

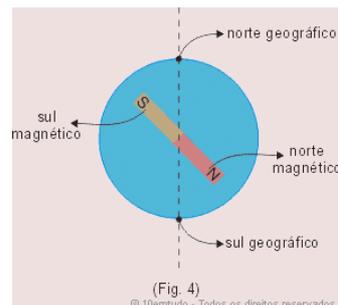
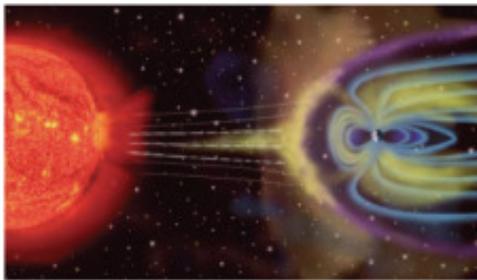
TEMA 2. EL CAMPO MAGNÉTICO

2.1 INTRODUCCIÓN

Desde siglos antes de Cristo se conocía que algunos minerales de hierro, como la magnetita (Fe_3O_4), atraían pequeños trozos de hierro. Esta propiedad se llamó *magnetismo* y a los cuerpos que la poseían *imanes*.

En 1600 *William Gilbert* realizó el primer estudio minucioso sobre el magnetismo. En su libro *De Magnete* se considera a la Tierra, por primera vez, como un gran imán natural.

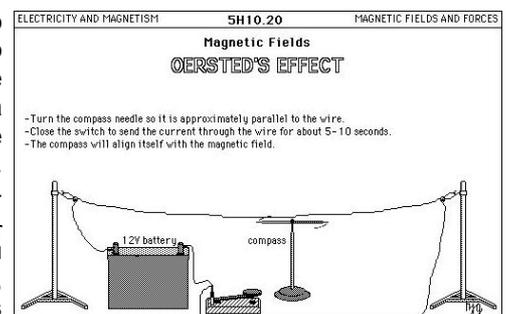
Gilbert, William (1544-1603), contemporáneo de Kepler y Galileo, físico y médico inglés conocido sobre todo por sus experimentos originales sobre la naturaleza de la **electricidad** y el **magnetismo**. Nació en **Colchester**, Essex, y estudió en el Saint John's College de la **Universidad de Cambridge**. Comenzó a practicar la **medicina** en Londres en 1573 y en 1601 fue nombrado médico de **Isabel I**. Gilbert descubrió que muchas sustancias tenían la capacidad de atraer objetos ligeros cuando se frotaban y aplicó el término eléctrico para la fuerza que ejercen estas sustancias después de ser frotadas. Fue el primero en utilizar términos como 'energía eléctrica', 'atracción eléctrica' y 'polo magnético'. Quizá su aportación más importante fue la demostración experimental de la naturaleza magnética de la **Tierra**. También fue el primer defensor en Inglaterra del **sistema de Copérnico** sobre la mecánica celeste y planteó que no todas las estrellas fijas están a la misma distancia de la Tierra. Su obra más importante fue *De Magnete* (1600), quizá la primera gran obra científica escrita en Inglaterra.



En 1750 **J. Michell** (1724-1793) usó una balanza de torsión para mostrar que los polos magnéticos ejercen fuerzas de atracción o de repulsión entre sí y que estas fuerzas varían con el inverso del cuadrado de la distancia. Aunque la fuerza entre dos polos magnéticos es semejante a la que existe entre dos cargas eléctricas, existe una diferencia importante: las cargas eléctricas se pueden aislar, mientras que los polos magnéticos no se pueden separar.

En 1820, **Hans Cristian Oersted** dio a conocer su descubrimiento de que la corriente eléctrica produce efectos magnéticos, observando como el paso de una corriente eléctrica hace desviarse a una aguja imantada.

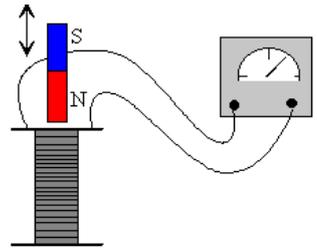
Oersted, Hans Christian (1777-1851), físico y químico danés, que demostró la existencia de un campo magnético en torno a una corriente eléctrica. Nació en Rudkøbing y estudió en la Universidad de Copenhague. Fue profesor de **física** en esa universidad en 1806. En 1819 descubrió que una aguja imantada se desvía colocándose en dirección perpendicular a un conductor por el que circula una corriente eléctrica, iniciando así el estudio del electromagnetismo. Al parecer, también fue el primero en aislar el (1825) **aluminio**. En 1844 apareció su *Manual de física mecánica*. Oersted, directamente influido por Kant, era un pensador encuadrado dentro de la tradición antinewtoniana. Su línea de trabajo giraba en torno a la idea de la unidad de las fuerzas, es decir, de que todas las fuerzas son simplemente manifestaciones de las fuerzas atractivas y repulsivas fundamentales (igual que Kant). Siguiendo la idea de la unidad de las fuerzas, a Oersted le parecía



que todas las fuerzas debían de ser *directamente* convertibles unas en otras. En un trabajo en el que analizaba la presunta identidad entre las fuerzas químicas y eléctricas, Oersted ya había señalado (1813), antes de su famoso descubrimiento, la importancia de comprobar la interacción entre la electricidad y el magnetismo. El **modelo unificado** en el que todas las fuerzas conocidas por entonces (eléctricas, magnéticas, de cohesión, gravitacionales, etc.) se podrían entender como formas distintas de las dos únicas acciones posibles: la repulsión por contacto y la atracción a distancia, parece que fue una guía constante en las investigaciones de Faraday sobre la electricidad y el magnetismo.

En 1831, M. Faraday observó el efecto contrario: si se aproxima un imán a un conductor en movimiento, éste origina una corriente eléctrica. Ambas experiencias tienen el mismo fundamento: *las cargas en movimiento producen fuerzas magnéticas*.

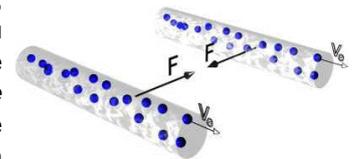
Faraday, Michael (1791-1867), físico y químico británico, conocido principalmente por sus descubrimientos de la **inducción** electromagnética y de las leyes de la electrólisis. Era hijo de un herrero y recibió poca formación académica. Mientras trabajaba de aprendiz con un encuadernador de Londres, leyó libros de temas científicos y realizó experimentos en el campo de la **electricidad**. En 1812 asistió a una serie de conferencias impartidas por el químico **Humphry Davy** y envió a éste las notas que tomó en esas conferencias junto con una petición de empleo. Davy le contrató como ayudante en su laboratorio químico de la Institución Real y en 1813 le llevó con él a un largo viaje por Europa. Hacia 1820 se independizó, y comenzó su larga y fecunda carrera científica. La contribución de Faraday fue desde entonces inmensa, hizo del orden de 30.000 experimentos, que describía cuidadosamente en sus diarios, y anotaciones.



Faraday entró en la Sociedad Real en 1824 y al año siguiente fue nombrado director del laboratorio de la Institución Real. Las investigaciones que convirtieron a Faraday en el primer científico experimental de su época las realizó en los campos de la electricidad y el **magnetismo**. En 1821 trazó el campo magnético alrededor de un **conductor** por el que circula una corriente eléctrica (la existencia del campo magnético había sido observada por vez primera por el físico danés **Hans Christian Oersted** en 1819). En 1831 Faraday descubrió la inducción electromagnética, y el mismo año demostró la inducción de una corriente eléctrica por otra

Ampère fue uno de los más sorprendidos por el descubrimiento de Oersted. Como muchos otros, era de la opinión de Coulomb de que sólo había interacciones entre la electricidad y la electricidad, y entre los fenómenos magnéticos y los fenómenos magnéticos; es decir, entre fenómenos de la misma naturaleza. Sin embargo, con sus teorías basadas en las experiencias de Oersted y de Faraday, puso los fundamentos del electromagnetismo.

Ampère, André Marie (1775-1836), científico francés, conocido por sus importantes aportaciones al estudio de la electrodinámica. Ampère nació en Polémieux-au-Mont-d'Or, cerca de Lyon. El **amperio** (A), la unidad de intensidad de corriente eléctrica, toma su nombre de él. Su teoría electrodinámica y sus interpretaciones sobre la relación entre **electricidad** y **magnetismo** se publicaron en su *Colección de observaciones sobre electrodinámica* (1822) y en su *Teoría de los fenómenos electrodinámicos* (1826). Ampère inventó la aguja astática, que hizo posible el moderno galvanómetro. Fue el primero en demostrar que dos conductores paralelos por los que circula una corriente en el mismo sentido, se atraen el uno al otro, mientras que si los sentidos de la corriente son opuestos, se repelen.



En la década de 1860, J. C. Maxwell (1831 - 1879) enunció, a través de las ideas de Ampère, la síntesis de la electricidad y del magnetismo

2.2 IMANES

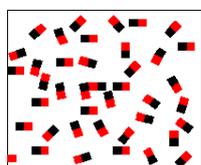
Los *imanes* pueden ser *naturales*, como la magnetita, o *artificiales*, si se preparan por la magnetización del hierro o de algunos de los metales ferromagnéticos: cobalto, manganeso, gadolinio y disprosio. La mayor parte de los imanes comerciales se fabrican de ALICO son una aleación de aluminio, cobalto y cobre.

Tanto unos como otros presentan las siguientes **propiedades**:

1. Todo imán presenta su máxima atracción en los extremos, que reciben el nombre de **polos magnéticos**. Entre los polos existe una zona neutra en donde el imán no ejerce ninguna atracción.
2. Un imán tiene dos polos que se conoce con los nombres de Norte y Sur, porque se orienta según los polos geográficos de la Tierra.
3. Los polos, aunque distintos, no se pueden separar.
4. Los polos de un mismo nombre se repelen y polos de distinto nombre se atraen.

Las propiedades magnéticas de los imanes naturales son consecuencia también de las cargas móviles: un imán natural posee una gran cantidad de átomos, cuyos electrones en su movimiento de giro producen minúsculos campos magnéticos cuya resultante puede producir un magnetismo exterior estable. Un electrón es el imán más pequeño que existe y también tiene sus polos norte y sur inseparables.

A los imanes atómicos se les denomina **dipolos magnéticos**. Estos dipolos pueden surgir tanto por el movimiento orbital de los electrones como por el movimiento de rotación de los mismos (spin).



No todas las sustancias tienen propiedades magnéticas puesto que la mayor parte de los cuerpos tienen sus imanes orientados al azar.

Según el comportamiento magnético de las sustancias, se pueden clasificar en:

1. **Sustancias ferromagnéticas.**- Son fuertemente atraídas por un imán y fácilmente imantables. Entre ellas se encuentra el hierro, el cobalto, el níquel, el acero y las aleaciones de dichos metales. En un material ferromagnético no imantado los dominios están orientados al azar. Pero en presencia de un campo magnético externo la mayoría de los dominios se orientan en la misma dirección y sentido que el imán exterior.
2. **Sustancias paramagnéticas.**- Son atraídas débilmente por un imán y, prácticamente no se imantan. Ej: el aluminio. En estas sustancias la orientación de sus dipolos es muy débil.
3. **Sustancias diamagnéticas.**- Son repelidas por un imán. Esto es debido a que algunos dipolos magnéticos se orientan en sentido contrario al campo magnético exterior. Ej: plata, cobre, plomo, etc.

Se puede destruir el magnetismo de una sustancia magnética por calentamiento y se restablece cuando el material se enfría de nuevo. Existen sustancias, como el gadolinio, que a temperatura ambiente no es magnético, pero si lo introducimos en nitrógeno líquido se convierte en una sustancia ferromagnética.

2.3 CAMPO MAGNÉTICO Y LÍNEAS DE FUERZA

El campo magnético de un imán con sus dos polos es semejante al campo eléctrico producido por dos cargas semejantes y opuestas.

Todo imán está rodeado por un espacio en el cual ejerce efectos magnéticos sobre limaduras de hierro, sobre una brújula, sobre otros imanes y sobre cargas eléctricas en movimiento. Esta zona del espacio se llama **campo magnético**. El campo magnético viene determinado por el vector **B** que recibe el nombre de **inducción magnética**. Más correcto sería denominarlo *intensidad de campo magnético*, pero esa denominación se le asignó por razones históricas al vector **H** también relacionado con el campo magnético.

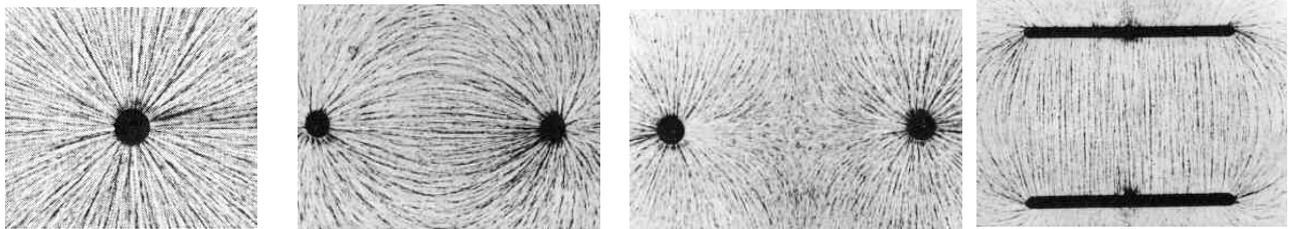
El campo magnético se puede representar mediante **líneas de campo o líneas de inducción magnética**. La dirección del campo es tangente en cada punto a las líneas de inducción.

1. Las líneas de inducción magnética salen del polo norte y entran en el polo sur
2. Las líneas de campo magnético son cerradas: por dentro del imán van de sur a norte

Comparemos las líneas de campo generadas por partículas cargadas eléctricamente (líneas de campo eléctrico) y las líneas de campo magnético producidas por imanes o elementos de corriente

Líneas de un campo eléctrico creado por:

Carga puntual Cargas de signo opuesto Cargas de igual signo Láminas de signo opuesto

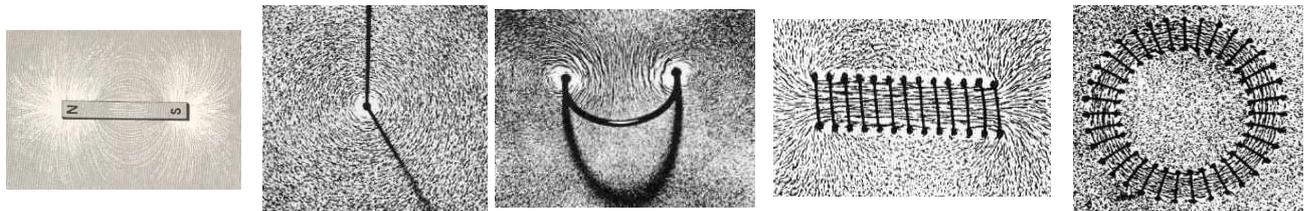


Líneas de un campo magnético generado por:

IMAN

CORRIENTE ELÉCTRICA QUE PASA POR:

Hilo rectilíneo Hilo circular Solenoide circular Solenoide Toroidal



*Se dice que existe un **campo magnético B** en una región del espacio si se manifiestan interacciones magnéticas sobre imanes, elementos ferromagnéticos o cargas eléctricas en movimiento.*

2.4 FUENTES DEL CAMPO MAGNÉTICO.

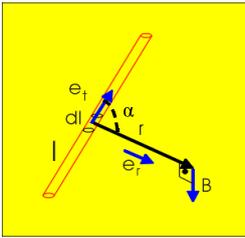
CREACIÓN DE CAMPOS MAGNÉTICOS POR CARGAS EN MOVIMIENTO

Definido el campo magnético, estudiaremos los agentes que pueden producirlo. Oersted demostró que la corriente eléctrica era la fuente de un campo magnético.

Vamos a estudiar el campo originado por:

- una corriente rectilínea e indefinida
- una espira

Después de los descubrimientos de Oersted y los experimentos llevados a cabo por Ampère, J.B. Biot (1774-1862) y F. Savart (1791-1841) dieron lugar, en 1820, a la que en la actualidad conocemos como **Ley de Biot y Sarvat**, que determina el campo magnético **B** creado en un punto del espacio por un *elemento de corriente dl (vector elemental que tiene la dirección del conductor y el sentido de la corriente)* por donde circula una intensidad de corriente *I*.



El campo magnético cumple las siguientes propiedades:

1. El vector $d\mathbf{B}$ es perpendicular a $d\mathbf{l}$ y al vector unitario \mathbf{e}_r $k = \mu_0 / 4\pi$

2. El módulo de $d\mathbf{B}$ es inversamente proporcional a r^2

3. El módulo de $d\mathbf{B}$ es proporcional a $d\mathbf{l}$

3. El módulo de $d\mathbf{B}$ es proporcional a $\sin \alpha$

$$d\mathbf{B} = k' \cdot \frac{I}{r^2} \cdot d\mathbf{l} \cdot \sin \alpha$$

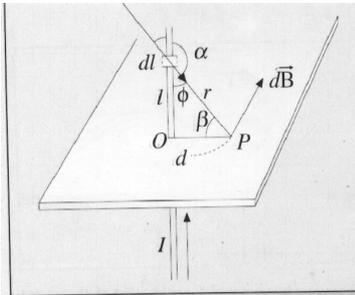
k' : cte de proporcionalidad que depende del medio. En el SI: $= 10^{-7} \text{ T}\cdot\text{m/A}$

Campo magnético producido por una corriente rectilínea e indefinida

Las líneas eléctricas nunca pueden existir en pequeños segmentos, luego hay que ir sumando o integrando las contribuciones eléctricas debidas a cada segmento de la corriente que circule.

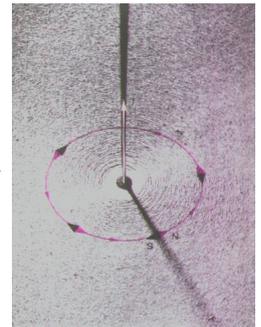
Utilizamos la ley de Biot para calcular el campo magnético \mathbf{B} producido por un conductor rectilíneo indefinido por el que circula una corriente de intensidad I .

$$B = \int_{-\infty}^{\infty} k' \frac{I \cdot dl \cdot \sin \alpha}{r^2}$$



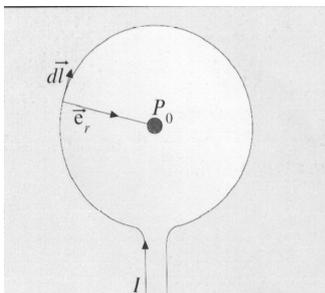
Vamos a hallar el valor del campo en un punto P situado a una distancia d de un conductor largo. Sea l la distancia desde O hasta un elemento de corriente dl . Sea r la distancia desde el elemento de corriente al punto considerado. ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Tm/A}$ - permeabilidad magnética en el vacío)

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot d} = \frac{2 \cdot k' \cdot I}{d}$$

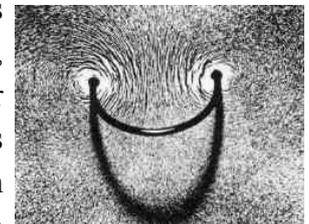


El campo debido a un hilo rectilíneo suficientemente largo es siempre perpendicular al hilo, proporcional a la intensidad de corriente que circula por él y disminuye inversamente con la primera potencia con la distancia al hilo. El resultado neto es un campo que se mueve en circunferencias. Las líneas de fuerza son circunferencias concéntricas con el hilo y el campo es constante a lo largo de cada circunferencia

Campo magnético producido por una corriente espira



Hay muchos dispositivos en los que los conductores están arrollados formando una bobina: electroimanes, transformadores, etc. Por ello es importante calcular el campo magnético producido por uno de estos arrollamientos. Para hallar la inducción magnética en el centro de la espira de radio r , suponemos que está dividida en elementos de corriente dl . La inducción total será la suma de las inducciones debidas a todos los elementos de corriente en que se pueden descomponer la espira. Como dl y \mathbf{e}_r son perpendiculares $\sin \alpha = 1$. Teniendo eso en cuenta, la integral quedará:



Como dl y \mathbf{e}_r son perpendiculares $\sin \alpha = 1$. Teniendo eso en cuenta, la integral quedará:

$$B = \int_0^{2\pi r} k' \frac{I \cdot dl \cdot \sin \alpha}{r^2} = \frac{\mu_0 \cdot I}{2 \cdot r}$$

2.5 FUERZAS MAGNÉTICAS

Sobre imanes

La ecuación de la fuerza entre polos magnéticos se asemeja a la ecuación de la fuerza entre cargas eléctricas o entre masas gravitatorias.

$$F_m = K_m \frac{p_1 \cdot p_2}{r^2}$$

p_1, p_2 : polos magnéticos norte y/o sur. Los polos opuestos se atraen y los iguales se repelen

K_m : Constante magnética

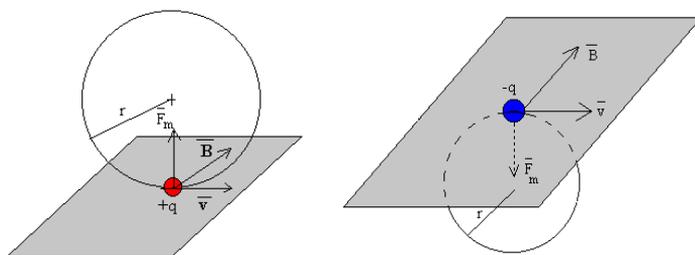
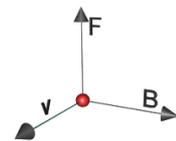
Sobre cargas móviles situadas en campos magnéticos. Ley de Lorentz

a) Sobre una carga

Un campo magnético no aplica fuerza alguna a una carga eléctrica que esté en reposo; sin embargo, si la carga eléctrica está en movimiento existe una fuerza magnética llamada **Fuerza de Lorentz**, perpendicular tanto al campo **B** como a la dirección del movimiento de la carga **v**

$$\vec{F} = q \cdot (\vec{v} \times \vec{B}) \quad F = q \cdot v \cdot B \cdot \text{sen}\alpha$$

Si la carga es negativa ($q < 0$) el producto vectorial es opuesto.



α : ángulo que forma la dirección del movimiento v con la dirección del campo B
 - si la partícula se mueve en la misma dirección al campo, la fuerza es nula
 - si la partícula se mueve perpendicular al campo, la fuerza es máxima

Como la fuerza magnética siempre es perpendicular a la velocidad, la fuerza no la hace aumentar ni disminuir, y las cargas tienden a seguir trayectorias circulares en campos eléctricos uniformes.

El radio de dicha órbita, puede obtenerse a partir de la aplicación de la ecuación de la dinámica del movimiento circular uniforme: fuerza igual a masa por aceleración normal. La velocidad angular con que la partícula describe la órbita viene dada por:

$$F_m = m \frac{v^2}{r} \quad qvB = m \frac{v^2}{r} \quad r = \frac{mv}{qB}$$

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

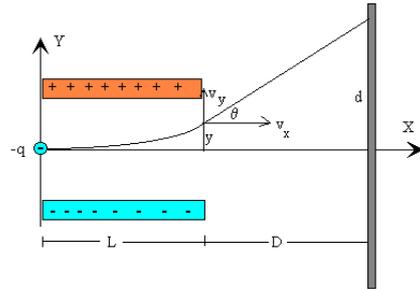
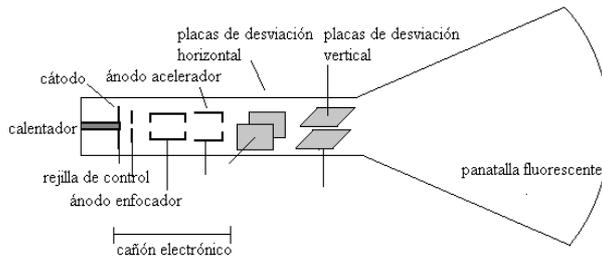
Atendiendo a las fuerzas de Lorentz, se define *inducción de campo magnético en un punto, a la fuerza que ejerce el campo sobre la unidad de carga que se mueve con una unidad de velocidad en dirección perpendicular al campo y a la fuerza.*

$$B = \frac{F}{q \cdot v}$$

La unidad de campo magnético en el S.I. es: $\frac{N}{C \cdot \frac{m}{s}} = \frac{N}{A \cdot m} = T(\text{tesla})$ y se define como *la inducción de un campo magnético que ejerce una fuerza de un newton sobre una carga de un coulombio cuando se mueve con la velocidad de un metro por segundo, en el interior del campo, y perpendicular a las líneas de inducción.*

Aplicaciones de la fuerza de Lorentz:

- Pantalla de televisión, ordenadores, osciloscopios, etc.

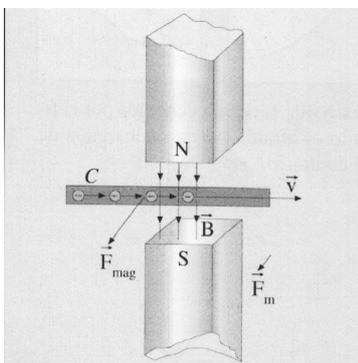


El tubo de un televisor, o tubo de rayos catódicos, utiliza un haz de electrones que se desvían por medio de campos magnéticos, para formar imágenes. Consta de 3 partes:

- Zona aceleradora.- En el tubo, los electrones se liberan de los átomos en el cátodo por acción de la corriente eléctrica. Un campo eléctrico de alta tensión acelera los electrones y los enfoca formando un haz estrecho.
- Zona deflectora.- los campos magnéticos deflectores desvían el haz de electrones de izquierda a derecha y de arriba abajo, en la pantalla del tubo
- zona de imagen.- pantalla recubierta con fósforo. El haz produce una imagen 30 veces por segundo.

- Microscopio electrónico. (Libro Mc Graw pag 212)
- Aceleradores de partículas.

b) Sobre corrientes eléctricas:



Una corriente eléctrica consiste en un flujo de electrones con una velocidad común de desplazamiento. Por consiguiente, cada uno de los electrones que forma la corriente estará sometido a una fuerza magnética, cuando el conductor se encuentre en un campo magnético.

Si colocamos un conductor perpendicular a las líneas de campo, con una longitud dentro del campo igual a l ; al hacer circular electrones con una velocidad v emplearán un tiempo en atravesar el campo igual a:

$$t = \frac{l}{v} \Rightarrow l = v \cdot t$$

Durante ese tiempo la cantidad de carga que circula será $Q = I \cdot t$ siendo I la intensidad de corriente. Por tanto, la fuerza sobre esta carga estará de acuerdo con la ecuación de Lorentz:

$$F = Q \cdot v \cdot B \cdot \text{sen} \alpha = I \cdot t \cdot v \cdot B \cdot \text{sen} \alpha = I \cdot l \cdot B \cdot \text{sen} \alpha$$

Luego, la fuerza que ejerce un campo magnético sobre un conductor rectilíneo depende de la intensidad de corriente, de la longitud del conductor dentro del campo y del ángulo que forma el conductor con el campo.

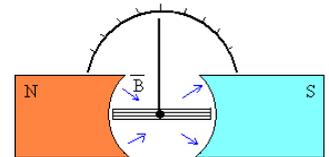
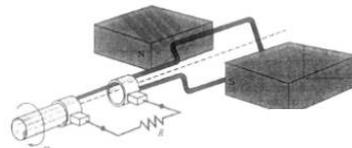
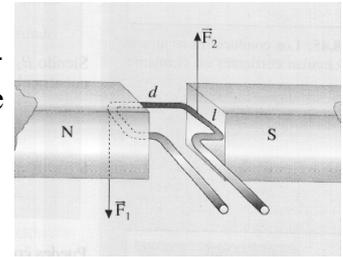
Si en lugar de un conductor rectilíneo colocamos una espira rectangular dentro del campo magnético, se produce un par de fuerzas que tiende a producir una rotación de la espira.

Cada par de fuerzas vale: $F_1 = F_2 = I \cdot l \cdot B$

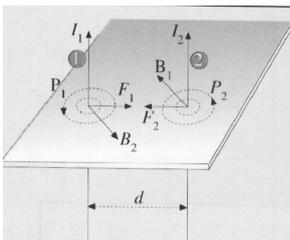
El momento de torsión del par es: $M = F \cdot d = I \cdot l \cdot B \cdot d = I \cdot B \cdot S$

siendo $S = l \cdot d$ la superficie de la espiral.

En este hecho se fundamentan los motores eléctricos y los aparatos de medida, como los galvanómetros, amperímetros y voltímetros



c) Entre corrientes paralelas. Definición de Amperio:



Supongamos dos conductores rectilíneos y paralelos separados por una distancia d y por los que pasan corrientes I_1 e I_2 en el mismo sentido. Cada conductor se verá sometido a la fuerza magnética generado por el otro conductor.

El conductor 1 estará sometido a una fuerza F_1 que vale:

$$F_1 = I_1 \cdot l_1 \cdot B_2$$

Siendo B_2 el campo magnético creado por el conductor 2 en el punto P_1 , donde se encuentra el conductor 1.

$$B_2 = \frac{\mu_0 \cdot I_2}{2 \cdot \pi \cdot d}$$

Sustituyendo este valor en la expresión de la fuerza tenemos: $F_1 = I_1 \cdot l_1 \cdot \frac{\mu_0 \cdot I_2}{2 \cdot \pi \cdot d} = \frac{\mu_0 \cdot I_1}{2 \cdot \pi \cdot d} I_2 \cdot l_1$

El conductor 2 estará sometido a la fuerza: $F_2 = \frac{\mu_0 \cdot I_1}{2 \cdot \pi \cdot d} I_2 \cdot l_2$

Ambas fuerzas tienen la misma dirección pero sentido opuesto. De donde se deduce la siguiente propiedad: *dos conductores paralelos e indefinidos por los que circulan corrientes del mismo sentido se atraen. Dos conductores por los que circulan corrientes en sentido contrario se repelen.*

El hecho de que dos conductores paralelos ejercen fuerzas de atracción o repulsión entre ellos se ha tomado como criterio para definir la unidad de intensidad de corriente en el SI.

Amperio es la corriente que circulando por dos conductores paralelos e indefinidos separados por una distancia de un metro en el vacío produce sobre cada conductor una fuerza de $2 \cdot 10^{-7} \text{ N}$ por metro de longitud del conductor.

El valor numérico de $2 \cdot 10^{-7} \text{ N}$ se obtiene de la ecuación anterior con $I_1 = I_2 = 1 \text{ A}$ y $d = 1 \text{ m}$

TEMA 3. INDUCCIÓN ELECTRO MAGNÉTICA

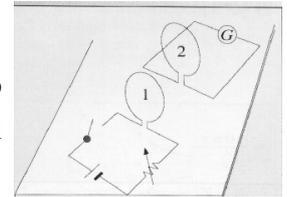
3.1 EXPERIENCIAS DE FARADAY Y DE HENRY

La inducción electromagnética es el proceso por el cual se genera una corriente eléctrica en un circuito como resultado de la variación de un campo magnético

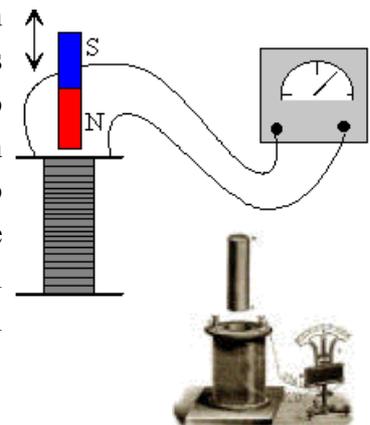
a) Experiencias de Faraday

El descubrimiento de las corrientes inducidas no tiene nada de casual o improvisado, como bien lo muestran los intentos infructuosos de Faraday registrados en su diario de los años 1824-1828.

1ª Experiencia: Dos espiras, una de las cuales tiene un generador.- Faraday logró detectar por primera vez corrientes inducidas el 29 de agosto de 1831. Solamente en los momentos de establecer e interrumpir el contacto del circuito primario con la batería eran apreciables breves corrientes en el secundario. El aparato empleado era un anillo de hierro con sus bobinados primario y secundario.



2ª Experiencia: Una espira unida a un galvanómetro.- También estudió las corrientes inducidas producidas por movimiento de imanes mediante un cilindro de cartón alrededor del cual arrolló 220 pies de hilo de cobre convenientemente aislado conectando sus extremos a un galvanómetro sensible. Cuando empujaba un imán cilíndrico a lo largo del hueco de la bobina la aguja del galvanómetro se movía, cuando se retiraba el imán la aguja se movía en sentido contrario. Al descubrir el fenómeno de la inducción, Faraday había conseguido transformar el magnetismo en electricidad, el [experimento inverso al de Oersted](#).

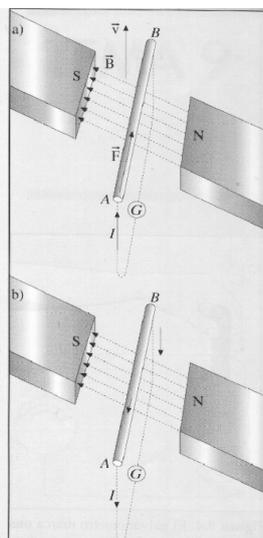


b) Experiencias de Henry

Casi simultáneamente, en 1831, y de manera independiente, el científico americano J. Henry

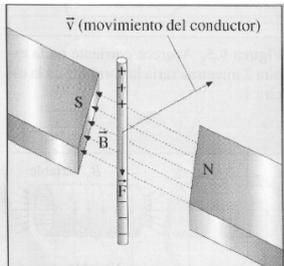
(1797-1878) descubría que *si un conductor de longitud l se mueve perpendicularmente a un campo magnético se origina una diferencia de potencial en los extremos del conductor*. Esta diferencia de potencial origina una corriente si el alambre forma parte de un circuito cerrado. Henry observó los siguientes hechos:

1. Cuando el alambre se mueve a través del campo, el galvanómetro indica que hay una corriente en el conductor.
2. Mientras el conductor se mueve hacia arriba la corriente circula en un sentido. Si se mueve hacia abajo, la corriente tiene sentido opuesto.
3. Si el alambre se deja quieto o se mueve paralelo al campo, no se induce corriente en el alambre. La corriente se induce sólo si el alambre se mueve cortando las líneas de campo.
4. Si el alambre está inmóvil y se mueve el campo magnético, también aparece corriente inducida en el alambre.



5. Si el alambre se mueve formando un ángulo distinto a 90° con el campo magnético, solamente la componente de la velocidad perpendicular al campo magnético genera corriente.

Interpretación de las experiencias de Faraday y de Henry



Hay dos maneras de explicar los fenómenos de inducción:

a) Considerarlo como una consecuencia de la ley de Lorentz: cuando una carga se mueve en un campo magnético está sometida a una fuerza. Las cargas libres que existen en un conductor se mueven bajo la acción de esta fuerza, originándose una fuerza inducida.

$$\vec{F} = q \cdot (\vec{v} \times \vec{B}) \quad F = q \cdot v \cdot B \cdot \text{sen } \theta$$

La carga en los extremos va aumentando hasta que la fuerza magnética es equilibrada por la fuerza del campo eléctrico. En este punto se cumple: $q \cdot E = q \cdot v \cdot B \cdot \text{sen } \theta$ o $E = v \cdot B \cdot \text{sen } \theta$

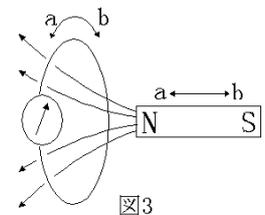
Este campo eléctrico generado en el conductor de longitud l , que se mueve con una velocidad v en un campo magnético B , produce una diferencia de potencial V o fuerza electromotriz (f.e.m.) entre los extremos del conductor:

$$V = E \cdot l = B \cdot l \cdot v \cdot \text{sen } \theta$$

b) Suponer que la causa de las corrientes inducidas es la *variación del flujo magnético* que atraviesa el plano inducido. Recuerda que *el flujo* (es decir, el número de líneas de campo que pasan a través de una superficie) *depende del valor del campo B, del valor del área de la superficie S y de la orientación de ésta con el campo magnético*:

$$N = B \cdot S \cdot \cos \theta$$

En todas las experiencias de Faraday que hemos descrito varía el valor del campo y, por tanto, del flujo. Al acercarse el imán aumenta la intensidad del campo en la región de la espira, aumentando el flujo. Mientras se desplaza el imán hay variación del flujo $\Delta N = N_f - N_0$ (por tanto, hay corriente inducida); si el imán se para cesa la variación del flujo.



Si la espira gira un ángulo de 90° de manera que la normal a la espira sea perpendicular al eje del imán, se ha producido una variación de flujo. $\Delta N = B \cdot S \cdot \cos 90^\circ - B \cdot S \cdot \cos 0^\circ = - B \cdot S$

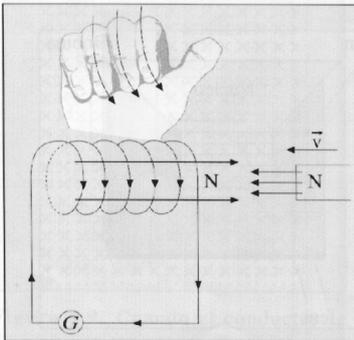
3.2 LEYES DE FARADAY Y DE LENZ

La inducción electromagnética se rige por dos leyes: *la Ley de Lenz que nos da el sentido de la corriente inducida, y la Ley de Faraday que nos da el valor de dicha corriente.*

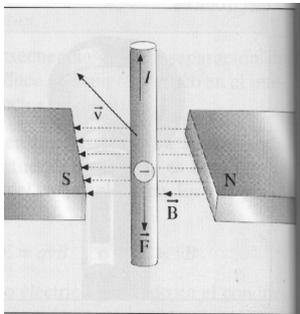
a) Ley de Lenz

El sentido en que circula la corriente inducida fue determinado en 1835 por el físico alemán H. Lenz (1804-1865). El resultado de su descubrimiento se conoce como la **ley de Lenz**:

La corriente se induce en un sentido tal que los efectos que genera tienden a oponerse al cambio de flujo que las origina



La ley de Lenz representa el principio de acción y reacción del electromagnetismo. Cuando el polo N del imán se aproxima a la bobina, induce una corriente en ella que, a su vez crea otro campo magnético que produce una fuerza que se opone al movimiento del imán. Si el polo N se aleja, aparece en la cara de la bobina un polo S que tiende a oponerse a dicho alejamiento, para ello cambia de sentido la corriente de la bobina.



Para hallar el sentido de la corriente en un conductor móvil, experiencia de Henry, utilizamos la regla del producto vectorial:

$$F = q \cdot (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) = -e \cdot (\mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

La intensidad de corriente tiene sentido opuesto al movimiento de los electrones; por tanto, el sentido de la corriente vendrá dado por el producto $(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$

b) Ley de Faraday

En las experiencias anteriores hemos observado que siempre se ha producido una variación del flujo magnético que atraviesa la superficie de la espira. La relación entre la variación del flujo magnético y la fuerza electromotriz inducida constituye la **ley de Faraday**. Esta ley nos permite calcular el valor de la corriente inducida y se enuncia así:

La corriente inducida es producida por una fem inducida que es directamente proporcional a la rapidez con que varía el flujo y directamente proporcional al número de espiras "N" del inducido.

$$\varepsilon = -N \frac{\Phi_1 - \Phi_0}{\Delta \cdot t}$$

, ∴ viene dada en voltios (V) M: en Weber (T·m²)

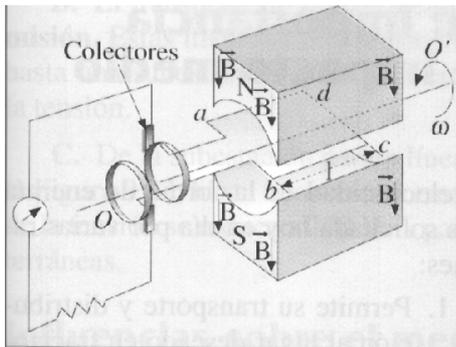
Un flujo magnético que cambia con la rapidez de 1 Weber por segundo induce una fem de un voltio por cada vuelta de conductor.

La fuerza electromotriz instantánea será:

$$\varepsilon = -N \frac{d}{dt} (B \cdot S \cdot \cos. w \cdot t) = -N \cdot B \cdot S \cdot w \cdot \text{sen.} w \cdot t$$

Cuando no haya variación del flujo en el transcurso del tiempo, la fem es cero y no hay corriente en el inducido.

3.3 PRODUCCIÓN DE CORRIENTES ALTERNAS MEDIANTE VARIACIÓN DEL FLUJO MAGNÉTICO



Una de las principales aplicaciones de la inducción electromagnética es la obtención a nivel industrial de la energía eléctrica. La inducción electromagnética permite transformar la energía mecánica en energía eléctrica.

Los generadores industriales de corriente emplean bobinas que giran dentro de un campo magnético. Cuando la espira gira con una velocidad angular ω constante en un campo magnético, se origina una corriente que periódicamente cambia de sentido

Si θ es el ángulo que forma el campo magnético con la normal al plano de la espira en cualquier instante, el flujo magnético vale:

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos \theta = N \cdot B \cdot S \cdot \cos \omega \cdot t$$

Según la ley de Faraday la fem inducida en la espira será :

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} = B \cdot S \cdot \omega \cdot \sin \omega \cdot t$$

Si en lugar de una espira fuera una bobina con N espiras, la fem inducida en cualquier instante será N veces mayor:

$$\varepsilon = N \cdot B \cdot \omega \cdot S \cdot \sin \omega \cdot t = N \cdot B \cdot \omega \cdot S \cdot \sin 2\pi f \cdot t$$

En Europa la frecuencia de la corriente que nos suministran las compañías es de 50 Hz

Diferencia entre corriente continua y corriente alterna

Si dos cuerpos de carga igual y opuesta se conectan por medio de un conductor metálico, por ejemplo un cable, las cargas se neutralizan mutuamente. Esta neutralización se lleva a cabo mediante un flujo de electrones a través del conductor, desde el cuerpo cargado negativamente al cargado positivamente (en ingeniería eléctrica, se considera por convención que la corriente fluye en sentido opuesto, es decir, de la carga positiva a la negativa). En cualquier sistema continuo de conductores, los electrones fluyen desde el punto de menor potencial hasta el punto de mayor potencial. Un sistema de esa clase se denomina circuito eléctrico. La corriente que circula por un circuito se denomina corriente continua (c.c.) si fluye siempre en el mismo sentido y corriente alterna (c.a.) si fluye alternativamente en uno u otro sentido.

El **flujo de una corriente continua** está determinado por tres magnitudes relacionadas entre sí. La primera es la *diferencia de potencial* en el circuito, que en ocasiones se denomina fuerza electromotriz (fem), tensión o voltaje. La segunda es la *intensidad de corriente*. Esta magnitud se mide en amperios; 1 amperio corresponde al paso de unos 6.250.000.000.000.000 electrones por segundo por una sección determinada del circuito. La tercera magnitud es la *resistencia* del circuito. Normalmente, todas las sustancias, tanto conductores como aislantes, ofrecen cierta oposición al flujo de una corriente eléctrica, y esta resistencia limita la corriente. La unidad empleada para cuantificar la resistencia es el ohmio (Ω), que se define como la resistencia que limita el flujo de corriente a 1 amperio en un circuito con una fem de 1 voltio. La ley de Ohm, llamada así en honor al físico alemán **Georg Simon Ohm**, que la descubrió en 1827, permite relacionar la intensidad con la fuerza electromotriz. Se expresa mediante la ecuación

$\varepsilon = I \times R$, donde ε es la fuerza electromotriz en voltios, I es la intensidad en amperios y R es la resistencia en ohmios. A partir de esta ecuación puede calcularse cualquiera de las tres magnitudes en un circuito dado si se conocen las otras dos.