

# **ELECTRICIDAD Y MAGNETISMO**

Ing. Ricardo Echevarria

Lab. de Ensayos No Destructivos

Facultad de Ingeniería

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE

---

## INDICE

|   |    |
|---|----|
| ELECTRICIDAD .....                          | 3  |
| Electricidad.....                           | 3  |
| Electrostática.....                         | 3  |
| Propiedades eléctricas de los sólidos ..... | 3  |
| Cargas eléctricas .....                     | 4  |
| Medidas eléctricas .....                    | 5  |
| Corriente eléctrica.....                    | 5  |
| Electromagnetismo .....                     | 6  |
| Conducción en líquidos y gases.....         | 7  |
| Fuentes de fuerza electromotriz.....        | 7  |
| Corrientes alternas.....                    | 7  |
| Historia.....                               | 8  |
| MAGNETISMO.....                             | 10 |
| Magnetismo.....                             | 10 |
| Historia de su estudio.....                 | 10 |
| Teoría electromagnética.....                | 10 |
| El campo magnético.....                     | 11 |
| Tipos de materiales magnéticos.....         | 12 |
| Otros ordenamientos magnéticos.....         | 12 |
| Aplicaciones.....                           | 13 |

## ELECTRICIDAD

### Electricidad

Categoría de fenómenos físicos originados por la existencia de cargas eléctricas y por la interacción de las mismas. Cuando una carga eléctrica se encuentra estacionaria, o estática, produce fuerzas eléctricas sobre las otras cargas situadas en su misma región del espacio; cuando está en movimiento, produce además efectos magnéticos. Los efectos eléctricos y magnéticos dependen de la posición y movimiento relativos de las partículas con carga. En lo que respecta a los efectos eléctricos, estas partículas pueden ser neutras, positivas o negativas. La electricidad se ocupa de las partículas cargadas positivamente, como los protones, que se repelen mutuamente, y de las partículas cargadas negativamente, como los electrones, que también se repelen mutuamente. En cambio, las partículas negativas y positivas se atraen entre sí. Este comportamiento puede resumirse diciendo que las cargas del mismo signo se repelen y las cargas de distinto signo se atraen.

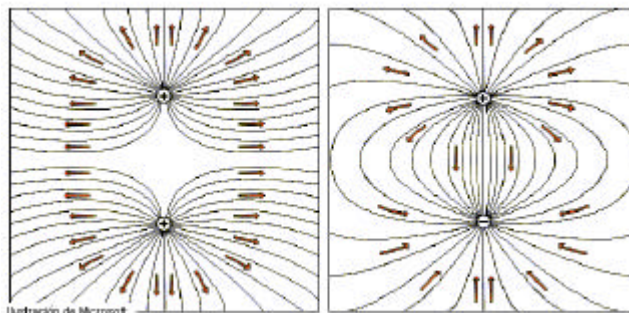
### Electrostática

Una manifestación habitual de la electricidad es la fuerza de atracción o repulsión entre dos cuerpos estacionarios que, de acuerdo con el principio de acción y reacción, ejercen la misma fuerza eléctrica uno sobre otro. La carga eléctrica de cada cuerpo puede medirse en culombios. La fuerza entre dos partículas con cargas  $q_1$  y  $q_2$  puede calcularse a partir de la ley de Coulomb

$$F_{\text{eléc}} = K \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

según la cual la fuerza es proporcional al producto de las cargas dividido entre el cuadrado de la distancia que las separa. La constante de proporcionalidad  $K$  depende del medio que rodea a las cargas. La ley se llama así en honor al físico francés Charles de Coulomb.

Toda partícula eléctricamente cargada crea a su alrededor un campo de fuerzas. Este campo puede representarse mediante líneas de fuerza que indican la dirección de la fuerza eléctrica en cada punto. Para mover otra partícula cargada de un punto a otro del campo hay que realizar trabajo. La cantidad de energía necesaria para efectuar ese trabajo sobre una partícula de carga unidad se conoce como diferencia de potencial entre ambos puntos. Esta magnitud se mide en voltios. La Tierra, un conductor de gran tamaño que puede suponerse sustancialmente uniforme a efectos eléctricos, suele emplearse como nivel de referencia cero para la energía potencial. Así, se dice que el potencial de un cuerpo cargado positivamente es de tantos voltios por encima del potencial de tierra, y el potencial de un cuerpo cargado negativamente es de tantos voltios por debajo del potencial de tierra.



Líneas de fuerza eléctricas

### Propiedades eléctricas de los sólidos

El primer fenómeno eléctrico artificial que se observó fue la propiedad que presentan algunas sustancias resinosas como el ámbar, que adquieren una carga negativa al ser frotadas con una piel o un trapo de

lana, tras lo cual atraen objetos pequeños. Un cuerpo así tiene un exceso de electrones. Una varilla de vidrio frotada con seda tiene una capacidad similar para atraer objetos no cargados, y atrae los cuerpos cargados negativamente con una fuerza aún mayor. El vidrio tiene una carga positiva, que puede describirse como un defecto de electrones o un exceso de protones.

Cuando algunos átomos se combinan para formar sólidos, frecuentemente quedan libres uno o más electrones, que pueden moverse con facilidad a través del material. En algunos materiales, llamados conductores, ciertos electrones se liberan fácilmente. Los metales, en particular el cobre y la plata, son buenos conductores.

Los materiales en los que los electrones están fuertemente ligados a los átomos se conocen como aislantes, no conductores o dieléctricos. Algunos ejemplos son el vidrio, la goma o la madera seca.

Existe un tercer tipo de materiales en los que un número relativamente pequeño de electrones puede liberarse de sus átomos de forma que dejan un 'hueco' en el lugar del electrón. El hueco, que representa la ausencia de un electrón negativo, se comporta como si fuera una unidad de carga positiva. Un campo eléctrico hace que tanto los electrones negativos como los huecos positivos se desplacen a través del material, con lo que se produce una corriente eléctrica. Generalmente, un sólido de este tipo, denominado semiconductor, tiene una resistencia mayor al paso de corriente que un conductor como el cobre, pero menor que un aislante como el vidrio. Si la mayoría de la corriente es transportada por los electrones negativos, se dice que es un semiconductor de tipo  $n$ . Si la mayoría de la corriente corresponde a los huecos positivos, se dice que es de tipo  $p$ .

Si un material fuera un conductor perfecto, las cargas circularían por él sin ninguna resistencia; por su parte, un aislante perfecto no permitiría que se movieran las cargas por él. No se conoce ninguna sustancia que presente alguno de estos comportamientos extremos a temperatura ambiente. A esta temperatura, los mejores conductores ofrecen una resistencia muy baja (pero no nula) al paso de la corriente y los mejores aislantes ofrecen una resistencia alta (pero no infinita). Sin embargo, la mayoría de los metales pierden toda su resistencia a temperaturas próximas al cero absoluto; este fenómeno se conoce como superconductividad.

### **Cargas eléctricas**

El electroscopio es un instrumento cualitativo empleado para demostrar la presencia de cargas eléctricas. En la figura 1 se muestra el instrumento tal como lo utilizó por primera vez el físico y químico británico Michael Faraday. El electroscopio está compuesto por dos láminas de metal muy finas ( $a, a_1$ ) colgadas de un soporte metálico ( $b$ ) en el interior de un recipiente de vidrio u otro material no conductor ( $c$ ). Una esfera ( $d$ ) recoge las cargas eléctricas del cuerpo cargado que se quiere observar; las cargas, positivas o negativas, pasan a través del soporte metálico y llegan a ambas láminas. Al ser iguales, las cargas se repelen y las láminas se separan. La distancia entre éstas depende de la cantidad de carga.

Pueden utilizarse tres métodos para cargar eléctricamente un objeto: 1) contacto con otro objeto de distinto material (como por ejemplo, ámbar y piel) seguido por separación; 2) contacto con otro cuerpo cargado; 3) inducción.

El efecto de las cargas eléctricas sobre conductores y no conductores se muestra en la figura 2. Un cuerpo cargado negativamente,  $A$ , está situado entre un conductor neutro,  $B$ , y un no conductor neutro,  $C$ . Los electrones libres del conductor son repelidos hacia la zona del conductor alejada de  $A$ , mientras que las cargas positivas se ven atraídas hacia la zona próxima. El cuerpo  $B$  en su conjunto es atraído hacia  $A$ , porque la atracción de las cargas distintas más próximas entre sí es mayor que la repulsión de las cargas iguales más separadas (las fuerzas entre las cargas eléctricas son inversamente proporcionales al cuadrado de la distancia entre las cargas). En el no conductor,  $C$ , los electrones no pueden moverse libremente, pero los átomos o moléculas del mismo se reorientan de forma que sus electrones constituyentes estén lo más lejos posible de  $A$ ; el no conductor también es atraído por  $A$ , pero en menor medida que el conductor.

El movimiento de los electrones en el conductor *B* de la figura 2 y la reorientación de los átomos del no conductor *C* proporciona a esos cuerpos cargas positivas en los lados más próximos a *A* y negativas en los lados más distantes de *A*. Las cargas generadas de esta forma se denominan cargas inducidas.

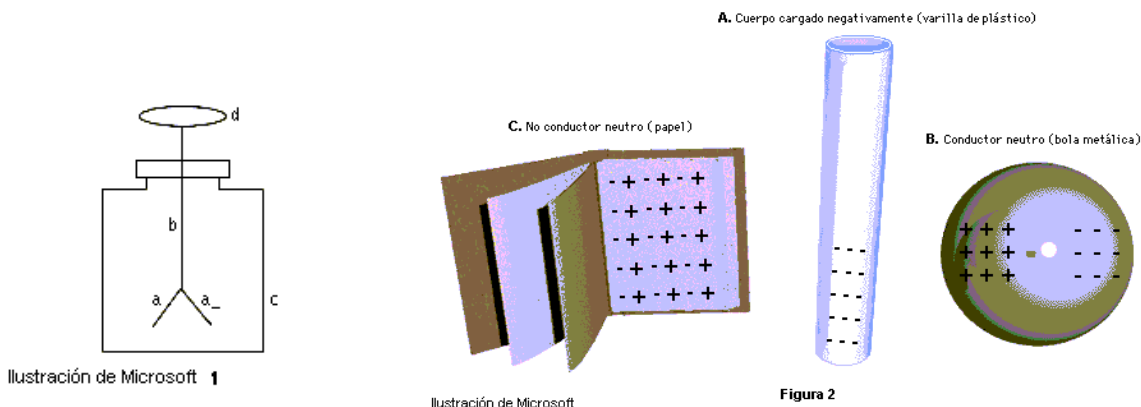


Figura 1

Figura 2: carga eléctrica inducida

Estos tres objetos muestran la forma en que las cargas eléctricas afectan a conductores y no conductores. Una varilla negativamente cargada (*A*) afecta a la distribución de cargas de un conductor (*B*) y un no conductor (*C*) cercanos. En los lados de *B* y *C* más próximos a *A* se induce una carga positiva, mientras que en los lados más alejados aparece una carga negativa. En el conductor (*B*), la separación de la carga afecta a todo el objeto, porque los electrones pueden moverse libremente. En el no conductor (*C*), la separación se limita a la distribución de los electrones dentro de cada átomo. El efecto se nota más si el no conductor está cerca del objeto cargado.

### **Medidas eléctricas**

El flujo de carga, o intensidad de corriente, que recorre un cable conductor se mide por el número de culombios que pasan en un segundo por una sección determinada del cable. Un culombio por segundo equivale a 1 amperio, unidad de intensidad de corriente eléctrica llamada así en honor al físico francés André Marie Ampère.

Cuando una carga de 1 culombio se desplaza a través de una diferencia de potencial de 1 voltio, el trabajo realizado equivale a 1 julio, unidad llamada así en honor al físico británico James Prescott Joule. Esta definición facilita la conversión de cantidades mecánicas en eléctricas.

Una unidad de energía muy usada en física atómica es el electronvoltio (eV). Corresponde a la energía adquirida por un electrón acelerado por una diferencia de potencial de 1 voltio. Esta unidad es muy pequeña y muchas veces se multiplica por un millón o mil millones, abreviándose el resultado como 1 MeV o 1 GeV.

### **Corriente eléctrica**

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 (  $\Omega$  ), 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  $V = I \times R$ , donde  $V$  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. .

Cuando una corriente eléctrica fluye por un cable pueden observarse dos efectos importantes: la temperatura del cable aumenta y un imán o brújula colocado cerca del cable se desvía, apuntando en dirección perpendicular al cable. Al circular la corriente, los electrones que la componen colisionan con los átomos del conductor y ceden energía, que aparece en forma de calor. La cantidad de energía desprendida en un circuito eléctrico se mide en julios. La potencia consumida se mide en vatios; 1 vatio equivale a 1 julio por segundo. La potencia  $P$  consumida por un circuito determinado puede calcularse a partir de la expresión  $P = V \times I$ , o la que se obtiene al aplicar a ésta la ley de Ohm:  $P = I^2 \times R$ . También se consume potencia en la producción de trabajo mecánico, en la emisión de radiación electromagnética como luz u ondas de radio y en la descomposición química.

### **Electromagnetismo**

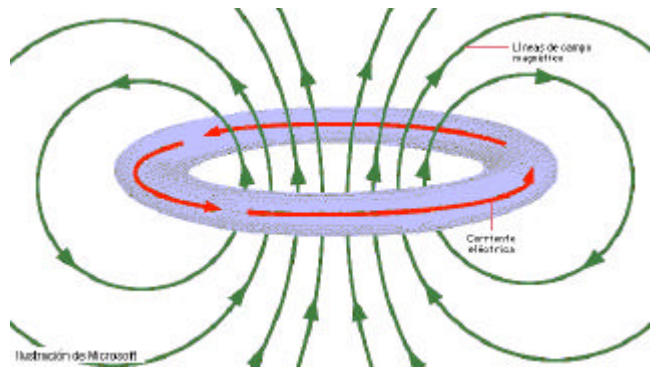
El movimiento de la aguja de una brújula en las proximidades de un conductor por el que circula una corriente indica la presencia de un campo magnético alrededor del conductor. Cuando dos conductores paralelos son recorridos cada uno por una corriente, los conductores se atraen si ambas corrientes fluyen en el mismo sentido y se repelen cuando fluyen en sentidos opuestos. El campo magnético creado por la corriente que fluye en una espira de alambre es tal que si se suspende la espira cerca de la Tierra se comporta como un imán o una brújula, y oscila hasta que la espira forma un ángulo recto con la línea que une los dos polos magnéticos terrestres.

Puede considerarse que el campo magnético en torno a un conductor rectilíneo por el que fluye una corriente se extiende desde el conductor igual que las ondas creadas cuando se tira una piedra al agua. Las líneas de fuerza del campo magnético tienen sentido antihorario cuando se observa el conductor en el mismo sentido en que se desplazan los electrones. El campo en torno al conductor es estacionario mientras la corriente fluya por él de forma uniforme.

Cuando un conductor se mueve de forma que atraviesa las líneas de fuerza de un campo magnético, este campo actúa sobre los electrones libres del conductor desplazándolos y creando una diferencia de potencial y un flujo de corriente en el mismo. Se produce el mismo efecto si el campo magnético es estacionario y el cable se mueve que si el campo se mueve y el cable permanece estacionario. Cuando una corriente empieza a circular por un conductor, se genera un campo magnético que parte del conductor. Este campo atraviesa el propio conductor e induce en él una corriente en sentido opuesto a la corriente que lo causó (según la llamada regla de Lenz). En un cable recto este efecto es muy pequeño, pero si el cable se enrolla para formar una bobina, el efecto se amplía ya que los campos generados por cada espira de la bobina cortan las espiras vecinas e inducen también una corriente en ellas. El resultado

es que cuando se conecta una bobina así a una fuente de diferencia de potencial, impide el flujo de corriente cuando empieza a aplicarse la diferencia de potencial. De forma similar, cuando se elimina la diferencia de potencial, el campo magnético se desvanece, y las líneas de fuerza vuelven a cortar las espiras de la bobina. La corriente inducida en estas circunstancias tiene el mismo sentido que la

corriente original, y la bobina tiende a mantener el flujo de corriente. Debido a estas propiedades, una bobina se resiste a los cambios en el flujo de corriente, por lo que se dice que posee inercia eléctrica o autoinducción. Esta inercia tiene poca importancia en circuitos de corriente continua, ya que no se observa cuando la corriente fluye de forma continuada, pero es muy importante en los circuitos de corriente alterna .



### **Conducción en líquidos y gases**

Cuando fluye una corriente eléctrica por un conductor metálico, el flujo sólo tiene lugar en un sentido, ya que la corriente es transportada en su totalidad por los electrones. En cambio en los líquidos y gases, se hace posible un flujo en dos sentidos debido a la ionización . En una solución líquida, los iones positivos se mueven en la disolución de los puntos de potencial más alto a los puntos de potencial más bajo; los iones negativos se mueven en sentido opuesto. De forma similar, en los gases —que pueden ser ionizados por radiactividad, por los rayos ultravioletas de la luz solar, por ondas electromagnéticas o por un campo eléctrico muy intenso— se produce un movimiento de iones en dos sentidos que produce una corriente eléctrica a través del gas.

### **Fuentes de fuerza electromotriz**

Para producir un flujo de corriente en cualquier circuito eléctrico es necesaria una fuente de fuerza electromotriz. Las fuentes disponibles son las siguientes: 1) máquinas electrostáticas, que se basan en el principio de inducir cargas eléctricas por medios mecánicos; 2) máquinas electromagnéticas, en las que se genera corriente desplazando mecánicamente un conductor a través de un campo o campos magnéticos; 3) células voltaicas, que producen una fuerza electromotriz a través de una acción electroquímica; 4) dispositivos que producen una fuerza electromotriz a través de la acción del calor; 5) dispositivos que generan una fuerza electromotriz por la acción de la luz; 6) dispositivos que producen una fuerza electromotriz a partir de una presión física, como los cristales piezoeléctricos.

### **Corrientes alternas**

Cuando se hace oscilar un conductor en un campo magnético, el flujo de corriente en el conductor cambia de sentido tantas veces como lo hace el movimiento físico del conductor. Varios sistemas de generación de electricidad se basan en este principio, y producen una forma de corriente oscilante llamada corriente alterna. Esta corriente tiene una serie de características ventajosas en comparación con la corriente continua, y suele utilizarse como fuente de energía eléctrica tanto en aplicaciones industriales como en el hogar. La característica práctica más importante de la corriente alterna es que su voltaje puede cambiarse mediante un sencillo dispositivo electromagnético denominado transformador. Cuando una corriente alterna pasa por una bobina de alambre, el campo magnético alrededor de la bobina se intensifica, se anula, se vuelve a intensificar con sentido opuesto y se vuelve a anular. Si se sitúa otra bobina en el

campo magnético de la primera bobina, sin estar directamente conectada a ella, el movimiento del campo magnético induce una corriente alterna en la segunda bobina. Si esta segunda bobina tiene un número de espiras mayor que la primera, la tensión inducida en ella será mayor que la tensión de la primera, ya que el campo actúa sobre un número mayor de conductores individuales. Al contrario, si el número de espiras de la segunda bobina es menor, la tensión será más baja que la de la primera.

La acción de un transformador hace posible la transmisión rentable de energía eléctrica a lo largo de grandes distancias. Si se quieren suministrar 200.000 vatios de potencia a una línea eléctrica, puede hacerse con un voltaje de 200.000 voltios y una corriente de 1 amperio o con un voltaje de 2.000 voltios y una corriente de 100 amperios, ya que la potencia es igual al producto de tensión y corriente. La potencia perdida en la línea por calentamiento es igual al cuadrado de la intensidad de la corriente multiplicado por la resistencia. Por ejemplo, si la resistencia de la línea es de 10 ohmios, la pérdida de potencia con 200.000 voltios será de 10 vatios, mientras que con 2.000 voltios será de 100.000 vatios, o sea, la mitad de la potencia disponible.

En un circuito de corriente alterna, el campo magnético en torno a una bobina varía constantemente, y la bobina obstaculiza continuamente el flujo de corriente en el circuito debido a la autoinducción. La relación entre el voltaje aplicado a una bobina ideal (es decir, sin resistencia) y la intensidad que fluye por dicha bobina es tal que la intensidad es nula cuando el voltaje es máximo, y es máxima cuando el voltaje es nulo. Además, el campo magnético variable induce una diferencia de potencial en la bobina de igual magnitud y sentido opuesto a la diferencia de potencial aplicada. En la práctica, las bobinas siempre presentan resistencia y capacidad además de autoinducción.

Si en un circuito de corriente alterna se coloca un condensador (también llamado capacitor) la intensidad de corriente es proporcional al tamaño del condensador y a la velocidad de variación del voltaje en el mismo. Por tanto, por un condensador cuya capacidad es de 2 faradios pasará el doble de intensidad que por uno de 1 faradio. En un condensador ideal, el voltaje está totalmente desfasado con la intensidad. Cuando el voltaje es máximo no fluye intensidad, porque la velocidad de cambio de voltaje es nula. La intensidad es máxima cuando el voltaje es nulo, porque en ese punto la velocidad de variación del voltaje es máxima. A través de un condensador circula intensidad —aunque no existe una conexión eléctrica directa entre sus placas— porque el voltaje de una placa induce una carga opuesta en la otra.

De los efectos indicados se deduce que si se aplica un voltaje alterno a una bobina o condensador ideales, no se consume potencia. No obstante, en todos los casos prácticos los circuitos de corriente alterna presentan resistencia además de autoinducción y capacidad, y se consume potencia. Esta potencia consumida depende de la proporción relativa de las tres magnitudes en el circuito.

### **Historia**

Es posible que el filósofo griego Tales de Mileto, que vivió en torno al 600 a.C., ya supiera que el ámbar adquiere la propiedad de atraer objetos ligeros al ser frotado. Otro filósofo griego, Teofrasto, afirmaba en un tratado escrito tres siglos después que otras sustancias poseen esa propiedad. Sin embargo, el primer estudio científico de los fenómenos eléctricos no apareció hasta el 1600 d.C., cuando se publicaron las investigaciones del médico británico William Gilbert, quien aplicó el término 'eléctrico' (del griego *elektron*, 'ámbar') a la fuerza que ejercen esas sustancias después de ser frotadas. También distinguió entre las acciones magnética y eléctrica.

La primera máquina para producir una carga eléctrica fue descrita en 1672 por el físico alemán Otto von Guericke. Estaba formada por una esfera de azufre movida por una manivela, sobre la que se inducía una carga cuando se apoyaba la mano sobre ella. El científico francés Charles François de Cisternay Du Fay fue el primero en distinguir claramente los dos tipos diferentes de carga eléctrica: positiva y negativa. El condensador más antiguo, la botella de Leyden, fue desarrollado en 1745. Estaba formado por una botella de vidrio recubierta por dos láminas de papel de estaño, una en el interior y otra en el exterior. Si se

cargaba una de las láminas con una máquina electrostática, se producía una descarga violenta si se tocaban ambas láminas a la vez.

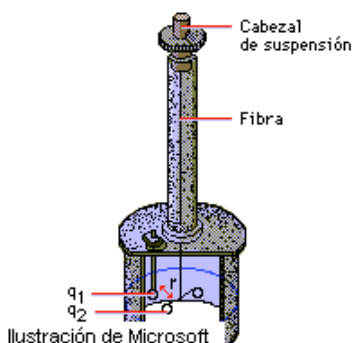
El inventor estadounidense Benjamin Franklin dedicó mucho tiempo a la investigación de la electricidad. Su famoso experimento con una cometa o papalote demostró que la electricidad atmosférica que provoca los fenómenos del relámpago y el trueno es de la misma naturaleza que la carga electrostática de una botella de Leyden. Franklin desarrolló una teoría según la cual la electricidad es un 'fluido' único que existe en toda la materia, y sus efectos pueden explicarse por el exceso o la escasez de ese fluido.

La ley de que la fuerza entre cargas eléctricas es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre las cargas fue demostrada experimentalmente por el químico británico Joseph Priestley alrededor de 1766. Priestley también demostró que una carga eléctrica se distribuye uniformemente sobre la superficie de una esfera metálica hueca, y que en el interior de una esfera así no existen cargas ni campos eléctricos. Charles de Coulomb inventó una balanza de torsión para medir con precisión la fuerza que se ejerce entre las cargas eléctricas. Con ese aparato confirmó las observaciones de Priestley y demostró que la fuerza entre dos cargas también es proporcional al producto de las cargas individuales. Faraday, que realizó numerosas contribuciones al estudio de la electricidad a principios del siglo XIX, también desarrolló la teoría de las líneas de fuerza eléctricas.

Los físicos italianos Luigi Galvani y Alessandro Volta llevaron a cabo los primeros experimentos importantes con corrientes eléctricas. Galvani produjo contracciones musculares en las patas de una rana aplicándoles una corriente eléctrica. En 1800, Volta presentó la primera fuente electroquímica artificial de diferencia de potencial, un tipo de pila eléctrica o batería. La existencia de un campo magnético en torno a un flujo de corriente eléctrica fue demostrada por el científico danés Hans Christian Oersted en 1819, y en 1831 Faraday demostró que la corriente que circula por una espira de cable puede inducir electromagnéticamente una corriente en una espira cercana. Alrededor de 1840, James Prescott Joule y el científico alemán Hermann von Helmholtz demostraron que los circuitos eléctricos cumplen la ley de conservación de la energía, y que la electricidad es una forma de energía.

El físico matemático británico James Clerk Maxwell realizó una contribución importante al estudio de la electricidad en el siglo XIX; Maxwell investigó las propiedades de las ondas electromagnéticas y la luz y desarrolló la teoría de que ambas tienen la misma naturaleza. Su trabajo abrió el camino al físico alemán Heinrich Hertz, que produjo y detectó ondas eléctricas en la atmósfera en 1886, y al ingeniero italiano Guglielmo Marconi, que en 1896 empleó esas ondas para producir el primer sistema práctico de señales de radio.

La teoría de los electrones, que forma la base de la teoría eléctrica moderna, fue presentada por el físico holandés Hendrik Antoon Lorentz en 1892. El primero en medir con precisión la carga del electrón fue el físico estadounidense Robert Andrews Millikan, en 1909. El uso generalizado de la electricidad como fuente de energía se debe en gran medida a ingenieros e inventores pioneros de Estados Unidos, como Thomas Alva Edison, Nikola Tesla o Charles Proteus Steinmetz.



## **MAGNETISMO**

### **Magnetismo**

Uno de los aspectos del electromagnetismo, que es una de las fuerzas fundamentales de la naturaleza. 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.

### **Historia de su estudio**

El fenómeno del magnetismo se conoce desde tiempos antiguos. La piedra imán o magnetita, un óxido de hierro que tiene la propiedad de atraer los objetos de hierro, ya era conocida por los griegos, los romanos y los chinos. Cuando se pasa una piedra imán por un pedazo de hierro, éste adquiere a su vez la capacidad de atraer otros pedazos de hierro. Los imanes así producidos están 'polarizados', es decir, cada uno de ellos tiene dos partes o extremos llamados polos norte y sur. Los polos iguales se repelen, y los polos opuestos se atraen.

La brújula se empezó a utilizar en Occidente como instrumento de navegación alrededor del 1300 d.C. En el siglo XIII, el erudito francés Petrus Peregrinus realizó importantes investigaciones sobre los imanes. Sus descubrimientos no se superaron en casi 300 años, hasta que el físico y médico británico William Gilbert publicó su libro, *De magnete* en 1600. Gilbert aplicó métodos científicos al estudio de la electricidad y el magnetismo. Observó que la Tierra también se comporta como un imán gigante, y a través de una serie de experimentos investigó y refutó varios conceptos incorrectos sobre el magnetismo aceptados en la época. Posteriormente, en 1750, el geólogo británico John Michell inventó una balanza que utilizó para estudiar las fuerzas magnéticas. Michell demostró que la atracción o repulsión entre dos polos magnéticos disminuye a medida que aumenta el cuadrado de la distancia entre ellos. El físico francés Charles de Coulomb, que había medido las fuerzas entre cargas eléctricas, verificó posteriormente la observación de Michell con una gran precisión.

### **Teoría electromagnética**

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 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. 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.

### **Tipos de materiales magnéticos**

Las propiedades magnéticas de los materiales se clasifican siguiendo distintos criterios.

Una de las clasificaciones de los materiales magnéticos —que los divide en diamagnéticos, paramagnéticos y ferromagnéticos— se basa en la reacción del material ante un campo magnético. Cuando se coloca un material diamagnético en un campo magnético, se induce en él un momento magnético de sentido opuesto al campo. En la actualidad se sabe que esta propiedad se debe a las corrientes eléctricas inducidas en los átomos y moléculas individuales. Estas corrientes producen momentos magnéticos opuestos al campo aplicado. Muchos materiales son diamagnéticos; los que presentan un diamagnetismo más intenso son el bismuto metálico y las moléculas orgánicas que, como el benceno, tienen una estructura cíclica que permite que las corrientes eléctricas se establezcan con facilidad.

El comportamiento paramagnético se produce cuando el campo magnético aplicado alinea todos los momentos magnéticos ya existentes en los átomos o moléculas individuales que componen el material. Esto produce un momento magnético global que se suma al campo magnético. Los materiales paramagnéticos suelen contener elementos de transición o lantánidos con electrones desapareados. El paramagnetismo en sustancias no metálicas suele caracterizarse por una dependencia de la temperatura: la intensidad del momento magnético inducido varía inversamente con la temperatura. Esto se debe a que al ir aumentando la temperatura, cada vez resulta más difícil alinear los momentos magnéticos de los átomos individuales en la dirección del campo magnético.

Las sustancias ferromagnéticas son las que, como el hierro, mantienen un momento magnético incluso cuando el campo magnético externo se hace nulo. Este efecto se debe a una fuerte interacción entre los momentos magnéticos de los átomos o electrones individuales de la sustancia magnética, que los hace alinearse de forma paralela entre sí. En circunstancias normales, los materiales ferromagnéticos están divididos en regiones llamadas 'dominios'; en cada dominio, los momentos magnéticos atómicos están alineados en paralelo. Los momentos de dominios diferentes no apuntan necesariamente en la misma dirección. Aunque un trozo de hierro normal puede no tener un momento magnético total, puede inducirse su magnetización colocándolo en un campo magnético, que alinea los momentos de todos los dominios. La energía empleada en la reorientación de los dominios desde el estado magnetizado hasta el estado desmagnetizado se manifiesta en un desfase de la respuesta al campo magnético aplicado, conocido como 'histéresis'.

Un material ferromagnético acaba perdiendo sus propiedades magnéticas cuando se calienta. Esta pérdida es completa por encima de una temperatura conocida como punto de Curie, llamada así en honor del físico francés Pierre Curie, que descubrió el fenómeno en 1895. (El punto de Curie del hierro metálico es de unos 770 °C).

### **Otros ordenamientos magnéticos**

En los últimos años, una mejor comprensión de los orígenes atómicos de las propiedades magnéticas ha llevado al descubrimiento de otros tipos de ordenamiento magnético. Se conocen casos en los que los momentos magnéticos interactúan de tal forma que les resulta energéticamente favorable alinearse entre sí en sentido antiparalelo; estos materiales se llaman antiferromagnéticos. Existe una temperatura análoga al punto de Curie, llamada temperatura de Néel, por encima de la cual desaparece el orden antiferromagnético.

También se han hallado otras configuraciones más complejas de los momentos magnéticos atómicos. Las sustancias 'ferrimagnéticas' tienen al menos dos clases distintas de momento magnético atómico, que se orientan de forma antiparalela. Como ambos momentos tienen magnitudes diferentes, persiste un

momento magnético neto, al contrario que en un material antiferromagnético, donde todos los momentos magnéticos se anulan entre sí. Curiosamente, la piedra imán es ferrimagnética, y no ferromagnética; en este mineral existen dos tipos de ion hierro, con momentos magnéticos diferentes. Se han encontrado disposiciones aún más complejas en las que los momentos magnéticos están ordenados en espiral. Los estudios de estos ordenamientos han proporcionado mucha información sobre las interacciones entre los momentos magnéticos en sólidos.

### **Aplicaciones**

En los últimos 100 años han surgido numerosas aplicaciones del magnetismo y de los materiales magnéticos. El electroimán, por ejemplo, es la base del motor eléctrico y el transformador. En épocas más recientes, 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 trenes de levitación magnética utilizan poderosos imanes para elevarse por encima de los raíles y evitar el rozamiento. En la exploración mediante resonancia magnética nuclear, una importante herramienta de diagnóstico empleada en medicina, se utilizan campos magnéticos de gran intensidad. Los imanes superconductores se emplean en los aceleradores de partículas más potentes para mantener las partículas aceleradas en una trayectoria curva y enfocarlas.