

Tema 3.- FUNDAMENTOS DE MAGNETISMO (RESUMEN)

• Introducción

Existen ciertos minerales que presentan la propiedad de atraer al hierro. No se sabe cuándo fue apreciada esta propiedad por primera vez, pero sí que tenemos noticias de que los griegos la conocían. El fenómeno fue estudiado por Tales de Mileto (624-546 a.c.), quien nos habla sobre la existencia de un óxido de hierro que atraía el hierro con mayor o menor intensidad, lo que dependía de la distancia que separase a ambas materias. A este mineral, que fue localizado cerca de la ciudad de Magnesia (Asia Menor), se le llamó piedra de Magnesia (magnetita) y al fenómeno se le denominó **magnetismo**.

Más adelante se descubrió que si un fragmento de hierro se ponía en contacto con el mineral magnético (imán), quedaba magnetizado (imantado) temporalmente. También se descubrió que si se permitía a una aguja magnética girar libremente, siempre señalaría la dirección norte sur. En el 1180, el inglés Alexander Neckam fue el primer europeo que hizo referencia a la utilidad del magnetismo para señalar la dirección (brújula). A partir del año 1200 se generaliza el uso de la brújula en Europa.

En el 1269 Pierre de Maricourt descubrió que los materiales imantados concentraban una mayor actividad en determinados lugares (polos), generalmente en los extremos, revelando que todo imán tiene dos polos diferenciados que conocemos como norte y sur. La interacción entre polos magnéticos iguales es de repulsión y entre polos magnéticos distintos es de atracción. No existen monopolos magnéticos, los polos N y S siempre aparecen por parejas.

El primer estudio sistemático del magnetismo aparece en el 1600, año en el que el médico inglés William Gilbert (1544-1603) publicó "De Magnete" ("Sobre el Magneto"). A Gilbert le debemos la noción (ahora sabida) de que la propiedad de la aguja de la brújula de apuntar hacia el norte proviene del hecho de que la propia Tierra es un enorme imán, siendo reconocido como el padre fundador del estudio del geomagnetismo. A partir de los estudios de Gilbert se diseñan los primeros mapas magnéticos. Humboldt, y luego Gauss y Mascart dieron su forma clásica al magnetismo terrestre.

Por su parte, Charles de Coulomb (1736-1806) demostró, midiendo las fuerzas de atracción y repulsión de los polos de un imán, que podían aplicarse al magnetismo la mayor parte de los resultados teóricos de la electrostática. Coulomb confirmó que la fuerza magnética variaba en proporción a $1/r^2$.

Hasta el año 1820, el único tipo de magnetismo conocido era el magnetismo permanente: imanes naturales (magnetita) y el del hierro magnetizado; además del hecho de que la Tierra era un enorme imán. En julio de ese año se publica la famosa experiencia de Oersted: *la desviación que sufre una aguja magnética situada en las proximidades de un conductor eléctrico*. A raíz de la cual, se pone de manifiesto que las **interacciones eléctricas y magnética** están estrechamente relacionadas y **constituyen dos aspectos diferentes de una misma propiedad de la materia, su carga eléctrica**. El magnetismo es una manifestación de las cargas eléctricas en movimiento con respecto al observador. Por esta razón, las interacciones eléctrica y magnética deben considerarse juntas bajo el nombre de *interacción electromagnética*.

• Movimiento de cargas en campos magnéticos

El campo magnético \vec{B} en un punto del espacio se define en función de la fuerza magnética ejercida sobre una partícula de carga q y velocidad \vec{v} en dicho punto:

$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$$

La dirección de la fuerza magnética es perpendicular al plano definido por los vectores \vec{v} y \vec{B} . Como la fuerza magnética es perpendicular al vector velocidad, su trabajo al mover la carga es cero, por lo que se mantiene constante la energía cinética de la partícula. Esto implica que el módulo del vector velocidad permanece constante cuando la partícula se mueve en el seno de un campo magnético, aunque cambia su dirección y sentido.

Si la partícula se mueve en una región donde hay un campo eléctrico y un campo magnético, la fuerza total sobre la partícula se conoce como fuerza de Lorentz:

$$\vec{F} = q \cdot (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

Las características espaciales de un campo magnético pueden ilustrarse con líneas de campo magnético, que son tangentes en cada punto a la dirección de \vec{B} en ese punto. Las líneas del campo magnético nacen en el polo norte y finalizan en el polo sur siendo cerradas sobre sí mismas, debido a la no existencia de monopolos magnéticos.

Si una partícula cargada se mueve con velocidad v ($v \ll c$) en el interior de un campo magnético uniforme siendo \vec{v} perpendicular a \vec{B} , y no existen otras fuerzas, la partícula cargada describe un movimiento circular uniforme. Para una partícula de masa m , el módulo de la velocidad v y el radio r de la trayectoria están relacionados por:

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

La **frecuencia ciclotrónica** no depende de v y r :

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

Y en forma vectorial:

$$\vec{\omega} = -\frac{q}{m} \cdot \vec{B}$$

Si el campo magnético es uniforme pero la velocidad de la partícula no es perpendicular al campo, la partícula describirá una hélice de radio y paso constante.

Si el campo magnético no es uniforme y la velocidad de la partícula no es perpendicular al campo, la partícula describirá una hélice de radio y paso variable, disminuyendo éstos conforme aumenta la intensidad del campo magnético.

Espectrómetro de masas: Se utiliza para separar iones de la misma carga y diferente masa. La relación carga-masa de los iones es:

$$\frac{q}{m} = \frac{2 \cdot \Delta V}{B^2 \cdot r^2}$$

donde ΔV es el valor del potencial eléctrico acelerador.

Determinación de la carga-masa del electrón (Thomson): Se utiliza un tubo de rayos catódicos y un campo eléctrico E y otro magnético B perpendiculares como selector de velocidad. Solamente las partículas con velocidad:

$$v = E / B$$

pasarán a través de la región de los campos sin desviarse.

El ciclotrón: Es un acelerador de partículas cargadas formado por dos conductores huecos en forma de D y entre los cuales se aplica una tensión alterna de

frecuencia angular la frecuencia ciclotrónica. Perpendicular a los conductores hay un campo magnético uniforme. La energía cinética máxima de las cargas aceleradas es:

$$E_c = \frac{1}{2} m \cdot v_{\max}^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{q^2 B^2 R^2}{m}$$

siendo R el radio del ciclotrón.

- **Fuerzas sobre corrientes**

La fuerza producida por un campo magnético uniforme sobre un trozo recto de conductor, por el que circula una corriente, viene dada por:

$$\vec{F} = I \cdot \vec{l} \times \vec{B}$$

En general, la fuerza magnética sobre un trozo de conductor por el que circula una corriente eléctrica es:

$$\vec{F} = I \cdot \int_L d\vec{l} \times \vec{B}$$

- **Dipolo Magnético**

Si una espira por la que circula una corriente se encuentra en el seno de un campo magnético uniforme, el momento de las fuerzas que ejerce el campo sobre el circuito es:

$$\vec{\tau} = I \cdot \vec{S} \times \vec{B}$$

donde \vec{S} es el vector del área plana encerrada por la espira. Su dirección es perpendicular al plano de la espira y su sentido viene determinado por la regla de la mano derecha.

Una espira por la que circula corriente equivale a un imán con sus polos norte y sur contenidos en el área plana encerrada por la espira (cada uno en una de sus caras). Esta configuración constituye un dipolo magnético, cuyo momento dipolar magnético viene dado por:

$$\vec{m} = I \cdot \vec{S}$$

De esta forma, el momento de las fuerzas sobre un dipolo magnético inmerso en un campo \vec{B} puede expresarse:

$$\vec{\tau} = \vec{m} \times \vec{B}$$

Dicho dipolo tiene una energía potencial:

$$E_p = -\vec{m} \cdot \vec{B}$$

- **Fuerzas entre corrientes**

El módulo de la fuerza por unidad de longitud que ejercen entre sí dos conductores rectilíneos indefinidos, paralelos y separados una distancia d , por los que circulan corrientes de intensidades I_1 e I_2 viene dada por:

$$f = \frac{F}{l} = \frac{\mu_0 I_1 \cdot I_2}{2\pi d}$$

Las fuerzas son atractivas si las corrientes circulan ambas en el mismo sentido, y repulsivas si una circula en sentido contrario a la otra.

El amperio, unidad de corriente eléctrica, se define en función de la fuerza por unidad de longitud entre los conductores.

- **Campos magnéticos producidos por corrientes. Ley de Biot-Savart.**

La experiencia de Oersted puso de manifiesto que las cargas en movimiento producen campos magnéticos en su entorno. Un conjunto de cargas en movimiento, como el que se produce en un conductor por el que circula una corriente eléctrica, origina un campo magnético que puede determinarse a partir de la ley de Biot-Savart (determinada de forma empírica):

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{I d\vec{l} \times \vec{u}_r}{r^2}$$

μ_0 es la permeabilidad del vacío ($4\pi \cdot 10^{-7} \text{ m kg C}^{-2}$).

Para una corriente rectilínea e indefinida, a una distancia r del conductor, el módulo del campo vale:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2\pi r}$$

siendo las líneas de campo circunferencias concéntricas con la corriente rectilínea, situadas en un plano perpendicular a dicha corriente.

El módulo del campo magnético creado por una espira circular de radio R , que transporta una corriente I , en un punto de su eje a una distancia d de su centro es:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot R^2}{2(R^2 + d^2)^{3/2}}$$

Siendo su dirección perpendicular a la espira.

En ambos casos, corriente rectilínea y espira, el sentido de las líneas de campo viene determinado por la regla de la mano derecha, poniendo el dedo pulgar en el sentido de la corriente (el resto de dedos marcan el sentido del campo).

- **Ley de Gauss para el campo magnético**

Se define el flujo del campo magnético a través de una superficie S como la integral de superficie del vector campo magnético extendida a toda la superficie:

$$\phi_B = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

La Ley de Gauss para el campo magnético establece que el flujo magnético a través de una superficie cerrada es nulo, de acuerdo con la inexistencia de monopolos magnéticos (las líneas de campo son cerradas sobre sí mismas, no teniendo origen ni fin):

$$\phi_B = \int_{SC} \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

- **Ley de Ampère**

La ley de Ampère establece que la circulación del campo magnético a lo largo de una línea cerrada L que enlaza las corrientes I_1, I_2, I_3, \dots depende únicamente de las corrientes que atraviesan una superficie delimitada por la línea cerrada:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \cdot I_e$$

donde $I_e = I_1 + I_2 + I_3 + \dots$ es la corriente enlazada por la línea cerrada L .

Cuando se aplica la ley de Ampère utilizamos la regla de la mano derecha para determinar el signo de la corriente. Siguiendo el sentido de la trayectoria con el pulgar, una corriente es positiva si atraviesa la superficie definida por la trayectoria en el sentido que marcan el resto de los dedos, y negativa en caso contrario.

La ley de Ampère puede usarse para obtener el campo magnético producido por distribuciones de corriente con gran simetría. El campo magnético en el interior de un solenoide largo de vueltas apretadas, con n vueltas por unidad de longitud, y por el que circula una corriente I , viene dado por:

$$B = \mu_0 n I$$