

Unidad N° 10: Propiedades magnética de la materia.

Permeabilidad relativa y absoluta. Paramagnetismo, diamagnetismo y ferromagnetismo. Magnetización, susceptibilidad magnética y relación entre parámetros. Los tres vectores magnéticos. Ferromagnetismo y ciclo de histéresis, energía en el ciclo.

Magnetismo en la materia

Los átomos poseen momentos magnéticos debidos tanto al movimiento orbital de los electrones como al spin. El momento magnético total de un átomo es la suma vectorial de los momentos magnéticos orbitales y del espín.

Estos momentos magnéticos tienen un efecto conjunto de modo que en la mayoría de los casos se producen interferencias de unos con otros dando como consecuencia un momento magnético total nulo. Sin embargo, determinadas sustancias presentan momentos magnéticos totales distintos de cero incluso en ausencia de campos magnéticos externos, es decir, tienen momentos magnéticos permanentes.

Mediante el uso de la Física Clásica no es posible estudiar los orígenes del magnetismo en la materia de forma satisfactoria; para ello es necesario recurrir a la Física Cuántica. En cambio, si es posible describir los aspectos más básicos del magnetismo en la materia apoyándonos en observaciones experimentales y en explicaciones de tipo fenomenológico.

De esta manera es posible clasificar la casi totalidad de los materiales frente a su comportamiento magnético en tres categorías:

Materiales diamagnéticos: no tienen momentos magnéticos permanentes. Si a estos materiales se le somete a un campo magnético externo, aparecen momentos magnéticos inducidos. En realidad, estos momentos magnéticos inducidos aparecen en todos los materiales por lo que se puede decir que todos los materiales son diamagnéticos. Sin embargo, el efecto diamagnético es tan débil frente a otros efectos que su presencia pasa desapercibida cuando los materiales presentan momentos magnéticos permanentes.

Materiales paramagnéticos: El paramagnetismo se produce cuando al aplicar un campo magnético externo los dipolos magnéticos permanentes sufren una alineación parcial con este campo externo. En estos materiales, la interacción entre los momentos magnéticos permanentes es débil de manera que se encuentran orientados aleatoriamente. La alineación parcial que sufren los dipolos en presencia de campo externo crece con la intensidad del campo y decrece con el aumento de temperatura.

Materiales ferromagnéticos: Su comportamiento es muy complejo. Presentan una fuerte interacción entre los momentos magnéticos vecinos por lo que el alineamiento, incluso en ausencia de campo magnético externo, es muy fuerte. De esta manera pueden formar imanes permanentes.

Magnetización e intensidad de campo magnético

La magnetización de la materia se describe por medio de una cantidad denominada vector magnetización \vec{M} , cuya magnitud se define como el momento magnético por unidad de volumen de la sustancia.

Supongamos que disponemos de una región en la que existe un campo magnético \vec{B}_0 producido por algún conductor por el que circula corriente.

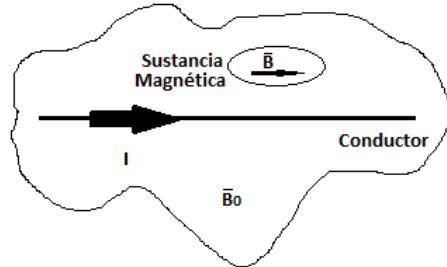
Si llenamos esa región con un material, el campo magnético total \vec{B} en la región sería:

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_m$$

\vec{B}_0 = Campo magnético generado por la corriente

\vec{B} = Campo magnético dentro de la sustancia

\vec{B}_m = Campo magnético debido a la magnetización de la sustancia



Parece claro que el valor de \vec{B}_m debe estar relacionado con el vector magnetización \vec{M} de manera lineal. Es posible demostrar que:

$$\vec{B}_m = \mu_0 \vec{M}$$

Entonces el campo magnético total se puede escribir así:

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \mu_0 \vec{M}$$

Las unidades de momento magnético son corriente por área (Am^2), por lo que las unidades de magnetización son $\frac{(Am^2)}{m^3} = \frac{A}{m}$, las unidades de la constante μ_0 son $\frac{(Tm)}{A}$. Así que las unidades de $\mu_0 \vec{M}$ son las mismas que las de \vec{B} :

$$\frac{(Tm)}{A} \cdot \frac{(Am^2)}{m^3} = T$$

Resulta conveniente introducir un nuevo vector denominado **intensidad de campo magnético** \vec{H} de manera que,

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}$$

La unidad es: $[H] = [M] = \frac{A}{m}$

En el caso de estar en el vacío, el vector magnetización sería nulo con lo que

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0}$$

De la ecuación que define \vec{H} de forma general podemos hallar \vec{B}

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{M}$$

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M})$$

Para poder comprender mejor las implicaciones de las expresiones anteriores consideremos el caso particular de un toroide que conduce una corriente I , así como el espacio encerrado por el toroide. Si este espacio estuviera vacío

$$\vec{M} = 0$$

$$\vec{B} = \vec{B}_0 = \mu_0 \vec{H}$$

Tal y como vimos en la clase anterior, el campo magnético en el caso del toroide vacío es

$$B = \mu_0 \frac{NI}{2\pi r} = \mu_0 \frac{N}{l} I = \mu_0 nI \quad l = 2\pi r$$

Por lo que

$$\mu_0 nI = \mu_0 H$$

Es decir

$$H = nI$$

Si ahora llenamos el interior del toroide con una sustancia magnética, H dentro de la sustancia no cambia y sigue valiendo nI , por lo que el vector intensidad de campo magnético sólo depende de las corrientes verdaderas, es decir de las corrientes en el devanado del toroide.

Si el núcleo del toroide está ocupado por una sustancia magnética

$$\vec{B}_m \neq 0; \vec{M} \neq 0$$

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M})$$

$\vec{B}_m = \mu_0 \vec{M}$ representa el campo magnético generado por la sustancia que se suma a \vec{B}_0 el campo generado por la corriente.

Sin embargo, el campo magnético $\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_m$ depende tanto de las corrientes verdaderas \vec{B}_0 como de las de magnetización \vec{B}_m es decir, de todos los tipos de corriente.

Clasificación de las sustancias magnéticas

En la mayor parte de las sustancias, por ejemplo en las **diamagnéticas** y en las **paramagnéticas**, el vector magnetización \vec{M} es proporcional a la intensidad de campo \vec{H} . En este caso se puede escribir

$$\vec{M} = \chi \vec{H}$$

donde χ es un factor llamado **susceptibilidad magnética** que no tiene dimensiones.

Para muestras paramagnéticas χ es positivo y \vec{M} y \vec{H} tienen la misma dirección, mientras que para muestras diamagnéticas χ es negativo y \vec{M} y \vec{H} tienen direcciones opuestas.

La relación entre \vec{M} y \vec{H} en las sustancias ferromagnéticas es mucho más complicada que la descrita.

Si sustituimos la relación anterior en la expresión obtenemos

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0(\vec{H} + \chi \vec{H}) = \mu_0(1 + \chi) \vec{H}$$

o bien

$$\vec{B} = \mu \vec{H}$$

donde la constante μ recibe el nombre de **permeabilidad magnética** del material

$$\mu = \mu_0(1 + \chi)$$

K_m , llamado **permeabilidad relativa** del material

$$K_m = 1 + \chi$$

$$\mu = K_m \mu_0$$

Podemos **hacer una clasificación del comportamiento de la materia en** presencia de campos magnéticos en función del valor de la permeabilidad magnética de la siguiente forma:

Diamagnéticas $\mu < \mu_0$

Paramagnéticas $\mu > \mu_0$

Ferromagnéticas $\mu \gg \mu_0$

En las sustancias diamagnéticas, que son las más usadas en ingeniería de comunicaciones, se cumple que μ es casi idéntico a μ_0 por lo que habitualmente se hace $\mu = \mu_0$.

Ejemplo: El devanado de un toroide tiene 60 vueltas/m de hilo de cobre que transporta una corriente de 5A. El núcleo es de hierro con una permeabilidad magnética de $5000\mu_0$ en las condiciones que se indican. Hallar \vec{H} , \vec{B} y \vec{M} tanto si el núcleo fuera el vacío como si fuera hierro.

Solución:

En el vacío:

$$H = nI = 60 \frac{\text{vueltas}}{\text{m}} \cdot 5\text{A} = 300 \text{vueltas} \cdot \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

$$B_0 = \mu_0 H = 4\pi \times 10^{-7} \frac{\text{Tm}}{\text{A}} \cdot 300 \text{vueltas} \cdot \frac{\text{A}}{\text{m}} = 3,8 \times 10^{-4} \text{T}$$

$$M = 0$$

Y en el hierro

$$H = nI = 60 \frac{\text{vueltas}}{\text{m}} \cdot 5\text{A} = 300 \text{vueltas} \cdot \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

$$B = \mu H = 5000\mu_0 \cdot 300 \text{vueltas} \cdot \frac{\text{A}}{\text{m}} = 1,88 \text{ T}$$

$$M = \chi H$$

$$M = 1,5 \times 10^6 \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

Siendo B aproximadamente 5000 veces mayor que B_0

Ferromagnetismo

Los materiales ferromagnéticos son sustancias de naturaleza cristalina (su estructura atómica interna está ordenada) que presentan dipolos magnéticos permanentes y muestran efectos magnéticos intensos, como por ejemplo el hierro, cobalto, níquel, etc. Los momentos magnéticos permanentes de estas sustancias tienden a alinearse paralelos entre sí, incluso en presencia de campos magnéticos muy débiles. Una vez alineados, la sustancia permanece magnetizada incluso en ausencia de campo magnético externo, es decir, presenta magnetización permanente (son imanes). Esto se debe al fuerte acoplamiento entre momentos magnéticos próximos.

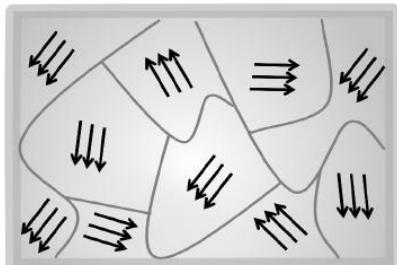
En los materiales ferromagnéticos hay unas regiones microscópicas denominadas dominios, dentro de las cuales todos los momentos magnéticos están alineados. El tamaño de estos

dominios está comprendido entre 10^{-8}m y 10^{-12}m . Las fronteras entre los dominios se llaman paredes de los dominios.

Cuando la muestra está desmagnetizada los dominios se orientan al azar de manera que el momento magnético total es nulo como se muestra en la figura.

Cuando la muestra se somete a un campo magnético externo, los momentos de algunos dominios tienden a alinearse con el campo lo que da lugar a una magnetización total neta distinta de cero.

Las observaciones experimentales muestran que los dominios orientados en la dirección del campo aplicado crecen a expensas de los no orientados.



Dominios magnéticos en un medio ferromagnético.
Cuando el material está desmagnetizado los dominios se orientan al azar y el momento magnético total es nulo.

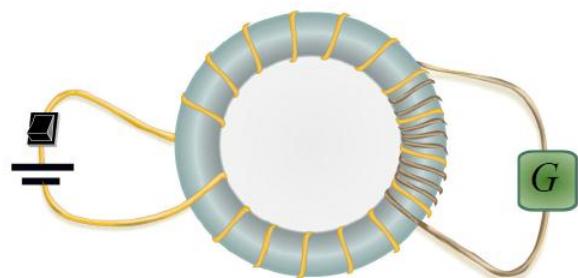
Al eliminar el campo externo puede permanecer una magnetización debido a que el predominio de dominios orientados permanece. La agitación térmica a temperaturas normales no es suficiente para romper esta orientación privilegiada.

Pensemos en un sistema experimental capaz de medir la respuesta característica de un material ferromagnético.

Supongamos una muestra de un material de este tipo con forma de toroide. Sobre esta muestra se realiza un arrollamiento de N vueltas que se conecta a un generador. Para medir el flujo magnético en este toroide se usa una segunda bobina que también utiliza el toroide como núcleo, pero cuyos terminales están unidos a un galvanómetro.

Sistema experimental para la medir la respuesta magnética de un material ferromagnético.

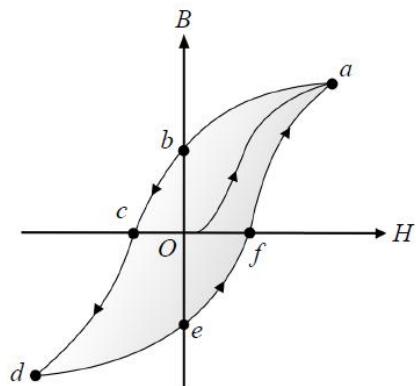
Sobre el material, con forma de toroide, se realizan dos arrollamientos. En el primero se conecta un generador y en el segundo un galvanómetro.



Se aumenta el flujo magnético aumentando la intensidad de la primera bobina desde 0 hasta I . En la segunda bobina se detecta esta variación del flujo (se induce una corriente en la segunda bobina tal como ya se analizó anteriormente).

Supongamos ahora que, inicialmente la muestra está desmagnetizada. Al aumentar la corriente desde 0 hasta I el campo H aumenta desde 0 hasta nI . Esto hace que B aumente. La curva que describe la variación de B con H se muestra en la siguiente figura y corresponde a la zona Oa.

Ciclo de histéresis de un material magnético.



A medida que el campo aumenta también aumenta el número de dipolos alineados que se hace máximo al llegar al punto a. En este punto el núcleo de hierro estará próximo a la saturación, es decir, con la totalidad de sus dominios orientado en la misma dirección del campo.

Si ahora la corriente se reduce a cero eliminando el campo externo, la curva de magnetización o curva B-H sigue el camino ab. Vemos que en b la inducción magnética \vec{B} no es cero aunque si lo es el campo externo \vec{H} , lo que se explica por el hecho de que, ahora, el núcleo de hierro del toroide está magnetizado debido a la magnetización remanente producida por el alineamiento de un gran número de dipolos.

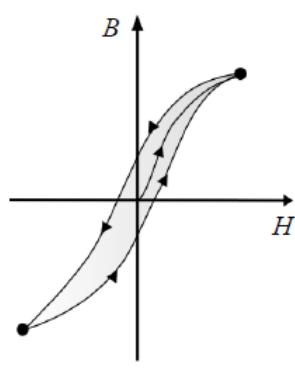
Si a partir de b invertimos el campo externo y aumentamos su intensidad los dominios se reorientan en la nueva dirección del campo hasta que la muestra está de nuevo desmagnetizada cuando se llega al punto c donde $\vec{B} = 0$. Un aumento adicional de la corriente provoca que el hierro se magnetice en la dirección opuesta acercándose a la saturación al llegar al punto d.

Si ahora invertimos todo el proceso reduciendo primero la corriente a cero, y luego la aumentamos, pero en la dirección positiva se sigue la trayectoria de fa. Vemos que de esta manera se ha descrito un ciclo conocido como ciclo de histéresis que es característico y distinto para cada material ferromagnético.

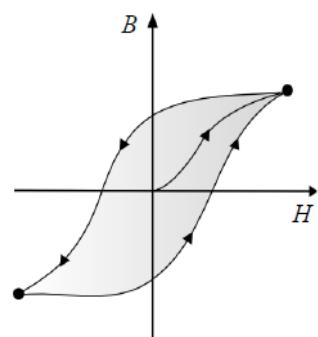
Ciclos de histéresis

a) Material magnéticamente duro, el campo remanente es grande.

Este ciclo de histéresis es característico de las sustancias ferromagnéticas denominadas duras: es ancho lo que indica una magnetización remanente grande.



b) Material magnéticamente blando, el campo remanente es pequeño.



H Los materiales “ blandos” como el hierro muestran ciclos estrechos y se magnetizan y desmagnetizan con facilidad. Así el área encerrada en el lazo representa el trabajo necesario para llevar el material por el ciclo de histéresis. Por ello los materiales de determinados

dispositivos, como los transformadores, deben hacerse con materiales blandos para que las pérdidas de energía sean mínimas.