

INTRO. CAMPOS MAGNÉTICOS Y CORRIENTES ELECTRICAS

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), Ampère (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, cada vez más completa.

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. James Clark Maxwell fue el científico que cerró ese sistema de relaciones al elaborar su teoría electromagnética, una de las más bellas construcciones conceptuales de la física clásica.

IMANES Y MAGNETISMO

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 más 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 Petrus 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.

Algunas 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 \sim el símbolo de la proporcionalidad directa, tal propiedad se expresa en la forma:

$$F_m \sim \frac{1}{r^2}$$

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 MAGNÉTICO

Las fuerzas magnéticas y la idea física de campo

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:

- a) F_m es tanto mayor cuanto mayor es la magnitud de la carga q y su sentido depende del signo de la carga.
- b) F_m es tanto mayor cuanto mayor es la velocidad v de la carga q .
- c) 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.
- d) 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 c quedan resumidas en la expresión:

$$F_m = q \cdot v \cdot B \cdot \text{sen} \cdot \mathfrak{J} \quad (11.1)$$

donde B representa el módulo o magnitud de la intensidad del campo y \mathfrak{J} 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:

$$B = \frac{F_m}{q \cdot v \cdot \text{sen} \cdot \mathfrak{J}} \quad (11.2)$$

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.

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

Aunque no pertenece al SI, con cierta frecuencia se emplea el gauss (G):

$$1 \text{ T} = 10^4 \text{ G}$$

EL MOVIMIENTO DE PARTÍCULAS EN UN CAMPO MAGNÉTICO

Los campos eléctricos y magnéticos desvían ambas 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 MAGNETICOS DEBIDOS ...

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 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 Christian 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 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:

$$B = \frac{\mu I}{2\pi r} \quad (11.3)$$

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

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:

$$B = \frac{\mu I}{2R} \quad (11.4)$$

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 \mathbf{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:

$$B = \mu_0 i \frac{N}{L} \quad (11.5)$$

$\frac{N}{L}$ 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 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.

APLICACIÓN: CAMPO MAGNÉTICO DEBIDO A CORRIENTES ELÉCTRICAS

Se trata de calcular la intensidad del campo magnético B creado por una corriente de 4A 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 $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$).

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

$$B = \mu_0 \frac{i}{2\pi r}$$

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

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

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:

$$B = N \frac{\mu_0 i}{2R} = 20 \cdot \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 4}{10 \cdot 10^{-2}} = 3,2\pi \cdot 10^{-4} \text{ T}$$

c) En cualquier punto del interior de un solenoide el campo magnético es

homogéneo, es decir, toma un mismo valor $B = \mu_0 i \frac{N}{L}$. Aun cuando no se conozca

la longitud, para calcular B basta conocer el número de espiras por unidad de longitud, que en este caso es $\frac{N}{L} = 40 \cdot 10^2$ espiras/m. Sustituyendo, resulta:

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

APLICACIÓN DE LA REGLA DE LA MANO DERECHA

La regla de la mano derecha permite determinar el sentido de las líneas de fuerza, y por tanto del campo magnético \mathbf{B} creado por una corriente rectilínea, pero también el de una corriente circular si se aplica a una porción de la misma. Se trata de determinar, aplicando dicha regla, el carácter norte o sur de las caras de las espiras representadas en la figura.

Rodeando con la mano derecha una porción de la espira de modo que el dedo pulgar señale el sentido de la corriente, se aprecia que el resto de los dedos están orientados hacia abajo (respecto del plano del papel) en el caso a) y hacia arriba en el caso b). Eso significa que las líneas de fuerza del campo \mathbf{B} van de arriba hacia abajo en el primer caso y de abajo hacia arriba en el segundo; o lo que es lo mismo, salen de la cara inferior y terminan en la superior en la espira a) orientándose de forma opuesta en la b). Por tanto, recordando que las líneas de fuerza de \mathbf{B} parten siempre del polo norte y terminan en el sur, la cara anterior de la espira será sur en el primer caso y norte en el segundo. Esta conclusión coincide con la obtenida aplicando la ayuda consistente en representar las letras N y S con flechas en sus extremidades.

FUERZAS MAGNÉTICAS SOBRE ...

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:

$$F_m = I \cdot B \cdot L \cdot \text{sen } \vartheta \quad (11.6)$$

en donde I es la intensidad de corriente, B la intensidad de campo y ϑ el ángulo que forma la corriente con el vector campo.

La anterior ecuación, que se conoce como *ley de Laplace*, se puede obtener experimentalmente, pero también puede deducirse de la expresión

$F_m = I \cdot B \cdot l \cdot \text{sen } \vartheta$ 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:

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

pues en tal supuesto $v = \frac{L}{t}$ e $I = \frac{q}{t}$; despejando la variable

tiempo en ambas ecuaciones e igualándolas, resulta $\frac{L}{v} = \frac{q}{I}$, 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 \overline{AD} y \overline{BC} y otro vertical $\overline{AB} = \overline{DC}$ por los que circula la corriente I . Cuando se aplica la regla de la mano izquierda a los segmentos horizontales \overline{AD} y \overline{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 \overline{AB} y \overline{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:

$$M = \text{fuerza} \times \text{brazo} = F_m \cdot b \cdot \text{sen}\theta$$

donde b es la dimensión horizontal de la espira y θ 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:

$$F_m = B \cdot I \cdot a \cdot \text{sen } 90^\circ = B \cdot I \cdot a$$

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

$$M = B \cdot I \cdot a \cdot b \cdot \text{sen}\alpha = B \cdot I \cdot S \cdot \text{sen}\alpha \quad (11.8)$$

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.

El fundamento del galvanómetro de cuadro móvil

El galvanómetro de cuadro o bobina móvil se basa en el fenómeno anteriormente descrito. La expresión del momento M de la fuerza magnética aplicada a una bobina de N espiras resulta de multiplicar por el número de espiras el momento de una sola, es decir:

$$M = N \cdot B \cdot I \cdot S \cdot \text{sen}\alpha$$

que indica que el momento M y la intensidad de corriente I son directamente proporcionales.

En un *galvanómetro de cuadro móvil* una aguja cuyo extremo señala una escala graduada se mueve junto con una bobina, y un resorte en espiral se opone a cualquier movimiento de giro, manteniendo la aguja, en ausencia de corriente, en el cero de la escala. Si se hace pasar por la bobina una corriente eléctrica, el par de las fuerzas magnéticas deforman el resorte oponiéndose al *par recuperador* de éste. Cuando sus momentos respectivos se igualan, la aguja se detiene en una posición que estará tanto más desplazada del origen de la escala cuanto mayor sea la intensidad de corriente que circula por el galvanómetro.

El fundamento del motor eléctrico

Aun cuando una bobina por la que circula una corriente eléctrica puede girar por la acción de un campo magnético, dicho giro es transitorio y acaba cuando el plano de la bobina se sitúa perpendicularmente al campo. Para conseguir un movimiento de rotación continuado es necesario que en cada media vuelta se invierta el sentido de la corriente que circula por la bobina, con lo que el nuevo par actuando en el sentido del movimiento provoca la siguiente media vuelta y así sucesivamente. Aun cuando en la posición de la bobina perpendicular a las líneas de fuerza el momento es nulo, dicha orientación es sobrepasada debido a la inercia de la bobina en movimiento, lo que permite que el nuevo par entre en acción.

En un motor de corriente continua la bobina está arrollada sobre un cilindro formado por láminas de hierro; este conjunto constituye el *rotor*. El elemento *conmutador* encargado de invertir en cada media vuelta el sentido de la corriente eléctrica que circula por la bobina, está formado por dos piezas semicilíndricas o *delgas*, aisladas eléctricamente entre sí, solidarias al rotor y en contacto con unas varillas de grafito o escobillas, cuya misión es mantener el paso de la corriente del generador a la bobina. Con frecuencia el campo magnético es producido por un electroimán alimentado también por corriente eléctrica.

La *corriente alterna*, que es la empleada habitualmente para usos domésticos e industriales, se caracteriza porque invierte su sentido de modo alternativo a razón de 50 veces por segundo, lo cual hace innecesario el conmutador. Por tal motivo, los motores que funcionan con corriente alterna disponen de unos anillos colectores completos y no partidos en dos mitades aisladas como en los motores de corriente continua. Su velocidad de rotación está limitada, en este caso, por la frecuencia de la corriente que los alimenta.

APLICACIÓN: FUERZA MAGNÉTICA SOBRE UNA CORRIENTE ELÉCTRICA

Por un hilo conductor rectilíneo de 0,75 m de longitud circula una corriente de 20 A de intensidad; se coloca en el campo magnético producido por un imán de herradura, formando la corriente un ángulo de 30° con respecto a las líneas de fuerza del campo magnético.

Si la intensidad del campo B es de $2 \cdot 10^3$ T, determinar numéricamente la magnitud de la fuerza y con la ayuda de una figura su dirección y sentido.

La ley de Laplace proporciona la expresión de la fuerza magnética que sufre una corriente eléctrica I rectilínea y de longitud L si está inmersa en un campo magnético B :

$$F_m = I \cdot B \cdot L \cdot \text{sen } \vartheta$$

siendo ϑ el ángulo que forma la corriente con el campo B .

Sustituyendo en la expresión anterior se tiene:

$$F_m = 20 \cdot 2 \cdot 10^3 \cdot 0,75 \cdot \text{sen } 30 = 1,5 \cdot 10^2 \text{ N}$$

La aplicación de la regla del tornillo proporciona la dirección y sentido de \mathbf{F}_m , que es perpendicular a la corriente y al campo, y en este caso dirigida hacia abajo, según el esquema de la figura.

FUERZAS MAGNÉTICAS ENTRE ...

Atracciones y repulsiones magnéticas entre corrientes

Las corrientes eléctricas en presencia de imanes sufren fuerzas magnéticas, pero también las corrientes eléctricas y no sólo los imanes producen campos magnéticos; de modo que dos corrientes eléctricas suficientemente próximas experimentarán entre sí fuerzas magnéticas de una forma parecida a lo que sucede con dos imanes.

La experimentación con conductores dispuestos paralelamente pone de manifiesto que éstos se atraen cuando las corrientes respectivas tienen el mismo sentido y se repelen cuando sus sentidos de circulación son opuestos. Además, esta fuerza magnética entre corrientes paralelas es directamente proporcional a la longitud del conductor y al producto de las intensidades de corriente e inversamente proporcional a la distancia r que las separa, dependiendo además de las características del medio.

La explicación de tales resultados experimentales puede hacerse aplicando ordenadamente la ley de Laplace,

$\mathbf{F}_m = B \cdot I \cdot L \cdot \text{sen } \vartheta$, la expresión del campo magnético

debido a una corriente rectilínea, $B = \mu \frac{I}{2\pi r}$ y las relaciones

entre las direcciones del campo \mathbf{B} , la corriente I y la fuerza \mathbf{F}_m resumidas en la regla de la mano izquierda.

La corriente I_1 crea a nivel de I_2 un campo magnético de intensidad B_1 igual a:

$$B_1 = \mu \frac{I_1}{2\pi r}$$

Al estar sometido al campo B_1 , la corriente I_2 experimenta una fuerza magnética debida a I_1 igual a:

$$F_{1 \rightarrow 2} = B_1 \cdot I_2 \cdot L$$

ya que al ser B_1 e I_2 perpendiculares, $\text{sen } \vartheta = 1$. Sustituyendo B_1 por su valor resulta:

$$F_{1 \rightarrow 2} = \mu \frac{I_1 I_2 L}{2\pi r} \quad (11.9)$$

Inversamente, la corriente I_2 crea al nivel de I_1 un campo magnético:

$$B_2 = \mu \frac{I_2}{2\pi r}$$

por lo que la corriente I_1 experimenta una fuerza magnética debida a I_2 e igual a

$$F_{2 \rightarrow 1} = B_2 \cdot l \cdot I = \mu \frac{l_2 I_2 L}{2\pi r} \quad (11.10)$$

El estudio gráfico que se muestra en la figura anterior indica que tales fuerzas de igual magnitud tienen sentidos opuestos. Se trata, por tanto, de fuerzas de acción y reacción que definen la interacción magnética entre las corrientes y cuya magnitud depende de las intensidades de corriente, de la longitud y de la distancia en la forma indicada por los experimentos. Por otra parte, la aplicación de la regla de la mano izquierda explica su carácter atractivo o repulsivo en función del sentido igual u opuesto de las corrientes consideradas.

La definición de ampere internacional

El hecho de que las fuerzas se sepan medir con facilidad y con precisión sugirió la posibilidad de definir el ampere como unidad fundamental recurriendo a experiencias electromagnéticas, en las cuales la fuerza magnética varía con la intensidad de corriente según una ley conocida. Tal es el caso de la interacción magnética entre corrientes paralelas.

Considerando como medio el vacío con $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ y la distancia entre los hilos conductores de 1 m, la expresión de la fuerza magnética entre ellos se convierte en:

$$F = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot l_2}{2\pi \cdot 1} L = 2 \cdot 10^{-7} I^2 \cdot L$$

Haciendo en la anterior ecuación $I = 1$ A y $L = 1$ m, resulta una fuerza $F = 2 \cdot 10^{-7}$ N, lo cual permite definir el *ampere* como la intensidad de corriente que circulando por dos conductores rectilíneos de longitud infinita, sección circular y paralelos, separados entre sí un metro en el vacío, producirá una fuerza magnética entre ellos de $2 \cdot 10^{-7}$ N por cada metro de longitud de cada uno de los dos hilos.

APLICACIÓN DE LA REGLA DE LA MANO IZQUIERDA

Por un pequeño colupio de alambre circula una corriente eléctrica, de tal forma que cuando un tramo horizontal se introduce entre los polos de un imán experimenta una fuerza magnética. Se trata de determinar en cuáles de las posiciones *a*, *b* o *c* de la figura adjunta, el colupio se desplaza de su posición de equilibrio. (El punto y las cruces representan sentidos opuestos de la intensidad de corriente que atraviesa el alambre, cuando se mira la figura frontalmente.)

Aplicando la regla del tornillo o de la mano izquierda en cada caso, se tiene lo siguiente:

Por tanto, sólo en los dos primeros casos la fuerza magnética producirá un desplazamiento del colupio. En el caso *c*) dicha fuerza es neutralizada por la presencia de la barra fija en la que se apoya el colupio.

EL MAGNETISMO NATURAL Y LAS ...

El magnetismo de la materia

El hierro es el material magnético por excelencia, pues en contacto con un imán y, en general, cuando es sometido a la acción de un campo magnético, adquiere propiedades magnéticas,

esto es, se imana o magnetiza. El tipo de materiales que como el hierro presentan un magnetismo fuerte reciben el nombre de sustancias *ferromagnéticas*. Los materiales que por el contrario poseen un magnetismo débil se denominan *paramagnéticos* o *diamagnéticos* según su comportamiento.

Las sustancias ferromagnéticas se caracterizan porque poseen una permeabilidad magnética μ elevada, del orden de 10^2 a 10^6 veces la del vacío μ_0 . En las sustancias paramagnéticas el valor de μ es ligeramente mayor que el del μ_0 , mientras que en las diamagnéticas es ligeramente menor. Por tal motivo el magnetismo de este tipo de sustancias es inapreciable a simple vista.

Junto con el hierro, el níquel, el cobalto y algunas aleaciones son sustancias ferromagnéticas. El estaño, el aluminio y el platino son ejemplos de materiales paramagnéticos, y el cobre, el oro, la plata y el cinc son diamagnéticos. A pesar de esta diferencia en su intensidad, el magnetismo es una propiedad presente en todo tipo de materiales, pues tiene su origen en los átomos y en sus componentes más elementales.

El origen del magnetismo natural

El hecho de que los campos magnéticos producidos por los imanes fueran semejantes a los producidos por las corrientes eléctricas llevó a Ampère a explicar el magnetismo natural en términos de corrientes eléctricas. Según este físico francés, en el interior de los materiales existirían unas corrientes eléctricas microscópicas circulares de resistencia nula y, por tanto, de duración indefinida; cada una de estas corrientes produciría un campo magnético elemental y la suma de todos ellos explicaría las propiedades magnéticas de los materiales.

Así, en los imanes las orientaciones de esas corrientes circulares serían todas paralelas y el efecto conjunto, sería máximo. En el resto, al estar tales corrientes orientadas al azar se compensarían mutuamente sus efectos magnéticos y darían lugar a un campo resultante prácticamente nulo.

La imanación del hierro fue explicada por Ampère en la siguiente forma: en este tipo de materiales el campo magnético exterior podría orientar las corrientes elementales paralelamente al campo de modo que al desaparecer éste quedarían ordenadas como en un imán.

De acuerdo con los conocimientos actuales sobre la composición de la materia, los electrones en los átomos se comportan efectivamente como pequeños anillos de corriente. Junto a su movimiento orbital en torno al núcleo, cada electrón efectúa una especie de rotación en torno a sí mismo denominada *espín*; ambos pueden contribuir al magnetismo de cada átomo y todos los átomos al magnetismo del material. En la época de Ampère se ignoraba la existencia del electrón; su hipótesis de las corrientes circulares se adelantó en tres cuartos de siglo a la moderna teoría atómica, por lo que puede ser considerada como una genial anticipación científica.

LOS CINTURONES DE RADIACIÓN DE VAN ALLEN

La existencia del campo magnético terrestre ejerce un efecto protector de la vida sobre la Tierra. De no ser por él, el nivel de radiación procedente del espacio sería mucho más alto y el desarrollo y mantenimiento de la vida en la forma actualmente conocida probablemente no hubiera sido posible.

A la radiación cósmica procedente de las explosiones nucleares que se producen continuamente en multitud de objetos celestes situados en el espacio exterior, se le suma la que proviene de la actividad de la corona solar. Un chorro de partículas cargadas, compuesto principalmente de

protones y electrones, es proyectado desde el Sol hacia la superficie terrestre como si de una corriente de viento se tratara, por lo que se denomina *viento solar*.

Al llegar a la zona de influencia del campo magnético terrestre (también llamada *Magnetosfera*) todas estas partículas cargadas que provienen de la radiación cósmica y del viento solar, sufren la acción desviadora de las fuerzas magnéticas. Éstas se producen en una dirección perpendicular a la trayectoria de la partícula y a las líneas de fuerza del campo magnético terrestre y sitúan a una importante cantidad de protones y electrones en órbita en torno a la Tierra como si se trataran de pequeños satélites. Sólo una pequeña fracción formada por aquellas partículas que inciden en la dirección de las líneas de fuerza, no experimenta fuerza magnética alguna y alcanza la superficie terrestre. Ese conjunto de partículas cargadas orbitando alrededor de la Tierra se concentra, a modo de cinturones, en ciertas regiones del espacio. Son los llamados cinturones de radiación de Van Allen. En ellos, la densidad de partículas cargadas moviéndose a gran velocidad es tan alta que en las expediciones espaciales el atravesarlos supone siempre un riesgo, tanto para los astronautas como para el instrumental de comunicación.