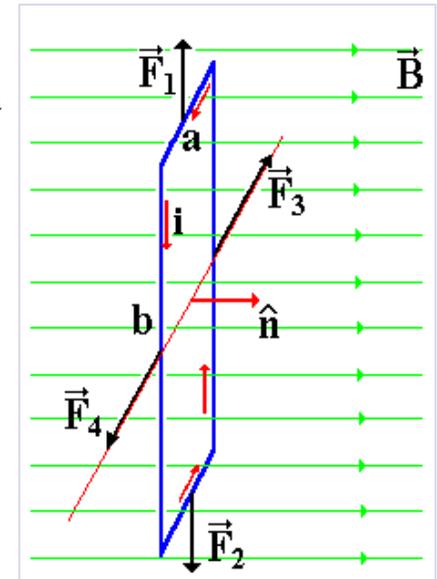


Fuerza sobre una espira. Dipolos magnéticos

Aplicamos lo visto para calcular la fuerza sobre una espira rectangular, colocada en un campo magnético \vec{B} , de lados a y b , que transporta una corriente i . El vector \hat{n} , normal a la espira indica



su orientación en el espacio. Es un vector unitario perpendicular a la espira. Su sentido se determina utilizando la regla de la mano derecha. Si \hat{n} es paralelo a \vec{B} , la espira se encuentra en equilibrio. Sin embargo cuando forma



un ángulo θ con \vec{B} (figura de la derecha) las fuerzas \vec{F}_1 y \vec{F}_2 producirán un momento de rotación $\vec{\tau}$ sobre la espira, tendiente a orientarla con el campo exterior.



Los módulos de las fuerzas sobre la espira son:

$$F_1 = F_2 = iaB$$

$$F_3 = F_4 = ibB$$

En la situación representada anteriormente, los momentos no nulos actuantes sobre la espira son los ejercidos por las fuerzas \mathbf{F}_1 y \mathbf{F}_2 . Sus módulos, respecto a un eje transversal que corta por la mitad los lados de la espira de longitud \mathbf{b} , respectivamente, son:

$$\tau_1 = F_1 \frac{b}{2} \sin\theta \quad \text{y} \quad \tau_2 = F_2 \frac{b}{2} \sin\theta$$

Teniendo en cuenta que el módulo de ambas fuerzas es iguales y que ambos momentos originan giros con el mismo sentido, el momento resultante será

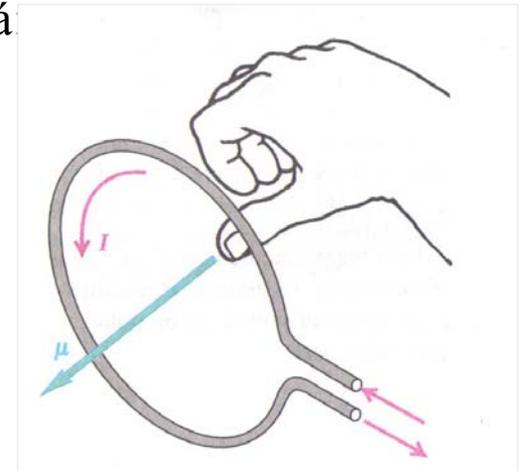
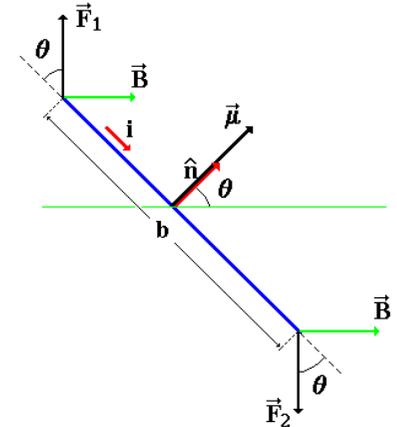
$$\tau_r = 2 F_1 \frac{b}{2} \sin\theta = i ab B \sin\theta$$

Se define **momento dipolar magnético** de una espira, que delimita un Área \mathbf{A} y transporta una corriente \mathbf{i} , al vector:

$$\vec{\mu} = Ai \hat{n}$$

Para el caso particular de la espira en estudio:

$$\vec{\mu} = i ab \hat{n}$$





Finalmente podemos asociar $\vec{\tau}_r$ y $\vec{\mu}$ de la siguiente manera:

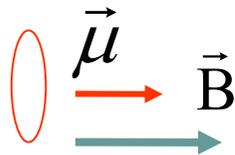
$$\vec{\tau}_r = \vec{\mu} \times \vec{B}$$

Expresión similar a la obtenida en el caso del dipolo eléctrico.

También del mismo modo que en el problema eléctrico, puede demostrarse que la energía potencial asociada a un dipolo magnético en un campo magnético es:

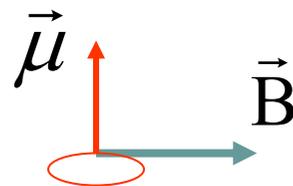
$$U = - \vec{\mu} \cdot \vec{B}$$

El nivel $U = 0$ corresponde a la espira orientada de tal modo que el momento dipolar es perpendicular al campo exterior (conclusión análoga al caso del dipolo eléctrico).



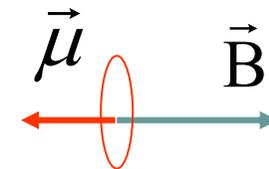
$$\tau = 0$$

$$U = -\mu B \text{ (mínima)}$$



$$\tau = \mu B \text{ (máximo)}$$

$$U = 0$$



$$\tau = 0$$

$$U = \mu B \text{ (máxima)}$$



11.4 Campos magnéticos producidos por corrientes

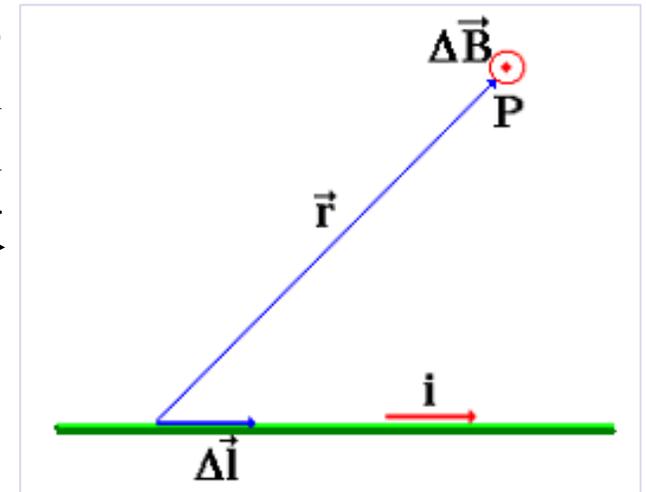
La ley de Biot-Savart da la expresión del campo magnético generado por una corriente eléctrica en un punto del espacio a su alrededor \mathbf{P} . Si consideramos un elemento de longitud $\Delta\vec{\mathbf{l}}$ perteneciente a un conductor que transporta una corriente \mathbf{i} , el campo magnético $\Delta\vec{\mathbf{B}}$ debido a este elemento de longitud en el punto \mathbf{P} , es:

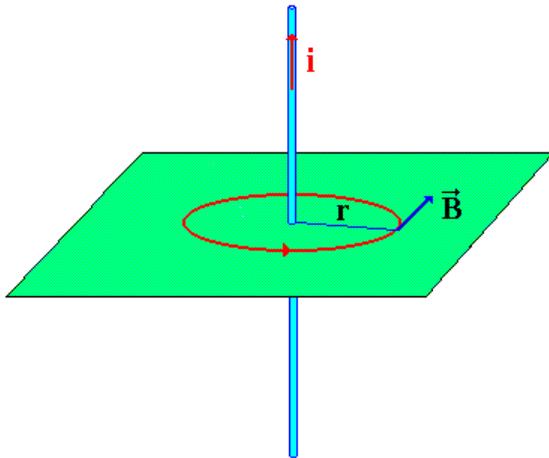
$$\Delta\vec{\mathbf{B}} = \frac{k}{2} \mathbf{i} \frac{\Delta\vec{\mathbf{l}} \times \hat{\mathbf{r}}}{r^2}$$

donde la constante k es $2 \times 10^{-7} \text{ T m A}^{-1}$.

En esta expresión de la Ley de Biot-Savart, $\hat{\mathbf{r}}$ es un vector unitario en la dirección del vector $\vec{\mathbf{r}}$ que va desde el origen de $\Delta\vec{\mathbf{l}}$ al punto \mathbf{P} .

El campo magnético resultante en el punto \mathbf{P} , será la suma (integral) de todas las contribuciones diferenciales individuales, hasta completar el recorrido de todo conductor. Del mismo modo que la Ley de Coulomb, la Ley de Biot-Savart da una dependencia del campo con el inverso del cuadrado de la distancia, sin embargo en el caso del problema magnético el cálculo del campo es más complejo al estar involucrados productos vectoriales.

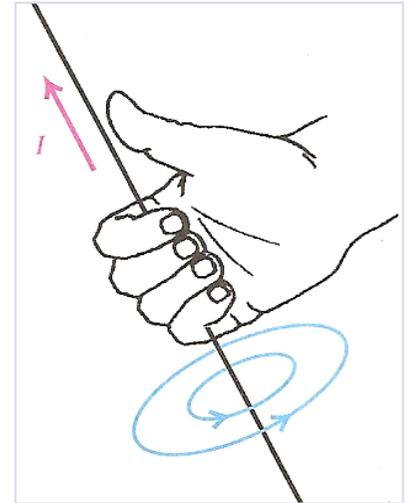




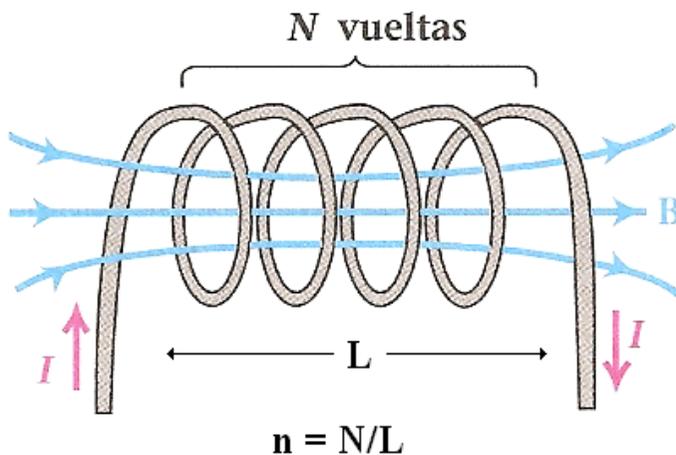
Para un conductor rectilíneo la **Ley de Biot-Savart**, conduce a la siguiente expresión final para el campo magnético **B** a una distancia **r** del conductor:

$$B = \frac{k i}{r}$$

el sentido del campo se desprende de la siguiente regla:



Regla de la Mano Derecha: tomando al conductor con esta mano, de modo que el pulgar coincida con el sentido de **i**, el resto de los dedos abrazan al conductor en igual sentido que las líneas de campo.



En el interior de un **solenoid**, con **n** vueltas por unidad de longitud, la aplicación de la Ley de Biot-Savart conduce a que el módulo de **B** es:

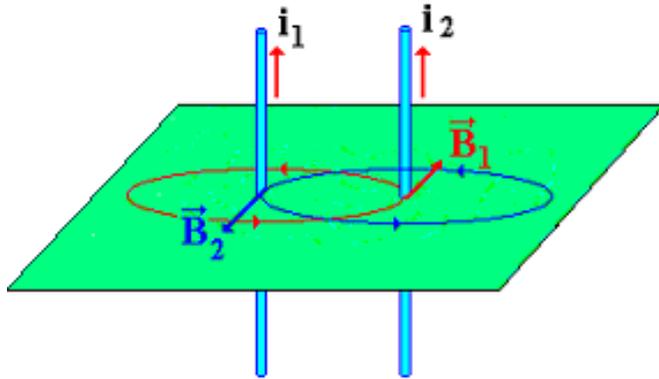
$$B = n\mu_0 i$$

la constante μ_0 se denomina **permeabilidad magnética** y su valor es:

$$k = \frac{\mu_0}{2\pi}$$



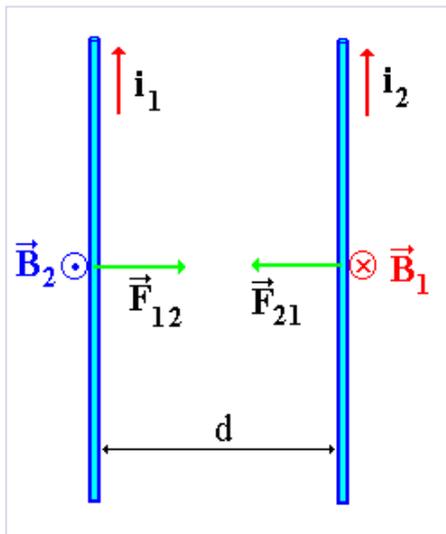
10.5 Fuerza entre Conductores Paralelos



Sean dos conductores de longitud l , con corrientes i_1 e i_2 paralelas, separados una distancia d . El conductor 1 (izquierda) genera un campo magnético \vec{B}_1 en la posición donde se encuentra el 2 (derecha). Por lo tanto, existe una fuerza, \vec{F}_{21} , sobre el conductor 2 con sentido hacia el primer conductor. El efecto inverso es producido por el conductor 2 sobre el 1.

Los módulos de los respectivos campos son:

$$B_1 = \frac{\mu_0 i_1}{2\pi d} \quad \text{y} \quad B_2 = \frac{\mu_0 i_2}{2\pi d}$$

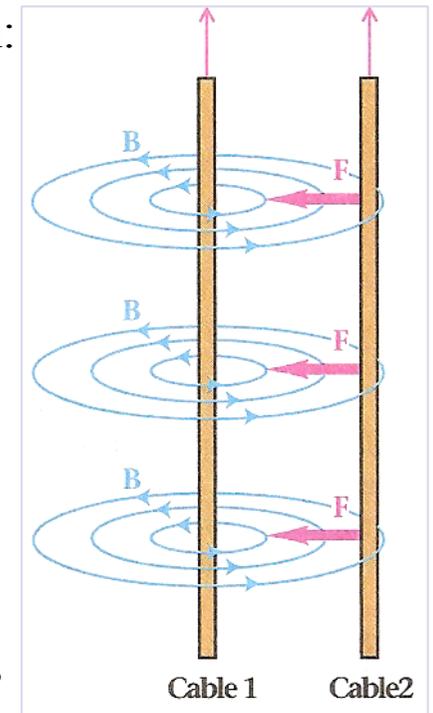


El módulo de cada fuerza es:

$$F_{21} = i_2 l B_1 = \frac{\mu_0 l i_1 i_2}{2\pi d}$$

$$F_{12} = i_1 l B_2 = \frac{\mu_0 l i_1 i_2}{2\pi d}$$

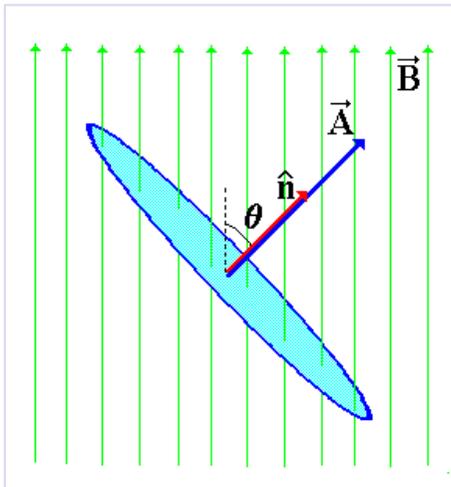
Las fuerzas sobre los conductores tienen igual módulo y dirección, siendo su sentidos opuestos.





Puede demostrarse que si las corrientes en los conductores fueran **antiparalelas** (sentido contrario), entre los conductores se genera una fuerza de repulsión.

10.6 Inducción Magnética. Ley De Faraday

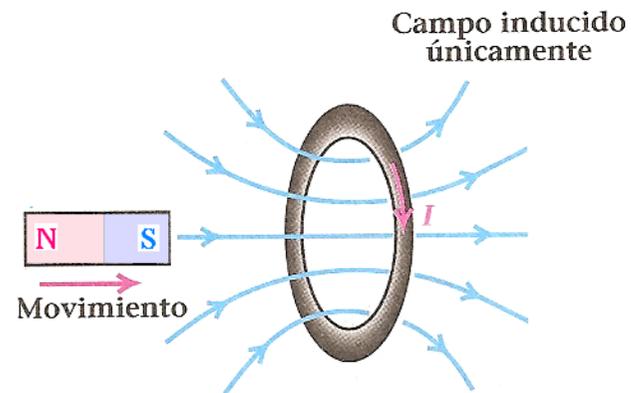
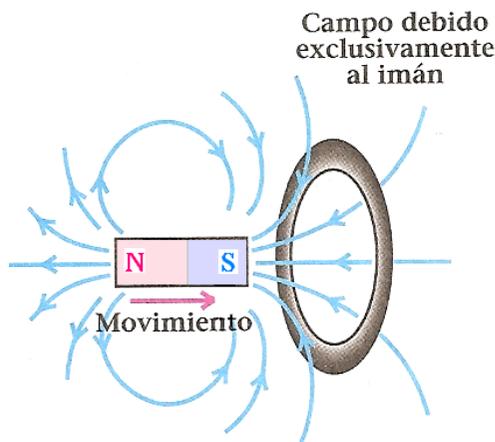


Sea una espira circular de área A situada en un campo magnético \mathbf{B} . Si \hat{n} es un vector unitario normal a la superficie determinada por la espira, el área A podemos expresarla vectorialmente del siguiente modo:

$$\vec{A} = A \hat{n}$$

Se define **flujo del campo magnético** a través de la espira a:

$$\phi_B = \vec{B} \cdot \vec{A} = B A \cos \theta$$



Quando hay un **cambio en el flujo magnético** en una espira conductora, se **induce** en ésta una fuerza electromotriz. Este fenómeno es conocido como **inducción magnética**.



La **Ley de Faraday** da la expresión analítica del valor de la **fem** inducida en una espira, en función del cambio de flujo magnético en su interior:

$$\mathcal{E} = - \frac{d\phi_B}{dt}$$

Cuando cambia el flujo magnético en el interior de una bobina de **N** vueltas, la ecuación anterior se generaliza, siendo la **fem** inducida:

$$\mathcal{E} = -N \frac{d\phi_B}{dt}$$

El signo menos, en la **Ley de Faraday**, tiene como significado el siguiente principio físico:

Ley de Lenz: el sentido del campo magnético producido por la fem inducida sobre la espira se opone a la variación de flujo en el interior de la misma.

