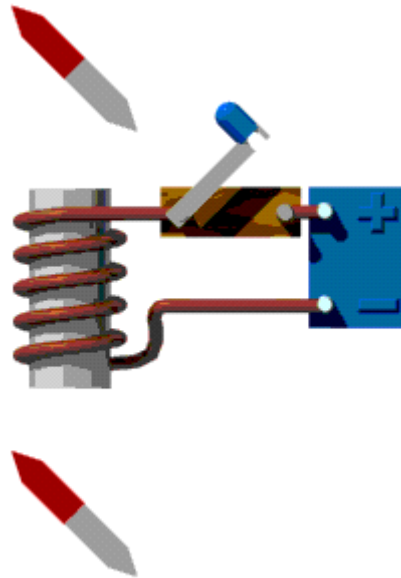


Electromagnetismo

1. [Generación e Interacción de campo magnético](#)
2. [Naturaleza de los Imanes](#)
3. [¿De dónde procede el magnetismo?](#)
4. [¿Puede un imán perder su potencia?](#)
5. [Imanes cerámicos](#)
6. [Imanes de alnico](#)
7. [Imanes de tierras raras](#)
8. [Imanes flexibles](#)
9. [Otros imanes](#)
10. [Campo Magnético de la Tierra](#)
11. [Magnetosfera](#)
12. [Electroimán](#)
13. [El electroimán. Motores y generadores de electricidad](#)
14. [La ley de Coulomb](#)
15. [El origen atómico del campo magnético](#)
16. [Fuerzas magnéticas](#)
17. [Aplicaciones tecnológicas del magnetismo.](#)



El electromagnetismo fue descubierto de forma accidental en 1821 por el físico danés Hans Christian Oersted. El electromagnetismo se utiliza tanto en la conversión de energía mecánica en energía eléctrica (en generadores), como en sentido opuesto, en los motores eléctricos.

En el dibujo hemos construido un circuito eléctrico con una bobina de cable de cobre aislado, arrollada alrededor de un núcleo de "hierro" (acero magnético).

El electromagnetismo es un campo muy amplio, por lo tanto describirlo en pocas palabras es imposible. Así que se empezará por las corrientes y sus efectos en un cable conductor

Cuando una corriente (sea alterna o continua) viaja por un conductor (cable), genera a su alrededor un efecto no visible llamado campo electromagnético.

Este campo forma unos círculos alrededor del cable como se muestra en la figura. Hay círculos cerca y lejos al cable en forma simultánea.

El campo magnético es mas intenso cuanto mas cerca está del cable y esta intensidad disminuye conforme se aleja de él hasta que su efecto es nulo. Se puede encontrar el sentido que tiene el flujo magnético si se conoce la dirección que tiene la corriente en el cable y con la ayuda de La ley de la mano derecha

Este efecto es muy fácil visualizar en corriente continua

La fórmula para obtener el campo magnético en un conductor largo es :

$$B = m I / (2 p d)$$

Donde:

- B: campo magnético
- m: es la permeabilidad del aire
- I: corriente que circula por el cable
- p: $\pi = 3.1416$
- d: distancia desde el cable

Si hubiera N cables juntos el campo magnético resultante sería:

$$B = N m I / (2 p d)$$

Donde N: número de cables.

El campo magnético en el centro de una bobina de N espiras circulares es:

$$B = N m I / (2 R)$$

Donde: R es el radio de la espira

- Nota: es importante mencionar que
Una corriente en un conductor genera un campo magnético y que
- Un campo magnético genera una corriente en un conductor.

Sin embargo, las aplicaciones mas conocidas utilizan corriente alterna.

Por ejemplo:

- Las bobinas: Donde la energía se almacena como campo magnético.

Los transformadores: Donde la corriente alterna genera un campo magnético alterno en el bobinado primario, que induce en el bobinado secundario otro campo magnético que a su vez causa una corriente, que es la corriente alterna de salida.

Generación e Interacción de campo magnético

Aunque los antiguos griegos conocían las propiedades electrostáticas del ámbar, y los chinos ya fabricaban imanes con magnetita en el 2700 a.C., los fenómenos eléctricos y magnéticos no empezaron a comprenderse hasta finales del siglo XVIII, cuando comenzaron a realizarse experimentos en estos campos. En 1785, el físico francés Charles de Coulomb confirmó por primera vez de forma experimental que las cargas eléctricas se atraen o se repelen con una intensidad inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa (ley de Coulomb).

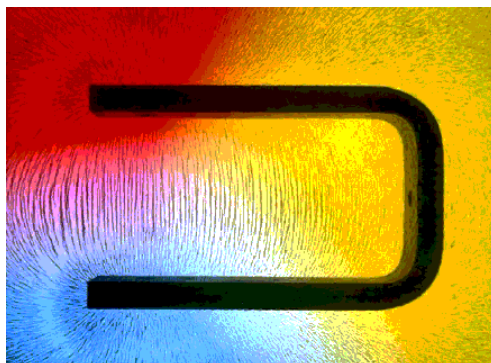
Más tarde el matemático francés Siméon Denis Poisson y su colega alemán Carl Friedrich Gauss desarrollaron una potente teoría para calcular el efecto de un número indeterminado de cargas eléctricas estáticas arbitrariamente distribuidas

Dos partículas con cargas opuestas se atraen, por lo que tienden a acelerarse una hacia la otra. Si el medio a través del cual se mueven ofrece resistencia, pueden acabar moviéndose con velocidad constante (en lugar de moverse con aceleración constante) a la vez que el medio se calienta y sufre otras alteraciones.

La posibilidad de mantener una fuerza electromotriz capaz de impulsar de forma continuada partículas eléctricamente cargadas llegó con el desarrollo de la pila química en 1800, debido al físico italiano Alessandro Volta. La teoría clásica de un circuito eléctrico simple supone que los dos polos de una pila se mantienen cargados positiva y negativamente debido a las propiedades internas de la misma.

Cuando los polos se conectan mediante un conductor, las partículas cargadas negativamente son repelidas por el polo negativo y atraídas por el positivo, con lo que se mueven hacia él y calientan el conductor, ya que ofrece resistencia a dicho movimiento. Al llegar al polo positivo las partículas son obligadas a desplazarse dentro de la pila hasta el polo negativo, en contra de las fuerzas que se oponen a

ello según la ley de Coulomb. El físico alemán Georg Simon Ohm descubrió la existencia de una constante de proporcionalidad sencilla entre la corriente que fluye por el circuito y la fuerza electromotriz suministrada por la pila. Esta constante es la resistencia eléctrica del circuito, R .



La ley de Ohm, que afirma que la resistencia es igual a la fuerza electromotriz, o tensión, dividida entre la intensidad de corriente, no es una ley fundamental de la física de aplicación universal, sino que describe el comportamiento de una clase limitada de materiales sólidos.

Los conceptos elementales del magnetismo, basados en la existencia de pares de polos opuestos, aparecieron en el siglo XVII y fueron desarrollados en los trabajos de Coulomb. Sin embargo, la primera conexión entre el magnetismo y la electricidad se encontró en los experimentos del físico y químico danés Hans Christian Oersted, que en 1819 descubrió que un cable conductor por el que fluía una corriente eléctrica desviaba una aguja magnética situada en sus proximidades.

A la semana de conocer el descubrimiento de Oersted, el científico francés André Marie Ampère demostró experimentalmente que dos cables por los que circula una corriente ejercen una influencia mutua igual a la de los polos de un imán.

En 1831, el físico y químico británico Michael Faraday descubrió que podía inducirse el flujo de una corriente eléctrica en un conductor en forma de espira no conectado a una batería, moviendo un imán en sus proximidades o situando cerca otro conductor por el que circulara una corriente variable.

La forma más fácil de enunciar la íntima relación entre la electricidad y el magnetismo, perfectamente establecida en la actualidad, es a partir de los conceptos de campo eléctrico y magnético. La intensidad, dirección y sentido del campo en cada punto mide la fuerza que actuaría sobre una carga unidad (en el caso del campo eléctrico) o una corriente unidad (en el caso del campo magnético) situadas en ese punto. Las cargas eléctricas estacionarias producen campos eléctricos; las corrientes —esto es, las cargas en movimiento— producen campos eléctricos y magnéticos.

Un campo eléctrico también puede ser producido por un campo magnético variable, y viceversa. Los campos eléctricos ejercen fuerzas sobre las partículas cargadas por el simple hecho de tener carga, independientemente de su velocidad; los campos magnéticos sólo ejercen fuerzas sobre partículas cargadas en movimiento.

Estos hallazgos cualitativos fueron expresados en una forma matemática precisa por el físico británico James Clerk Maxwell, que desarrolló las ecuaciones diferenciales en derivadas parciales que llevan su nombre. Las ecuaciones de Maxwell relacionan los cambios espaciales y temporales de los campos eléctrico y magnético en un punto con las densidades de carga y de corriente en dicho punto. En principio, permiten calcular los campos en cualquier momento y lugar a partir del conocimiento de las cargas y corrientes.

Un resultado inesperado que surgió al resolver las ecuaciones fue la predicción de un nuevo tipo de campo electromagnético producido por cargas eléctricas aceleradas.

Este campo se propagaría por el espacio con la velocidad de la luz en forma de onda electromagnética, y su intensidad disminuiría de forma inversamente proporcional al cuadrado de la distancia de la fuente. En 1887, el físico alemán Heinrich Hertz consiguió generar físicamente esas ondas por medios eléctricos, con lo que sentó las bases para la radio, el radar, la televisión y otras formas de telecomunicaciones.

El comportamiento de los campos eléctrico y magnético en estas ondas es bastante similar al de una cuerda tensa muy larga cuyo extremo se hace oscilar rápidamente hacia arriba y hacia abajo.

Cualquier punto de la cuerda se mueve hacia arriba y hacia abajo con la misma frecuencia que la fuente de las ondas situada en el extremo de la cuerda.

Los puntos de la cuerda situados a diferentes distancias de la fuente alcanzan su máximo desplazamiento vertical en momentos diferentes.

Cada punto de la cuerda hace lo mismo que su vecino, pero lo hace algo más tarde si está más lejos de la fuente de vibración (véase Oscilación). La velocidad con que se transmite la perturbación a lo largo de la cuerda, o la 'orden' de oscilar, se denomina velocidad de onda (véase Movimiento ondulatorio). Esta velocidad es función de la densidad lineal de la cuerda (masa por unidad de longitud) y de la tensión a la que esté sometida.

Una fotografía instantánea de la cuerda después de llevar moviéndose cierto tiempo mostraría que los puntos que presentan el mismo desplazamiento están separados por una distancia conocida como longitud de onda, que es igual a la velocidad de onda dividida entre la frecuencia.

En el caso del campo electromagnético la intensidad del campo eléctrico se puede asociar al movimiento vertical de cada punto de la cuerda, mientras que el campo magnético se comporta del mismo modo pero formando un ángulo recto con el campo eléctrico (y con la dirección de propagación). La velocidad con que la onda electromagnética se aleja de la fuente es la velocidad de la luz.

A finales del siglo XVIII y principios del XIX se investigaron simultáneamente las teorías de la electricidad y el magnetismo

En 1819, el físico danés Hans Christian Oersted llevó a cabo un importante descubrimiento al observar que una aguja magnética podía ser desviada por una corriente eléctrica. Este descubrimiento, que mostraba una conexión entre la electricidad y el magnetismo, fue desarrollado por el científico francés André Marie Ampère, que estudió las fuerzas entre cables por los que circulan corrientes eléctricas, y por el físico francés Dominique François Arago, que magnetizó un pedazo de hierro colocándolo cerca de un cable recorrido por una corriente.

En 1831, el científico británico Michael Faraday descubrió que el movimiento de un imán en las proximidades de un cable induce en éste una corriente eléctrica; este efecto era inverso al hallado por Oersted.

Así, Oersted demostró que una corriente eléctrica crea un campo magnético, mientras que Faraday demostró que puede emplearse un campo magnético para crear una corriente eléctrica. La unificación plena de las teorías de la electricidad y el magnetismo se debió al físico británico James Clerk Maxwell, que predijo la existencia de ondas electromagnéticas e identificó la luz como un fenómeno electromagnético.

Los estudios posteriores sobre el magnetismo se centraron cada vez más en la comprensión del origen atómico y molecular de las propiedades magnéticas de la materia. En 1905, el físico francés Paul Langevin desarrolló una teoría sobre la variación con la temperatura de las propiedades magnéticas de las sustancias paramagnéticas (ver más adelante), basada en la estructura atómica de la materia.

Esta teoría es uno de los primeros ejemplos de la descripción de propiedades macroscópicas a partir de las propiedades de los electrones y los átomos.

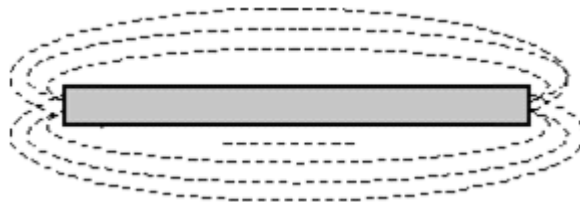
Posteriormente, la teoría de Langevin fue ampliada por el físico francés Pierre Ernst Weiss, que postuló la existencia de un campo magnético interno, molecular, en los materiales como el hierro.

Este concepto, combinado con la teoría de Langevin, sirvió para explicar las propiedades de los materiales fuertemente magnéticos como la piedra imán.

Después de que Weiss presentara su teoría, las propiedades magnéticas se estudiaron de forma cada vez más detallada. La teoría del físico danés Niels Bohr sobre la estructura atómica, por ejemplo, hizo que se comprendiera la tabla periódica y mostró por qué el magnetismo aparece en los elementos de transición, como el hierro, en los lantánidos o en compuestos que incluyen estos elementos. Los físicos estadounidenses Samuel Abraham Goudsmit y George Eugene Uhlenbeck demostraron en 1925 que los electrones tienen espín y se comportan como pequeños imanes con un 'momento magnético' definido. El momento magnético de un objeto es una magnitud vectorial (véase Vector) que expresa la intensidad y orientación del campo magnético del objeto. El físico alemán Werner Heisenberg dio una explicación detallada del campo molecular de Weiss en 1927, basada en la recientemente desarrollada mecánica

cuántica (véase Teoría cuántica). Más tarde, otros científicos predijeron muchas estructuras atómicas del momento magnético más complejas, con diferentes propiedades magnéticas.

El campo magnético



Una barra imantada o un cable que transporta corriente pueden influir en otros materiales magnéticos sin tocarlos físicamente porque los objetos magnéticos producen un 'campo magnético'. Los campos magnéticos suelen representarse mediante 'líneas de campo magnético' o 'líneas de fuerza'. En cualquier punto, la dirección del campo magnético es igual a la dirección de las líneas de fuerza, y la intensidad del campo es inversamente proporcional al espacio entre las líneas.

En el caso de una barra imantada, las líneas de fuerza salen de un extremo y se curvan para llegar al otro extremo; estas líneas pueden considerarse como bucles cerrados, con una parte del bucle dentro del imán y otra fuera. En los extremos del imán, donde las líneas de fuerza están más próximas, el campo magnético es más intenso; en los lados del imán, donde las líneas de fuerza están más separadas, el campo magnético es más débil. Según su forma y su fuerza magnética, los distintos tipos de imán producen diferentes esquemas de líneas de fuerza. La estructura de las líneas de fuerza creadas por un imán o por cualquier objeto que genere un campo magnético puede visualizarse utilizando una brújula o limaduras de hierro.

Los imanes tienden a orientarse siguiendo las líneas de campo magnético. Por tanto, una brújula, que es un pequeño imán que puede rotar libremente, se orientará en la dirección de las líneas. Marcando la dirección que señala la brújula al colocarla en diferentes puntos alrededor de la fuente del campo magnético, puede deducirse el esquema de líneas de fuerza. Igualmente, si se agitan limaduras de hierro sobre una hoja de papel o un plástico por encima de un objeto que crea un campo magnético, las limaduras se orientan siguiendo las líneas de fuerza y permiten así visualizar su estructura.

Los campos magnéticos influyen sobre los materiales magnéticos y sobre las partículas cargadas en movimiento. En términos generales, cuando una partícula cargada se desplaza a través de un campo magnético, experimenta una fuerza que forma ángulos rectos con la velocidad de la partícula y con la dirección del campo.

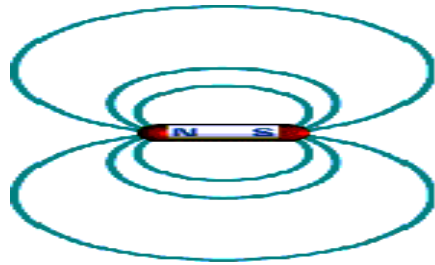
Como la fuerza siempre es perpendicular a la velocidad, las partículas se mueven en trayectorias curvas. Los campos magnéticos se emplean para controlar las trayectorias de partículas cargadas en dispositivos como los aceleradores de partículas o los espectrógrafos de masas.

Naturaleza de los Imanes

¿Qué es un imán?

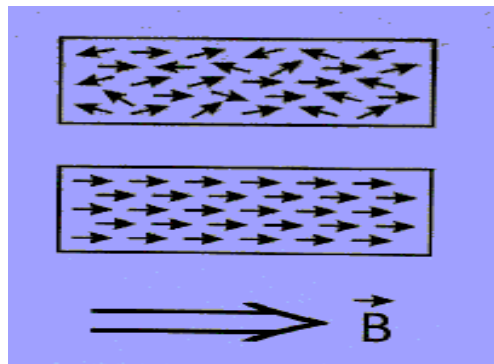
Un imán es un material capaz de producir un campo magnético exterior y atraer el hierro (también puede atraer al cobalto y al níquel). Los imanes que manifiestan sus propiedades de forma permanente pueden ser naturales, como la magnetita (Fe_3O_4) o artificiales, obtenidos a partir de aleaciones de diferentes metales. En un imán la capacidad de atracción es mayor en sus extremos o polos. Estos polos se denominan norte y sur, debido a que tienden a orientarse según los polos geográficos de la Tierra, que es un gigantesco imán natural. La región del espacio donde se pone de manifiesto la acción de un imán se llama campo magnético.

Este campo se representa mediante líneas de fuerza, que son unas líneas imaginarias, cerradas, que van del polo norte al polo sur, por fuera del imán y en sentido contrario en el interior de éste; se representa con la letra B



¿De dónde procede el magnetismo?

Desde hace tiempo es conocido que una corriente eléctrica genera un campo magnético a su alrededor. En el interior de la materia existen pequeñas corrientes cerradas debidas al movimiento de los electrones que contienen los átomos, cada una de ellas origina un microscópico imán o dipolo. Cuando estos pequeños imanes están orientados en todas direcciones sus efectos se anulan mutuamente y el material no presenta propiedades magnéticas; en cambio si todos los imanes se alinean actúan como un único imán y en ese caso decimos que la sustancia se ha magnetizado.



¿Puede un imán perder su potencia?

Para que un imán pierda sus propiedades debe llegar a la llamada "temperatura de Curie" que es diferente para cada composición. Por ejemplo para un imán cerámico es de 450 °C, para uno de cobalto 800 °C, etc.

También se produce la desimantación por contacto, cada vez que pegamos algo a un imán perdemos parte de sus propiedades. Los golpes fuertes pueden descolocar las partículas haciendo que el imán pierda su potencia.

¿Cuántos tipos de imanes permanentes hay?

Además de la magnetita o imán natural existen diferentes tipos de imanes fabricados con diferentes aleaciones:

- Imanes cerámicos o ferritas.
- Imanes de alnico.
- Imanes de tierras raras.
- Imanes flexibles.
- Otros

Imanes cerámicos

Se llaman así por sus propiedades físicas. Su apariencia es lisa y de color gris oscuro, de aspecto parecido a la porcelana. Se les puede dar cualquier forma, por eso es uno de los imanes más usados (altavoces, aros para auriculares, cilindros para pegar en figuras que se adhieren a las neveras, etc.). Son muy frágiles, pueden romperse si se caen o se acercan a otro imán sin el debido cuidado. Se fabrican a partir de partículas muy finas de material ferromagnético (óxidos de hierro) que se transforman en un

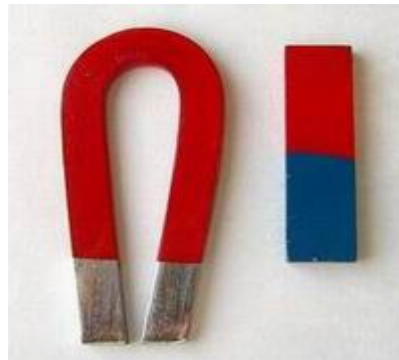
conglomerado por medio de tratamientos térmicos a presión elevada, sin sobrepasar la temperatura de fusión.

Otro tipo de imanes cerámicos, conocidos como ferritas, están fabricados con una mezcla de bario y estroncio. Son resistentes a muchas sustancias químicas (disolventes y ácidos) y pueden utilizarse a temperaturas comprendidas entre $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $260\text{ }^{\circ}\text{C}$



Imanes de alnico

Se llaman así porque en su composición llevan los elementos aluminio, níquel y cobalto. Se fabrican por fusión de un 8 % de aluminio, un 14 % de níquel, un 24 % de cobalto, un 51 % de hierro y un 3 % de cobre. Son los que presentan mejor comportamiento a temperaturas elevadas. Tienen la ventaja de poseer buen precio, aunque no tienen mucha fuerza.



Imanes de tierras raras

Son imanes pequeños, de apariencia metálica, con una fuerza de 6 a 10 veces superior a los materiales magnéticos tradicionales. Los imanes de boro/neodimio están formados por hierro, neodimio y boro; tienen alta resistencia a la desmagnetización.

Son lo bastante fuertes como para magnetizar y desmagnetizar algunos imanes de alnico y flexibles. Se oxidan fácilmente, por eso van recubiertos con un baño de cinc, níquel o un barniz epoxídico y son bastante frágiles.



Los imanes de samario/cobalto no presentan problemas de oxidación pero tienen el inconveniente de ser muy caros. Están siendo sustituidos por los de boro _ neodimio.

Es importante manejar estos imanes con cuidado para evitar daños corporales y daño a los imanes (los dedos se pueden pellizcar seriamente).

Imanes flexibles

Se fabrican por aglomeración de partículas magnéticas (hierro y estroncio) en un elastómero (caucho, PVC, etc.).

Su principal característica es la flexibilidad, presentan forma de rollos o planchas con posibilidad de una cara adhesiva. Se utilizan en publicidad, cierres para nevera, llaves codificadas, etc.

Consisten en una serie de bandas estrechas que alternan los polos norte y sur. Justo en la superficie su campo magnético es intenso pero se anula a una distancia muy pequeña, dependiendo de la anchura de las bandas.

Se hacen así para eliminar problemas, como por ejemplo que se borre la banda magnética de una tarjeta de crédito (se anulan con el grosor del cuero de una cartera).



Otros imanes

Los imanes de platino/cobalto son muy buenos y se utilizan en relojería, en dispositivos aeroespaciales y en odontología para mejorar la retención de prótesis completas. Son muy caros.

Otras aleaciones utilizadas son cobre/níquel/cobalto y hierro/cobalto/vanadio

IMANES NATURALES Y ARTIFICIALES

Existen dos tipos de imanes:

-imanes naturales: son aquellos que se encuentran en la Tierra y que atraen al hierro. Denominados magnetita, hoy sabemos que es hierro cristalino Fe_3O_4 . Pero también la Tierra es un imán natural.

-imanes artificiales: son cuerpos que han sido imanados en forma artificial. El hierro y el acero pueden ser magnetizados. El acero se magnetiza permanentemente, como comprobaste con la aguja; lo mismo sucede con las tijeras: si la dejas en contacto con el imán durante un rato, se magnetizarán. Compruébalo

PROPIEDADES

Los imanes poseen dos zonas en las que se concentra la fuerza que ejercen, estas zonas son los extremos del imán y reciben el nombre de polos magnéticos, norte y sur. Los polos del mismo nombre se repelen y los polos opuestos se atraen. Compruébalo.

Los polos de un imán no se pueden aislar, es decir, si partes por la mitad un imán, obtienes dos imanes, cada uno con su polo norte y polo sur respectivo. La tierra es un imán natural, el polo Norte geográfico es un polo sur magnético y el polos Sur geográfico es un polo norte magnético; en esta propiedad está basado el funcionamiento de la brújula.

Un imán puede perder su imantación de dos formas:

-aplicando el frotamiento en sentido contrario o invirtiendo el sentido de la corriente, según sea el método que se usó para imanarlo.

-aplicándole calor.

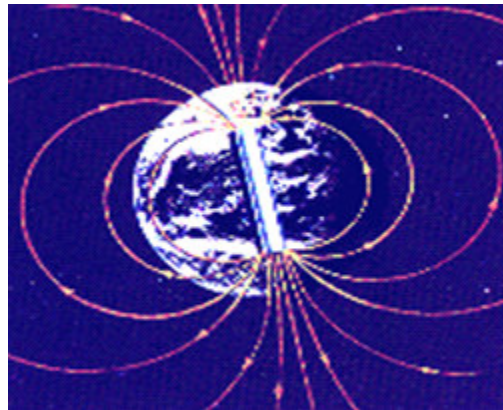
Aplicaciones

El electroimán es la base del motor eléctrico y el transformador. El desarrollo de nuevos materiales magnéticos ha influido notablemente en la revolución de los ordenadores o computadoras. Es posible fabricar memorias de computadora utilizando dominios burbuja. Estos dominios son pequeñas regiones de magnetización, paralelas o antiparalelas a la magnetización global del material. Según que el sentido sea uno u otro, la burbuja indica un uno o un cero, por lo que actúa como dígito en el sistema binario empleado por los ordenadores. Los materiales magnéticos también son componentes importantes de las cintas y discos para almacenar datos.

Los imanes grandes y potentes son cruciales en muchas tecnologías modernas. Los imanes superconductores se emplean en los aceleradores de partículas más potentes para mantener las partículas aceleradas en una trayectoria curva y enfocarlas.

Campo Magnético de la Tierra

En nuestro ambiente diario las fuerzas magnéticas no tienen influencia y para detectarlas se necesita un instrumento sensible, la aguja del compás (brújula). Esto es así porque los materiales que encontramos en nuestra vida diaria, incluidos el oxígeno y el nitrógeno que respiramos, son todos neutros eléctricamente. Los átomos de oxígeno, por ejemplo, contienen electrones con cargas eléctricas negativas y protones que son positivos, pero las dos cargas se equilibran entre sí, y se cancelan las fuerzas eléctricas y magnéticas. Las fuerzas magnéticas no tienen casi efecto sobre los átomos neutros.

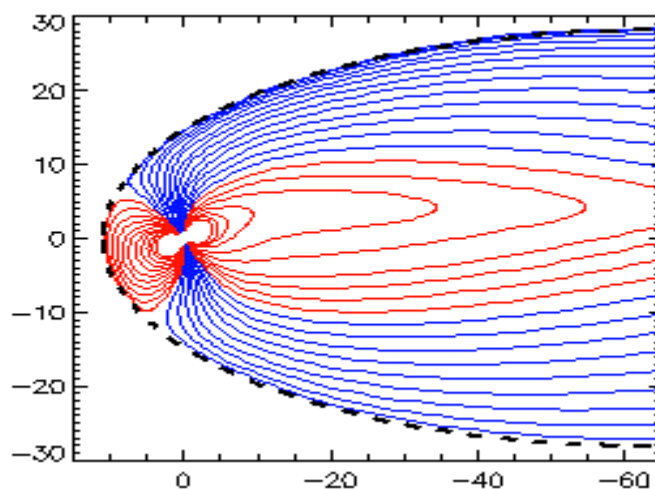


Sin embargo, a 60 millas (100 km) o más sobre la superficie de la Tierra, el ambiente natural es muy diferente. Las capas de la atmósfera a esas alturas son calentadas fuertemente por los rayos X y la luz ultravioleta del Sol (y también por otras causas), arrancando los electrones negativos de los átomos y dejando a los átomos restantes como "iones" cargados positivamente. Estos fragmentos cargados eléctricamente reaccionan con fuerza a las fuerzas magnéticas y pueden ser guiados y atrapados por ellas.

Con una adecuada aportación de energía, estos fragmentos también pueden acelerarse a altas velocidades, ocasionar corrientes eléctricas y emitir una variedad de ondas de radio.

Se pone en evidencia que esos electrones e iones libres serán guiados por las líneas del campo magnético (o "líneas de fuerza") que se elevan desde las cercanías del polo sur magnético y entran en la Tierra de nuevo cerca del polo norte. Los electrones e iones tienden a permanecer unidos a las líneas magnéticas de forma parecida a las cuentas de un collar en el hilo, aunque, a diferencia de las cuentas, también emigran ("deriva") hacia los "hilos" colindantes.

Resulta que la estructura de las líneas de campo cerca de la Tierra determina mucho del movimiento y del comportamiento de los electrones iones libres encontrados allí. Los satélites que observan las fuerzas magnéticas en el espacio hallaron (figura de la derecha) que en la mayoría de las direcciones, esas líneas no se alejan indefinidamente sino que están confinadas dentro de una cavidad, la magnetosfera terrestre. El espacio fuera de ella está dominado por el Sol y por el rápido "viento solar" de iones y electrones libres emitidos por el Sol



La Tierra tiene un campo magnético con polos Norte y Sur. El campo magnético de la Tierra alcanza hasta 36 000 millas en el espacio.

El campo magnético de la Tierra está rodeado por una región llamada la magnetosfera. La magnetosfera previene que la mayoría de las partículas del Sol, que se trasladan con el viento solar, choquen contra la Tierra.

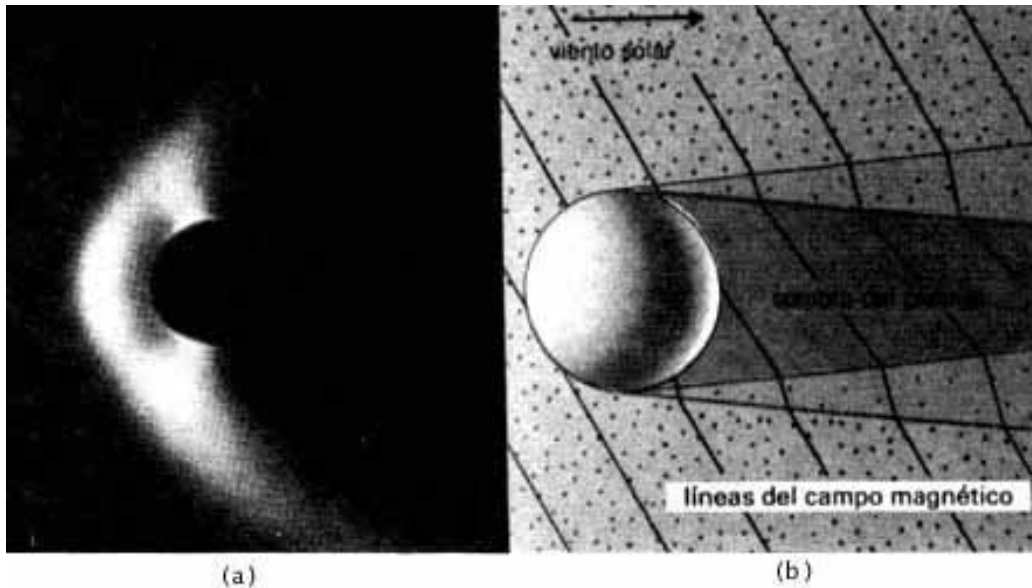
Algunas partículas del viento solar pueden penetrar la magnetosfera. Estas partículas dan origen a los espectáculos de luces de la Aurora

El campo magnético de la tierra es como una pequeña pero poderosa barra magnética ubicada cerca del centro de la tierra y inclinada 11° con respecto al eje de rotación de la tierra. El magnetismo en la tierra lo podemos visualizar como líneas de fuerza del campo magnético que indican la presencia de una fuerza magnética en cualquier punto del espacio. La brújula está influida por este campo ya que su aguja rota y se detiene cuando está paralela a las líneas de fuerza en dirección Norte-Sur.

El modelo que asume que existe un magneto al interior de la tierra tiene un problema. Experimentos en laboratorio nos muestran que los materiales pierden sus propiedades magnéticas cuando se calientan por sobre los 500°C , entonces bajo los 20 o 30 Km de corteza no habría magnetismo ya que las temperaturas son muy elevadas. Se cree entonces que la tierra es un gran dinamo. Por ejemplo para producir electricidad se utiliza un enrollado de cobre que es un material conductor y este al girar produce un campo magnético. Los científicos creen que el núcleo externo del núcleo es de hierro líquido, entonces por procesos convectivos generados por radioactividad hay movimiento del hierro líquido y como el hierro es un buen conductor al moverse genera un campo magnético.

Al estudio de la intensidad y la dirección del campo magnético de la Tierra en el pasado, por medio de rocas naturales, para determinar así sus cambios durante largos periodos de tiempo, se le conoce como

paleo magnetismo. El desarrollo del paleo magnetismo llevó a un resultado sorprendente: el campo magnético ha sufrido diferentes inversiones en el pasado. Claramente la antigüedad de la lava aumenta con la profundidad. La dirección de la magnetización remanente de dos capas superiores (3.62 y 3.68 millones de años), así como de una muy profunda (4.5 millones de años) es prácticamente paralela a la del campo magnético terrestre actual.



Relaciones entre el viento solar y el campo magnético de la tierra.

a) La relación entre el viento solar y el campo magnético se puede simular en el laboratorio haciendo incidir un flujo de plasma de electrones y de iones de helio sobre una esfera que contiene un electro magneto. El chorro de plasma es desviado en forma análoga a como sucede en la tierra cuando llega el viento solar.

b) Diagrama construido con base en los datos recopilados por satélites artificiales ilustrando la relación real entre el viento solar y el campo magnético de la Tierra. Los puntos en la figura representan el flujo de partículas que llega del Sol. Las líneas de fuerza del campo magnético están aplastadas del lado opuesto. A este fenómeno se le llama magnetosfera.

Sin embargo, la magnetización remanente de todas las capas intermedias está orientada en forma antiparalela a la actual. Se piensa que una inversión completa del campo magnético de la Tierra toma de 1 000 a 10 000 años. No se sabe a ciencia cierta el motivo de estas inversiones, pero sí se ha podido predecir estos resultados mediante un modelo de los dínamos acoplados electromagnéticamente, extendiendo el modelo original descrito unos párrafos atrás. Se ha probado que, bajo condiciones apropiadas, un acoplamiento entre dos sistemas de dínamos auto excitantes puede causar inversiones repetidas del campo magnético. Sin embargo, el problema de la inversión del campo sigue estando abierto, así como la discusión de las implicaciones que este fenómeno posee.

Una importante utilidad del campo magnético terrestre es que nos protege del viento solar. El viento solar es un plasma, gas de hidrógeno casi perfectamente ionizado, que emana del Sol, habiendo sido parte de la corona solar. La velocidad del flujo del plasma es de 300 a 400 km/seg en condiciones normales y puede llegar a 800 km/seg en una tormenta.

En la figura 27 se muestra un ejemplo de una simulación de la interacción entre el viento solar y el campo magnético. Cuando el modelo de la Tierra no tiene campo, el plasma hace impacto directo con la superficie.

En cambio, cuando se le conecta un fuerte imán, el plasma se desvía y se forma una cavidad alrededor del modelo de la Tierra. La enorme cavidad natural en torno a la Tierra es conocida actualmente como la magnetosfera y su larga cola debida al viento solar en dirección opuesta al Sol es llamada cola geomagnética.

Las partículas cargadas, principalmente electrones y protones, quedan atrapadas en diferentes "cinturones" de energía llamados cinturones Van Allen. Sus órbitas están confinadas en un plano ecuatorial alrededor de la Tierra debido al campo magnético. Hay dos cinturones de electrones, aproximadamente a 2 000-5 000 y 13 000-19 000 kilómetros sobre la superficie de la Tierra, y los protones parecen estar distribuidos en capas intermedias. Las partículas en las capas externas provienen principalmente del viento solar, pero dos de las capas internas están formadas por rayos cósmicos.

Así pues, el campo magnético terrestre constituye una defensa para la Tierra de las partículas cargadas que permanecen en órbitas que oscilan de norte a sur del ecuador magnético en los cinturones Van Allen.

¿Qué sucedería durante una inversión de la dirección del campo como la que hemos mencionado? Necesariamente habría un periodo grande de años en que el campo magnético sería muy pequeño o nulo y las radiaciones sobre la superficie muy intensas.

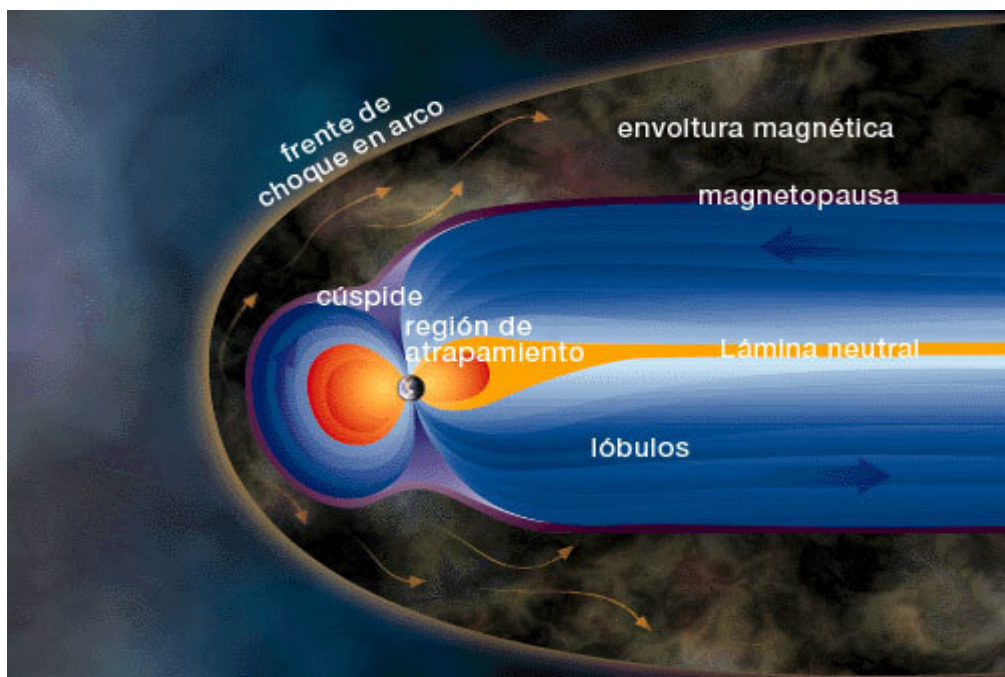
Ha habido muchas especulaciones sobre esto, unidas a la evolución de las especies. Tal vez la radiación intensa al penetrar en las células logre alterar las moléculas de ADN de los cromosomas, modificando las características hereditarias de los seres vivos. Tal vez puedan desaparecer unas especies y aparecer otras. Ciertamente, éste no podría ser considerado como el mecanismo único para la evolución, pero podría colaborar a entender la súbita aparición o extinción simultánea de algunas especies en todo el mundo, en sitios donde los argumentos de adaptación al medio no son válidos por tratarse de medios muy variados. La verificación de estas hipótesis está en proceso y requiere de muchas observaciones en lugares adecuados en donde se pueda afirmar que el magnetismo original no ha sido alterado.

Magnetosfera

Una magnetosfera tiene muchas partes, tales como: frente de choque en arco, envoltura magnética, magneto cola, lámina de plasma, lóbulos, plasmafera, cinturones de radiación, y gran cantidad de corrientes eléctricas. Está compuesta de partículas cargadas y flujo magnético.

Estas partículas son responsables de gran cantidad de maravillosos fenómenos naturales tales como la aurora y emisiones de radio naturales tales como el rugido de un león u ondas silbantes.

Las partículas se mueven y circulan sobre la magnetosfera, e incluso generan tormentas. La magnetosfera cambia constantemente.



ELECTROIMÁN

En 1820, el físico danés Hans Christian Oersted descubrió que la corriente eléctrica que circulaba por un conductor atraía la aguja de una brújula colocada en sus proximidades. Había hallado el vínculo entre electricidad y magnetismo. Uno de los muchos científicos intrigados por el descubrimiento de Oersted fue el inglés William Sturgeon, quien descubrió que, al atravesar la corriente un conductor enrollado sobre una barra de hierro en forma de herradura, se formaba lo que denominó un electroimán, capaz de levantar veinte veces su propio peso.

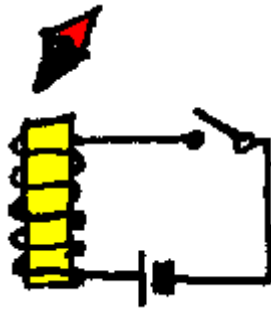
En 1831, el físico estadounidense Joseph Henry mejoró el diseño de Sturgeon; empleó alambre de cobre aislado con seda (de una de las enaguas de su esposa) y lo enrolló alrededor de la barra en varias capas, con lo que aumentaba enormemente la fuerza del imán. El electroimán constituyó la base de gran número de máquinas eléctricas posteriores.

Se pueden encontrar electroimanes en numerosas aplicaciones de la vida cotidiana, desde relés que permiten controlar circuitos, hasta grandes grúas para cargar chatarras.

Cuando se tienen cargas eléctricas en movimiento, aparece asociado un campo magnético, que es de la misma naturaleza que los que proporcionan los imanes permanentes.

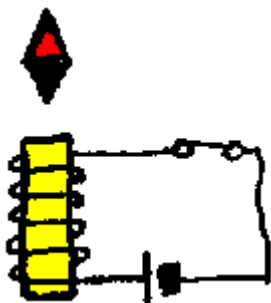
La Tierra tiene su propio campo magnético que es capaz de orientar a las brújulas. Las brújulas no son más que pequeños imanes que pueden girar y orientarse libremente.

Es fácil demostrar la existencia de campos magnéticos producidos por corrientes eléctricas. Para ello, en las proximidades de una brújula, se coloca una bobina de hilo de cobre barnizado, formando un circuito con una pila y un interruptor que permitirá que pase la corriente o no.



Si se deja el circuito abierto, la brújula se orienta respecto del campo magnético existente que no es otro que el campo magnético de la Tierra.

Sin embargo, al cerrar el interruptor, circula corriente por el circuito, lo que origina un campo magnético mucho más intenso que el de la Tierra en las proximidades de la brújula y hace girar la brújula para orientarse respecto de este nuevo campo.



Los electroimanes funcionan como la bobina que acabas de ver, y son capaces de atraer materiales ferromagnéticos.

EL ELECTROIMÁN. MOTORES Y GENERADORES DE ELECTRICIDAD

LOS descubrimientos de Ampère y Faraday tuvieron inmediatas aplicaciones prácticas que cambiaron la faz de la civilización moderna.

Usando el descubrimiento de Oersted, de que una corriente eléctrica produce un campo magnético en el espacio alrededor del cable que la conduce, tanto Ampère como Arago lograron magnetizar agujas de hierro. Lo hicieron de la siguiente forma: enrollaron un cable alrededor de la aguja y luego conectaron los extremos de aquél a una batería. Al pasar la corriente por el cable crea un campo magnético en el espacio dentro de la bobina; este campo magnético a su vez magnetiza la aguja. De la misma forma que un imán permanente magnetiza una limadura de hierro.

En 1825 el inglés William Sturgeon (1783-1850) enrolló 18 espiras de alambre conductor alrededor de una barra de hierro dulce, que dobló para que tuviera la forma de una herradura (Figura 9). Al conectar los extremos del cable a una batería el hierro se magnetizó y pudo levantar un peso que era 20 veces mayor que el propio. Este fue el primer electroimán, es decir, un imán accionado por electricidad.

Años después, en 1829, el estadounidense Joseph Henry (1797-1878) construyó una versión mejorada del electroimán. Para ello enrolló en una barra de hierro dulce espiras en forma mucho más apretada y en un número mayor; de esta manera logró una mayor intensidad magnética.

El electroimán se comporta de forma equivalente a un imán permanente, con la ventaja de que su intensidad se puede controlar, ya sea cambiando la corriente que se le hace circular o variando el número de espiras de la bobina. Además, al cesar la corriente, cuando se desconecta la batería, desaparece el efecto magnético.

El descubrimiento de Ampère sentó las bases para la invención del primer motor eléctrico. Su funcionamiento es el siguiente. Supóngase que se enrolla una bobina alrededor de un cilindro de hierro (Figura 10) y que ésta se fija en un eje *LL*, alrededor del cual puede girar. Si metemos la bobina dentro de los polos de un imán permanente, como se muestra en la figura, y se hace pasar una corriente eléctrica por ella, ésta se vuelve un imán que puede girar dentro del imán permanente. Los polos de los imanes ejercen fuerzas entre sí; por consiguiente, la bobina experimenta fuerzas que la hacen girar alrededor del eje *LL*. Si se conecta adecuadamente el eje, por medio de poleas y bandas, se puede aprovechar el giro de la bobina y realizar trabajo mecánico, como por ejemplo subir cuerpos o moverlos, etc. De esta manera es posible transformar la energía eléctrica que la batería entrega al hacer circular la corriente por la bobina, en energía mecánica para mover algún objeto. Al dispositivo que funciona de esta forma se le llama motor eléctrico.

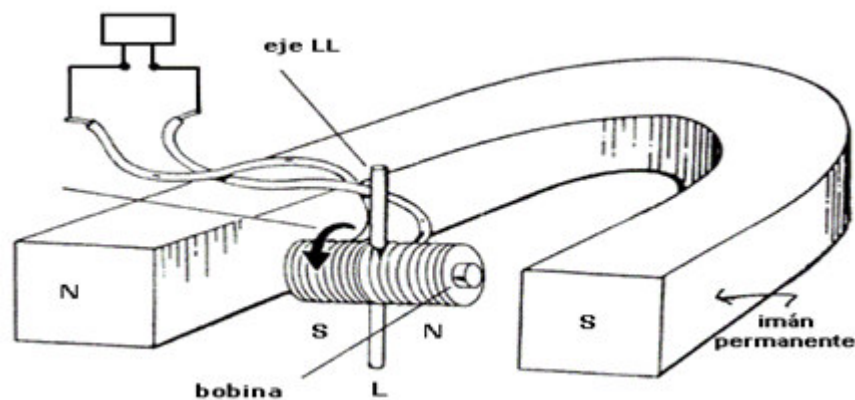


Figura 10. Esquema de un motor eléctrico.

El motor eléctrico acabado de describir fue el primero que se construyó y resultó ser muy burdo. En 1837 L. C. Davenport construyó el primer motor eléctrico para uso industrial. Alrededor de 1845 Charles Wheatstone reemplazó el imán permanente del motor por un electroimán, accionado por una batería

externa. Así se logró un motor más efectivo. Posteriormente se fueron añadiendo diferentes mejoras, pero el principio básico de su funcionamiento es el descrito.

Por otro lado, en 1832, o sea un año después del anuncio del descubrimiento de Faraday, Hippolyte Pixii en Francia, a sugerencia de Faraday, construyó el primer generador de electricidad. En forma breve, su comportamiento es el siguiente.

Tomemos el mismo aparato mostrado en la figura 10 y en lugar de conectar los extremos del cable de la bobina a una batería como en el motor, los conectamos entre sí e intercalamos en el circuito un galvanómetro. Ahora, por medio de una manivela hacemos girar la bobina alrededor del eje LL , con la bobina dentro del imán permanente. De esta manera, el flujo magnético del imán permanente a través del plano de cada espira de la bobina varía con el tiempo. Por lo tanto podemos decir que, según la ley de Faraday, se induce una corriente eléctrica a través del alambre conductor.

En efecto, se puede observar que la aguja del galvanómetro se empieza a mover. De esta manera se produce electricidad que se puede, por así decirlo, recoger de los extremos del alambre de la bobina, por ejemplo, conectándolos a un foco.

Con este aparato la energía mecánica que se desarrolla al girar la bobina por medio de la manivela se ha convertido en energía eléctrica que tiene la corriente que se induce. Este aparato se llama generador (o dínamo) de electricidad.

Desde la década de 1830, hasta 1880, se fueron añadiendo diferentes dispositivos tanto al motor como al generador para hacerlos más eficientes. Sin embargo, el uso de estos aparatos en forma masiva no se dio sino hasta la década de 1880. El motivo principal no fue técnico sino económico. En efecto, la industria europea de mediados del siglo XIX estaba basada en unidades productoras de fuerza motriz muy grandes, como las máquinas de vapor estacionarias en las fábricas, y en las locomotoras y motores marinos para el transporte.

La creciente mecanización de las industrias menores dio lugar a la construcción de pequeñas unidades también accionadas por vapor. Hacia la octava década del siglo se empezaron a usar máquinas que utilizaban gas y luego gasolina. Estos fueron los primeros motores de combustión interna. Sin embargo, para la industria, el motor eléctrico era un medio más flexible y práctico para disponer de fuerza motriz que los motores de vapor, gas o gasolina. Pero la posibilidad de utilizar masivamente el motor eléctrico dependía de que se contara con una amplia red de abastecimiento de energía eléctrica, la cual solamente se pudo construir cuando se creó una necesidad más fuerte que la pura demanda industrial. Esta necesidad surgió con la evolución de los servicios domésticos, en particular el de la iluminación eléctrica, tema que trataremos en un capítulo posterior.

Con los descubrimientos del electromagnetismo, las únicas aplicaciones que tuvieron demanda inicial fueron en primer lugar las relacionadas con las comunicaciones, como el telégrafo; luego hubo demanda en la galvanoplastia (operación mediante la cual se deposita una capa de metal sobre un objeto determinado) y ya posteriormente en la iluminación y en la fuerza motriz.

La ley de Coulomb

Mediante una balanza de torsión, Coulomb encontró que la fuerza de atracción o repulsión entre dos cargas puntuales (cuerpos cargados cuyas dimensiones son despreciables comparadas con la distancia r que las separa) es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa.

$$F = \frac{1}{4 \pi \epsilon_0} \frac{qq'}{r^2}$$

El valor de la constante de proporcionalidad depende de las unidades en las que se exprese F , q , q' y r . En el Sistema Internacional de Unidades de Medida vale $9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$.

Las formulaciones matemáticas para poder describir el comportamiento de la fuerza eléctrica fueron desarrolladas en el año 1785 por Charles-Augustin de Coulomb (1,736-1,806). famoso también por sus investigaciones sobre el magnetismo, el roce, las fuerzas insertas en estructuras de ingeniería, y otros temas. Ahora bien, nos es posible estimar, por ejemplo, en lo que respecta a distancia, que la «fuerza de Coulomb» es igual a la de gravedad como la describió Newton: al duplicar la distancia, su magnitud

disminuye a la cuarta parte (ley inversa del cuadrado de la distancia). Muy semejante verdad. Pero pese a ello, hay una diferencia fundamental entre ambas fuerzas. Mientras la gravedad depende de la masa del objeto (se duplica cuando se duplica la masa), la fuerza eléctrica sólo depende de su carga (también se duplica con la carga, pero permanece invariable si se dobla en tamaño la masa). Podemos describir también el fenómeno, señalando que mientras dos cuerpos de distinta masa caen igual hacia un tercero que los atrae por gravedad, dos objetos de diferente carga caen en forma diferente si son atraídos eléctricamente hacia un tercero. La fuerza eléctrica no es reductible a una propiedad geométrica del espaciotiempo, como lo es la gravedad.

Para una distribución continua en cgs,

$$\mathbf{E} = \int \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}'}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3} \rho(\mathbf{r}') d^3\mathbf{r}',$$

y MKS

Para un punto de carga cgs,

$$\mathbf{E} = q \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}'}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3},$$

y MKS

$$\mathbf{E} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}'}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3}.$$

Ahora bien, cuando hablamos de interacción de la fuerza eléctrica a distancia, la Ley de Coulomb nos permite deducir que si hay una carga eléctrica aquí y otra, por ejemplo, en la Luna, ellas se influyen mutuamente a través del vacío del espacio intermedio, tal como las masas lo hacen según la teoría de Newton de la gravedad.

Aquí, hemos entrado a una cuestión de la física que, para muchos, siempre va a ser un motivo de discusión y dudas. Para obtener el electromagnetismo y la gravedad matemáticamente se necesitan cinco dimensiones espaciotiempo en vez de cuatro. Para ello, es necesario aceptar la idea propuesta por el matemático Theodor Kaluza, quién demostró que con el artificio de una dimensión adicional a las cuatro conocidas de espaciotiempo, es factible obtener el electromagnetismo y la gravedad a partir de una misma teoría. El problema de la idea es saber qué es esa quinta dimensión agregada, que no percibimos. En uno de mis trabajos que se encuentra inserto en uno de los temas que he difundido en «A Horcajadas en el Tiempo», precisamente en el [capítulo XII, sección 05.02](#), intento explicar los alcances teóricos de esa propuesta de Kaluza.

EL ORIGEN ATÓMICO DEL CAMPO MAGNÉTICO

Hacia fines del siglo XIX, se logró una descripción unificada de los fenómenos electromagnéticos. Si la luz resulta de la vibración de cargas, la siguiente pregunta a responder es, ¿por qué los átomos emiten luz?, ¿hay algo que vibre dentro de ellos? Como veremos a continuación, la respuesta de la última pregunta es: sí, el electrón. Las primeras evidencias de la existencia de esa partícula son muy antiguas y están asociadas con la electricidad, es decir, con los fenómenos relacionados con el movimiento, acumulación o deficiencia de electrones en la materia.

DESCARGAS A TRAVÉS DE GASES

El fenómeno eléctrico más espectacular es el de las descargas entre nubes (los *rayos*), que originalmente era asociado al estado de ánimo de algunas deidades; fue Benjamín Franklin el primero en demostrar su naturaleza eléctrica en su famoso experimento con cometas de papel. Sin embargo, los rayos resultaron demasiado esporádicos e incontrolables como para permitir su estudio sistemático.

Las descargas eléctricas a través de gases habían sido observadas en el laboratorio por Francis Hauskbee quien, en 1709, reportó la aparición de una luz *extraña* cuando electrificaba un recipiente de vidrio que contenía aire a baja presión. Otros estudiosos del fenómeno fueron William Watson, quien en 1748 notó la aparición de flamas en la zona de vacío de sus barómetros de mercurio, y Michael Faraday, quien en 1838

realizó experimentos con descargas eléctricas a través de gases enrarecidos. La conducción eléctrica a través de gases intrigó a Faraday, ya que incluso los gases que eran considerados como aislantes, cuando eran enrarecidos, propiciaban fácilmente ese tipo de descargas. ¿Sería posible la conducción eléctrica en el vacío? En tal caso, se podría estudiar directamente la naturaleza del *fluido eléctrico*.

LOS RAYOS CATÓDICOS

Antes de que se lograra dar respuesta a esta pregunta, debieron desarrollarse tres técnicas experimentales fundamentales: una bomba de vacío eficiente, un sello metal-vidrio que permitiera transmitir el potencial eléctrico a los electrodos dentro de la zona evacuada y la bobina de inducción para obtener las enormes diferencias de potencial requeridas. La necesidad de este tipo de cambios se aprecia mejor si se considera que Faraday utilizaba un tubo de vidrio tapado en ambos extremos por corchos a través de los cuales hacía pasar alambres para conectar los electrodos internos a una batería.

Las primeras bombas de vacío funcionaban con pistones ajustados a sus respectivos cilindros a través de empaques que sellaban muy mal. No fue sino hasta 1855 que Johann Heinrich Geissler inventó en Bonn, Alemania, una bomba que utilizaba columnas de mercurio como pistones, y que eliminaba así los empaques. De este modo, se lograron obtener presiones de una diezmilésima de atmósfera. Simultáneamente, el mismo Geissler desarrolló nuevos tipos de vidrio cuyos coeficientes de dilatación eran iguales a los de algunos metales, con lo que permitió pasar alambres a través de vidrio fundido sin peligro de que se formaran fracturas por las que se perdiera el vacío.

Otra mejora indispensable fue la obtención de grandes diferencias de potencial eléctrico. En este sentido, la contribución de otro alemán, Heinrich Daniel Ruhmkorff, fue importante. Como ya se mencionó, los primeros experimentos con tubos de descarga obtenían sus voltajes de baterías enormes conectadas en serie. Ruhmkorff modificó la bobina de inducción para obtener algo parecido a las bobinas de los automóviles actuales, con las que se producen descargas de miles de voltios a partir de una batería de menos de diez voltios.

Con estos avances, en 1858 el profesor alemán Julius Plucker estudió la conducción de electricidad a través de gases a muy baja presión utilizando un tubo de vidrio en el que colocó dos placas metálicas en la parte interior de los extremos. Tal como se había observado antes para un vacío pobre, Plucker vio cómo se iluminaba todo el tubo al aplicar electricidad a las placas.

Sin embargo, cuando casi todo el gas era evacuado notó que esa luz desaparecía quedando tan sólo un resplandor verdoso en el vidrio cercano a la zona de la placa conectada a la terminal positiva de su fuente de electricidad (el ánodo); la imagen luminosa no dependía mucho de la posición de ese electrodo. Más bien, parecía como si la luminosidad en esa zona fuera producida por algún tipo de *rayos* emitidos por la placa conectada al cátodo, y que viajaban de una placa a la otra a través del vacío.

Plucker también observó que la posición de la imagen luminosa podía ser modificada si se acercaba un imán a la zona del ánodo. Un alumno de Plucker, J. W. Hittorf, encontró que al interponer objetos entre el cátodo y el ánodo se producían sombras en la imagen luminosa, con lo que reforzó la idea del origen catódico para esos rayos. El nombre de *rayos catódicos* fue introducido años después por el investigador alemán Eugen Goldstein, quien además demostró que las propiedades de esos rayos no dependían del material de que estuviera hecho el cátodo.

Una de las primeras teorías sobre la naturaleza de los rayos catódicos fue propuesta por el inglés William Crookes, quien sugirió que se podía tratar de moléculas de gas, cargadas eléctricamente en el cátodo y, posteriormente, repelidas violentamente por la acción del campo eléctrico. Goldstein puso en duda esta hipótesis basado en la gran penetrabilidad que demostraban tener los rayos catódicos, lo cual había sido interpretado por el físico alemán Heinrich Hertz como una indicación de que, en lugar de partículas, los rayos catódicos serían ondas electromagnéticas tal como él mismo había demostrado que era la luz. Sin embargo, en 1895 el físico francés Jean Baptiste Perrin encontró que los rayos catódicos depositaban carga en un electroscopio, con lo que confirmó que se trataba de partículas cargadas. Fue por aquellas fechas que el inglés Joseph John Thomson se interesó en medir la velocidad de dichas partículas.

THOMSON Y EL ELECTRÓN

Nacido en 1856, Thomson se ganó en 1880 una posición en el Trinity College de la Universidad de Cambridge, Inglaterra, para trabajar en el Laboratorio Cavendish. Originalmente dedicó su tiempo a estudios matemáticos poco relevantes, hasta que en 1884 fue inesperadamente designado director del laboratorio. El Cavendish había sido construido diez años antes con fondos donados por el Duque de

Devon, William Cavendish, descendiente del famoso Henry Cavendish, quien midiera por primera vez la fuerza de atracción gravitacional entre dos objetos de laboratorio. El puesto de director había sido ocupado por James Clark Maxwell y, posteriormente, por John William Strutt (Lord Rayleigh), quien se retiró en 1884.

El nuevo nombramiento implicaba una orientación más experimental para su investigación y, siguiendo los consejos de Rayleigh, Thomson se dedicó a estudiar la naturaleza de los rayos catódicos. Como ya vimos, por esas fechas el tema era atacado también en otros laboratorios. La contribución de Thomson fue publicada en tres artículos aparecidos en 1897. Aun cuando no era demasiado hábil con las manos —uno de sus asistentes decía que ellos preferían que no tocara los instrumentos—, su genio consistió en saber qué hacer luego de cada nueva observación.

Para medir la velocidad de los rayos catódicos, Thomson los hacía pasar por la combinación de un campo eléctrico y uno magnético, producidos por un par de placas conectadas a una batería y por un par de electroimanes, respectivamente (véase figura 2). Tanto la fuerza eléctrica como la magnética ejercidas sobre las supuestas partículas eran directamente proporcionales a la relación entre su carga y su masa. Sin embargo, la fuerza magnética depende, además, de la velocidad. Con este principio, Thomson ajustaba ambos campos para compensar con el segundo la deflexión ocasionada por el primero. En estas condiciones, conocer el cociente de los campos era medir la velocidad. Como información adicional, el experimento permitía medir la relación entre la carga y la masa de las partículas en cuestión.

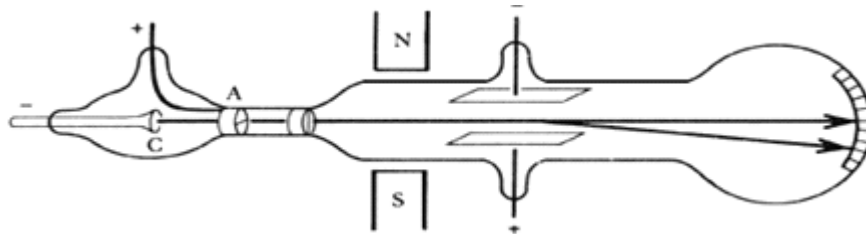


Figura 2. Tubo de rayos catódicos. Los electrones emitidos por el cátodo (C) son acelerados por el campo eléctrico hacia el ánodo (A) que deja pasar algunos por un orificio central. La trayectoria de este haz es afectada por la acción de un campo magnético y uno eléctrico. J.J. Thomson buscaba cancelar esos efectos para determinar la velocidad de los electrones.

Los resultados del trabajo de Thomson indicaban que la velocidad de los rayos con los que él trabajaba era, aproximadamente, diez veces menor que la de la luz. Sin embargo, lo que más llamó su atención es que la relación carga/masa obtenida era mil veces mayor que la esperada para iones (véase II.7). Este resultado sugería que, si los rayos catódicos tenían algún origen atómico, se trataba de partículas (los electrones) mil veces más ligeras que el átomo de hidrógeno. Estas partículas resultaron ser los electrones.

Estrictamente, el que la masa del electrón fuese mil veces menor que la del átomo que lo contenía era sólo una de las posibles interpretaciones, que dependía de suponer que la carga del electrón era igual a la unidad electrolítica de carga. Fue entonces necesario determinar experimentalmente, y en forma independiente, la carga y/o la masa del electrón.

CARGA Y MASA DEL ELECTRÓN

Los primeros experimentos tendientes a determinar la carga del electrón fueron motivados por el descubrimiento de un alumno de Thomson, Charles Thomson Rees Wilson, en el sentido de que los iones podían servir como semillas de condensación de gotas en las nubes. La fascinación de Wilson por los fenómenos ópticos producidos por la luz del sol al pasar por las nubes, lo motivaron a estudiar en el laboratorio la producción de atmósferas gaseosas.

Antes que Wilson, Coulier y Aitken habían descubierto un método para producir nubes al expandir una cámara que contuviera una atmósfera húmeda. Siguiendo este método, en 1894 Wilson encontró que, en ausencia de polvo, se podía lograr una atmósfera supersaturada de humedad libre de gotas.

La producción de gotas sólo se producía si se rebasaba cierto límite de saturación, o bien si se provocaba algún tipo de ionización de las moléculas del medio. Aparentemente, cada ion atrapaba a las moléculas libres para formar gotas.

En 1895, cuando Roentgen descubrió los rayos X, J. J. Thomson propuso a Wilson estudiar el efecto de esos rayos sobre medios supersaturados con su cámara de expansión, y se encontró que esos rayos eran altamente ionizantes.

Poco tiempo después, con el descubrimiento de la radiactividad, vio que ésta era capaz de producir gotas en la cámara. La cámara de Wilson fue esencial en el descubrimiento de algunas de las partículas elementales, motivo por el cual recibió el Premio Nobel de física en 1927.

Thomson y otros de sus colegas, J. S. E. Townsend y H. A. Wilson, cada uno por su cuenta, diseñaron métodos para medir la masa de las gotitas que se formaban alrededor de cada ion. Townsend, por ejemplo, separaba el líquido de las gotitas que se formaban alrededor de iones, midiendo la carga total. La masa de cada gotita era deducida de la velocidad de caída bajo la acción conjunta de la gravedad y la viscosidad del aire.

La masa total del líquido dividido por la masa de cada gotita determinaba el número de gotitas acumuladas, y la carga total dividida por el número de gotitas daba la carga de cada gotita. En el supuesto de que cada gotita creció alrededor de un ion, la carga de cada gotita sería la carga del ion. Y ya que este tipo de ionización se puede asociar con la pérdida de un electrón por parte de una molécula, la carga del ion es de la misma magnitud que la del electrón perdido, puesto que la molécula no ionizada es eléctricamente neutra.

El método de Thomson utilizaba medidas de conductividad eléctrica y térmica de la nube gaseosa para determinar la masa líquida, mientras que H. A. Wilson mejoró el método de Townsend al incluir un campo eléctrico variable, paralelo al gravitacional, que permitía una medida más directa de la carga de cada gotita. Sus resultados, publicados independientemente entre 1897 y 1903, indicaban que la carga iónica era del orden de 10^{-19} coulombs.

Las medidas del grupo de Thomson, a pesar de ser bastante cercanas al valor aceptado actualmente (1.6021×10^{-19} coulomb), fueron vistas con desconfianza y abrieron el camino para medidas más precisas. En 1906, el físico norteamericano Robert Andrews Millikan atacó el problema repitiendo las medidas de H. A. Wilson con la ayuda de Harvey Fletcher, entonces estudiante de doctorado. Pronto se dieron cuenta que la masa de las gotitas variaba rápidamente debido a la evaporación. Para minimizar este efecto empezaron a utilizar gotitas de aceite.

Otro cambio importante fue que, en lugar de observar el comportamiento global, Millikan se concentró en el comportamiento de gotas individuales al ser expuestas al efecto combinado de la gravedad y el campo eléctrico a la manera de Wilson. Los resultados mostraron que, si bien la carga inicial de cada gotita observada era enorme comparada con lo reportado por Thomson y su grupo, ésta fluctuaba de una a otra (para la misma gotita) en pasos discretos.

Pronto se dieron cuenta de que estas diferencias eran múltiplos pequeños de una misma carga, aparentemente debidas a la pérdida o ganancia de algunos electrones por interacción con el medio en su trayecto. Luego de un simple análisis estadístico, esto los llevó a deducir 1.592×10^{-19} coulombs como la carga del electrón, que se denota comúnmente con la letra *e*. Millikan recibió el Premio Nobel en 1923 por este trabajo.

Una vez determinada la carga del electrón, su masa pudo ser deducida utilizando la relación carga/masa medida por Thomson, que dio como resultado 9×10^{-31} kg. El propio Millikan dedujo el número de Avogadro, simplemente dividiendo el faraday por *e*, que dio como resultado: 6.06×10^{23} moléculas por gramo-mol, y la masa del ion de hidrógeno a partir de la relación carga/masa deducida en electrólisis, que dio 1.66×10^{-27} kg. Es decir, la masa del electrón es casi 1/2000 de la del átomo que lo contiene. Un cálculo aritmético simple también permitió a Thomson deducir que las dimensiones de un átomo son del orden de 10^{-10} metros.

Para terminar, vale la pena hacer notar que, si bien Zeeman y otros realizaron simultáneamente investigaciones cuyos resultados muestran inequívocamente la existencia del electrón, el crédito de este descubrimiento se otorga casi enteramente a Thomson. Esto puede deberse a que, desde su publicación original, Thomson hizo hincapié en el carácter *elemental* del electrón, al considerarlo una fracción del átomo.

RESUMEN

Los estudios enfocados a entender la naturaleza del *fluido eléctrico* fueron motivados inicialmente por las descargas a través de gases. En tal labor se requirió el desarrollo de técnicas de vacío y de otras que dieron como resultado el *tubo de rayos catódicos*. El descubrimiento de que estos rayos están constituidos por *partículas* cargadas fue la labor de J. J. Thomson quien, antes de deducir la naturaleza elemental, necesitó demostrar que su masa era mucho menor que la de los átomos que las contenían

FUERZAS MAGNETICAS

Las fuerzas magnéticas son producidas por el movimiento de partículas cargadas, como por ejemplo electrones, lo que indica la estrecha relación entre la electricidad y el magnetismo. El marco que aúna ambas fuerzas se denomina teoría electromagnética. La manifestación más conocida del magnetismo es la fuerza de atracción o repulsión que actúa entre los materiales magnéticos como el hierro. Sin embargo, en toda la materia se pueden observar efectos más sutiles del magnetismo.

Recientemente, estos efectos han proporcionado claves importantes para comprender la estructura atómica de la materia.

Fuerza magnética sobre una corriente rectilínea

Una carga en movimiento en presencia de un imán experimenta una fuerza magnética F_m que desvía su trayectoria. Dado que la corriente eléctrica supone un movimiento continuado de cargas, un conductor por donde circula corriente sufrirá, por la acción de un campo magnético, el efecto conjunto de las fuerzas magnéticas que se ejercen sobre las diferentes cargas móviles de su interior. Si la corriente es rectilínea y de longitud l , la expresión de la fuerza magnética toma la forma:

$$F_m = I.B.L.\text{sen } \alpha \quad (11.6)$$

en donde I es la intensidad de corriente, B la intensidad de campo y α el ángulo que forma la corriente con el vector campo. La anterior ecuación, que se conoce como *ley de Laplace*, se puede obtener experimentalmente, también puede deducirse de la expresión $F_m = I.B.l.\text{sen } \alpha$ de la fuerza magnética sobre una carga móvil. Admitiendo que la corriente es estacionaria, esto es, de intensidad constante y considerando en tal circunstancia el movimiento de avance de las cargas como uniforme, se cumple la igualdad:

$$q.v = I.L \quad (11.7)$$

pues en tal supuesto $v = L/t$ e $I = q/t$; despejando la variable t en ambas ecuaciones e igualándolas, resulta

$$L/v = q/I$$

ecuación equivalente a la anterior. La dirección y el sentido de la fuerza magnética F_m se obtiene aplicando la regla de la mano izquierda, con el dedo pulgar representando la dirección de la fuerza magnética F_m , el índice el campo magnético B y el dedo corazón la corriente I .

Fuerza magnética sobre una espira rectangular

Una espira con forma rectangular por la que circula una corriente cuando es situada en el interior de un campo magnético, como el producido por un imán de herradura, sufre un conjunto de acciones magnéticas que producen en ella un movimiento de giro o rotación, hasta situarla dispuesta paralelamente a la dirección del campo B (o dirección de las líneas de fuerza).

La explicación de este fenómeno puede efectuarse aplicando la ley de Laplace a cada uno de los tramos rectilíneos de la espira. Supóngase que como se muestra en la figura adjunta, la espira puede girar en torno a un eje que es perpendicular a las líneas de fuerza.

La espira rectangular está formada por dos pares de segmentos rectilíneos paralelos entre sí, un par horizontal AD y BC y otro vertical AB = DC, por los que circula la corriente I . Cuando se aplica la regla de la mano izquierda a los segmentos horizontales AD y BC se advierte que las fuerzas magnéticas correspondientes resultan verticales y opuestas de modo que no producen ningún efecto de movimiento.

Las fuerzas sobre los segmentos verticales AB y DC son opuestas y paralelas y están contenidas en un plano horizontal. Constituyen por tanto un par de fuerzas, el cual da lugar a un movimiento de giro que hace que la espira se sitúe perpendicularmente a las líneas de fuerza. En tal situación también estas otras fuerzas actuantes se anulan mutuamente y el cuadro permanece en equilibrio. La expresión del momento del par de fuerzas que actúa sobre la espira es, de acuerdo con su definición:

$$M = \text{fuerza} \times \text{brazo} = F_m \cdot b \cdot \sin \alpha$$

donde b es la dimensión horizontal de la espira y α es el ángulo que forma la dirección de una cualquiera de las dos fuerzas del par con la línea que une sus respectivos puntos de aplicación. La aplicación de la ley de Laplace a uno cualquiera de los segmentos verticales de longitud a da lugar a la expresión:

$$F_m = B \cdot I \cdot a \cdot \sin 90^\circ = B \cdot I \cdot a$$

pues \mathbf{B} y la dirección de la corriente I son perpendiculares; la expresión del momento toma la forma:

$$M = B \cdot I \cdot a \cdot b \cdot \sin \alpha = B \cdot I \cdot S \cdot \sin \alpha \quad (11.8)$$

donde $S = a \cdot b$ es el área de la espira. Cuando la espira al girar se orienta paralelamente al campo, α se hace cero y el momento M resulta nulo, lo que explica que esta orientación sea la del equilibrio.

Trayectoria de una partícula en un campo magnético

La desviación de una aguja magnética bajo la acción de un campo originado por una corriente, según el experimento de Oersted, pone de manifiesto la existencia de una fuerza magnética que el campo aplica sobre la aguja.

Si existe una fuerza hacia alguna dirección, según la tercera ley de Newton, debe existir una segunda fuerza equivalente y de sentido contrario, que actúe sobre el conductor o sobre las cargas en movimiento. Esto se da realmente, ya que si colocamos una barra conductora en un imán en forma de "u", observaremos que se mueve saliendo o entrando en el imán, hacia el lado de la corriente que este dispuesto. Al experimentar en esta forma nos damos cuenta que el sentido de la corriente, el campo y el movimiento son perpendiculares entre sí. Esto permite señalar varias reglas para determinar con precisión uno de éstos sentidos cuando se conocen los otros dos.

Regla de la mano izquierda:

Consiste en colocar perpendicularmente entre sí los tres primeros dedos de la mano izquierda, de modo que el índice señale el sentido del campo, el medio indique el sentido de la corriente y, entonces, el pulgar señala el sentido del movimiento del conductor o de la desviación que experimentan las cargas.

Regla de la mano derecha:

Consiste en extender la mano derecha, de modo que el pulgar quede perpendicular a los restantes dedos (en un solo plano). Entonces, si el pulgar indica el sentido de la corriente y de los demás dedos, el sentido del campo, el sentido del movimiento o de la fuerza aplicada sobre el conductor o sobre las cargas será perpendicular a la palma de la mano, alejándose de ésta.

APLICACIONES TECNOLÓGICAS DEL MAGNETISMO.

El caso del electromagnetismo es notable, entre otras cosas, por el hecho de que una vez llevados a cabo los descubrimientos científicos tuvieron inmediata aplicación práctica y viceversa, las aplicaciones prácticas fomentaron la investigación científica para resolver diferentes problemas, lo cual a su vez abrió nuevos horizontes científicos.

Se reseña la curiosidad científica que ha tenido el hombre desde tiempos inmemoriales por las propiedades de la electricidad por un lado y del magnetismo por otro.

Se relata el descubrimiento de la relación entre estos dos campos, resaltando el hecho de que no son independientes. Se habla de los trabajos de Christian Oersted, André-Marie Ampère y Michael Faraday, algunas de las figuras señeras de la ciencia en el siglo pasado.

El conocimiento científico de la relación entre electricidad y magnetismo dio lugar, inmediatamente, a aplicaciones tecnológicas importantes. Éstas se detallan en los capítulos VII-X e incluyen al telégrafo, con el que el hombre pudo comunicarse por medios eléctricos, y a las máquinas eléctricas, o sea, motores eléctricos y generadores de electricidad. De esta forma, el hombre tuvo a su disposición fuentes de corriente eléctrica de gran intensidad, hecho que cambió drásticamente la vida, dando lugar a una

revolución en la forma de vida de la humanidad, cuyas consecuencias fueron la iluminación eléctrica y el teléfono, entre otras.

Otra novedad importante que se dio en el desarrollo de estas aplicaciones de la electricidad y el magnetismo fue la creación de los primeros laboratorios industriales, que desempeñaron un papel primordial en los subsiguientes avances.

Por otro lado, la historia dio un vuelco inesperado. James Clerk Maxwell realizó una gran síntesis teórica de los trabajos de Ampère y Faraday sobre la electricidad y el magnetismo, lo que le condujo al sorprendente descubrimiento de que la luz era de origen eléctrico y magnético.

Además, como consecuencia de la teoría que desarrolló predijo la existencia de las ondas electromagnéticas. El contexto en que trabajó Maxwell se presenta en los capítulos XI a XIII y su contribución se relata en el capítulo XIV. Basado en el trabajo de sus antecesores, Maxwell construyó uno de los pilares de la física, comparable con la mecánica desarrollada por Newton. Hemos de mencionar que la teoría electromagnética de Maxwell sirvió para el futuro desarrollo de la teoría de la relatividad de Einstein.

Años después de que Maxwell hiciera la predicción de las ondas electromagnéticas en forma teórica, Hertz llevó a cabo un notable experimento, que es un ejemplo de la forma en que se hace ciencia. Se propuso indagar si en la naturaleza efectivamente existen ondas electromagnéticas. Su trabajo verificó en forma brillante las predicciones de Maxwell.

Después de los experimentos de Hertz no quedó ya ninguna duda, desde el punto de vista conceptual, acerca de la realidad física de los campos, idea que Faraday había propuesto originalmente y que Maxwell elaboró en su forma matemática. Esta idea ha sido de crucial importancia en la física posterior, tanto para la relatividad de Einstein como para las teorías modernas de las partículas elementales.

Otra consecuencia de los trabajos de Maxwell y Hertz fue el inicio de las comunicaciones inalámbricas. Los antecedentes y trabajos más importantes se presentan en los capítulos XVI a XVIII.

A principios del presente siglo, los trabajos de Marconi solamente habían dado por resultado el telégrafo inalámbrico. La necesidad de desarrollar la radiotelefonía precipitó el inicio de la electrónica moderna. De hecho, esta rama del electromagnetismo consolidó el importante papel de los laboratorios industriales. En el capítulo XX se describe la relación entre la parte científica y sus aplicaciones prácticas. Una vez logrado el entendimiento fundamental del funcionamiento de los tubos al vacío hubo una nueva irrupción de grandes novedades: la radio, que dominaría la vida humana durante varias décadas, y posteriormente la televisión, que tanta repercusión ha tenido. Esto lo reseñamos en los capítulos XXI y XXII.

En el capítulo XXIII presentamos en forma breve la introducción y aplicaciones de la electricidad en México.

En los capítulos XXV y XXVI se detalla la invención del radar y el papel determinante que desempeñó en la victoria de los ingleses en la llamada Batalla de Inglaterra. Ésta, que tuvo en sus momentos culminantes en el otoño de 1940, fue decisiva en la posterior derrota de la Alemania nazi y pudo lograrse gracias a que los ingleses contaban con el radar, primitivo, pero funcional. Éste fue una aplicación importante de la teoría electromagnética. Para mejorar su funcionamiento y reducir su tamaño fue necesario trabajar con microondas, que se lograron generar por medio del magnetrón.

Como se reseña en el capítulo XXVII, hacia 1946 se terminó de construir un dispositivo que llegaría a tener gran influencia en la vida humana: las computadoras electrónicas.

Otra revolución se lleva a cabo en la segunda parte de la década de 1940: la invención del transistor. En el capítulo XXVIII se presenta el trabajo científico que se realizó para lograr esta novedad; en particular, la base cuántica fue indispensable para hacer una descripción correcta de la estructura microscópica de los sólidos. De esta manera, como se puede leer en el capítulo XXIX, se inició un torrente de aplicaciones y de mejoras cada vez más interesantes, lo que hizo posible la miniaturización de los aparatos electrónicos.

De hecho, a partir de la década de 1950 se ha vivido en una revolución continua.

Los avances científicos en la comprensión de la estructura de la materia han dado lugar a un sinfín de aplicaciones del electromagnetismo. Una de ellas fue el láser, cuyo principio se basó en un mecanismo que Einstein propuso en 1917 para explicar la distribución de radiación encontrada por Planck en 1900. En el capítulo XXX se detalla la base del funcionamiento de este dispositivo, que tiene una cantidad impresionante de aplicaciones, algunas de las cuales presentamos.

Finalmente, en el último capítulo, el XXXI, se indican algunos de los avances que se están dando en la actualidad, así como las tendencias hacia el futuro. La fotónica, o sea la transmisión de señales, ahora por medio de ondas electromagnéticas y usando fibras ópticas, está ahora al frente del desarrollo, con la posibilidad real de reemplazar a los dispositivos electrónicos. De hecho, se vislumbra que en el siglo venidero los aparatos no sean ya electrónicos sino fotónicos, convirtiéndose en realidad un sueño de excitantes posibilidades, sólo concebido en la ciencia ficción.

Por limitación de espacio el autor ha elegido sólo algunos de los más importantes avances tecnológicos del electromagnetismo; aun así ha sido necesario abreviar la información, ya que varios de ellos requerirían un libro completo.

En esta obra se plantea el hecho de que, en el caso del electromagnetismo, la frontera entre la ciencia y la tecnología no está bien delimitada; de hecho, es difícil hablar de frontera. Y es que las dos están tan interrelacionadas que no puede avanzar una sin la ayuda de la otra. Esta mancuerna ha sido la base de la civilización moderna

Hecho y publicado por:

Mario E. Navas

Mario_navas444@hotmail.com

<http://www.humano.ya.com/mnavas42>