

# Introducción a los conceptos sobre Fuerza Magnética y Campo Magnético.

*Profesor Eduardo Abraham  
Escárcega Pliego\**

---

\*Colegio de Ciencias y Humanidades, plantel sur, Universidad Nacional Autónoma de México. Correo-e: [eaep@comunidad.unam.mx](mailto:eaep@comunidad.unam.mx); [eaepgm@gmail.com](mailto:eaepgm@gmail.com). Esta obra se distribuye bajo una licencia Creative Commons tipo Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 México, . Consulte la siguiente página en internet para conocer los terminos de licenciamiento: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/mx/>. Usted es libre de compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra bajo los terminos siguientes: (a) **Atribución** – Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra). (b) **No Comercial** – No puede utilizar esta obra para fines comerciales. (c) **Sin Obras Derivadas** – No se puede alterar, transformar o generar una obra derivada a partir de esta obra.

# Índice

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. Fuerza magnética.</b>   | <b>2</b>  |
| <b>2. Campo magnético</b>   | <b>5</b>  |
| <b>3. Fuerza magnética sobre una partícula con carga eléctrica en el vacío que se mueve en un campo magnético uniforme.</b> | <b>16</b> |
| <b>4. Momento de torsión de una espira conductora con corriente en un campo magnético.</b>                                  | <b>18</b> |
| <b>5. Medida del campo magnético.</b>   | <b>22</b> |
| <b>6. Bibliografía</b>  | <b>26</b> |

---

## 1. Fuerza magnética.

La fuerza magnética tiene su origen en el movimiento de la carga. Un par de hilos conductores rígidos en el vacío, de longitud infinita, orientados paralelamente, separados una distancia  $b$ , en los que circulan corrientes eléctricas de intensidades  $i_1$  e  $i_2$  en la misma dirección, se ejercen fuerzas sobre todo el

largo de hilos conductores expuestos cuya magnitud,  $F_m$ , depende de manera directa del producto de las corrientes eléctricas ya indicadas, así como de la longitud de hilo conductor expuesta,  $\Delta l$ , y depende de manera indirecta en la distancia entre los hilos conductores paralelos ya indicada, ver figura (1).

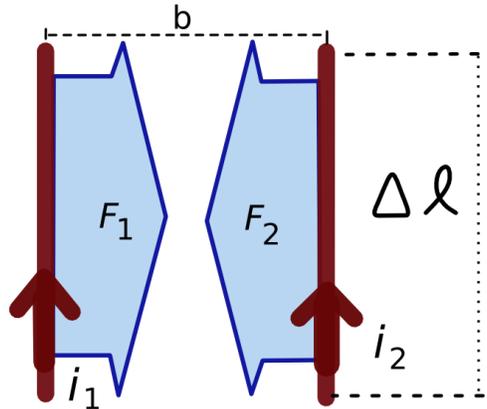


Figura 1: Fuerza magnética entre hilos conductores en el vacío rectos y paralelos con corrientes eléctricas en la misma dirección.

$$F_m = \frac{\mu_0 \Delta l i_1 i_2}{2 \pi b}$$

$$\mu_0 = 1,26 \times 10^{-6} \left( \frac{\text{Newton metro}}{\text{amper}^2 \text{ metro}} \right)$$

$\mu_0$  es una constante de proporcionalidad que permite convertir unidades de corriente eléctrica al cuadrado a unidades de fuerza, cuando la interacción de hilos conductores se da en el vacío.

Si los hilos conductores en las condiciones indicadas mantienen corrientes eléctricas en direcciones opuestas, la fuerza que se ejercen a lo largo del hilo conductor expuesto se invierte en dirección manteniendo la magnitud en la dependencia ya indicada, ver figura (2).

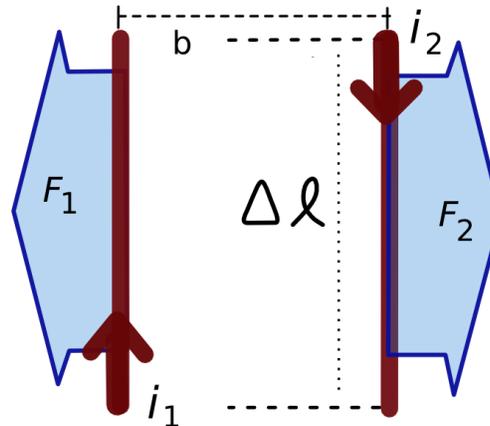


Figura 2: Fuerza magnética entre hilos conductores en el vacío rectos y paralelos con corrientes eléctricas en dirección opuesta.

Se puede hacer una descripción más amplia respecto a la geometría de los hilos conductores con corrientes eléctricas que interactúan magnéticamente,

sin embargo tal descripción sale fuera del aspecto introductorio buscado en este documento.

Hasta aquí se describe la interacción entre hilos conductores en el vacío con corrientes eléctricas, la cual afirmamos es una interacción de carácter magnético. Justificaremos esta afirmación en la sección siguiente al introducir el concepto de campo magnético.

## 2. Campo magnético

La fuerza magnética,  $\mathbf{F}_m$ , también se manifiesta sobre la corriente eléctrica de intensidad  $i$  en un hilo conductor rígido en el vacío situado entre polos opuestos de dos imanes, o entre los polos opuestos de un imán de herradura, sobre su longitud  $\Delta l$  puesta entre los imanes, ver figura (3).

Dicha fuerza magnética propone la existencia de una propiedad que se manifiesta entre los polos de los imanes indicados, *su campo magnético* de intensidad  $\mathbf{B}$ , el cual va dirigido del polo norte de uno de los imanes al polo sur del otro, ver figura (4).

La fuerza magnética es perpendicular al elemento de hilo conductor con la corriente eléctrica ya indicada,  $i\Delta l$ , y al campo magnético entre los polos opuestos de ambos imanes con intensidad  $\mathbf{B}$ , estará orientada según el sentido de giro de un tornillo con cuerda derecha, de la base del tornillo hacia su punta, a manera que el giro del vector  $i\Delta l$  hacia el vector  $\mathbf{B}$  corresponda al menor

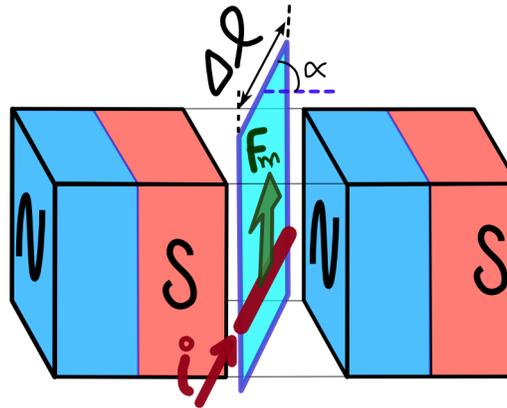


Figura 3: Fuerza sobre un elemento de corriente,  $i\Delta l$ , en un campo magnético de intensidad  $\mathbf{B}$ .

ángulo posible, en ese sentido de giro se orienta el tornillo de cuerda derecha a manera de ser atornillado, de penetrar, en esa dirección se orientará el vector de fuerza magnética  $\mathbf{F}_m$ , ver figuras (5) y (6).

La magnitud de la fuerza magnética,  $\mathbf{F}_m$ , sobre el elemento de hilo conductor rígido con corriente eléctrica,  $i\Delta l$  es directamente proporcional al producto de la corriente eléctrica,  $i$ , por la longitud de hilo conductor expuesta al campo magnético  $\Delta l$ , por la intensidad del campo magnético  $\mathbf{B}$ , y por el seno del ángulo que hacen el hilo conductor con el campo magnético entre los imanes de polos opuestos.

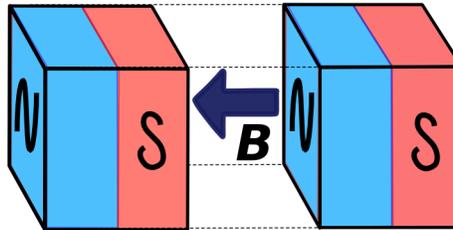


Figura 4: Dirección del vector de intensidad de campo magnético entre polos de imanes.

$$F_m = i \Delta l B \sin(\alpha)$$

Esta relación lleva a expresar a la magnitud de la intensidad del campo magnético entre los imanes ser:

$$B = \frac{F_m}{i \Delta l \sin(\alpha)}$$

La fuerza magnética sobre el elemento de hilo conductor expuesto al campo magnético es máxima cuando son perpendiculares el elemento de hilo con-

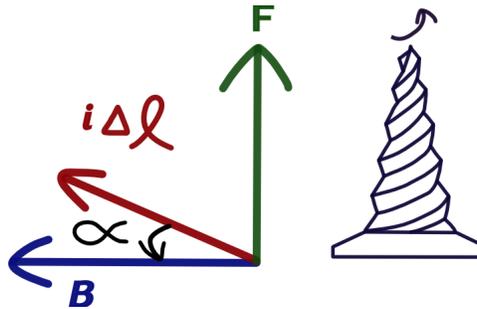


Figura 5: Orientación de la fuerza magnética.

ductor con corriente eléctrica expuesto al campo magnético y la dirección del campo magnético uniforme entre polos magnéticos opuestos, cuando  $\alpha = 90^\circ$ , con lo que  $\text{sen}(90^\circ) = 1,0$ , y.

$$F_{m_{\text{máxima}}} = i\Delta l B$$

Con ello la magnitud de la intensidad del campo magnético también puede ser expresada como:

$$B = \frac{F_{m_{\text{máxima}}}}{i\Delta l}$$

Podemos entender al campo magnético como fuerza magnética por unidad de corriente y por unidad de longitud de hilo conductor con corriente situado en

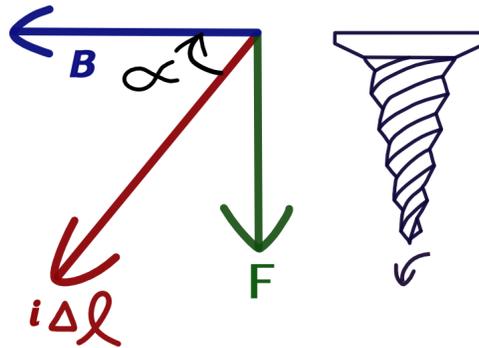


Figura 6: Orientación de la fuerza magnética.

el vacío entre los polos opuestos de imanes actuando dicha fuerza sobre el hilo conductor perpendicular al hilo conductor y perpendicular al campo magnético simultáneamente.

La propiedad vectorial que llamaremos campo magnético,  $\vec{B}$ , es nombrada también intensidad de campo magnético, inducción magnética, o intensidad de inducción magnética.

Si hay diferencia en los términos campo magnético e inducción magnética. La inducción magnética considera la condición del campo magnético en interior de un material, el cual puede variar respecto al campo magnético en el exterior de un material. Consideraremos la interacción de campos magnéticos y de hilos conductores en el vacío, lo que no establece diferencia entre los términos campo magnético e inducción magnética.

Ante la propuesta de la existencia del campo magnético entre polos opuestos de imanes, surge la necesidad de asociar esta propiedad a un elemento diferencial de hilo conductor con corriente eléctrica. La fuerza de interacción entre elementos diferenciales de hilo conductor con corrientes eléctricas ya descrita impone las propiedades geométricas que debe satisfacer el campo magnético de un elemento de hilo conductor con corriente eléctrica.

El campo magnético en elemento diferencial de hilo conductor con corriente eléctrica ha de ubicarse de manera radial a dicho elemento diferencial de hilo conductor. Si la corriente eléctrica va de positivo a negativo de abajo hacia arriba en el hilo conductor, el campo magnético será tal que visto el hilo conductor de frente, el polo norte de una brújula puesta a la izquierda del hilo conductor apunta hacia la persona que observa el fenómeno, y puesto a la derecha del hilo conductor, apunta en contra de la persona que observa el fenómeno, ver la figura (7).

La interacción entre elementos diferenciales de hilos conductores paralelos con corrientes queda explicada en base a los campos magnéticos a los que dan lugar esas corrientes. La figura (8) muestra la justificación de esta interacción en el caso de interacción entre elementos de hilos conductores en el vacío rectos y paralelos con corrientes eléctricas en la misma dirección.

La figura (9) muestra la justificación de esta interacción en el caso de interacción entre elementos de hilos conductores en el vacío rectos y paralelos con corrientes eléctricas en dirección opuesta.

Combinando las expresiones para la magnitud de la fuerza magnética entre elementos diferenciales de hilos conductores paralelos en el vacío encontrada

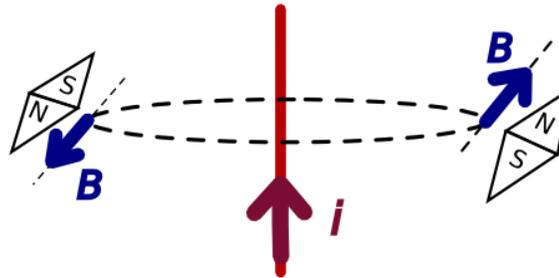


Figura 7: Campo magnético de un elemento diferencial de hilo conductor con corriente eléctrica.

por Ampère,  $F_{m_{\text{Ampère}}}$ , para hilos conductores rectos y paralelos de longitud  $\Delta l$  con la misma corriente eléctrica  $i$  en la misma dirección, separados una distancia  $b$  en los que cada elemento de hilo conductor con corriente es atraído magnéticamente por el campo magnético generado por el elemento de hilo conductor complementario, ver figura (8):

$$F_{m_{\text{Ampère}}} = \frac{\mu_0 \Delta l i^2}{2\pi b}$$

y la expresión para la magnitud de la fuerza magnética,  $F_m$ , sobre un elemento diferencial de hilo conductor de longitud  $\Delta l$  con corriente eléctrica  $i$  en un campo magnético en el vacío de magnitud  $B$  siendo perpendiculares el campo magnético y el elemento de hilo conductor con corriente eléctrica:

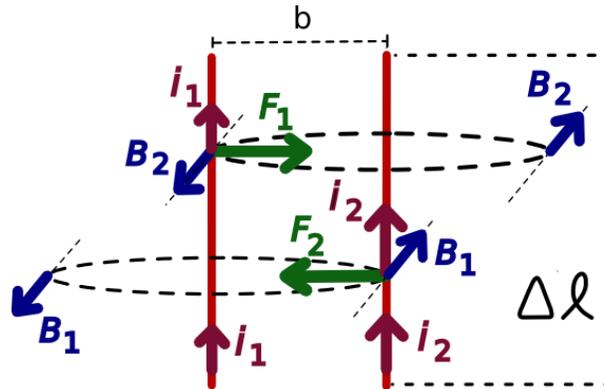


Figura 8: La interacción entre elementos diferenciales de hilos conductores paralelos con corrientes eléctricas se debe a sus campos magnéticos. Esta vez se explica la interacción entre hilos conductores rectos y paralelos con corrientes eléctricas en la misma dirección.

$$F_m = i \Delta l B$$

es posible expresar la magnitud de la intensidad de campo magnético de un elemento diferencial de hilo conductor con una corriente eléctrica en él a una distancia  $b$  en perpendicular al hilo conductor, ver la figura (10), según la deducción siguiente:

Se establece una igualdad entre ambas expresiones para la fuerza magné-

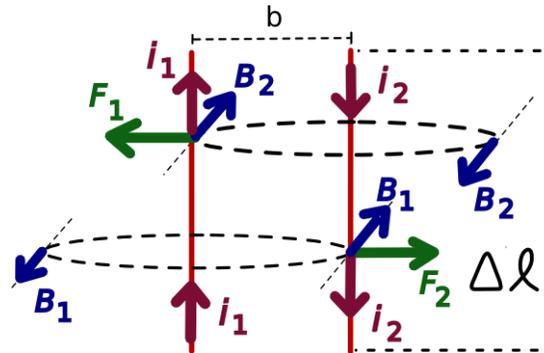


Figura 9: La interacción entre elementos diferenciales de hilos conductores paralelos con corrientes eléctricas se debe a sus campos magnéticos. Esta vez se explica la interacción entre hilos conductores rectos y paralelos con corrientes eléctricas en dirección opuesta.

tica, ya que la fuerza sobre un conductor recto y paralelo se debe al campo magnético del conductor que se halla próximo.

$$F_m = F_{m_{\text{Ampère}}}$$

se sustituyen sus expresiones.

$$i \Delta l B = \frac{\mu_0 \Delta l i^2}{2\pi b}$$

despejando la magnitud del campo magnético, B:

$$B = \frac{\mu_0 \Delta l i^2}{2 \pi b i \Delta l}$$

ó, finalmente:

$$B = \frac{\mu_0 i}{2 \pi b}$$

Esta expresión es la más simple que se tenga para la magnitud del campo magnético  $B$  de un elemento de hilo conductor recto con corriente eléctrica  $i$  a una distancia  $b$  (en paralelo) de tal elemento de hilo conductor, ver figura (10). Es conocida como la relación de *Biot y Savart* para el campo magnético de un elemento de hilo conductor con corriente eléctrica a cierta distancia de tal conductor.

La intensidad de campo magnético se mide en tesla

$$1 \text{ (tesla)} = 1 \left( \frac{\text{Newton}}{\text{amper metro}} \right)$$

La intensidad del campo magnético,  $B$ , en el centro e interior de una espira (un enrollado vuelta sobre vuelta de hilo conductor en varias capas), de  $n$  vueltas de hilo conductor aislado de radio  $r$ , con corriente eléctrica  $i$ , ver figura (2), esta dada por:

$$B = n \frac{\mu_0 i}{2 r}$$

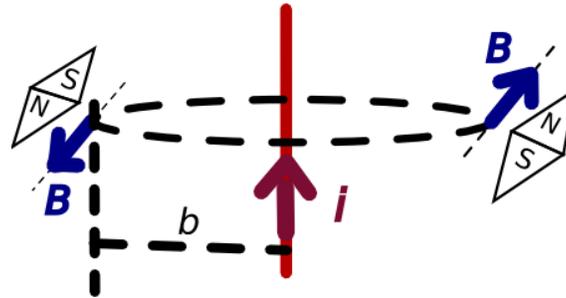


Figura 10: Campo magnético  $B$  de un elemento de hilo conductor recto en el vacío a una distancia  $b$ .

La intensidad del campo magnético,  $B$ , en el interior de un solenoide (un enrollado de vueltas de hilo conductor contiguas en espiral y en una sola capa), de  $n$  vueltas de hilo conductor aislado de radio  $r$ , con corriente eléctrica  $i$ , ver figura (12), esta dada por:

$$B = \mu_0 i n$$

### 3. Fuerza magnética sobre una partícula con carga eléctrica en el vacío que se mueve en un campo magnético uniforme.

La corriente eléctrica es carga en movimiento en un medio conductor. La carga puede moverse como un haz de partículas en el vacío, ya sea iones o cargas fundamentales en sí – electrones o protones. La carga en movimiento ha de manifestar las mismas propiedades que la corriente eléctrica que se mueve con componente de velocidad perpendicular a un campo magnético, ha de manifestar interacción electromagnética.

Una carga positiva  $q^+$  en el vacío, moviéndose con velocidad  $\mathbf{v}$  en un campo magnético de intensidad  $\mathbf{B}$  con el que la velocidad hace cierto ángulo  $\alpha$  ha de sufrir la acción de una fuerza  $\mathbf{F}_m$  la cual es perpendicular tanto al campo magnético como al la velocidad de la carga en el campo magnético, cumpliendo con la regla del producto vectorial de los vectores velocidad y intensidad de campo magnético, mencionada también como regla del tornillo con cuerda derecha.

Una carga negativa en el vacío en movimiento con cierta velocidad  $\mathbf{v}$  en un campo magnético de intensidad  $\mathbf{B}$  ha de considerarse como una carga positiva que se mueve a velocidad  $-\mathbf{v}$ , siguiendo la regla del tornillo de cuerda derecha, la fuerza magnética ha de ser opuesta en dirección a la fuerza que actuaría sobre la carga positiva moviéndose con velocidad  $\mathbf{v}$ .

En la figura (3) se muestra el comportamiento de la cargas positiva y ne-

gativa moviéndose con velocidad  $\mathbf{v}$  en perpendicular al campo magnético de intensidad  $\mathbf{B}$  que entra en el plano de la hoja, indicado por los signos  $\odot$ . La fuerza magnética va cambiando en dirección dando lugar al movimiento de las cargas en trayectorias circulares.

La fuerza magnética  $\mathbf{F}$  sobre una carga puntual positiva  $q_+$  que se mueve con velocidad  $\mathbf{v}$  en un campo magnético  $\mathbf{B}$  esta dada por:

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

Esta fuerza es perpendicular tanto al vector velocidad de la carga en un instante dado y al vector de campo magnético en un instante dado siguiendo la regla del tornillo de cuerda derecha al desplazar el vector velocidad de la carga puntual positiva hacia el vector campo magnético.

La magnitud de la fuerza magnética considerada se halla dada por:

$$F = q v B \sin(\alpha)$$

Siendo  $\alpha$  el ángulo entre el vector velocidad de la carga eléctrica y el vector de campo magnético uniforme en un instante dado.

El radio de giro  $r$  de una carga puntual  $q$  de masa  $m$  en el vacío donde se mueve con velocidad  $\mathbf{v}$  perpendicular a un campo magnético de uniforme de intensidad  $\mathbf{B}$  tiene la magnitud siguiente:

$$r = \frac{m v}{q B}$$

Obtenida de igualar la magnitud de la fuerza magnética sobre la carga puntual  $F = qvB$  con la fuerza centrípeta que permite el movimiento de la carga puntual en la trayectoria circular  $F = m\frac{v^2}{r}$ .

## 4. Momento de torsión de una espira conductora con corriente en un campo magnético.

El momento de torsión causado por la fuerza magnética que actúa sobre la corriente eléctrica en elementos de hilo conductor en forma de espira con un eje de giro sobre el plano de tal espira expuesta puesta en un campo magnético explica el funcionamiento de varios dispositivos importantes de uso tecnológico, como el motor electromagnético y el galvanómetro.

Un hilo conductor con corriente eléctrica puede experimentar la acción de una fuerza cuando se le pone en un campo magnético. Si una espira cerrada de hilo conductor con corriente se le suspende idealmente en un campo magnético a manera tal que haya elementos de hilo conductor con corriente teniendo componente perpendicular a la dirección del campo magnético, entonces la fuerza magnética no nula que actúa sobre estos elementos de hilo conductor con corriente en la espira, produciendo un momento de torsión resultante no nulo que hace girar la espira respecto al eje de giro que se le ha impuesto, ver figura (4).

La figura (4) muestra una vista superior de la espira con corriente eléctrica

puesta en un campo magnético uniforme y las fuerzas magnéticas sobre ambos lados de la espira. Si es la misma corriente eléctrica y se tiene el mismo largo de elemento de hilo conductor expuesto al campo magnético por cada lado de la espira rectangular y varía la dirección de la corriente eléctrica en cada elemento de hilo conductor en la espira, la regla de la mano derecha indica que estas fuerzas apuntarán en direcciones opuestas sobre ambos elementos de hilo conductor con corriente eléctrica de la espira, de modo que la espira no experimentará fuerza neta en absoluto. Sin embargo, la espira experimentará un momento de torsión neto que tiende a hacerla girar en la dirección del movimiento de las manecillas del reloj alrededor del eje vertical.

En la figura (4) se muestra que el momento de torsión es máximo cuando la normal al plano de la espira es perpendicular al campo magnético uniforme, dado a que es máximo el brazo de palanca de cada una de las fuerzas en las partes 1 y 2 de la espira rectangular, y que el momento de torsión es cero cuando la normal al plano de la espira es paralela a la dirección del campo magnético uniforme, dado que las fuerzas que se ejercen sobre el lado 1 y el lado 2 de la espira rectangular tienen una línea de acción que pasa por el eje de giro de la espira.

Así, cuando una espira conductora con corriente eléctrica se coloca en un campo magnético uniforme, la espira tiende a girar de modo tal que su normal se alinea con el campo magnético. La espira con corriente eléctrica se comporta como un imán suspendido en un campo magnético, como la aguja de una brújula, ya que un imán gira para alinearse a sí mismo con el campo magnético.

Determinemos la magnitud del momento de torsión de la espira. Hay dos elementos de hilo conductor con corriente eléctrica que forman parte de la espira rectangular, con una longitud  $\Delta l$ , que se mantienen siempre haciendo ángulo recto con el campo magnético uniforme entre los imanes, ver figura (4), sobre los cuales siempre actuará la fuerza magnética

$$\mathbf{F} = i \Delta l \mathbf{B} \sin(90^\circ) = i \Delta l \mathbf{B}$$

Hay dos elementos de hilo conductor con corriente de largo  $a$  sobre los que actuarán fuerzas de igual magnitud pero de dirección opuesta cuya magnitud dependerá del ángulo que hagan con la dirección del campo magnético uniforme y que puede considerarse que pasen por el eje de giro de la espira, o paralelas a este eje de giro, por lo que no causan momento de torsión en la espira.

El momento de torsión producido por una fuerza actuando sobre un cuerpo respecto a cierto eje de giro, es el producto de la magnitud de la fuerza por la distancia perpendicular entre la línea de acción de la fuerza y el eje de giro, a la cual se nombra *brazo de palanca de la fuerza respecto al eje de giro*.

Para el caso que nos toca analizar, el brazo de palanca de las fuerzas sobre los lados 1 y 2 de la espira, corresponde al producto  $\frac{a}{2} \sin(\phi)$ , siendo  $a$  el ancho de la espira y  $\phi$  el ángulo entre la normal al plano de la espira y la dirección del campo magnético uniforme, ver figuras (18) y (4).

La magnitud del momento de torsión neto,  $\tau$ , es la suma de las magnitudes de los momentos de torsión de las fuerzas que aplican en ambos lados de la espira,  $\tau_{\text{Lado 1}}$  y  $\tau_{\text{Lado 2}}$

$$\tau = \tau_{\text{Lado 1}} + \tau_{\text{Lado 2}}$$

$$\tau = F \frac{a}{2} \text{sen}(\phi) + F \frac{a}{2} \text{sen}(\phi)$$

$$\tau = i\Delta/B \frac{a}{2} \text{sen}(\phi) + i\Delta/B \frac{a}{2} \text{sen}(\phi)$$

$$\tau = i\Delta/B a \text{sen}(\phi)$$

La superficie que define el plano de la espira rectangular,  $S$ , se halla dado por el producto de su longitud,  $\Delta l$ , y de su ancho,  $a$ :

$$S = \Delta l a$$

La magnitud del momento de torsión neto queda como:

$$\tau = i S B \text{sen}(\phi)$$

Si la espira de hilo conductor plana rectangular tiene  $N$  vueltas y la corriente eléctrica  $i$ , la magnitud del momento de torsión neto se incrementará  $N$  veces, ya que la fuerza en cada lado de la espira es  $N$  veces mayor:

$$\tau = N i S B \sin(\phi)$$

Esta relación se ha deducido para la espira rectangular. Un análisis diferencial permite concluir que es válida para cualquier geometría de espira plana.

El momento de torsión neto de la espira puesta en un campo magnético uniforme depende de la corriente eléctrica en la espira, de las propiedades geométricas de la espira, de la magnitud del campo magnético y de la orientación de la normal al plano de la espira respecto a la dirección del campo magnético uniforme en donde se ha puesto tal espira.

La cantidad  $i N S$  se denomina *momento magnético de la espira*, sus unidades son  $(\text{ampère}) (\text{metro})^2$ .

$$p_{\text{magnético}} = i N S$$

Mientras mayor sea el momento magnético de una espira que conduce corriente, mayor será el momento de torsión que experimenta la bobina cuando se le tiene en un campo magnético.

## 5. Medida del campo magnético.

Para descubrir y medir el campo magnético son útiles varios aparatos. El aparato más sencillo con el cual se puede descubrir la acción del campo mag-

nético es la aguja magnética. La aguja magnética es un imán en sí, con ella podemos conocer la dirección de la fuerza que actúa sobre ella, pero el tamaño o modulo de esta fuerza va a depender de las propiedades magnéticas de la propia aguja. Se debe buscar al mismo tiempo la medida de la intensidad del campo magnético y la medida que caracteriza a la aguja.

Las dificultades de este tipo de pueden evitar empleando un dispositivo de medición en forma de pequeña espira o cuadro con corriente. Esta espira es fuente de un campo magnético y experimenta la acción que sobre ella ejerce otro campo magnético de cualquier origen. Las dimensiones de la espira deben ser lo suficientemente pequeñas para que dentro de sus límites el campo magnético pueda considerarse homogéneo.

La espira se introduce en la región del campo magnético que se estudia, ver figura (5). El campo magnético que se estudia ejerce una acción orientadora sobre el campo magnético de la espira, la hace girar y tomar definitivamente una posición determinada. El ángulo de torsión del hilo que sostiene a la espira se mide por la desviación de del rayo de luz (láser) que un espejo refleja sobre una escala. Se puede determinar la magnitud del momento de torsión  $\tau$  de las fuerzas que hacen girar a la espira en el campo magnético si se conocen las propiedades elásticas del hilo y el ángulo de torsión al que se ha sometido.

Experimentalmente se observa que para un mismo punto de un campo magnético determinado el momento máximo de las fuerzas,  $\tau_{\text{máximo}}$ , es proporcional a la corriente en la espira,  $i$ , y a la superficie de la espira  $S$ .

$$\tau_{\text{máximo}} \sim IS$$

La geometría de la espira no interviene en el resultado observado. La relación  $\frac{\tau}{iS}$  permanece constante para el punto en el espacio donde es considerado el campo magnético. Esta relación no depende de las propiedades de la espira más allá de que se use una espira plana, por lo que puede servir como característica del campo magnético en ese punto del espacio.

El estudio de la magnitud del momento de torsión sobre una espira de hilo conductor con corriente eléctrica realizado en la sección anterior nos permite relacionar al momento de torsión de la espira con la corriente eléctrica, con su superficie de la espira, con el campo magnético en el que se le ha puesto, y con el ángulo que hacen la normal al plano de la espira y la dirección del campo magnético,  $\phi$  según la relación ya deducida:  $\tau = NiSB \sin(\phi)$ , la cual es máxima cuando el ángulo entre la normal al plano de la espira y la dirección del campo magnético es de  $90^\circ$ , es decir cuando la normal al plano de la espira y la dirección del campo magnético son perpendiculares.

Así, la magnitud del momento de torsión máximo, será:

$$\tau_{\text{máximo}} = NiSB \sin(90^\circ) = NiSB$$

de donde podemos despejar la magnitud del *campo magnético*,  $B$ , propiedad que también es nombrada *inducción magnética* o *intensidad de campo magnético*, como:

$$B = \frac{\tau_{\text{máximo}}}{NiS}$$

Considerando que el denominador de esta expresión es el momento magnético de la espira,

$\rho_{\text{magnético}} = iNS$ , el campo magnético será:

$$B = \frac{\tau_{\text{máximo}}}{\rho_{\text{magnético}}}$$

El momento magnético es un vector dirigido según la dirección de la normal positiva del plano de la espira de hilo conductor con corriente considerada, la cual se obtiene con la regla del tornillo de cuerda derecha. *"si el tornillo de cuerda derecha se gira en la dirección de la corriente eléctrica en la espira, el movimiento de avance en el tornillo indicará la dirección del vector de momento magnético,  $\vec{p}_{\text{magnético}}$  o  $\vec{p}_m$ ".*

En el campo magnético la espira se orienta de tal modo que el vector  $\vec{p}_m$  coincide en dirección y en sentido con el vector de campo magnético  $\vec{B}$  cuando se deja libre la espira y deja de girar. La magnitud del momento de giro,  $\tau$ , de la espira será máximo cuando la espira se ponga con su normal positiva perpendicular a la dirección del campo magnético. *El campo magnético es una magnitud vectorial numéricamente igual al momento de giro máximo de la espira cuyo momento magnético sea unitario.* El vector de campo magnético es una característica de la fuerza del campo magnético, ya que está ligado con la acción de la fuerza del campo magnético sobre la espira con corriente.

*Para medir al campo magnético en una región del espacio, colocamos una espira diminuta de hilo conductor con corriente eléctrica sostenida por un hilo de material elástico en la que se pueda medir el ángulo de torsión del hilo respecto a la torsión que guarda fuera del campo magnético. Una vez puesta*

*esta espira en el campo magnético y se le ha permitido girar, la normal positiva de la espira apuntará en la dirección del campo magnético, y la magnitud del campo magnético será el cociente de la magnitud del momento de torsión de la espira respecto al giro sobre el hiló elástico dividido entre el momento magnético de la espira.*

## 6. Bibliografía

Saveliev, I. V.; “Curso de Física General”, volumen 2, capítulos VI y X; Editorial Mir, Moscú, Ex Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas (1989).

Cutnell, John D. y Kenneth W. Johnson; “Física”, segunda edición, capítulo 27; Editorial Limusa Wiley; México (2004).

Chapman, Sandra C.; “Core electrodynamics”, Capítulo 1; Taylor and Francis, England (2000).

Mneyán, M. G.; “Nuevas profesiones del imán”; Mir, Moscú (1989).

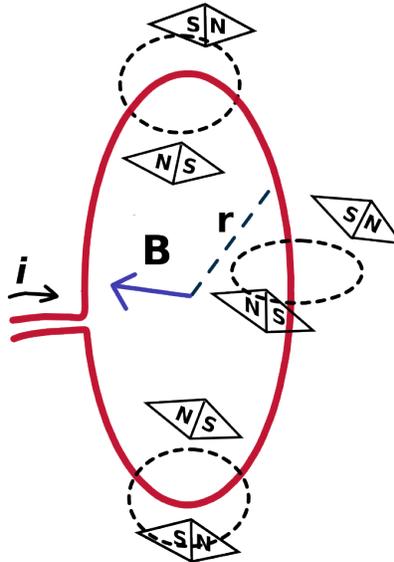


Figura 11: Campo magnético  $\mathbf{B}$  al interior de una espira de radio  $r$ .

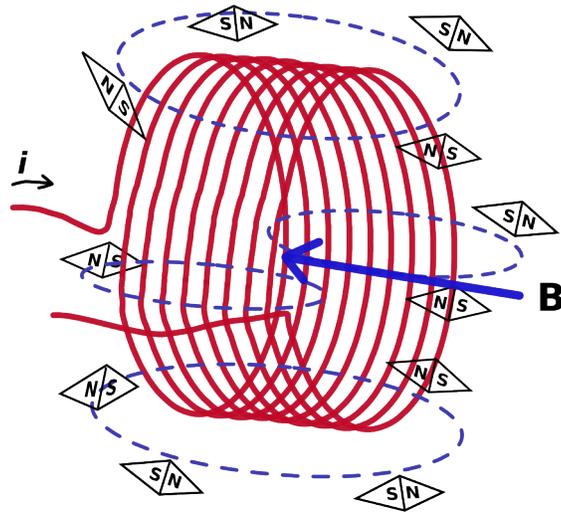


Figura 12: Campo magnético uniforme  $\mathbf{B}$  al interior de un solenoide.

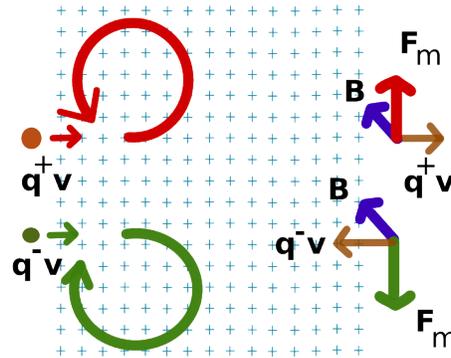


Figura 13: Interacción de cargas puntuales en el vacío  $Q^+$  y  $q^-$  moviéndose con velocidad  $\mathbf{v}$  perpendicular a un campo magnético uniforme de intensidad  $\mathbf{B}$  el cual les ejerce una fuerza magnética  $\mathbf{F}_m$  que varía su dirección causando que las cargas se muevan en trayectorias circulares.

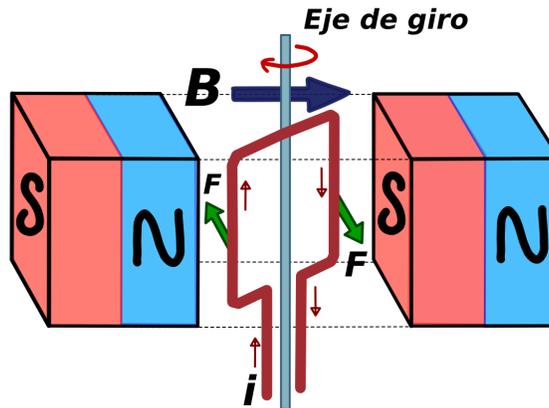


Figura 14: Momento de torsión sobre los elementos de hilo conductor con corriente de una espira en un campo magnético.

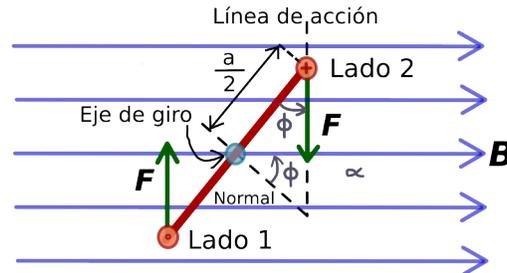


Figura 15: Vista superior de la espira en el campo magnético uniforme. La corriente en el lado 1 está dirigida hacia afuera de la página, lo que se simboliza por un punto encerrado en un círculo, y en el lado 2 está dirigida hacia adentro de la página, lo que se simboliza por una cruz encerrada en un círculo. La corriente en el lado 1 experimenta una fuerza  $\mathbf{F}$  que es de igual magnitud y de dirección opuesta a la fuerza ejercida sobre la corriente en el lado 2. Las dos fuerzas producen un momento de torsión en sentido del movimiento de las manecillas del reloj alrededor del eje de giro de la espira.

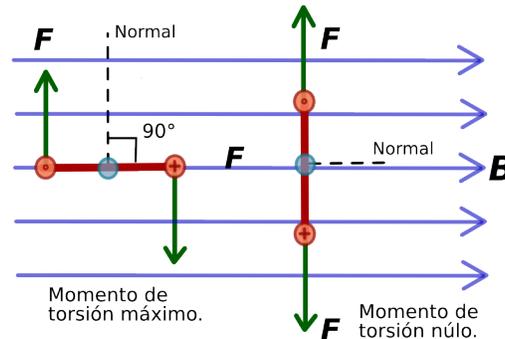


Figura 16: El momento de torsión que causan las fuerzas aplicadas sobre el lado 1 y sobre el lado 2 de la espira conductora con corriente eléctrica en la dirección ya indicada, será máximo cuando el plano de la espira haga un ángulo de  $90^\circ$  respecto a la dirección del campo magnético uniforme  $\mathbf{B}$  donde se halla la espira, y será nulo cuando el plano de la espira sea paralelo a la dirección del campo magnético uniforme  $\mathbf{B}$  donde se halla la espira.

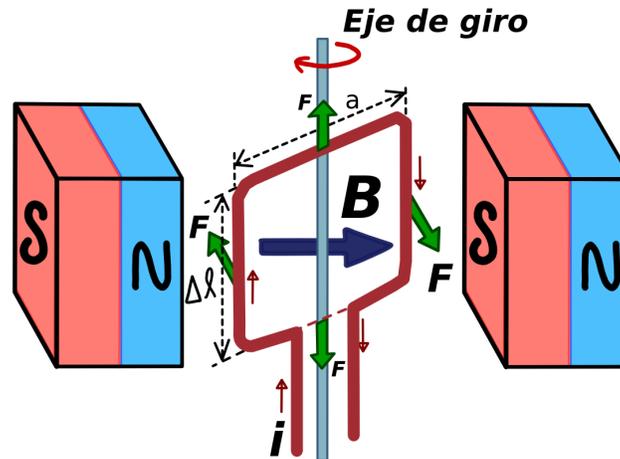


Figura 17: La espira rectangular presenta dos elementos de hilo conductor con corriente eléctrica de largo  $\Delta l$  que se mantienen siempre perpendiculares a la dirección del campo magnético uniforme entre los imanes indicados y sobre los cuales siempre actuará la fuerza magnética  $\mathbf{F} = i\Delta l/\mathbf{B}$ . Hay dos elementos de hilo conductor con corriente de largo  $a$  sobre los que actuarán fuerzas de dirección opuesta cuya magnitud dependerá del ángulo que hagan con la dirección del campo magnético uniforme y que no causan momento de torsión en la espira.

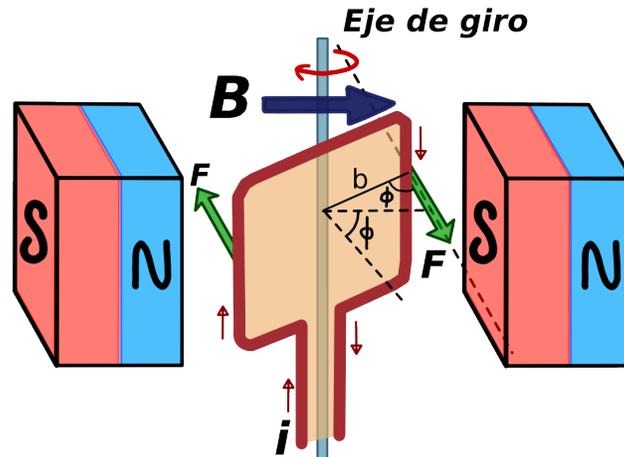


Figura 18: El brazo de palanca de las fuerzas sobre los lados 1 y 2 de la espira, es el producto de la mitad de la longitud del ancho de la espira,  $\frac{a}{2}$ , por el seno del ángulo  $\phi$  que hace la normal al plano de la espira con la dirección del campo magnético uniforme entre los polos de imanes opuestos,  $\frac{a}{2} \sin(\phi)$ .

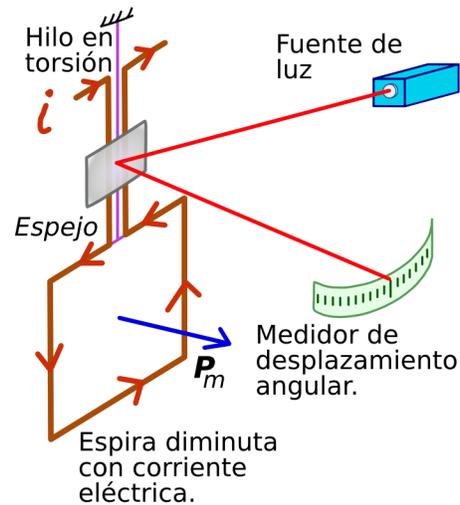


Figura 19: Espira diminuta de hilo conductor con corriente eléctrica sostenida de un hilo elástico colocada en un campo magnético.