

CAMPO MAGNÉTICO. INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

Luis Pardillo Vela <https://fisicayquimicaluis.wixsite.com/esoybach>

ÍNDICE:

HISTORIA. EXPERIMENTOS DE OERSTED Y FARADAY.

FUERZA MAGNÉTICA SOBRE UNA CARGA EN MOVIMIENTO. FUERZA DE LORENTZ.

- Movimiento de partículas cargadas en un campo magnético.
- El campo magnético no es conservativo.

APLICACIONES DE LA LEY DE LORENTZ

- CICLOTRÓN.
- ESPECTRÓMETRO DE MASAS.

ACCIÓN DEL CAMPO MAGNÉTICO SOBRE UN CONDUCTOR ELÉCTRICO RECTILÍNEO.

CAMPO MAGNÉTICO CREADO POR UN CONDUCTOR ELÉCTRICO RECTILÍNEO.

FUERZA MAGNÉTICA ENTRE DOS CONDUCTORES RECTILÍNEOS. AMPERIO

- Definición de Amperio.

CAMPO MAGNÉTICO CREADO POR UNA ESPIRA, SOLENOIDE Y TORO (TOROIDE).

ACCIÓN DEL CAMPO MAGNÉTICO SOBRE UNA ESPIRA.

FLUJO MAGNÉTICO. LEY DE GAUSS. LEY DE AMPERE.

- Teorema de Gauss para el Campo Magnético.
- Ley de Ampere.
- Ejemplo de aplicación de la ley de Ampere:

LEY DE FARADAY. LEY DE LENZ. INDUCCIÓN DE CORRIENTE ELÉCTRICA.

AUTOINDUCCIÓN.

- inductancia o coeficiente de autoinducción.

GENERACIÓN DE CORRIENTE ALTERNA Y CONTINUA

MOTOR ELÉCTRICO.

TRANSFORMADORES.

LA UNIFICACIÓN DE MAXWELL

RECORDATORIO DE LAS REGLAS PARA EL CÁLCULO DE DIRECCIONES Y SENTIDOS EN EL CAMPO MAGNÉTICO

ANALOGÍAS Y DIFERENCIAS ENTRE CAMPO GRAVITATORIO, ELÉCTRICO Y MAGNÉTICO

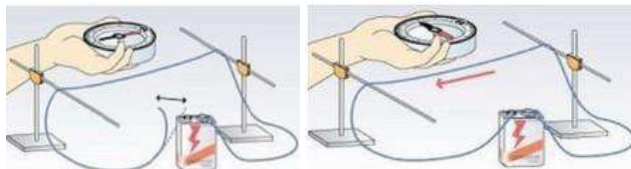
Las reglas sobre direcciones y sentidos en el campo magnético suelen traer dudas, por ello conviene realizar una aclaración y repaso de las mismas.

HISTORIA. EXPERIMENTOS DE OERSTED Y FARADAY.

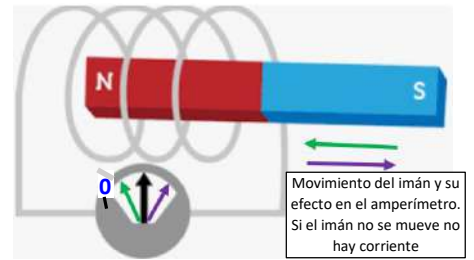
El fenómeno del magnetismo es conocido desde la antigua Grecia. Su nombre se debe a la región griega de Magnesia, en la que se encontraba un mineral (magnetita) que tenía la propiedad de atraer materiales de hierro un mineral natural llamado A los cuerpos naturales que, como la magnetita, presentan la propiedad de atraer pequeños trozos de hierro se les da el nombre de imanes naturales. Y la propiedad que tienen recibe el nombre de magnetismo.

Los imanes están compuestos por dos polos magnéticos que coinciden con los extremos de este, un polo norte (N) y un polo sur (S), llamados así por la orientación que adquiere una brújula según los polos geográficos magnéticos. Como propiedades más elementales de los imanes tenemos que los polos del mismo signo se repelen y los de diferente signo se atraen, y que los polos de un imán no pueden separarse, cada vez que un imán se divide en fragmentos, la estructura interna de la materia da lugar a que cada fragmento presente de nuevo los dos polos, cada fragmento es por tanto un nuevo imán.

La primera prueba de la interconexión entre el campo eléctrico y magnético la obtuvo **Oersted** en 1819 cuando observó cómo al conectar la corriente en un hilo conductor se desviaba la aguja de una brújula que estaba colocada al lado del hilo conductor.



En 1831 Michael **Faraday** se planteó si ocurriría también el fenómeno contrario, es decir, si una corriente eléctrica podía producir un campo magnético (Oersted), ¿podría un campo magnético producir una corriente eléctrica? Faraday planteó un circuito en forma de espira conectado a un amperímetro (para detectar el paso de corriente) y colocó un imán en las proximidades de la espira. Cuando el imán no se movía, no había corriente eléctrica, pero si el imán se movía acercándolo a la espira, en esta aparecía una corriente en el circuito, que era de sentido contrario cuando el imán se alejaba de la espira. Además, ocurría que también se producía corriente si se dejaba fijo el imán y lo que se acerca o aleja era la espira.



La conclusión que podemos obtener de esta experiencia es que una carga en movimiento relativo con respecto a un campo magnético experimenta una fuerza magnética que la hace moverse, produciendo una corriente eléctrica.

FUERZA MAGNÉTICA SOBRE UNA CARGA EN MOVIMIENTO. FUERZA DE LORENTZ.

Si una carga eléctrica está en reposo no se ve influida por la presencia de un campo magnético. Sin embargo una carga eléctrica (q) experimentará una fuerza magnética ($\vec{F}$) cuando se mueve con velocidad $\vec{v}$ en un campo magnético ($\vec{B}$).

El movimiento es preciso para que aparezca fuerza, puesto que ésta no aparece si está en reposo o si la dirección de movimiento es la del campo magnético. Si la velocidad de la carga es perpendicular al campo magnético, la fuerza magnética que aparece es perpendicular a ambos (en general al plano formado por el vector campo $\vec{B}$ y el vector velocidad $\vec{v}$). Estos hechos llevaron a concluir la siguiente expresión vectorial para la fuerza producida:

Fuerza de Lorentz

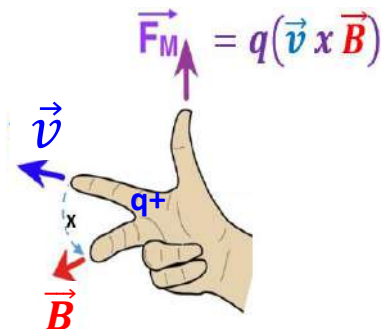
$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B})$$

$\times$ indica producto vectorial

$\vec{B}$ es el vector inducción magnética denominado campo magnético

Hay que tener en cuenta el orden $\vec{v} \times \vec{B}$ ya que el producto vectorial no es conmutativo.

- Si la velocidad $\vec{v}$ es perpendicular al $\vec{B}$, la fuerza magnética actúa como centrípeta y la partícula describe un movimiento circular.
- Si la velocidad $\vec{v}$ es paralela al $\vec{B}$, no hay fuerza magnética y la partícula continúa su movimiento rectilíneo uniforme.
- Para determinar la **dirección de la fuerza** se aplica la regla de la mano derecha como se observa en la figura. **Si la carga es negativa la fuerza estará invertida.**



El módulo de la fuerza viene dado por: $F = q \cdot v \cdot B \cdot \sin\alpha$, donde α es el ángulo formado por el vector campo magnético y la velocidad de la carga. si la carga se desplaza en la misma dirección del campo no experimentará fuerza alguna, y el valor es máximo cuando la carga se mueve en dirección perpendicular al campo.



Del módulo de $F = q \cdot v \cdot B \cdot \sin\alpha$, despejando B (para $\sin 90^\circ = 1$) tenemos:

$$B = F/q \cdot v$$

por lo que la **unidad del campo magnético** en el S.I. será $N/C \cdot ms^{-1}$ ($N \cdot s \cdot C^{-1} \cdot m^{-1}$) que se conoce con el nombre de **Tesla (T)**, en honor a Nikola Tesla (1856-1943). Un tesla es la intensidad de un campo magnético que ejerce una fuerza de 1 N sobre una carga de 1 C que se mueve perpendicularmente al campo con una velocidad de 1 m/s. Al ser el Tesla una unidad grande se suele utilizar el **Gauss** ($1 T = 10^4 G$).

Si en la zona de movimiento de la carga **existe un campo eléctrico, además del magnético**, la fuerza resultante (**fuerza de Lorentz**) será la suma de ambas:

$$\vec{F} = \vec{F}_{el\acute{e}ctrica} + \vec{F}_{magn\acute{e}tica} = q\vec{E} + q(\vec{v} \times \vec{B}) \Rightarrow \vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

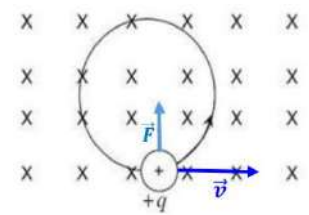
Esta expresi3n recibe el nombre de **fuerza de Lorentz generalizada**.

- Movimiento de partículas cargadas en un campo magnético.

Ya hemos visto que el movimiento de la carga eléctrica en un campo magnético es rectilíneo y uniforme si se mueve paralela al campo porque no se produce fuerza magnética, y si no es paralelo al campo se produce una **fuerza que actúa como fuerza centrípeta provocando un movimiento circular**. Veamos el caso del movimiento de la carga perpendicular al campo:

En la figura las X representan la direcci3n del campo magnético perpendicular al papel y sentido al interior del mismo (si el sentido fuera saliendo del papel en lugar de las X se usan puntos o pequeños círculos)

Si la velocidad $\vec{v}$ fuera paralela a $\vec{B}$ no habría fuerza y la carga seguiría en movimiento rectilíneo y uniforme, pero vamos a ver el caso en que son perpendiculares:



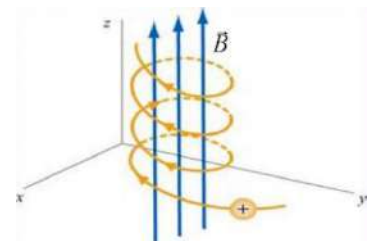
$$F = qvB = ma_c = m \frac{v^2}{r} \quad \text{de donde} \quad r = \frac{mv}{qB} \quad \text{y como} \quad \omega = \frac{v}{r} \Rightarrow \omega = \frac{qB}{m}$$

El periodo del movimiento circular será: $T = \frac{2\pi}{\omega} \Rightarrow T = \frac{2\pi m}{qB}$

Cuando la velocidad de entrada de la partícula no es perpendicular al campo, tendremos dos componentes, una normal al campo y otra tangencial $\vec{v} = \vec{v}_x + \vec{v}_y$. Cuando aplicamos la fuerza de Lorentz a la expresi3n anterior:

$$\vec{F} = q((\vec{v}_x + \vec{v}_y) \times \vec{B}) = q(\vec{v}_x \times \vec{B}) + q(\vec{v}_y \times \vec{B}) = q|\vec{v}_x||\vec{B}|\text{sen}0 + q|\vec{v}_y||\vec{B}|\text{sen}90 = q|\vec{v}_y||\vec{B}|$$

Vemos que la componente x no se ve afectada por el campo magnético, por lo que tendremos una trayectoria circular cuyo centro avanza, o sea una trayectoria helicoidal (en forma de hélice o tornillo)



- El campo magnético no es conservativo.

La fuerza magnética sobre una carga es:

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

La fuerza $\vec{F}$ es **perpendicular a la velocidad $\vec{v}$** , por lo que el trabajo resultante es:

$$W = \vec{F} \cdot \Delta\vec{x} = \vec{F} \cdot \vec{v} \cdot t = Fvt \cdot \cos 90 = 0$$

Consecuencias:

- La fuerza magnética **no realiza trabajo**, por lo que no cambia la **energía cinética** de la partícula: solo desvía la direcci3n de la velocidad, sin alterar su m3dulo.
- Por ello, la fuerza magnética **no es conservativa** y no tiene asociada una **energía potencial escalar** en el caso de cargas en movimiento, a diferencia de los campos eléctrico y gravitatorio, que sí son conservativos, realizan trabajo y pueden variar la energía cinética.

- Esto no contradice que en otros contextos (imanes, dipolos, corrientes) sí pueda definirse una **energía potencial magnética**.

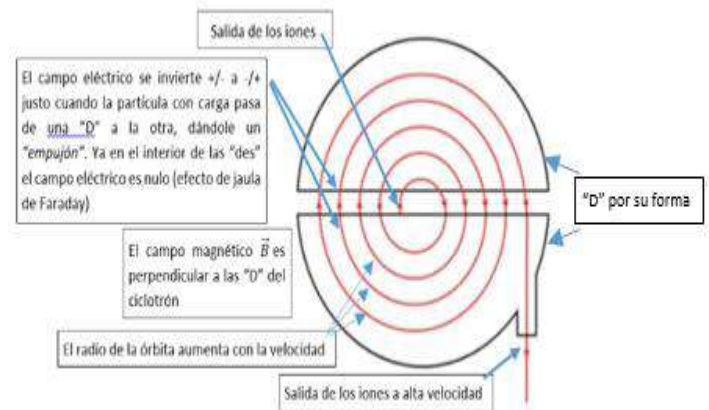
APLICACIONES DE LA LEY DE LORENTZ

- CICLOTRÓN.

Es un acelerador que aumenta la energía cinética de partículas cargadas (como protones o iones) usando campos **eléctricos** y **magnéticos**.

Componentes principales

- **Dos electrodos semicirculares** ("des" o "D").
- **Campo magnético uniforme** perpendicular al plano de las "des".
- **Generador de voltaje alterno** que produce un campo eléctrico en el espacio entre las "des".



Funcionamiento

- 1- **Aceleración:** La partícula entra por el centro. El campo eléctrico entre las "des" la acelera.
 - 2- **Giro:** Dentro de cada "D" el campo eléctrico es nulo, pero el campo magnético perpendicular curva la trayectoria en círculo (fuerza de Lorentz).
 - 3- **Sincronización:** Al cruzar de nuevo el espacio entre "des", el voltaje invierte su polaridad y vuelve a acelerar la partícula.
 - 4- **Espiral creciente:** En cada vuelta, la partícula gana velocidad → el radio de la órbita aumenta ($r = mv/qB$)
- Frecuencia ciclotrónica**

El tiempo de cada semicírculo es **constante**: $T = 2\pi m/qB$. Depende solo de la masa de la partícula, su carga y el campo magnético, **no de la velocidad**, por ello se puede usar un voltaje alterno de **frecuencia constante** para acelerar siempre a la partícula justo en el cambio de una "D" a la otra.

Cuando alcanza la energía deseada, la partícula se extrae del ciclotrón.

Aplicaciones

Entre otros, tiene un uso destacado es la **producción de radioisótopos** para medicina nuclear.

- ESPECTRÓMETRO DE MASAS.

El **espectrómetro de masas** es un aparato que permite **separar y analizar partículas cargadas** (iones) según su **relación masa/carga** (m/q).

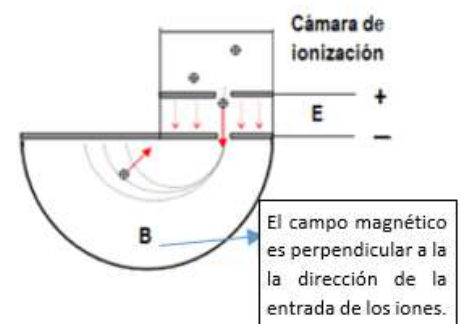
Es un sistema muy exacto para medir la masa atómica de los elementos. Igualmente, con él se investiga la presencia de isótopos y su proporción en un elemento.

Etapas de funcionamiento

- **Ionización:** El átomo o molécula se convierte en un ion cargado (normalmente positivo) mediante descargas eléctricas o bombardeo electrónico.
- **Aceleración:** Los iones se aceleran con un campo eléctrico, de modo que todos adquieren aproximadamente la **misma energía cinética**.
- **Desviación (Campo magnético):** Al entrar en un campo magnético, cada ion describe una trayectoria circular cuyo radio viene dado por:

Aplicando $F_{magn} = F_{cent} = ma_c \Rightarrow qvB = m \frac{v^2}{R}$ por lo que:

$$R = \frac{mv}{qB}$$



Así, los iones más pesados (mayor m/q) describen circunferencias de radio mayor, mientras que los más ligeros se curvan más y son registrados por un detector electrónico que nos muestra la abundancia relativa de cada ion en función de su masa.

ACCIÓN DEL CAMPO MAGNÉTICO SOBRE UN CONDUCTOR ELÉCTRICO RECTILÍNEO.

Ya hemos visto que si una carga eléctrica q se desplaza con una velocidad $\vec{v}$ al pasar por un punto del espacio en el que existe un campo magnético $\vec{B}$, sobre dicha carga aparece una fuerza $\vec{F}$ que tiende a desviarla de su trayectoria. Esta fuerza queda determinada por la ecuación:

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

Si en el espacio en el que existe el campo $\vec{B}$ hay situado un conductor eléctrico inmóvil, que forma parte de un circuito abierto, por él no circula carga eléctrica (es decir $\vec{v} = 0$) y por tanto la fuerza sobre dichas cargas es nula y la fuerza neta sobre el conductor será nula también. Sin embargo, si el conductor forma parte de un circuito cerrado, por el cual circula una corriente eléctrica de intensidad I , las cargas en el interior del conductor estarán en movimiento, siendo:

$$I = \frac{q}{t}$$

Usamos la corriente eléctrica es en el sentido tradicional, es decir el movimiento de cargas eléctricas positivas, no en el sentido real que es el movimiento de los electrones

y la fuerza que aparecerá sobre el conductor en función de la corriente eléctrica, teniendo en cuenta una longitud finita del conductor l , será:

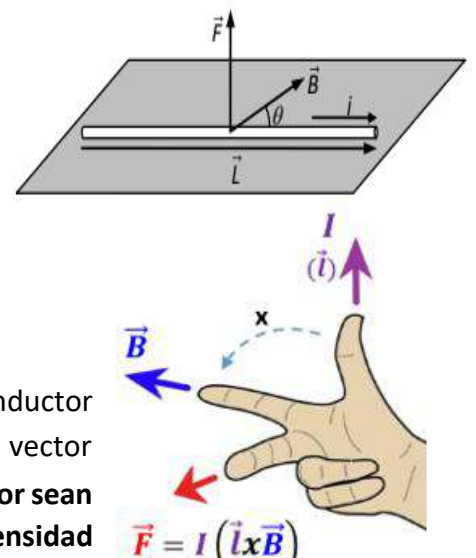
$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B}) = q \left(\frac{\vec{l}}{t} \times \vec{B} \right) = \frac{q}{t} (\vec{l} \times \vec{B}) = I (\vec{l} \times \vec{B})$$

$$\vec{F} = I (\vec{l} \times \vec{B})$$

Esta es la **Ley de Laplace** que indica que la fuerza sobre el conductor es perpendicular al plano formado por el propio conductor y por el vector intensidad de campo $\vec{B}$ (ver figura). **La fuerza es tanto mayor cuanto mayor sean la intensidad que circula por el conductor, la longitud de éste y la intensidad del campo magnético.**

Si el conductor es paralelo al campo, no sufrirá fuerza alguna.

$$\vec{l} \times \vec{B} = l \cdot B \cdot \sin 0 = 0$$



CAMPO MAGNÉTICO CREADO POR UN CONDUCTOR ELÉCTRICO RECTILÍNEO.

En 1820 los científicos Biot y Savart estudiaron el fenómeno de la inducción magnética creada por un elemento de corriente y dedujeron la siguiente ecuación:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \oint \frac{d\vec{l} \times \vec{u}_r}{r^2} \quad \text{Ley de Biot y Savart}$$

La aplicación de esta ley a un conductor rectilíneo (hilo de corriente) nos conduce al siguiente resultado:

$$|\vec{B}| = B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

Ley de Biot-Savart aplicada

a un conductor rectilíneo

Observaron que para este caso la intensidad del campo $\vec{B}$ era directamente proporcional a la intensidad de la corriente I e inversamente proporcional a la distancia r , e igualmente observaron que la constante de proporcionalidad dependía del medio en el que se encontraba el conductor.

Donde μ_0 es la constante denominada **permeabilidad magnética del vacío**, cuyo valor es:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T}\cdot\text{m/A} \text{ (o N/A}^2 \text{ o H/m} \rightarrow \text{Henrio/m)}.$$

De donde la expresión de la ley de Biot-Savart quedaría:

$$|\vec{B}| = B = 2 \cdot 10^{-7} \frac{I}{r}$$

La inducción magnética crea líneas de inducción de circunferencias concéntricas con centro en un punto del conductor, la dirección del $\vec{B}$ es siempre tangente a la línea de inducción (hilo de corriente) y su sentido depende del sentido de la corriente I (regla de la mano derecha, del destornillador o sacacorchos).



La **ley de Biot y Savart** es la demostración matemática de la experiencia de Oersted con la que iniciamos el tema.

FUERZA MAGNÉTICA ENTRE DOS CONDUCTORES RECTILÍNEOS. AMPERIO

Hemos visto que una corriente eléctrica I crea un campo magnético cuyo módulo viene dado por (Ley de Biot-Savart):

$$|\vec{B}| = B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R}$$

Igualmente sabemos que un campo magnético actúa sobre una corriente eléctrica (Ley de Laplace):

$$\vec{F} = I(\vec{l} \times \vec{B})$$

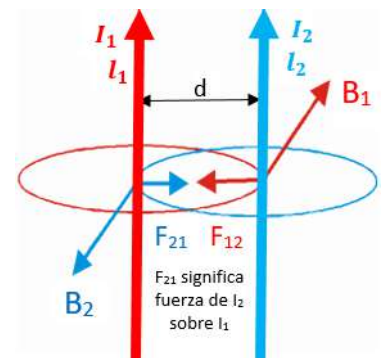
Entonces, la fuerza que experimenta un conductor rectilíneo frente a otro situado en paralelo vendrá dada por:

$$\vec{F}_{12} = I_2(\vec{l}_2 \times \vec{B}_1) \Rightarrow |\vec{F}_{12}| = I_2 \left(l_2 \frac{\mu_0 I_1}{2\pi d} \right) = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d} l_2$$

Como se cumple el principio de acción y reacción: $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$

Generalmente nos interesa conocer la fuerza por unidad de longitud del conductor, esto es:

$$\frac{|\vec{F}|}{l} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d}$$



En el caso considerado ambas corrientes circulan en el mismo sentido y obtenemos fuerzas entre corrientes de carácter atractivo (cada cable atrae al otro). Si las corrientes fuesen de sentidos opuestos, las fuerzas que se darían serían repulsivas.

- Definición de Amperio.

Aplicando la última ecuación se define el Amperio (A) como la intensidad de corriente que circula por dos hilos conductores, paralelos, separados un metro, situados en el vacío, cuando sobre cada metro de longitud de conductor se ejerce una fuerza de $2 \cdot 10^{-7}$ N.

La definición actual (2019) de amperio (A) es la corriente que resulta del flujo de $1/1.602\,176\,634 \cdot 10^{-19}$ cargas elementales (e) por segundo.

CAMPO MAGNÉTICO CREADO POR UNA ESPIRA, SOLENOIDE Y TORO (TOROIDE).

Cuando una corriente eléctrica circula por un hilo conductor doblado en forma de **espira circular**, se genera un **campo magnético** alrededor, cuyo valor, en su centro, desarrollando la Ley de Biot y Savart (desarrollo que se omite) se obtiene:

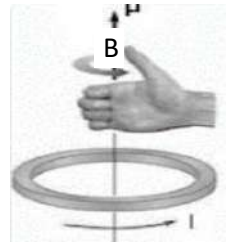
$$B = \frac{\mu_0 I}{2R}$$

vectorialmente $\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{2R} \vec{u}_r$

Siendo R es el radio de la espira, en cuyo centro el campo B es máximo máximo y está dirigido a lo largo del **eje perpendicular al plano de la espira**, debilitándose al alejarnos de su centro

Pero la fórmula anterior **solo nos indica el valor del campo en el centro de la espira**, no tiene aplicación para cualquier otro punto cuya fórmula es más compleja.

El **sentido** del campo magnético se determina por la **regla de la mano derecha**: si enrollamos la mano de forma que los dedos rodeen la espira en el **sentido de la corriente**, el **pulgar extendido** indica la dirección del campo magnético en el eje de la espira.



Si en un lugar de una espira tenemos **un solenoide de N espiras (solenoid estrecho)** tendremos:

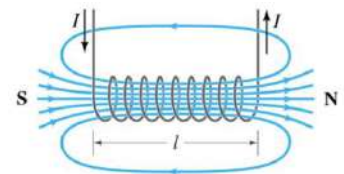
$$B = N \frac{\mu_0 I}{2R}$$

Igualmente solo nos indica la intensidad del campo en el centro.

Para un **solenoid largo** $l \gg R$ tenemos:

$$B = N \frac{\mu_0 I}{l}$$

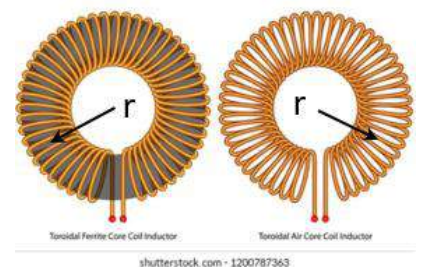
En este caso igualmente solo nos indica el valor en el interior del solenoide que por otra parte es constante en todo su interior (salvo cerca de los extremos)



En el caso de un **toroide** (bobina circular) tenemos:

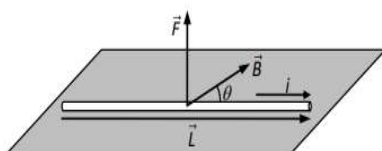
$$B = N \frac{\mu_0 I}{2\pi R}$$

Donde R es el **radio medio** del toroide, y solo nos indica el valor del campo en su interior, que es constante. Fuera del toroide el campo es nulo.



ACCIÓN DEL CAMPO MAGNÉTICO SOBRE UNA ESPIRA.

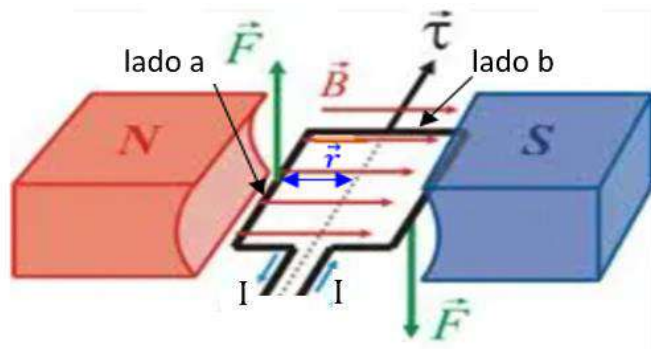
Hemos visto la acción de un campo magnético sobre un hilo donde circula corriente:



$$\vec{F} = I (\vec{l} \times \vec{B})$$

Pero ahora se trata de una **espira** (siguiente figura) que tiene cuatro lados (dos **a** y dos **b**) **por los que circula una corriente I** (uno de los lados no está cerrado, pero podemos considerar que la separación es mínima).

En los lados paralelos al campo $\vec{B}$ la fuerza es nula ($\sin 0 = 0$). Pero en los lados perpendiculares si se producen dos $\vec{F}$ de sentido contrario, provocando un torque $\vec{\tau}$ o momento de una fuerza $\vec{M}$:



$$\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F}$$

donde $\vec{r}$ es el vector que va desde el punto de aplicación de la fuerza hasta el centro de giro.

$$\vec{F} = I (\vec{l} \times \vec{B}) \rightarrow F = I \cdot L \cdot B \cdot \sin \alpha = I \cdot L \cdot B = I \cdot a \cdot B$$

La longitud del conductor L equivale a la longitud de un lado "a":

$$\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F} \rightarrow M = r \cdot F \cdot \sin \alpha = \frac{b}{2} \cdot I \cdot a \cdot B \cdot \sin \alpha$$

Pero debemos tener en cuenta que se han formado dos momentos, el de $\vec{F}$ hacia arriba y el de $\vec{F}$ hacia abajo del otro lado "a", en consecuencia, el momento total será $2 \cdot M$ ya que ambos hacen girar la espira en el mismo sentido:

$$M_T = 2 \cdot M = 2 \cdot \frac{b}{2} \cdot I \cdot a \cdot B \cdot \sin \alpha = I \cdot a \cdot b \cdot B \cdot \sin \alpha = I \cdot S \cdot B \cdot \sin \alpha \quad \text{siendo } S = a \cdot b \text{ superficie de la espira}$$

α es el ángulo entre la perpendicular a la superficie S de la espira y el campo $\vec{B}$.

En definitiva:

Vectorial

$$\vec{M} = I \cdot \vec{S} \times \vec{B}$$

módulo

$$M = I \cdot S \cdot B \cdot \sin \alpha$$

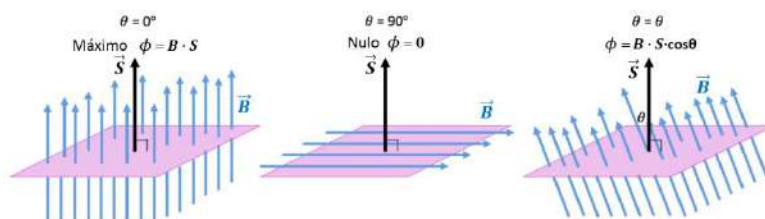
Este momento hace que la espira gire y es la base del funcionamiento de un motor eléctrico, mediante un conmutador (colector) que cambia periódicamente la dirección de la corriente en la espira para mantener la rotación en una dirección constante (se verá al final en el generador de corriente)

FLUJO MAGNÉTICO. LEY DE GAUSS. LEY DE AMPERE.

El flujo de un campo magnético (ϕ_M o ϕ) que atraviesa una superficie se define como el producto escalar entre el vector inducción magnética $\vec{B}$, y el vector superficie $\vec{S}$, siendo este un vector con dirección normal a la superficie cuyo módulo es el valor de esta.

$$\phi_M \text{ o } \phi = \vec{B} \cdot \vec{S} = B \cdot S \cdot \cos \alpha$$

Como se trata de un producto escalar, el flujo dependerá del módulo del vector inducción magnética $\vec{B}$ y del módulo del vector superficie $\vec{S}$ y del coseno del ángulo formado por ambos



La unidad del flujo es el Weber (Wb). $Wb = T \cdot m^2$

Un término relacionado que se suele encontrar es la *densidad de flujo magnético*, Wb/m^2 , y esto no es otra cosa que el Tesla. De hecho, a menudo usamos el término "densidad de flujo magnético" como sinónimo de "magnitud del campo magnético".

- Teorema de Gauss para el Campo Magnético.

Si elegimos como superficie de cálculo una superficie cerrada cualquiera, estaríamos aplicando el teorema de Gauss al campo magnético, veamos el resultado en este caso.

En el campo magnético, las líneas de campo salen del polo N y entran por el polo S, pudiendo imaginar entonces que el polo N es el nacimiento o "*fuentes*" de las líneas de campo y el polo S donde mueren o "*sumidero*". Pero cuando se parte el imán intentando separar ambos polos, se crean dos nuevos imanes, por lo que debemos pensar que las líneas no empiezan y acaban, sino que continúan por el interior del imán cerrándose sobre sí mismas. Si esto no fuera así existirían monopolos magnéticos por separado, unos "fuente" y otros "sumidero", pero por más que los monopolos han sido buscados, no se ha encontrado esas hipotéticas "partículas". En definitiva, la hipótesis es que las líneas de campo son cerradas.

Si **las líneas de campo son cerradas**, en cualquier superficie cerrada, todas las líneas que en ella entran deben salir, puesto que el interior no contiene ni "fuentes" ni "sumideros". Y si todas las líneas que entran salen, el **flujo neto** del campo magnético a través de cualquier superficie cerrada es nulo.

La ley de Gauss para el campo magnético, afirma que el flujo de dicho campo a través de una superficie cerrada es nulo:

$$\phi = \oint \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \quad \text{para una superficie cerrada}$$

Por tanto, al contrario de lo que ocurriría con la ley de Gauss, el flujo del campo magnético no puede emplearse para calcular campos magnéticos.

- Ley de Ampere.

La ley que nos permite calcular campos magnéticos a partir de las corrientes eléctricas es la Ley de Ampère. Fue descubierta por André - Marie Ampère en 1826 y se enuncia:

$$\oint \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 I_T$$

La integral del primer miembro es la circulación o integral de línea del campo magnético a lo largo de una trayectoria cerrada, y:

- μ_0 es la permeabilidad del vacío
- $d\vec{l}$ es un vector tangente a la trayectoria elegida en cada punto
- I_T es la corriente neta que atraviesa la superficie delimitada por la trayectoria, y será positiva o negativa según el sentido con el que atraviere a la superficie.

La ley de Ampere es muy sencilla de aplicar cuando existe **alta simetría** en la distribución de la corriente.

- Ejemplo de aplicación de la ley de Ampere:

Campo magnético creado por un conductor eléctrico rectilíneo:

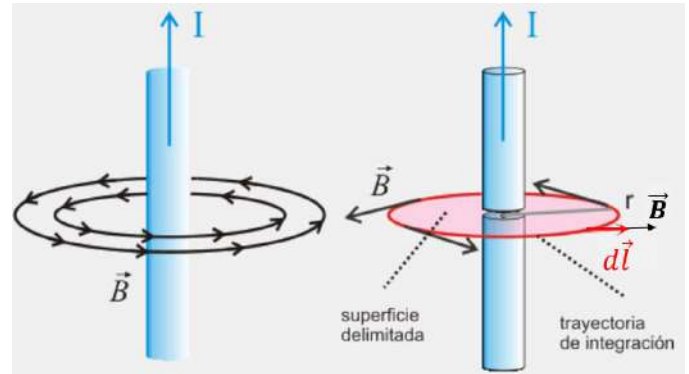
Ley de Ampere: $\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_{\text{encerrada}}$

Tomemos cualquier circunferencia de campo y en ella situamos el vector $d\vec{l}$

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

La integral de dl es simplemente la longitud de la circunferencia, que es $2\pi r$. Así, la expresión queda como:

$$B \cdot 2\pi r = \mu_0 I \Rightarrow B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$



Como vemos es muy sencillo el cálculo aplicando la Ley de Ampere, mientras que aplicando la ley de Biot y Savart nos saltamos la resolución por ser bastante más compleja.

¿Y por qué insistimos con la ley de Biot y Savart? Es por ser una herramienta más general que puede resolver cualquier problema de campo magnético, aunque su uso sea más complejo en los casos que por alta simetría son más fáciles de resolver con la ley de Ampere.

LEY DE FARADAY. LEY DE LENZ. INDUCCIÓN DE CORRIENTE ELÉCTRICA.

La **Ley de Faraday de la Inducción Electromagnética** es el principio fundamental que explica cómo se genera una **corriente inducida** a partir de un campo magnético. Esta ley es la base del funcionamiento de dispositivos tan importantes como los generadores y transformadores.

La ley, también conocida a veces como la **ley de Faraday-Lenz** (ver siguiente subapartado), es una de las relaciones más importantes del electromagnetismo. Nos dice que, al variar el **flujo magnético** a través de una **espira**, una bobina o solenoide o un circuito, se induce una diferencia de potencial, lo que a su vez provoca la aparición de una **corriente inducida**.

Matemáticamente, la relación es:

$$\text{Fuerza electromotriz (FEM)} \rightarrow \mathcal{E} = - \frac{d\phi}{dt}$$

Donde $\mathcal{E}$ (epsilon) es la fuerza electromotriz o fem, ϕ_M (o ϕ) es el flujo magnético y t es el tiempo.

NOTA: La fuerza electromotriz, se llama así por tradición, no es una fuerza en el sentido físico, es una diferencia de potencial y por tanto se mide en voltios (V), no en Newton como las fuerzas.

Recordemos que el flujo magnético se podía poner, si el campo magnético es constante a lo largo de la superficie como:

$$\phi = \vec{B} \cdot \vec{S} = B \cdot S \cdot \cos \alpha$$

donde α es el ángulo que forma el vector superficie perpendicular al plano, con el campo magnético. Si la bobina o solenoide tiene un número N de espiras, el flujo total será:

$$\phi_{\text{bobina}} = N \cdot \phi = N \cdot B \cdot S \cdot \cos \alpha \quad (\text{se volverá a ver su uso en generadores eléctricos})$$

Puede verse a veces como **Ley de Faraday-Henry** pero por simple reconocimiento de los mismos trabajos simultáneos de Joseph Henry

- Ley de Lenz:

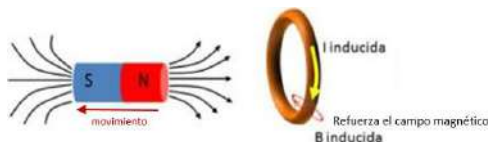
La ley de Lenz es el signo negativo que aparece en la ley de inducción de Faraday. Es una ley experimental y permite saber el sentido que tiene la corriente eléctrica inducida en el circuito. La ley de Lenz dice que el sentido de la corriente inducida es tal que su efecto magnético compensa a la variación de flujo magnético.

La **Ley de Lenz** determina la **dirección** de la corriente y la FEM inducida. Se formula como un principio de conservación de la energía, y establece que la corriente inducida siempre fluye en una dirección que se **opone** al cambio en el flujo magnético que la causa. Esta oposición se representa con el signo negativo en la fórmula de Faraday.

- Si un imán se acerca a una bobina, el flujo magnético a través de ella aumenta. La corriente inducida genera un campo magnético que **se opone a ese aumento**, creando un polo que repele al imán.



- Si un imán se aleja de una bobina, el flujo magnético a través de ella disminuye. La corriente inducida genera un campo magnético que **se opone a esa disminución**, creando un polo que atrae al imán.



AUTOINDUCCIÓN.

Si por alguna causa varía la intensidad de la corriente, el campo magnético también lo hará, ello modifica el flujo magnético y produce una corriente autoinducida. El fenómeno se llama **autoinducción**.

Supongamos un circuito con un interruptor. En el instante en que se cierra el interruptor el valor de la intensidad varía desde cero hasta un valor dado por la ley de Ohm ($I = \varepsilon / R$). Mientras la intensidad aumenta, el campo magnético varía y se autoinduce una corriente de sentido opuesto a I (contracorriente). Ello implica que se tarda cierto tiempo hasta que la corriente se estabiliza en el valor previsto por la ley de Ohm. Cuando el interruptor se abre la corriente se interrumpe bruscamente. La variación de intensidad se traduce en la aparición de una corriente autoinducida que se opone a dicho cambio (extracorriente). Sin embargo, la corriente no puede circular al estar el circuito abierto y se origina una ddp entre los extremos del conductor, que se puede manifestar como una chispa.

- inductancia o coeficiente de autoinducción.

El campo magnético creado por una corriente es proporcional a la intensidad y por tanto el flujo magnético también:

$$\phi_m = L \cdot I$$

L es el coeficiente de proporcionalidad y se llama inductancia, coeficiente de autoinducción o simplemente autoinducción. La unidad del Sistema Internacional se llama Henrio (H).

Todo circuito posee cierta autoinducción que depende de sus características geométricas. Se representa por:

$$\varepsilon = - \frac{d\phi}{dt} = - \frac{d(LI)}{dt} = - L \frac{dI}{dt}$$

En el caso de una bobina de N espiras y longitud l :

$$B = \mu_o \frac{N}{l} I$$

El flujo magnético total que atraviesa el solenoide es el campo magnético multiplicado por el área de una espira y por el número total de espiras (N):

$$\phi_m = N \cdot B \cdot S$$

Sustituyendo B por la expresión anterior:

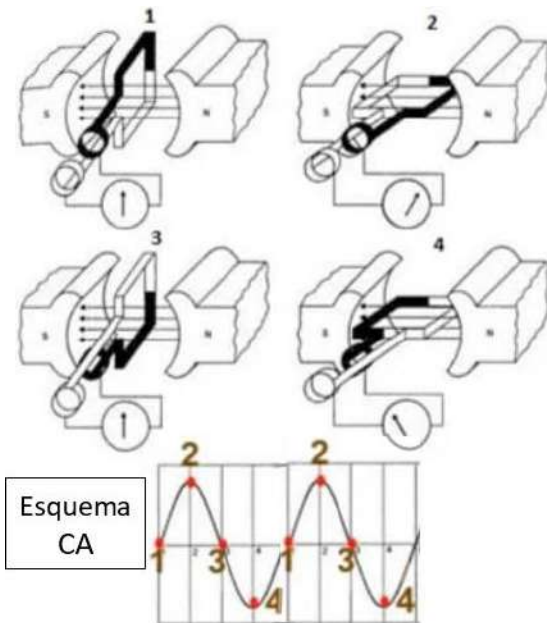
$$\phi_m = \mu_0 \frac{N^2}{l} I S \quad \text{y como } \phi = L \cdot I \text{ tenemos que: } \mathbf{L = \mu_0 \frac{N^2}{l} S}$$

Es decir, la **inductancia** solo depende de las características estructurales del solenoide o bobina.

La unidad de inductancia L es el henrio H

GENERACIÓN DE CORRIENTE ALTERNA Y CONTINUA

El procedimiento más simple para generar una corriente alterna es hacer girar (mediante algún tipo de energía (hidráulica, térmica, etc.) una espira en el interior de un campo magnético uniforme.



Procedencia de la imagen: SunFields Europe

De esta forma, como el vector superficie gira, el flujo del campo a través de la espira tiene un valor que cambia en función del ángulo entre el vector superficie y el campo magnético

Si aplicamos la **ley de Faraday-Lenz**, la fuerza electromotriz inducida en la espira vale: $\mathcal{E} = -\frac{d\phi}{dt}$

Siendo $\phi = \vec{B} \cdot \vec{S} = B \cdot S \cdot \cos\alpha$, donde B es el campo magnético, S la superficie de la espira y α el ángulo que forma el vector campo $\vec{B}$ con el vector superficie $\vec{S}$ de la espira.

1- Cuando la espira se encuentre justo perpendicular al campo magnético (punto 1), en ese punto, **la corriente es cero**

2- Según la espira se va moviendo, esta va cortando cada vez más líneas de campo magnético hasta que llegue al máximo, paralelo al al campo (punto 2)

3- Ahora sigue su movimiento cortando cada vez menos hasta llegar de nuevo a cero (punto 3)

4- La espira continúa su movimiento y es entonces cuando **el sentido de la corriente cambia**, porque los lados de la espira están cortando el campo magnético en sentido contrario al de antes (el lado por el que entraba la corriente inducida en la espira, ahora es por donde sale). Llegando así al máximo negativo en el punto 4 (contrario al punto 2). Finalmente se vuelve a llegar al punto 1 y se repite el ciclo continuamente.

Se obtiene así una **corriente alterna (CA)** y el aparato se denomina **alternador**

Si la espira gira con una velocidad angular constante ω , el ángulo girado por la espira es $\theta = \omega \cdot t$. El flujo magnético es:

$$\phi = B S \cos \theta = B S \cos \omega \cdot t$$

$$\mathcal{E} = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{d(BS \cos \omega \cdot t)}{dt} = -BS \cdot (-\omega \sin \omega \cdot t) = B \cdot S \cdot \omega \cdot \sin \omega \cdot t$$

$$\mathcal{E} = -\frac{d\phi}{dt} = B \cdot S \cdot \omega \cdot \sin(\omega t)$$

En práctica real, un generador no está formado sólo por una espira sino por un alto número N de espiras formando lo que se denomina bobina, por lo que la expresión que se obtiene finalmente es:

$$\varepsilon = N \cdot B \cdot S \cdot \omega \cdot \text{sen}(\omega t)$$

Lo que significa que el valor máximo de la f.e.m. es:

$$\varepsilon_0 = N \cdot B \cdot S \cdot \omega$$

El signo será + o – dependiendo de la posición de la espira en el ciclo, como se ve en el esquema CA

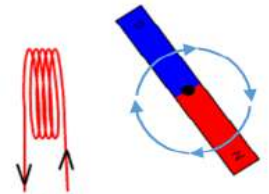
Y que la f.e.m. inducida se puede escribir como: $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \text{sen}(\omega t)$

La intensidad de corriente inducida I se calcula a partir de la f.e.m. obtenida y aplicando la ley de Ohm:

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{N \cdot B \cdot S \cdot \omega}{R} \cdot \text{sen}(\omega t) = I_0 \text{sen}(\omega t)$$

El imán que genera el campo magnético se denomina inductor y la bobina en la que se induce la fuerza electromotriz recibe el nombre de inducido. Los dos extremos de hilo conductor del inducido se conectan a unos anillos colectores que giran junto con la bobina. Las escobillas, en contacto permanente con los anillos colectores, transmiten la fem a los bornes del generador.

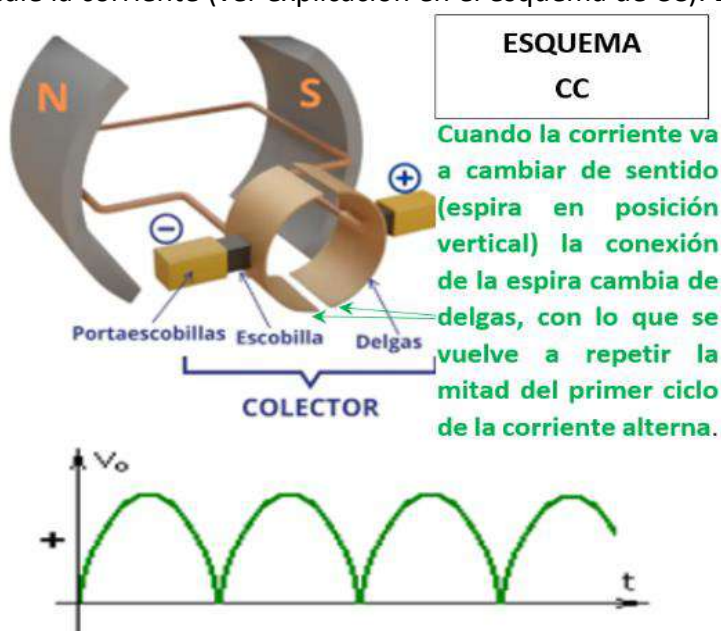
En los alternadores más prácticos, el inducido está fijo y el inductor es el que se mueve, de este modo no son necesarios los anillos colectores ni las escobillas, que necesitan mantenimiento.



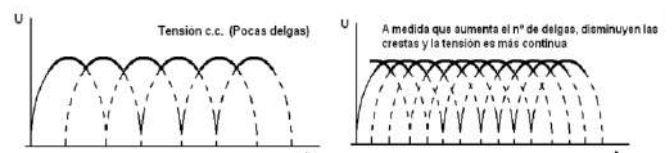
- Corriente continua.

El aparato estudiado anteriormente es un **alternador** ya que genera corriente alterna (CA).

Se puede conseguir corriente continua con una variante en las conexiones del alternador, haciendo que cuando va a cambiar de sentido (puntos 1 y 3 del esquema de CA se inviertan los extremos por los que sale la corriente (ver explicación en el esquema de CC). Este aparato se denomina **dinamo**.



La corriente continua (**CC o DC** en inglés) obtenida es oscilante entre 0 y el valor máximo, pero se puede obtener una CC con un valor de V más constante mediante el uso de 2 espiras (bobinas) y 4 delgas o 4 espiras (bobinas) y 8 delgas



En la práctica la corriente continua para usos en electrónica se obtiene a partir de la corriente alterna y el empleo de rectificadores de diodos y filtros, obteniendo una corriente continua de valor constante.

MOTOR ELÉCTRICO.

Si en lugar de hacer girar las espiras para obtener corriente le proporcionamos corriente a las espiras estas girarán y obtendremos un motor (ver apartado [acción del campo magnético sobre una espira](#)). Es fácil de comprobar que si tenemos un pequeño motor eléctrico y hacemos girar su eje obtenemos electricidad.

Motores de Corriente Continua (CC)

Estos motores, también conocidos como **motores de DC**, se usan en aplicaciones que requieren un **control preciso de la velocidad y el par** o que funcionan con baterías. Son ideales para robots, juguetes, ventiladores de PC y la mayoría de los vehículos eléctricos.

Principio de funcionamiento: Usan conmutadores y escobillas para invertir la dirección de la corriente en la bobina (rotor), lo que asegura que la fuerza magnética mantenga el giro en una sola dirección.

Motores de Corriente Alterna (CA)

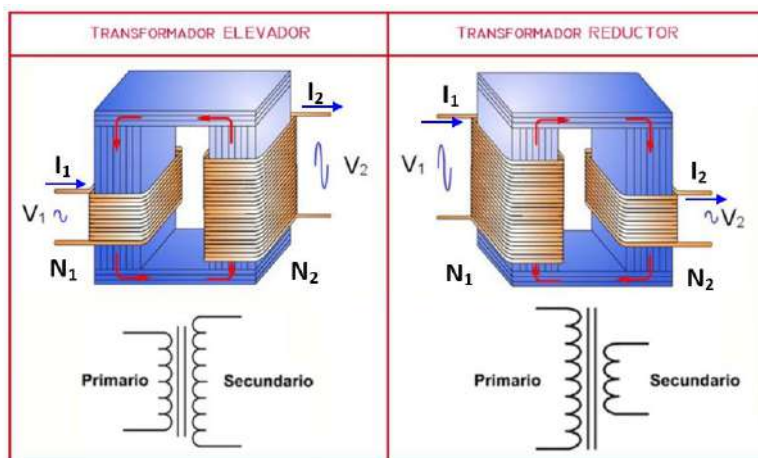
Estos son los motores más comunes en la industria y en electrodomésticos, como lavadoras, neveras y bombas de agua. Se usan donde la energía se suministra a través de la red eléctrica. Son más simples en su construcción y no necesitan escobillas, lo que reduce el mantenimiento.

Principio de funcionamiento: Generan un **campo magnético giratorio** en el estator (la parte fija del motor). Este campo arrastra el rotor (la parte que gira), haciendo que gire a una velocidad que depende de la frecuencia de la corriente alterna.

TRANSFORMADORES.

Muchos aparatos eléctricos deben funcionar con menos voltaje que el que proporciona la red, otros por el contrario pueden necesitar más voltaje. El transformador es el dispositivo encargado de “transformar el voltaje” de mayor a menor o a la inversa, mediante la aplicación del fenómeno de inducción electromagnética.

Un transformador consta de dos bobinas **enrolladas sobre un núcleo común**, la bobina primaria es la que recibe la corriente alterna original de la fuente de energía, mientras que la bobina secundaria es la que tiene la corriente inducida que se transfiere a la carga, gracias al **campo magnético** variable que se genera en el núcleo del transformador.



La tensión inducida en la bobina primaria tendrá el mismo valor absoluto que la fuerza electromotriz aplicada, de modo que podemos decir:

$$V_1 = N_1 \frac{d\phi_m}{dt}$$

Si el flujo de las dos bobinas es el mismo (de ahí el uso del núcleo de hierro que por su alta permeabilidad magnética transmite el flujo de la bobina primaria a la secundaria), la tensión inducida en la bobina secundaria será:

$$V_2 = N_2 \frac{d\phi_m}{dt}$$

Por lo que:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Si el transformador es ideal no hay pérdidas de potencia $P_1 = P_2 \rightarrow I_1 V_1 = I_2 V_2$ por lo que:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

En lugar de los subíndices 1 y 2 se suelen usar p y s (primario y secundario).

LA UNIFICACIÓN DE MAXWELL

James Clerk Maxwell unificó las teorías de la electricidad y el magnetismo en lo que se denominó Electromagnetismo.

Se basó en las cuatro ecuaciones representativas que establecen las relaciones causa-efecto entre los campos eléctrico y magnético y las fuentes que los generan, ya sean cargas, corrientes eléctricas o variaciones temporales de uno u otro campo.

1- Ley de Gauss para el Campo Eléctrico: Esta ley relaciona el **flujo eléctrico** que sale de una superficie cerrada con la **carga neta** encerrada dentro de ella. Nos dice que el campo eléctrico nace de cargas eléctricas positivas y termina en cargas negativas.

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{q}{\epsilon_0}$$

2- Ley de Gauss para el Campo Magnético: Esta ley establece que el **flujo magnético total** que sale de cualquier superficie cerrada es siempre **cero**. Esto significa que las líneas de campo magnético no tienen principio ni final; no existen los **monopolos magnéticos** aislados. Las líneas de campo magnético siempre forman bucles cerrados.

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

3- Ley de Faraday de la Inducción Electromagnética: Esta ley nos dice que un **campo magnético variable** con el tiempo crea un campo eléctrico. En términos prácticos, un cambio en el flujo magnético a través de un circuito induce una fuerza electromotriz (FEM), que puede generar una corriente eléctrica.

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{d\phi_m}{dt}$$

El signo negativo es la contribución de la Ley de Lenz.

4- Ley de Ampere-Maxwell: Esta ley, en su forma original (Ley de Ampere), relacionaba la circulación del campo magnético con la corriente eléctrica que lo produce. Maxwell añadió un término adicional, la **corriente de desplazamiento**, que muestra que un **campo eléctrico variable** también crea un campo magnético. Esta adición fue crucial para predecir la existencia de las ondas electromagnéticas.

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\phi_e}{dt}$$

RECORDATORIO DE LAS REGLAS PARA EL CÁLCULO DE DIRECCIONES Y SENTIDOS EN EL CAMPO MAGNÉTICO

PRODUCTO VECTORIAL O PRODUCTO CRUZ.

El producto vectorial o producto cruz no es conmutativo y sigue la regla de la imagen derecha.

En el campo magnético el producto vectorial aparece en varias ocasiones y debemos seguir las reglas del cálculo vectorial.

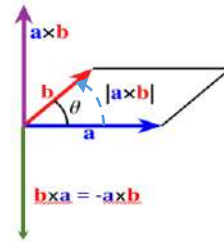
Fuerza magnética sobre una carga en movimiento. Fuerza de Lorentz.

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

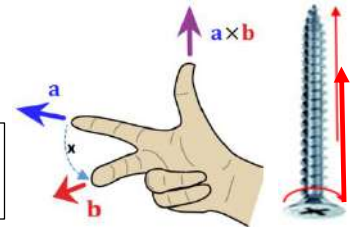
Fuerza del campo magnético sobre un conductor rectilíneo:

$$\vec{F} = I(\vec{l} \times \vec{B})$$

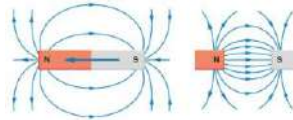
Regla general del producto vectorial



Este producto vectorial y el de la mano inferior son iguales, (gira esta imagen 180° en horizontal y verás que equivale a la imagen de la mano).



LAS LÍNEAS DEL CAMPO MAGNÉTICO SON SIEMPRE DE NORTE A SUR POR EL EXTERIOR, Y DE SUR A NORTE POR EL INTERIOR

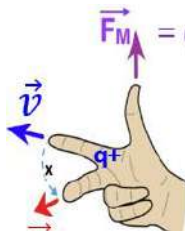


FUERZA MAGNÉTICA SOBRE UNA CARGA EN MOVIMIENTO. FUERZA DE LORENTZ.

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

Regla de la mano derecha.

Si la carga es negativa $\vec{F}$ se invierte

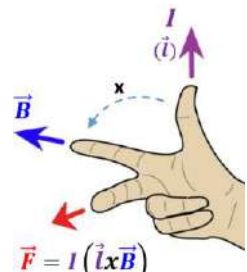


FUERZA DEL CAMPO MAGNÉTICO SOBRE UN CONDUCTOR RECTILÍNEO:

$$\vec{F} = I(\vec{l} \times \vec{B})$$

En este caso el producto vectorial es pulgar x índice.
En lugar de $\vec{l}$ se usa I ya que tiene la misma dirección que $\vec{l}$ pero nos interesa más ver la I .

Regla de la mano derecha

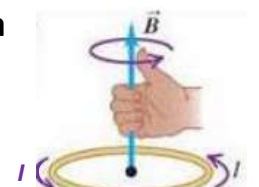


CAMPO MAGNÉTICO CREADO POR UN CONDUCTOR ELÉCTRICO RECTILÍNEO.

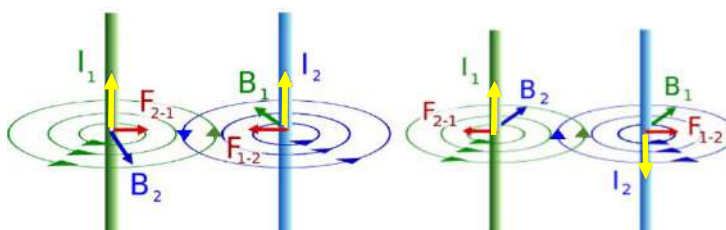
$$|\vec{B}| = B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$



Caso de una espira



FUERZA ENTRE HILOS CONDUCTORES PARALELOS



Los hilos se atraen y los campos $\vec{B}$ de cada hilo llevan sentidos contrarios en el centro

Los hilos se repelen y los campos $\vec{B}$ de cada hilo llevan sentidos iguales en el centro

ANALOGÍAS Y DIFERENCIAS ENTRE CAMPO GRAVITATORIO, ELÉCTRICO Y MAGNÉTICO

CAMPO GRAVITATORIO	CAMPO ELÉCTRICO	CAMPO MAGNÉTICO
Ejerce fuerzas sobre puntos materiales	Ejerce fuerzas sobre cargas eléctricas.	Ejerce fuerzas sólo si la carga está en movimiento.
Las fuerzas son siempre de atracción.	Las fuerzas son de atracción o repulsión	Las fuerzas son de atracción o repulsión
Conservativo	Conservativo	No conservativo
El trabajo para desplazar una masa entre dos puntos del campo no depende de la trayectoria seguida	El trabajo para desplazar una carga entre dos puntos del campo no depende de la trayectoria seguida	El trabajo de la fuerza magnética sobre una carga en movimiento es siempre cero, independientemente de la trayectoria, porque la fuerza magnética es siempre perpendicular a la velocidad de la carga.
Se puede definir una función de energía potencial gravitatoria	Se puede definir una función de energía potencial eléctrica	No se puede definir una función de energía potencial magnética
Líneas de fuerzas abiertas	Líneas de fuerzas abiertas	Líneas de fuerzas cerradas
Las fuerzas tienen la dirección del campo	Las fuerzas tienen la dirección del campo	Las fuerzas son perpendiculares a la dirección del campo
La intensidad del campo es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia	La intensidad del campo es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia	La intensidad del campo no tiene una dependencia fija con la distancia sino que depende de la geometría de las fuentes que lo generan.
La constante G de gravitación es igual en todos los medios materiales	La constante electrostática K depende del medio	La permitividad magnética μ_0 depende del medio
Cualquier cuerpo material crea campo.	Para crear campo un cuerpo material ha de estar cargado.	Para crear campo se necesitan cargas eléctricas en movimiento. El campo magnético en los imanes permanentes se debe al movimiento intrínseco de los electrones en los átomos, lo que crea pequeños campos magnéticos que se alinean.
No se puede apantallar	Se puede apantallar	Se puede apantallar
	Un campo eléctrico variable crea un campo magnético.	Un campo magnético variable crea un campo eléctrico.
No existen dipolos gravitatorios	Existen dipolos eléctricos, en los cuales las cargas se pueden separar	Existen dipolos magnéticos, en los cuales las cargas magnéticas no se pueden separar.