

MAGNETISMO

Las fuerzas características de los imanes se denominan fuerzas magnéticas. El desarrollo de la física amplió el tipo de objetos que sufren y ejercen fuerzas magnéticas. Las corrientes eléctricas y, en general, las cargas en movimiento se comportan como imanes, es decir, producen campos magnéticos. Siendo las cargas móviles las últimas en llegar al panorama del magnetismo han permitido, sin embargo, explicar el comportamiento de los imanes, esos primeros objetos magnéticos conocidos desde la antigüedad.

El término *magnetismo* tiene su origen en el nombre que en la época de los filósofos griegos recibía una región del Asia Menor, entonces denominada Magnesia; en ella abundaba una piedra negra o piedra imán capaz de atraer objetos de hierro y de comunicarles por contacto un poder similar. A pesar de que ya en el siglo VI a. de C. se conocía un cierto número de fenómenos magnéticos, el magnetismo como disciplina no comienza a desarrollarse hasta más de veinte siglos después, cuando la experimentación se convierte en una herramienta esencial para el desarrollo del conocimiento científico. Gilbert (1544-1603), Ampere (1775-1836), Oersted (1777-1851), Faraday (1791-1867) y Maxwell (1831-1879), investigaron sobre las características de los fenómenos magnéticos, aportando una descripción en forma de leyes.

Los fenómenos magnéticos habían permanecido durante mucho tiempo en la historia de la ciencia como independientes de los eléctricos. Pero el avance de la electricidad por un lado y del magnetismo por otro, preparó la síntesis de ambas partes de la física en una sola, el *electromagnetismo*, que reúne las relaciones mutuas existentes entre los campos magnéticos y las corrientes eléctricas. Maxwell fue el científico que cerró ese sistema de relaciones al elaborar su teoría electromagnética.

El magnetismo de los imanes

El estudio del comportamiento de los imanes pone de manifiesto la existencia en cualquier imán de dos zonas extremas o *polos* en donde la acción magnética es más intensa. Los *polos magnéticos* de un imán no son equivalentes, como lo prueba el hecho de que enfrentando dos imanes idénticos se observen atracciones o repulsiones mutuas según se aproxime el primero al segundo por uno o por otro polo.

Para distinguir los dos polos de un imán recto se les denomina *polo norte* y *polo sur*. Esta referencia geográfica está relacionada con el hecho de que la Tierra se comporte como un gran imán. Las experiencias con brújulas indican que los polos del imán terrestre se encuentran próximos a los polos Sur y Norte geográficos respectivamente. Por tal motivo, el polo de la brújula que se orienta aproximadamente hacia el Norte terrestre se denomina polo Norte y el opuesto constituye el polo Sur. Tal distinción entre polos magnéticos se puede extender a cualquier tipo de imanes.

Las experiencias con imanes ponen de manifiesto que polos del mismo tipo (N-N y S-S) se repelen y polos de distinto tipo (N-S y S-N) se atraen. Esta característica del magnetismo de los imanes fue explicada por los antiguos como la consecuencia de una propiedad general de la naturaleza consistente en lo que ellos llamaron la « atracción de los opuestos ».

Otra propiedad característica del comportamiento de los imanes consiste en la imposibilidad de aislar sus polos magnéticos. Así, si se corta un imán recto en dos mitades se reproducen otros dos imanes con sus respectivos polos norte y sur. Y lo mismo sucederá si se repite el procedimiento

nuevamente con cada uno de ellos. No es posible, entonces, obtener un imán con un solo polo magnético semejante a un cuerpo cargado con electricidad de un solo signo. Dicha experiencia fue efectuada por primera vez por Peregrinus, sabio francés que vivió sobre 1270 y a quien se debe el perfeccionamiento de la brújula, así como una importante aportación al estudio de los imanes.

Características de las fuerzas magnéticas

A diferencia de lo que sucede con una barra de ámbar electrizada por frotamiento -la cual atrae hacia sí todo tipo de objetos con la condición de que sean ligeros-, un imán ordinario sólo ejerce fuerzas magnéticas sobre cierto tipo de materiales, en particular sobre el hierro. Este fue uno de los obstáculos que impidieron una aproximación más temprana entre el estudio de la electricidad y el del magnetismo. Las fuerzas magnéticas son fuerzas de acción a distancia, es decir, se producen sin que exista contacto físico entre los dos imanes. Esta circunstancia, que excitó la imaginación de los filósofos antiguos por su difícil explicación, contribuyó más adelante al desarrollo del concepto de campo de fuerzas.

Experiencias con imanes y dinamómetros permiten sostener que la intensidad de la fuerza magnética de interacción entre imanes disminuye con el cuadrado de la distancia. Representando por F_m la fuerza magnética, por r la distancia y por $F_{1 \rightarrow 2} = \mu \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot L / 2 \cdot \pi \cdot r$ el símbolo de la proporcionalidad directa, tal propiedad se expresa en la forma:

$$F_m = 1/r^2$$

Espectros magnéticos

Cuando se espolvorea en una cartulina o en una lámina de vidrio, situadas sobre un imán, limaduras de hierro, éstas se orientan de un modo regular a lo largo de líneas que unen entre sí los dos polos del imán. Lo que sucede es que cada limadura se comporta como una pequeña brújula que se orienta en cada punto como consecuencia de las fuerzas magnéticas que soporta. La imagen que forma este conjunto de limaduras alineadas constituye el espectro magnético del imán.

El *espectro magnético* de un imán permite no sólo distinguir con claridad los polos magnéticos, sino que además proporciona una representación de la influencia magnética del imán en el espacio que le rodea. Así una pareja de imanes enfrentados por sus polos de igual tipo dará lugar a un espectro magnético diferente al que se obtiene cuando se colocan de modo que sean los polos opuestos los más próximos. Esta imagen física de la influencia de los imanes sobre el espacio que les rodea hace posible una aproximación relativamente directa a la idea de campo magnético.

EL CAMPO MAGNETICO

El hecho de que las fuerzas magnéticas sean fuerzas de acción a distancia permite recurrir a la idea física de campo para describir la influencia de un imán o de un conjunto de imanes sobre el espacio que les rodea. Al igual que en el caso del campo eléctrico, se recurre a la noción de *líneas de fuerza* para representar la estructura del campo. En cada punto las líneas de fuerza del campo magnético indican la dirección en la que se orientará una pequeña brújula (considerada como un elemento de prueba) situada en tal punto. Así las limaduras de hierro espolvoreadas sobre un imán se orientan a lo largo de las líneas de fuerza del campo magnético correspondiente y el espectro magnético resultante proporciona una representación espacial del campo. Por convenio se admite que las líneas

de fuerza salen del polo Norte y se dirigen al polo Sur.

La intensidad del campo magnético

Como sucede en otros campos de fuerza, el campo magnético queda definido matemáticamente si se conoce el valor que toma en cada punto una magnitud vectorial que recibe el nombre de *intensidad de campo*. La intensidad del campo magnético, a veces denominada *inducción magnética*, se representa por la letra **B** y es un vector tal que en cada punto coincide en dirección y sentido con los de la línea de fuerza magnética correspondiente. Las brújulas, al alinearse a lo largo de las líneas de fuerza del campo magnético, indican la dirección y el sentido de la intensidad del campo **B**.

La obtención de una expresión para **B** se deriva de la observación experimental de lo que le sucede a una carga q en movimiento en presencia de un campo magnético. Si la carga estuviera en reposo no se apreciaría ninguna fuerza mutua; sin embargo, si la carga q se mueve dentro del campo creado por un imán se observa cómo su trayectoria se curva, lo cual indica que una fuerza magnética F_m se está ejerciendo sobre ella. Del estudio experimental de este fenómeno se deduce que:

- F_m es tanto mayor cuanto mayor es la magnitud de la carga q y su sentido depende del signo de la carga.
- F_m es tanto mayor cuanto mayor es la velocidad v de la carga q .
- F_m se hace máxima cuando la carga se mueve en una dirección perpendicular a las líneas de fuerza y resulta nula cuando se mueve paralelamente a ella.
- La dirección de la fuerza magnética en un punto resulta perpendicular al plano definido por las líneas de fuerza a nivel de ese punto y por la dirección del movimiento de la carga q , o lo que es lo mismo, F_m es perpendicular al plano formado por los vectores **B** y v .

Las conclusiones experimentales a,b y e quedan resumidas en la expresión:

$$F_m = q.v.B.\text{sen } \varphi \quad (11.1)$$

donde B representa el módulo o magnitud de la intensidad del campo y φ el ángulo que forman los vectores v y **B**. Dado que F_m , v y **B** pueden ser considerados como vectores, es necesario además reunir en una regla lo relativo a la relación entre sus direcciones y sentidos: el vector F_m es perpendicular al plano formado por los vectores v y **B** y su sentido coincide con el de avance de un tornillo que se hiciera girar en el sentido que va de v a **B** (por el camino más corto). Dicha *regla*, llamada *del tornillo* de Maxwell, es equivalente a la *de la mano izquierda*, según la cual las direcciones y sentidos de los vectores F_m , v y **B** vienen dados por los dedos pulgar, índice y corazón de la mano izquierda dispuestos en la forma que se muestra en la figura adjunta.

La ecuación (11.1) constituye una definición indirecta del módulo o magnitud de la intensidad del campo magnético, dado que a partir de ella se tiene:

$$B = F_m/q.v.\text{sen } \varphi \quad (11.2)$$

La dirección de **B** es precisamente aquélla en la que debería desplazarse q para que F_m fuera nula;

es decir, la de las líneas de fuerza. La unidad del campo magnético en el SI es el tesla (T) y representa la intensidad que ha de tener un campo magnético para que una carga de 1 C, moviéndose en su interior a una velocidad de 1 m/s perpendicularmente a la dirección del campo, experimentase una fuerza magnética de 1 newton.

$$1 \text{ T} = 1 \text{ N/1 C} \cdot 1 \text{ m/s}$$

Aunque no pertenece al SI, con cierta frecuencia se emplea el gauss (G): $1 \text{ T} = 10^4 \text{ G}$

EL MOVIMIENTO DE PARTICULAS EN UN CAMPO MAGNETICO

Los campos eléctricos y magnéticos desvían ambos las trayectorias de las cargas en movimiento, pero lo hacen de modos diferentes. Una partícula cargada que se mueve en un campo eléctrico (como el producido entre las dos placas de un condensador plano dispuesto horizontalmente) sufre una fuerza eléctrica F_e en la misma dirección del campo E que curva su trayectoria. Si la partícula alcanza el espacio comprendido entre las dos placas según una dirección paralela, se desviará hacia la placa + si su carga es negativa y hacia la - en caso contrario, pero siempre en un plano vertical, es decir, perpendicular a ambas placas. Dicho plano es el definido por los vectores v y E .

Si las dos placas del condensador se sustituyen por los dos polos de un imán de herradura, la partícula sufre una fuerza magnética F_m que según la regla de la mano izquierda es perpendicular a los vectores v y B . En este caso la trayectoria de la partícula cargada se desvía en el plano horizontal.

Campos magnéticos - El experimento de Oersted

Aun cuando los filósofos griegos presintieron que las fuerzas eléctricas y las magnéticas tenían un origen común, la experimentación desarrollada desde William Gilbert (1544-1603) en torno a este tipo de fenómenos no reveló ningún resultado que indicara que un cuerpo cargado en reposo es atraído o repelido por un imán. A pesar de su similitud, los fenómenos eléctricos parecían independientes de los fenómenos magnéticos. Esta era la opinión de los colegas de Oersted (1777-1851) y probablemente la suya propia hasta que un día de 1819, al finalizar una clase práctica en la Universidad de Copenhague, fue protagonista de un descubrimiento que lo haría famoso. Al acercar una aguja imantada a un hilo de platino por el que circulaba corriente advirtió, perplejo, que la aguja efectuaba una gran oscilación hasta situarse inmediatamente perpendicular al hilo. Al invertir el sentido de la corriente, la aguja invirtió también su orientación.

Este experimento, considerado por algunos como fortuito y por otros como intencionado, constituyó la primera demostración de la relación existente entre la electricidad y el magnetismo. Aunque las cargas eléctricas en reposo carecen de efectos magnéticos, las corrientes eléctricas, es decir, las cargas en movimiento, crean campos magnéticos y se comportan, por lo tanto, como imanes.

Campo magnético debido a una corriente rectilínea

La repetición de la experiencia de Hans Christian Oersted con la ayuda de limaduras de hierro dispuestas sobre una cartulina perpendicular al hilo conductor rectilíneo, pone de manifiesto una estructura de líneas de fuerza del campo magnético resultante, formando circunferencias concéntricas que rodean al hilo. Su sentido puede relacionarse con el convencional de la corriente sustituyendo las limaduras por pequeñas brújulas. En tal caso se observa que el polo norte de cada brújula -que apunta siempre en el sentido del vector intensidad de campo **B**- se corresponde con la indicación de los dedos restantes de la mano derecha semicerrada en torno a la corriente, cuando el pulgar apunta en el sentido de dicha corriente. Esta es la *regla de la mano derecha* que aparece representada en la figura adjunta y que permite relacionar el sentido de una corriente rectilínea con el sentido de las líneas de fuerza del campo magnético **B** creado por ella. Experiencias más detalladas indican que la intensidad del campo **B** depende de las características del medio que rodea a la corriente rectilínea, siendo tanto mayor cuando mayor es la intensidad de corriente *I* y cuanto menor es la distancia *r* al hilo conductor. Todo lo cual queda englobado en la ecuación:

$$B = \mu \cdot I / 2 \cdot \pi \cdot r \quad (11.3)$$

μ representa una constante característica del medio que recibe el nombre de *permeabilidad magnética*. En el vacío su valor es $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ T m/A}$.

Campo magnético debido a una espira circular

El estudio del espectro magnético debido a una corriente circular, completado con la información que sobre el sentido del campo creado ofrecen pequeñas brújulas, indica que las líneas de fuerza del campo se cierran en torno a cada porción de la espira como si ésta consistiera en la reunión de pequeños tramos rectilíneos. En conjunto, el espectro magnético resultante se parece mucho al de un imán recto con sus polos norte y sur. La cara norte de una corriente circular, considerada como un imán, es aquella de donde salen las líneas de fuerza y la cara sur aquella otra a donde llegan dichas líneas.

La relación entre la polaridad magnética de una espira y el sentido de la corriente que circula por ella la establece la *regla de la mano derecha* de la que se deriva esta otra: una cara es norte cuando un observador situado frente a ella ve circular la corriente (convencional) de derecha a izquierda y es sur en el caso contrario. La experimentación sobre los factores que influyen en el valor de la intensidad de campo **B** en el interior de la espira muestra que éste depende de las propiedades del medio que rodea la espira (reflejadas en su permeabilidad magnética μ), de la intensidad de corriente *I* y del valor del radio *R* de la espira, en la forma dada por la siguiente ecuación:

$$B = \mu \cdot I / 2 \cdot R \quad (11.4)$$

Campo magnético debido a un solenoide

Un *solenoides* es, en esencia, un conjunto de espiras iguales y paralelas dispuestas a lo largo de una determinada longitud que son recorridas por la misma intensidad de corriente. Su forma es semejante a la del alambre espiral de un bloc. El espectro magnético del campo creado por un solenoide se parece más aún al de un imán recto que el debido a una sola espira. La regla que permite relacionar la polaridad magnética del solenoide como imán con el sentido convencional de la corriente que circula por él es la misma que la aplicada en el caso de una sola espira. El estudio experimental de la intensidad del campo magnético **B** debido a un solenoide en un punto cualquiera de su interior pone de manifiesto que una mayor proximidad entre las espiras produce un campo magnético más intenso, lo cual se refleja en la expresión de **B** a través del cociente N/L , siendo *N* el

número de espiras y L la longitud del solenoide. Dicha expresión viene dada por la ecuación:

$$B = \mu \cdot I \cdot N/l \quad (11.5)$$

N/l: representa el número de espiras por unidad de longitud, siendo su valor tanto mayor cuanto más apretadas están las espiras en el solenoide.

El hecho de que B dependa del valor de μ , y por tanto de las características del medio, sugiere la posibilidad de introducir en el interior del solenoide una barra de material de elevado μ y conseguir así un campo magnético más intenso con la misma intensidad de corriente I. Este es precisamente el fundamento del *electroimán*, en el cual una barra de hierro introducida en el hueco del solenoide aumenta la intensidad del campo magnético varios miles de veces con respecto al valor que tendría en ausencia de tal material. Los timbres, los teléfonos, las dinamos y muchos otros dispositivos eléctricos y electromecánicos utilizan electroimanes como componentes. Sus características de imanes temporales, que actúan sólo en presencia de corriente, amplía el número de sus posibles aplicaciones.

Ejemplo de campo magnético debido a corrientes eléctricas: Se trata de calcular la intensidad del campo magnético B creado por una corriente de 4 A de intensidad en cada uno de los siguientes casos: a) a 4 cm de un hilo conductor rectilíneo e indefinido; b) en el centro de una bobina formada por 20 espiras circulares de 10 cm de diámetro; c) en cualquier punto del interior de un solenoide de 2 cm de diámetro y de longitud indefinida que posee 40 espiras por cada centímetro de longitud (Tómese $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ T m/A).

a) El campo magnético B debido a una corriente rectilínea indefinida en un punto que dista r de dicha corriente, viene dado por la expresión

$$B = \mu_0 \cdot I / 2 \cdot \pi \cdot r$$

Sustituyendo los datos del enunciado y recordando que todas las magnitudes se han de expresar en unidades SI, resulta:

$$B = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot (\text{m/A}) \cdot 4 \text{ A} / 2 \cdot \pi \cdot 4 \cdot 10^{-2} \text{ m} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ T}$$

b) El campo B debido a una bobina formada por N espiras de igual radio R en su centro geométrico será igual a N veces el campo debido a una sola, es decir:

$$B = \mu_0 \cdot I \cdot N / 2 \cdot R = 20 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot (\text{m/A}) \cdot 4 \text{ A} / 10 \cdot 10^{-2} \text{ m} = 3,2 \cdot \pi \cdot 10^{-4} \text{ T}$$

c) En cualquier punto del interior de un solenoide el campo magnético es homogéneo, es decir, toma el mismo valor $B = \mu_0 \cdot I \cdot N/l$. Aún cuando no se conozca la longitud, para calcular B basta conocer el número de espiras por unidad de longitud, que en este caso es $N/l = 4 \cdot 10^2$ espiras/m. sustituyendo, resulta:

$$B = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 4 \cdot 40 \cdot 10^2 = 6,4 \cdot \pi \cdot 10^{-3} \text{ T}$$