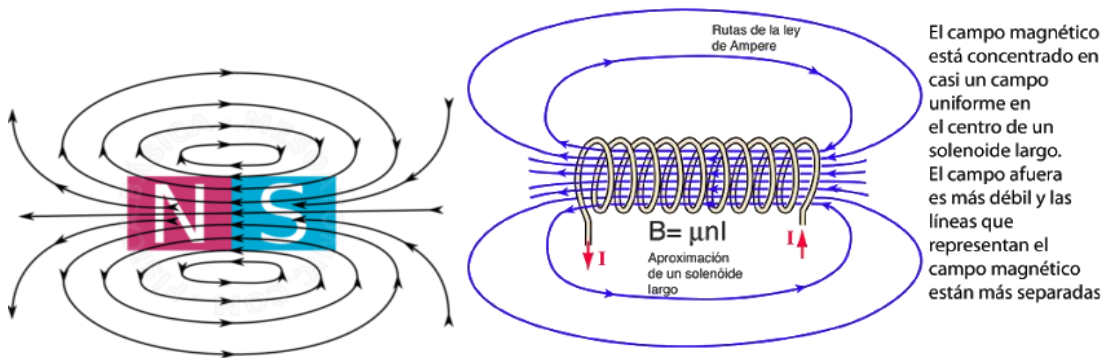


## Unidad VI : Campo Magnético (Magnetostática)

En ésta unidad veremos otro de los campos de acción a distancia, el campo magnético, específicamente, la **acción que ejerce el mismo** sobre la materia.

En la **unidad VII** veremos las **fuentes del campo magnético**, es decir, como se genera.

Los campos ya vistos (gravitatorio y electrostático) poseen líneas de fuerzas abiertas, es decir, poseen un origen y un final, en éste caso las líneas son cerradas, no poseen principio ni fin, no se generan en un punto ni mueren en otro punto. No existen monopolos magnéticos, como en los otros campos (carga positiva y negativa en el campo electrostático y masa en el gravitatorio).



Las líneas de acción del campo magnético siempre salen del polo norte e ingresan al polo sur y pueden ser producidas por un imán (natural o artificial) o la corriente eléctrica. En el diagrama de la derecha vemos una bobina (rollo de conductor) por la que circula una corriente I, donde el polo norte estaría a la izquierda.

Todas las máquinas eléctricas industriales (generadores y motores) necesitan altos campos magnéticos, por cuya razón hay que generarlos mediante las bobinas.

El **campo magnético o inducción magnética** se representa con la letra **B**, también llamado **densidad de flujo magnético ( $\Phi_m$ )** (cantidad de líneas de fuerza que pasan por unidad de superficie (S)), o sea  $B = \Phi_m / S$ .

Las **características de las líneas del campo magnético B** son:

- Sus líneas de acción son cerradas, no poseen principio ni fin.
- No existen monopolos magnéticos, es imposible dividir un imán en un polo norte y un sur.
- Sus líneas de acción no producen trabajo sobre las cargas eléctricas, es un campo no conservativo, a diferencia del electrostático y gravitatorio (son conservativos).
- La integración (sumatoria) sobre una superficie cerrada (de sus líneas de acción) es cero, a diferencia del campo electrostático en que dicha integración puede ser nula (si no existen cargas en su interior) o poseer un valor que identifica a las cargas contenidas en dicha superficie cerrada. (Recordar la Ley de Gauss.)

O sea: 
$$\iint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0 = \iint \varnothing_m = 0$$

**Unidades:**

El campo magnético se mide en **Tesla (T)** (en el sistema MKS), y en **Gauss (G)** (en el CGS).

La Tesla se define como la inducción de un **campo magnético** que ejerce una fuerza de 1 N (**newton**) sobre una **carga** de 1 C (**culombio**) que se mueve a velocidad de 1 m/s dentro del campo y perpendicularmente a las líneas de inducción magnética.

$$1 \text{ T} = 1 \text{ N} / (\text{Coul. m/seg.}) = \text{N} / \text{A m}$$

Observar que en dicha definición se involucra la carga eléctrica y el movimiento de la misma, o sea la corriente eléctrica.

$$1 \text{ T} = 10.000 \text{ Gauss}$$

**Fuerza magnética:**

Las líneas del campo magnético ejercen **fuerzas sobre las cargas eléctricas**, siempre que éstas estén **en movimiento** y que el mismo no sea paralelo a las líneas de campo.

$$\mathbf{F} = q \mathbf{v} \times \mathbf{B} = q v B \text{ seno } \theta \quad \text{donde;}$$

F: Fuerza (Newton)

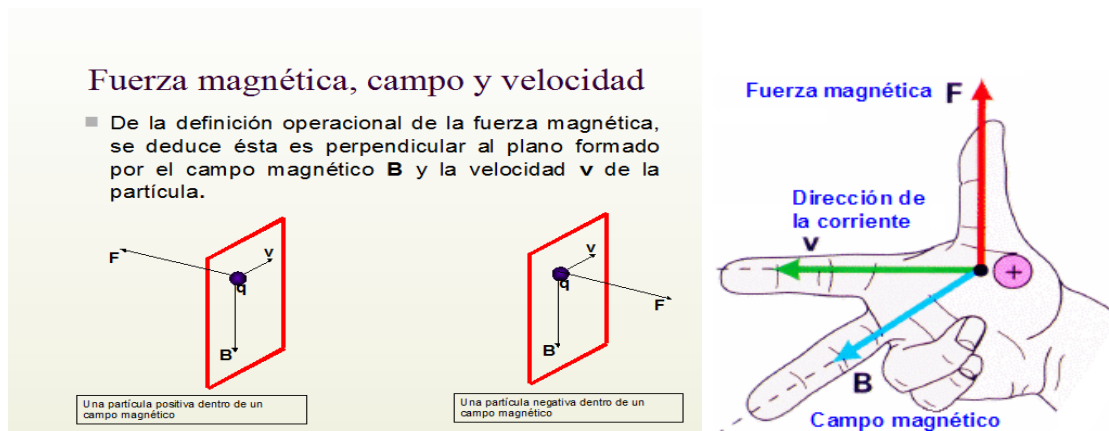
q: carga (Coulomb)

v: velocidad de la carga (m/seg)

B: Campo magnético (Tesla)

θ : ángulo entre el vector velocidad y campo magnético

Observar que es un producto vectorial entre v y B, máximo cuando ambos son perpendiculares y nulo cuando ambos son paralelos o colineales.



En la imagen derecha vemos la regla de la mano derecha para determinar la dirección y sentido de la fuerza (para una carga positiva), si la carga fuera negativa, la fuerza se ra en el otro sentido, pero siempre perpendicular al plano formado por v y B.

Cuando una carga eléctrica se somete a la **acción de un campo magnético y eléctrico** simultáneamente aparece la superposición de ambas fuerzas, o sea:

$$\mathbf{F} = q \mathbf{E} + q \mathbf{v} \times \mathbf{B} = q (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad \text{donde E es el campo eléctrico en N/Coul o Volt /m.}$$

## Movimiento de cargas en un campo B

Cuando una carga eléctrica ( $q$ ) ingresa perpendicular a un campo constante  $B$ , aparecen fuerzas magnéticas sobre la misma ( $F=q \mathbf{v} \times \mathbf{B}$ ) que la desvían de su trayectoria en dirección perpendicular al plano generado por  $\mathbf{v}$  y  $\mathbf{B}$  y en un sentido dependiente de su carga (+ o -). **Si la carga no sale del campo B**, comenzará a girar en círculo (ciclotrón) con una **aceleración normal** o centrípeta al plano generado entre  $\mathbf{v}$  y  $\mathbf{B}$  ( $a_{\text{centripeta}} = v^2 / R$ ), donde **R es el radio del círculo**.

Al quedar la carga girando en círculo se igualan las fuerzas magnéticas ( $F = q \mathbf{v} \times \mathbf{B}$ ) y centrípetas o normal ( $F = m v^2 / R$ ), o sea:

$$F = q \mathbf{v} \times \mathbf{B} = m v^2 / R ; \quad m: \text{ masa de la carga}$$

de donde:

$$R = m v / q B$$

y la **velocidad angular ( $\omega$ )** que tendrá la carga será:  $\omega = v / R = q B / m$  independiente de R.



### Partícula cargada con velocidad perpendicular al campo magnético uniforme

Cuando una partícula cargada penetra perpendicularmente en un campo magnético uniforme, comenzará a experimentar una fuerza que la obligará a cambiar la dirección de su vector velocidad y no de su módulo (rapidez o celeridad), provocando que se desplace describiendo un movimiento circular uniforme.

## Fuerza sobre un conductor recto (con corriente)

Considerando que la corriente está formada por **n portadores** (electrones en los metales) **en un determinado volumen** (área longitud) del conductor, la fuerza que ejerce el campo magnético sobre un conductor por el que circula corriente será:

$$F = n A \text{ long. } (q v_d \times B) \text{ (Newton) donde:}$$

$n$  : portadores de carga (electrones en los metales).

$A$ : área transversal del conductor por el que circula corriente( metros<sup>2</sup>).

long.: longitud del conductor inmerso en el campo B( metros).

$q$ : carga de cada uno de los  $n$  de los portadores( Coulomb).

$v_d$ : velocidad de deriva (velocidad de los portadores dentro del conductor) ( m/seg).

$B$  : campo magnético.( Tesla).

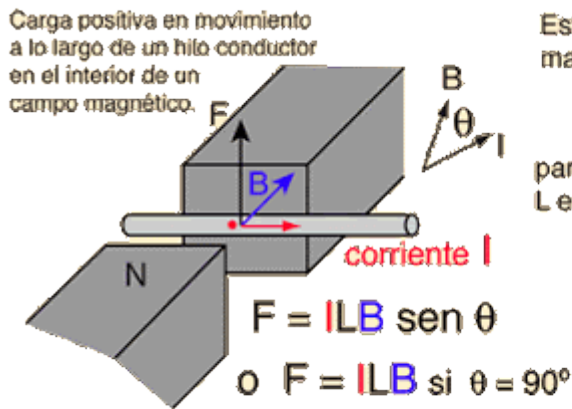
Considerando que la densidad de corriente ( $J$ ) es:  $J = n q v_d$ , nos queda:

$$F = J A \text{ long. } \times B \quad \text{y como } J A = I \quad \text{queda finalmente:}$$

$$F = I \text{ long} \times B = I \text{ long} B \text{ sen } \theta \text{ (Newton) donde:}$$

I : es la corriente por el conductor (en Ampere).

$\theta$ : es el ángulo entre el vector  $v_d$  de la corriente y el campo B.



Esta fórmula procede de la fuerza magnética básica:

$$F = qvB \text{ sen } \theta$$

para una carga q viajando una longitud L en un cable, se puede escribir

$$F = q \frac{L}{t} B \text{ sen } \theta$$

$$F = \frac{q}{t} LB \text{ sen } \theta$$

$$F = ILB \text{ sen } \theta$$

Conceptualmente es fundamental saber que si se cambia el sentido de la corriente o el campo, cambia el sentido de la fuerza:

Regla de la mano izquierda: el campo ingresa por la palma de la mano, el sentido de la corriente la indica el dedo mayor, la fuerza será el pulgar.

Regla de mano derecha: el pulgar es la corriente, el mayor es el campo y la fuerza es un vector que sale de la palma de la mano.

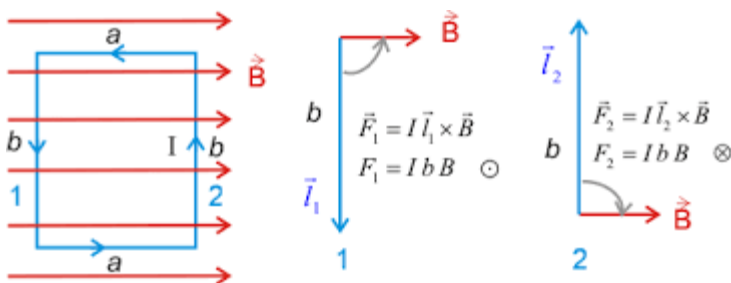
Ésta fórmula es de suma importancia ya que determina, por ejemplo en un motor, la fuerza tangencial que sobre los conductores del rotor ejerce el campo magnético del estator. En el caso de un parlante, ésta será la fuerza (que moverá el cono) producida entre la bobina del mismo (por donde circula corriente alterna de 20 Hz 16 Khz, frecuencias audibles) y el imán que posee.

### Momento sobre una espira

Si aplicamos sobre a la espira (rectangular, con I en sentido antihorario) el concepto de fuerza sobre un conductor, en las cuatro aristas, vemos que sobre las paralelas al campo (a) no existirán fuerzas ( $\theta=0$  o  $180^\circ$ ,  $\text{seno } 0 = 0$ ,  $\text{seno } 180 = 0$ ). Las fuerzas serán máximas ( $\theta=90$ ) sobre el lado  $b_1$  (salientes del plano) y sobre el lado  $b_2$  (entrantes al papel). Ambas fuerzas no desplazan la espira, sino que la hacen rotar en sentido horario. Se genera una cupla (torque o momento), respecto al eje (en la mitad de a) igual a:  $\tau = 2 F \cdot a/2$  y siendo  $F = I b B$  ( $\theta=90$ ) queda:

$\tau = I b B a$  siendo b.a el área (A) de la espira, finalmente queda:

$$\tau = I A \times B \text{ (Joule)}$$



O sea: la cupla sobre la espira es proporcional al área de la misma, a la corriente circulante y al valor del campo magnético donde está inmersa.

**A es un vector** cuyo módulo es el valor del área, la dirección es perpendicular al plano formado por B e I y el sentido se determina por la regla del tirabuzón (en éste caso, saliente del plano).

**Momento dipolar magnético ( $\mu$ ):** se lo define como el producto entre la corriente de la espira y el vector área, o sea:  $\mu = I A$  lo que determinaría el torque sobre una espira como:

$$\tau = \mu \times B$$

$\mu$  es un vector que en un imán va del polo sur al polo norte. El campo magnético B de un imán es proporcional a  $\mu$ .

El concepto de momento dipolar magnético es muy utilizado en las estructuras atómicas y moleculares de la materia. Por ejemplo, un electrón girando posee un momento dipolar magnético dado por su carga en movimiento (corriente) y el área generada por su giro alrededor del núcleo del átomo.

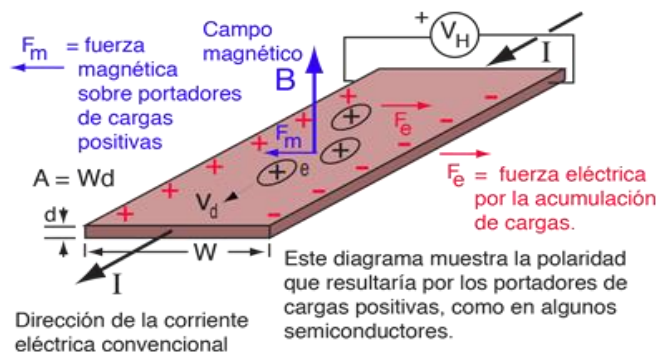
### Energía potencial de un dipolo magnético:

De manera similar que un dipolo eléctrico colocado en un campo E genera una energía potencial electrostática  $U = -p \cdot E$ ; donde p es un vector que va de la carga negativa hacia la positiva, en el magnetismo cuando se alinean el momento dipolar magnético de una espira de corriente con un campo B externo se genera una **energía potencial magnética (U)** igual a:

$$U = -\mu \cdot B \text{ (Joule)}$$

### Efecto Hall

Se denomina así al fenómeno de separación de cargas (pos. y neg.) que circulan por un conductor al atravesar un campo magnético B. Las cargas separadas generan un campo eléctrico E que dan origen a una fuerza  $F_e$  que cuando se equilibra con la fuerza magnética  $F_m$  (estado estacionario) da origen a un voltaje Hall ( $V_H$ ) cuya medición es utilizada para determinar el campo B (conocida la I) o los portadores de carga (conociendo la I y B).



Obs: la I y el campo B son perpendiculares entre sí.

En estado estacionario (luego de un tiempo), la fuerza  $F_e = F_m$ , o sea  $q E = q v_d B$ , de donde el campo E, llamado campo Hall  $E_H = v_d B$  donde  $v_d$  es la velocidad de los portadores de carga.

Recordando que  $v_d = I / n q A$  nos queda  $E_H = I B / n q A$  y como la tensión (V) es el campo (E) por la distancia (W) queda

$$V_H = E_H W = I B W / n q A = v_d B W \quad \text{donde:}$$

$V_H$ : voltaje Hall a medir. (voltios)

$I$ : corriente que circula por el conductor plano (Ampere)

$B$ : campo magnético conocido o a medir (tesla)

$W$ : ancho del conductor plano (metros).

$v_d$ : velocidad de deriva (velocidad de los portadores dentro del conductor) (m/seg)

$q$ : carga de los portadores.(Coulomb)

$A$ : área transversal a la corriente  $I$  ( $W d$ ) en  $m^2$

El efecto Hall es muy utilizado en sensores para medición de: campos magnéticos, corriente continua (sin contacto), velocidad angular, portadores de carga, etc.