

Comportamiento magnético de los materiales y su clasificación

Alumna: Floridia Micaela

Instituto Nacional Superior del Profesorado Técnico – Universidad Tecnológica Nacional

Profesores: Ozoires Paci Agustín, Tripicchio Diego

Carrera: Tecnicatura en Física y Física Aplicada

Materia: Física Aplicada

Año 2023

Índice

Introducción	Página 3
Marco teórico	Página 4
Momento dipolar magnético	Página 4
Magnetón de Bohr	Página 5
Vector magnetización	Página 7
Desarrollo	Página 8
Diamagnetismo	Página 8
Paramagnetismo	Página 10
Ferromagnetismo	Página 12
Antiferromagnetismo	Página 23
Ferrimagnetismo	Página 24
Superparamagnetismo	Página 25
Conclusiones	Página 26
Bibliografía	Página 27

Introducción

El vacío es el único medio no magnético. En cambio, en todos los materiales, están presentes, a diferentes escalas, a ciertas temperaturas y de distintas maneras, los efectos del magnetismo. Por lo tanto, el magnetismo es una de las propiedades básicas de los materiales.

Para poder clasificarlos, se tiene en cuenta cómo los materiales reaccionan ante la influencia de un campo magnético externo. Con el objetivo de analizar esas reacciones, es necesario conocer cómo los momentos dipolares magnéticos de los átomos que conforman los materiales interactúan entre sí en ausencia y en respuesta a un campo magnético externo.

En la actualidad, los materiales magnéticos tienen un sinnúmero de aplicaciones en diferentes ramas de la ciencia y la tecnología. Por ejemplo, están presentes en la generación y distribución de la corriente eléctrica, el almacenamiento y procesamiento de información y las comunicaciones, en la fabricación de motores, transformadores e imanes, y en el diagnóstico y tratamiento de diferentes enfermedades.

Es importante conocer los comportamientos atómicos de los materiales, ya que determinarán las propiedades magnéticas de cada uno y, en base a ellas, sus diferentes usos y aplicaciones.

Marco teórico

- Momento dipolar magnético:

Para poder analizar cómo responde la materia a nivel microscópico ante un campo magnético exterior, y cómo se clasifican los materiales según su comportamiento magnético, es necesario repasar el concepto de momento dipolar magnético (a nivel macroscópico).

Con este objetivo, se analizará la situación en una espira por la que circula una corriente I en un campo magnético \vec{B} , de forma que su plano sea paralelo a las líneas del campo (figura 1).

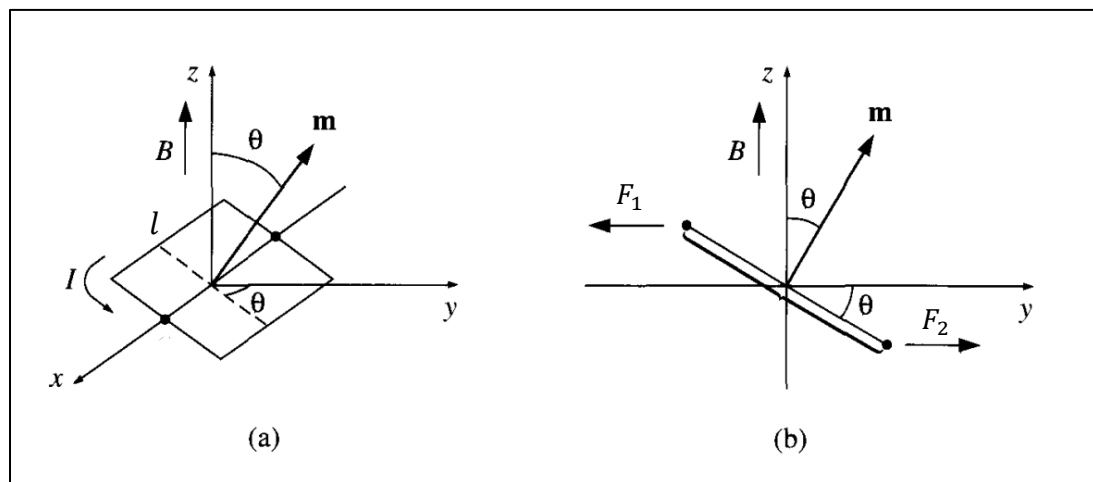


Figura 1: espira por la que circula una corriente I inmersa en un campo magnético \vec{B} .

Sobre un elemento de corriente de la espira, la fuerza que actúa es $d\vec{F} = I d\vec{l} \times \vec{B}$ (fuerza magnética sobre una sección infinitesimal de un conductor que transporta corriente). Su módulo es $dF = IdlB\sin\theta$, siendo θ el ángulo que forma un vector normal a la espira con la dirección del campo \vec{B} .

Las fuerzas opuestas que actúan sobre la espira se cancelan, por lo que no hay fuerza neta sobre ella. Sin embargo, las fuerzas F_1 y F_2 producen una torca τ en la espira (también denominada par o cupla) cuyo módulo es: $\tau = \frac{l}{2} \sin\theta 2IlB$. Simplificando, y teniendo en cuenta que $l^2 = A$ (área de la espira), esto puede reescribirse como $\tau = IAB\sin\theta$.

El producto IA se denomina momento dipolar magnético o momento magnético de la espira, y suele denotarse con la letra griega μ . Como se utilizará esa letra más adelante para nombrar otro concepto, en este trabajo al momento dipolar magnético se lo indicará con la letra \mathcal{M} . Por lo tanto, $\tau = \mathcal{M}B\sin\theta$.

Se puede, además, definir un momento magnético vectorial de magnitud IA . La dirección de \mathcal{M} se considera perpendicular al plano de la espira; es decir, tiene la misma dirección y sentido que el vector área \vec{A} de la espira: $\vec{\mathcal{M}} = I\vec{A}$. Teniendo en cuenta esto, se define la torca de forma vectorial como $\vec{\tau} = \vec{\mathcal{M}} \times \vec{B}$.

Una vez repasado el momento dipolar magnético a nivel macroscópico, es necesario revisar dos conceptos para poder luego utilizarlos a la hora de clasificar los materiales según sus propiedades magnéticas.

- Magnetón de Bohr:

Para poder comenzar analizar qué ocurre con el magnetismo a nivel atómico, hay que tener en cuenta que el origen de las fuerzas magnéticas está en el movimiento de las cargas, y dentro de los átomos hay cargas en movimiento: el movimiento orbital de los electrones alrededor del núcleo, el movimiento de giro sobre sí mismo del electrón (spin) y un movimiento similar por parte de los núcleos de los átomos (spin nuclear).

Es posible realizar una analogía entre un electrón que circula en una nube orbital alrededor del núcleo de un átomo y una espira de corriente pequeña que genera un campo magnético. Por lo que se puede asumir que, por su movimiento alrededor del núcleo, el electrón tendrá su propio momento dipolar magnético.

Se considerará un modelo en el que el electrón (de masa m y carga $-e$) se desplaza en una órbita circular de radio r y velocidad angular v (figura 2).

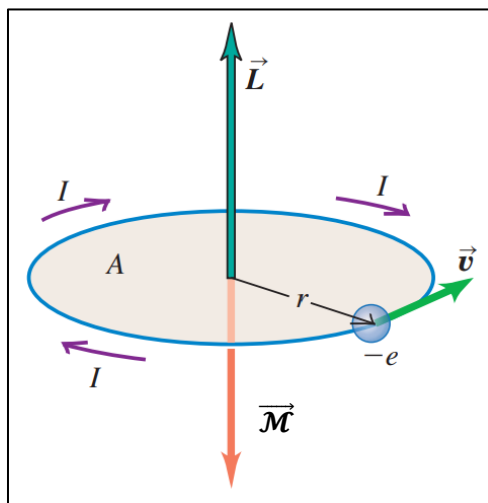


Figura 2

Teniendo en cuenta la analogía con la espira de corriente, para el electrón en la órbita el área de la espira sería $A = \pi r^2$. El período T es el tiempo que tarda el electrón en completar una órbita, y está dado por la longitud de la órbita dividida por la velocidad: $T = \frac{2\pi r}{v}$.

La corriente I asociada al electrón es la carga total que pasa por cualquier punto de la órbita por unidad de tiempo: $I = -\frac{e}{T} = -\frac{ev}{2\pi r}$.

Entonces, el momento magnético es $\mathcal{M} = IA = -\frac{ev\pi r^2}{2\pi r} = -\frac{evr}{2}$.

Como el momento angular L del electrón es $L = mvr$, se puede reescribir el momento magnético como $\mathcal{M} = -\frac{eL}{2m}$. Como se sabe que el momento angular atómico está cuantizado (es decir, su componente en una dirección particular siempre es múltiplo de $\frac{h}{2\pi}$, siendo h la constante de Planck), entonces es posible decir que $\mathcal{M} = -\frac{e}{2m} \left(\frac{h}{2\pi} \right) = -\frac{eh}{4\pi m}$. Esta cantidad se denomina magnetón de Bohr y se expresa como \mathcal{M}_e ($\mathcal{M}_e = 9,274 \cdot 10^{-24} \frac{J}{T}$).

Se puede demostrar que, para el caso del spin del electrón, el momento magnético es $\mathcal{M}_s = -\frac{e}{m} L$, y que el valor del momento magnético debido al spin nuclear es $\mathcal{M}_n = 10^{-3} \mu_e$ (su

efecto es despreciable sobre el total de las propiedades magnéticas de los materiales, pero es la base de la Resonancia Magnética Nuclear).

- Vector magnetización:

Para poder definir al vector magnetización, es necesario recordar el concepto intensidad de campo magnético o excitación magnética \vec{H} , el de campo inducción magnética \vec{B} y la relación que existe entre ellos, que depende de la permeabilidad magnética del medio (μ) donde se ha producido el campo magnético. En el vacío, se cumple que $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$, siendo μ_0 la permeabilidad magnética del vacío.

Se puede definir la permeabilidad magnética relativa μ_r o k_m como $\mu_r = k_m = \frac{\mu}{\mu_0}$.

El vector magnetización \vec{M} se introduce para describir mejor el comportamiento de los materiales sometidos a la acción de campos magnéticos. Para hacerlo, se considerará un material de volumen V , que es sometido a un campo magnético externo \vec{H} . Dentro de un volumen V existirán distintos momentos dipolares magnéticos producidos por los movimientos dentro de los átomos. El vector magnetización se define a partir de la sumatoria de todos esos momentos magnéticos: $\vec{M} = \sum \frac{\vec{m}}{V}$. La unidad de \vec{M} es Am^2/m^3 o A/m .

La relación que existe entre \vec{B} , \vec{H} y \vec{M} es: $\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M})$.

En muchos materiales (isótropos) existe una relación aproximadamente lineal entre \vec{M} y \vec{H} : $\vec{M} = \chi_m \vec{H}$, siendo χ_m la susceptibilidad magnética.

Desarrollo

Para poder clasificar a un material según sus características magnéticas, se tiene en cuenta la combinación de los diferentes componentes de momentos magnéticos que sus átomos presentan, y cómo reaccionan ante la influencia de un campo magnético externo.

Teniendo esto en cuenta, los materiales se pueden dividir en: diamagnéticos, paramagnéticos, ferromagnéticos, antiferromagnéticos, ferrimagnéticos y superparamagnéticos.

Además, se los puede agrupar dependiendo de si conservan magnetización remanente o no, una vez que se elimina el campo externo. En algunos, el momento magnético producido paralelo al campo externo se pierde apenas el campo es retirado (materiales diamagnéticos y paramagnéticos), y otros son capaces de conservar una magnetización remanente (materiales ferromagnéticos, ferrimagnéticos y antiferromagnéticos).

- Diamagnetismo

Este tipo de material se caracteriza porque sus átomos no tienen momento dipolar magnético en la ausencia de un campo magnético externo. Esto sucede ya que el momento magnético orbital y el de spin se compensan para anularse.

Si estos materiales son sometidos a un campo magnético externo, el momento de spin excede ligeramente al momento orbital, causando que sean repelidos por el campo. Los materiales diamagnéticos se magnetizan débilmente en el sentido opuesto al del campo magnético aplicado. Por este motivo, aparece una fuerza de repulsión sobre el cuerpo respecto del campo aplicado.

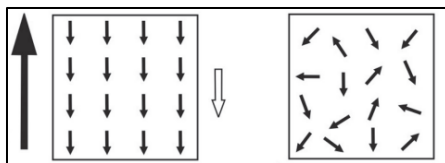


Figura 3: comportamiento magnético de un material diamagnético. La flecha rellena indica el campo aplicado y la vacía la magnetización del material bajo el campo aplicado (lado izquierdo) o en ausencia del campo (lado derecho). En estos materiales, en ausencia del campo no hay magnetización.

Si bien el diamagnetismo suele estar presente en todas las sustancias, en los casos donde aparecen otras propiedades magnéticas éste suele ser muy débil para poder ser observado.

La permeabilidad magnética μ de los materiales diamagnéticos es menor que la permeabilidad magnética del vacío μ_0 . Por lo tanto, su permeabilidad magnética relativa μ_r es inferior a 1. La susceptibilidad magnética χ_m es negativa.

Algunos ejemplos de materiales diamagnéticos son el bismuto, los gases nobles, el cloruro de sodio, el agua, el cobre, el plomo, el oro, la plata, el bronce. El grafito pirolítico es muy efectivo para usar como demostración visual del diamagnetismo, ya que una capa fina de este material puede levitar a temperatura ambiente, por repulsión, sobre un campo magnético generado, por ejemplo, por un imán.

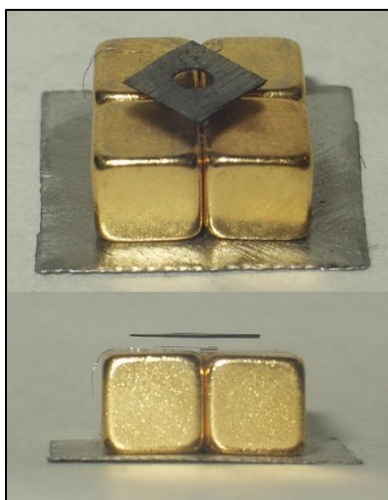


Figura 4: pieza de grafito pirolítico que levita sobre una matriz de imanes permanentes de neodimio.

- Paramagnetismo

En este tipo de material, el momento magnético orbital y el de spin son desiguales, por lo que tienen un momento magnético neto aún en ausencia de un campo externo.

Cuando se aplica un campo magnético externo, este genera una torca sobre cada momento magnético, por lo que los dipolos atómicos tienden a alinearse con el campo y el momento magnético aumenta. Pero debido a las interacciones internas y la agitación térmica, esa alineación no es perfecta y tiende a inhibir el proceso, obteniéndose en la práctica solo una alineación parcial. De todas formas, los efectos magnéticos pueden ser significantes.

Estos materiales no retienen las propiedades magnéticas cuando se elimina el campo externo.

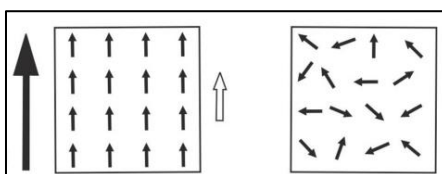


Figura 5: comportamiento magnético de un material paramagnético. La flecha rellena indica el campo aplicado y la vacía la magnetización del material bajo el campo aplicado (lado izquierdo) o en ausencia del campo (lado derecho). En estos materiales, en ausencia del campo no hay magnetización.

La permeabilidad magnética μ de los materiales paramagnéticos es levemente mayor que la permeabilidad magnética del vacío μ_0 . Por lo tanto, su permeabilidad magnética relativa μ_r es algo superior a 1. La susceptibilidad magnética χ_m es positiva.

Algunos ejemplos de materiales paramagnéticos son el aire, el aluminio, el paladio, el magnesio, el molibdeno, el litio y el tántalo.



Figura 6: el oxígeno líquido (material paramagnético) es vertido entre los polos de un imán y se adhiere a ellos.

Entre las aplicaciones de los materiales paramagnéticos se encuentra la resonancia paramagnética electrónica (EPR), una técnica espectroscópica que permite obtener información sobre la estructura y dinámica de sistemas con electrones desapareados (sistemas paramagnéticos). Desde su descubrimiento, ha sido aplicada a una gran variedad de problemas en física de la materia condensada y química y más recientemente a cuestiones en geología, arqueología y paleoantropología, dosimetría de radiación, bioquímica, biología y ciencias del espacio.

Otra aplicación es la pintura paramagnética para autos, que hace que los mismos varíen su color. Se logra aplicándoles un polímero (macromoléculas) a base de un material paramagnético para posteriormente pintarlo. Luego, presionando un botón, se aplica una corriente eléctrica continua a la carrocería y se genera un campo magnético de mayor o menor intensidad (según la diferencia de potencial aplicada) con el fin de orientar en mayor o menor medida las partículas del material, afectando su habilidad para reflejar la luz y cambiar de color. El vehículo pasa a color blanco tras desconectar la corriente aplicada.

- Ley de Curie:

La tendencia que tienen los momentos magnéticos atómicos a alinearse de forma paralela al campo magnético (donde la energía potencial es mínima) se opone al movimiento térmico aleatorio, el cual tiende a distribuir sus orientaciones al azar. Por esta razón, la susceptibilidad

paramagnética siempre disminuye con el aumento de la temperatura. De forma simplificada, puede establecerse la siguiente relación entre la temperatura absoluta, el módulo del campo y la magnetización: $M = C \frac{B}{T}$, llamada Ley de Curie en honor a su descubridor Pierre Curie. C es la constante de Curie y depende del material.

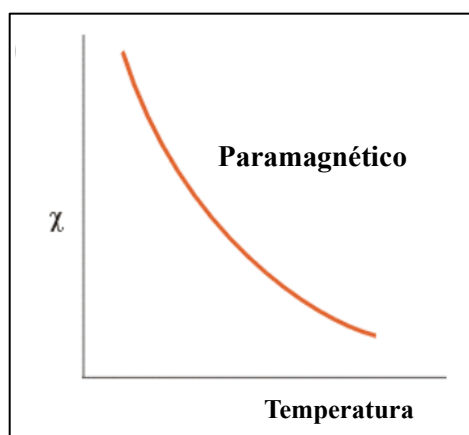


Figura 7: Gráfica de la susceptibilidad magnética dependiendo de la temperatura en un material paramagnético, respondiendo a la Ley de Curie.

- Ferromagnetismo

Este tipo de materiales se caracterizan por una posible magnetización permanente.

Algunos ejemplos son el hierro, el níquel, el cobalto y muchas aleaciones de estos elementos. En ellos, cada átomo tiene un momento magnético importante, causado por los momentos magnéticos de spin que no están compensados.

Las fuerzas interatómicas hacen que los átomos se alineen en forma paralela entre sí en regiones que contienen un gran número de átomos, denominadas dominios magnéticos, aun cuando no está presente un campo externo. Como estos dominios se orientan aleatoriamente, no

se genera imantación neta en el material. Los dominios pueden tener gran variedad de formas y tamaños.

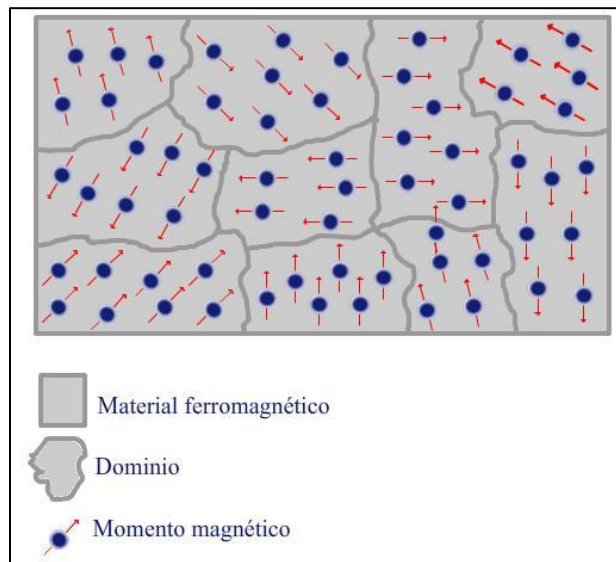


Figura 8: dominios magnéticos en un material ferromagnético

La permeabilidad magnética μ y la susceptibilidad magnética χ_m de estos materiales no son una constante, sino que varían según el campo aplicado y la historia magnética previa del material.

De todas formas, μ es siempre muy superior que la permeabilidad magnética del vacío μ_0 . Por lo tanto, su permeabilidad magnética relativa μ_r es mucho mayor que a 1. La susceptibilidad magnética χ_m es positiva.

Cuando no hay un campo externo aplicado, las magnetizaciones de los dominios están orientadas al azar. Pero cuando se aplica un campo externo, los dominios tienden a orientarse paralelos al campo.

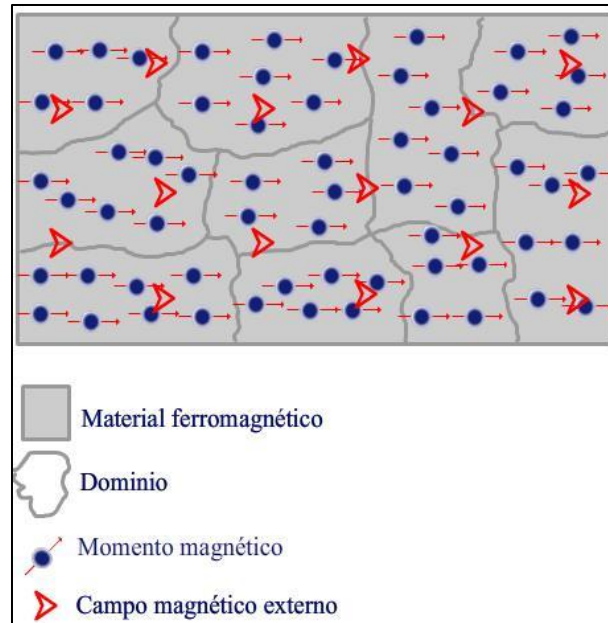


Figura 9: dominios orientados en dirección del campo magnético externo.

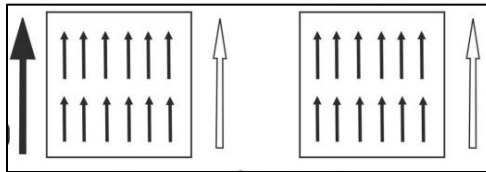


Figura 10: comportamiento magnético de un material ferromagnético. La flecha rellena indica el campo aplicado y las vacías la magnetización del material bajo el campo aplicado (lado izquierdo) o en ausencia del campo (lado derecho).

En este tipo de materiales, al igual que en los paramagnéticos, la agitación dependiente de la temperatura desordena esta alineación, haciéndola imposible por encima de una temperatura crítica, denominada temperatura de Curie.

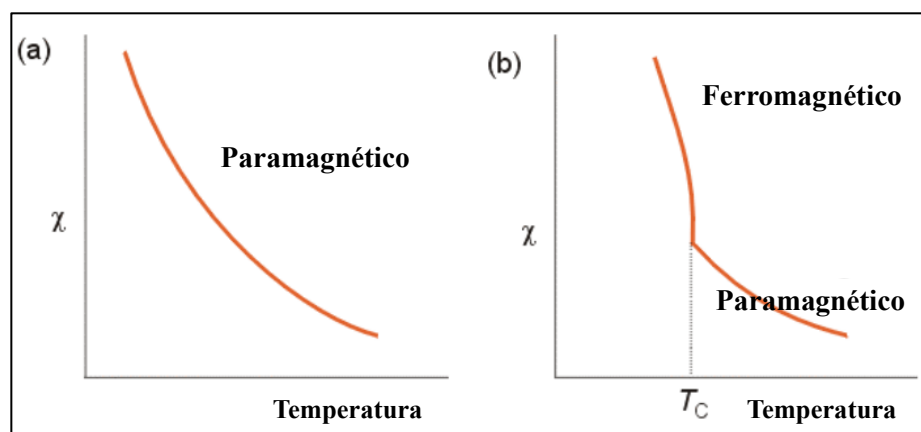


Figura 11: Comparación de las gráficas de las susceptibilidades magnéticas dependiendo de la temperatura en un material paramagnético y en uno ferromagnético, respondiendo a la Ley de Curie. En el gráfico b, se puede observar en cambio en el comportamiento a partir de la temperatura de Curie (T_c).

A medida que se incrementa el campo magnético externo \vec{H} , cuando inicialmente es de baja intensidad, los dominios magnéticos comienzan a orientarse en dirección al campo y \vec{B} comienza a crecer. Esta primera etapa se denomina zona reversible, y si se elimina el campo externo, la magnetización desaparece. En cambio, si \vec{H} sigue aumentando, se produce un cambio irreversible en la alineación de los dominios de manera que, si se elimina el campo externo, el material mantiene una magnetización remanente. Al aumentar \vec{H} se alcanza en algún momento un punto en que casi todos los momentos magnéticos en el material están alineados en forma paralela al campo. Esta condición se llama magnetización de saturación. Una vez alcanzada, un mayor incremento del campo externo ya no ocasiona un aumento en la magnetización.

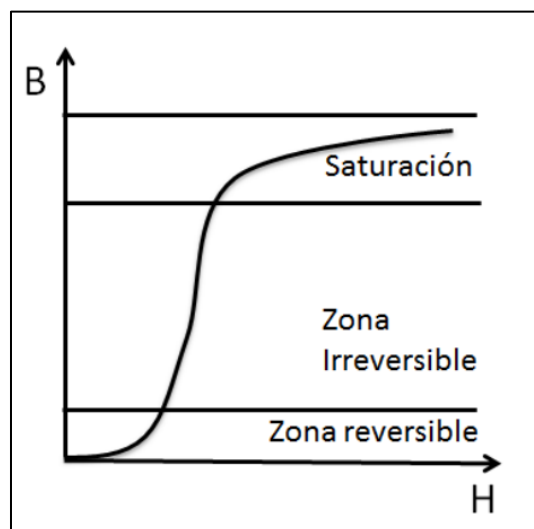


Figura 12: curva de magnetización para un material ferromagnético. B se aproxima a su valor de saturación a medida que el campo magnético externo H aumenta.

Para muchos materiales ferromagnéticos, la relación entre magnetización y el campo externo es diferente cuando el campo aumenta que cuando disminuye.

Cuando el material se magnetiza hasta la saturación y luego el campo externo se reduce a cero, permanece cierta magnetización (comportamiento característico de los imanes permanentes). Para reducir la magnetización a cero se requiere un campo externo en la dirección inversa. Este comportamiento se denomina histéresis. La histéresis magnética es un fenómeno que ocurre al magnetizar un material ferromagnético, donde éste mantiene sus propiedades magnéticas tras cesar el campo magnético que la ha inducido.

Este proceso implica la disipación de energía (denominada pérdida por histéresis), por lo que la temperatura del material aumenta durante el proceso.

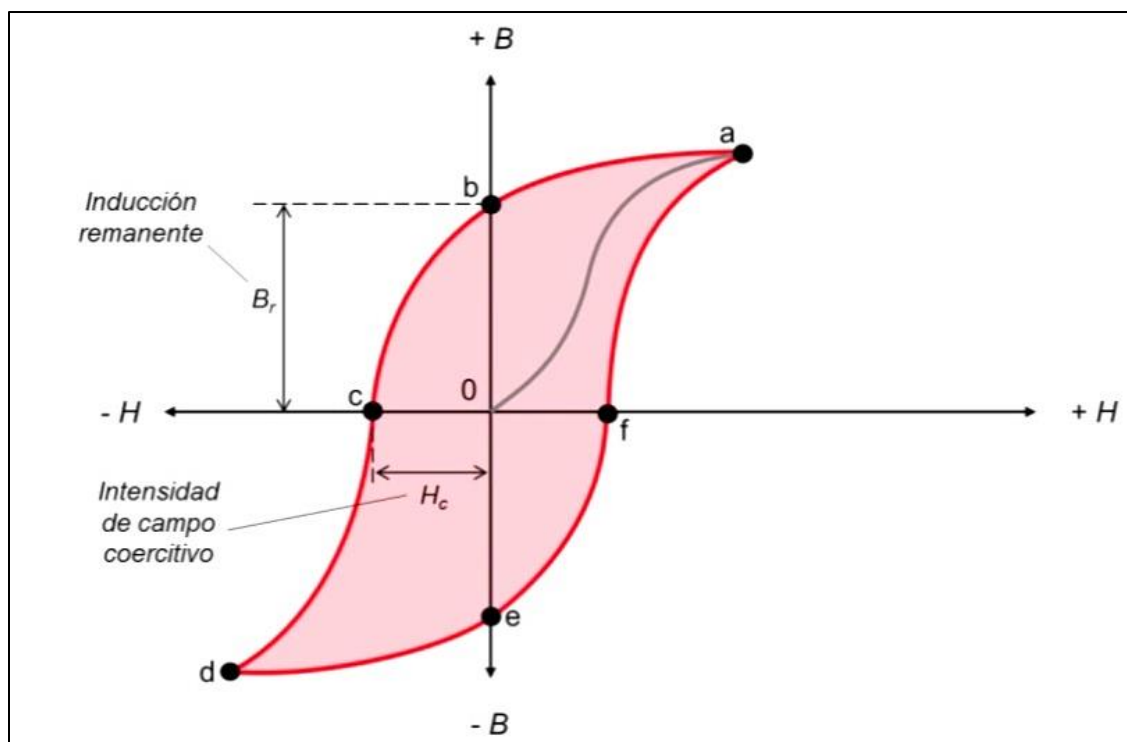


Figura 13: ciclos de histéresis de un material ferromagnético.

Este fenómeno se puede ver gráficamente de una manera muy intuitiva al representar la curva B en función de H de un material, siempre que el mismo se encuentre inicialmente desmagnetizado y el campo externo aumente de forma continua desde cero, como se muestra en la figura 13.

En la misma puede apreciarse que se parte inicialmente con el material desmagnetizado y comienza a incrementarse el campo externo hasta alcanzar el punto de saturación (punto a). Si luego disminuye H , B también lo hará, pero la curva seguida ya no será la misma, por lo que cuando H se haya anulado, B tendrá un valor denominado magnetismo remanente, inducción remanente o remanencia (punto b).

Para poder anular el campo B , es necesario llevar el campo externo hasta un valor inverso, denominado intensidad de campo coercitivo o coercitividad (punto c). Si se sigue

aumentando H en sentido inverso, se llegará a un punto en que los dipolos estarán alineados completamente en sentido contrario (punto d).

Luego, si H vuelve a incrementarse, el campo B comenzará a crecer y se cerrará así la curva. Este ciclo recibe el nombre de ciclo de histéresis.

Dependiendo de la utilidad de los materiales, es conveniente que el ciclo de histéresis sea más estrecho o más ancho, siendo que será más sencillo o más complicado desmagnetizarlos, e implicará distintas cantidades de energía disipada.

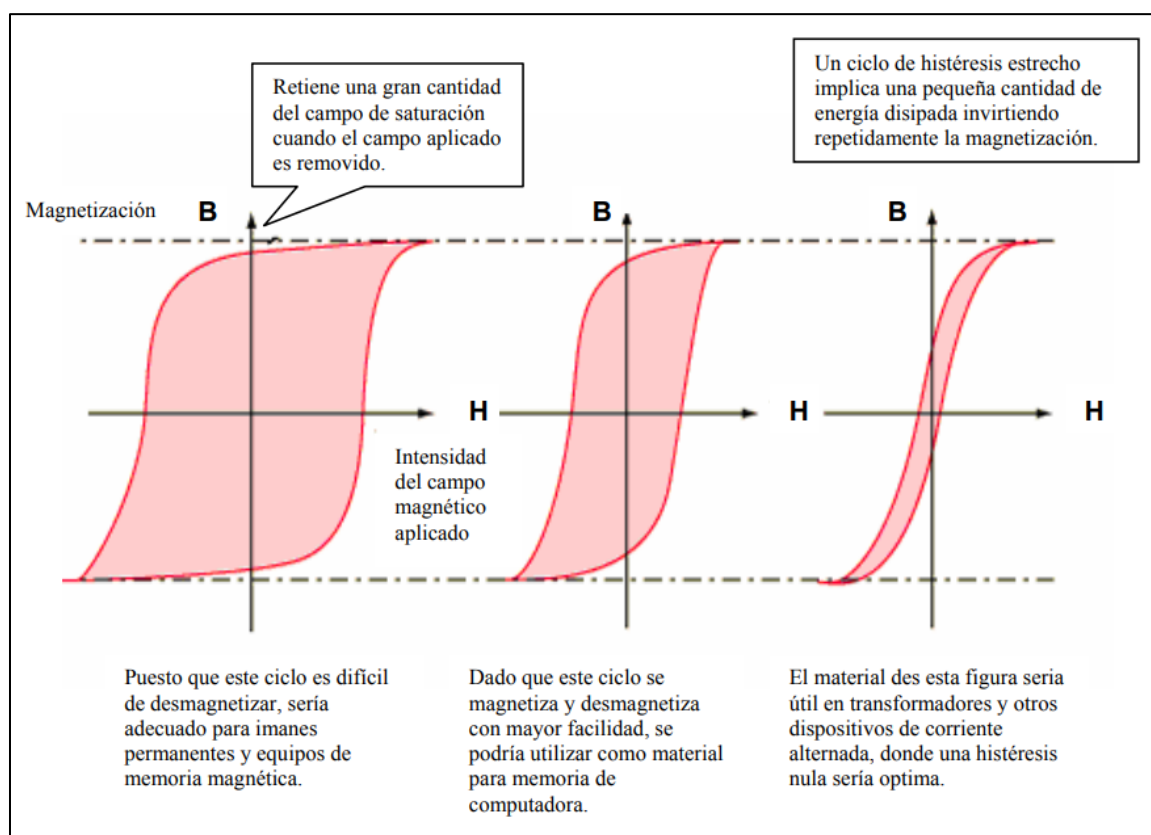


Figura 14: ciclos de histéresis de diferentes materiales.

Los materiales ferromagnéticos tienen muchas aplicaciones, como en núcleos de transformadores.

Un transformador es un dispositivo que se utiliza para transformar los niveles de voltaje y de corriente de un circuito de corriente alterna. Está conformado por dos bobinas o devanados,

aislados eléctricamente entre sí, pero enrollados en el mismo núcleo. El núcleo es la parte del transformador que forma el circuito magnético de la máquina. Su función es la de conducir el flujo magnético que se genera al circular una corriente alterna por los devanados. Suele estar hecho de un material ferromagnético, como el hierro o aleaciones del mismo, con una permeabilidad relativa μ_r muy grande, logrando así mantener las líneas del campo casi completamente dentro del núcleo y que casi todas pasen a través del segundo bobinado, maximizando la inductancia mutua de las dos bobinas.

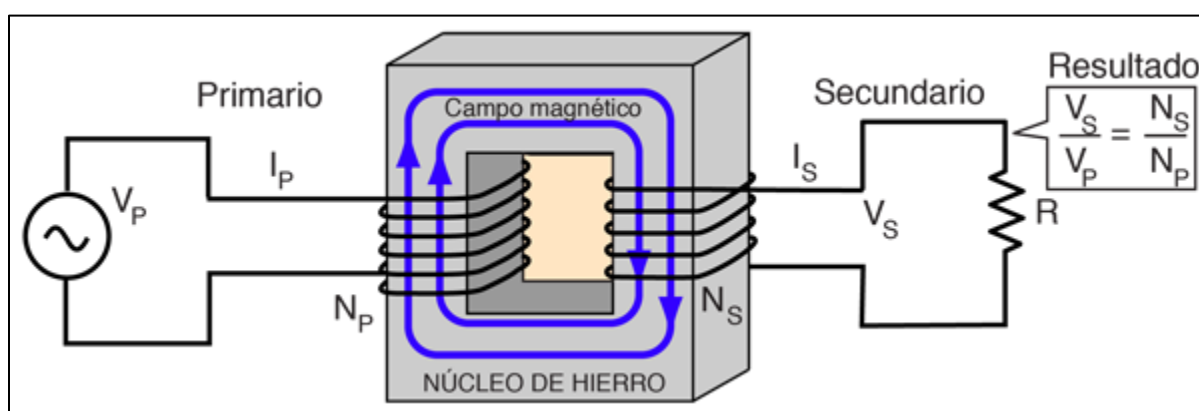


Figura 15: diagrama de un transformador. El embobinado primario está conectado a una fuente de ca; el secundario, a un dispositivo con resistencia R .

La aleación ferromagnética más utilizada para el diseño de núcleos de transformadores es la aleación hierro-silicio, conocida como acero eléctrico, acero magnético o acero al silicio. Está compuesta por hierro esencialmente puro con pequeño porcentaje de silicio. Es un acero especialmente fabricado para poseer determinadas propiedades magnéticas, como mayor respuesta que el hierro para campos magnéticos débiles, una resistividad mayor y pérdidas totales menores en el núcleo por tener una zona de histéresis pequeña (poca disipación de energía por ciclo). Esta aleación se lamina en chapas de menos de 2 milímetros de espesor, que son a su vez apiladas para formar los núcleos.



Figura 16: transformador con núcleo de hierro silicio.

El motivo por el cual en los núcleos de los transformadores suele usarse la disposición en láminas es para disminuir las pérdidas de energía por corrientes parásitas o corrientes de Foucault. Éstas son corrientes inducidas que circulan en el interior de conductores como consecuencia de campos magnéticos variables con el tiempo que producen flujos magnéticos variables en los mismos. Si bien tienen muchos usos prácticos, como en los hornos de inducción o en los detectores de metales, también tienen efectos indeseables.

En el caso del núcleo de hierro en los transformadores, si el núcleo es macizo, como el hierro es conductor, cualquier sección del mismo puede considerarse como varios circuitos conductores uno dentro de otro (figura a). El flujo a través de cada uno de estos circuitos cambia continuamente y, en consecuencia, hay corrientes parásitas que circulan por todo el volumen del núcleo en trayectorias circulares. Estas corrientes disipan energía i^2R a través del calentamiento y establecen un flujo opuesto.

Los efectos de las corrientes parásitas se minimizan mediante el empleo de un núcleo hecho con láminas delgadas separadas entre sí por un revestimiento o barniz aislante (figura b), que hace que las corrientes parásitas queden confinadas en cada lámina, reduciendo así sus trayectorias. Mientras más corta sea la distancia entre laminados adyacentes (por ejemplo, mientras mayor sea el número de laminados por unidad de área, perpendicular al campo aplicado), mayor será la eliminación de las corrientes de Foucault y, por lo tanto, menor el calentamiento del núcleo.

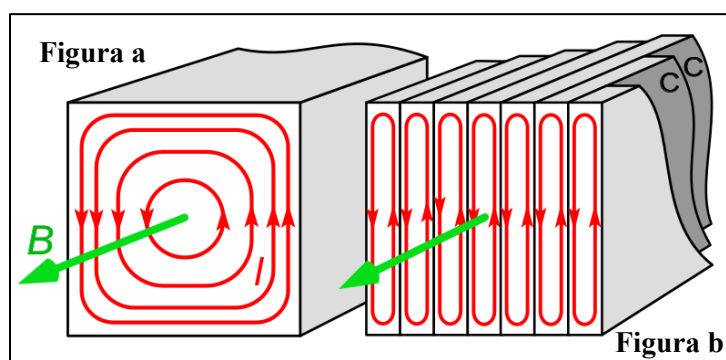


Figura 17: corrientes parásitas en un núcleo de hierro macizo (a) y en uno laminado (b).

Podría decirse entonces que los transformadores con núcleo de hierro presentan como desventaja las pérdidas de energía por corrientes parásitas y las pérdidas por histéresis. Para disminuirlas, pueden utilizarse transformadores sin núcleo, denominados transformadores con núcleo de aire. Sin embargo, este tipo presenta como desventaja el hecho de no mantener confinadas las líneas de flujo magnético dentro de él de igual manera que lo hace un material ferromagnético. Por eso no son aconsejados para transformadores de transmisión de potencia.

Pero como un material ferromagnético causa ruido o distorsión en la señal, debe evitarse en aplicaciones de alta frecuencia como la transmisión de señales. Aquí sí tienen muy buenos resultados los transformadores de aire, y son utilizados en radiocomunicación o para transformadores resonantes como las bobinas de Tesla, donde las frecuencias son elevadas.

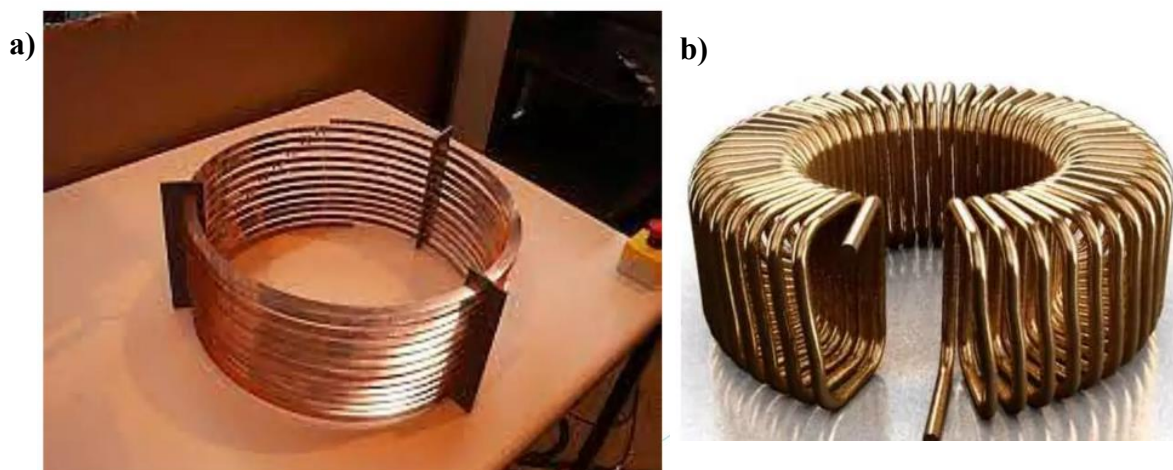


Figura 18 : transformadores de núcleo de aire helicoidal (a) y toroidal (b).

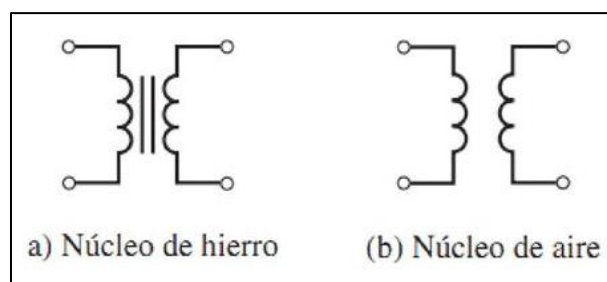


Figura 19: simbología para un transformador con núcleo de hierro (a) y uno con núcleo de aire (b).

Otro uso de los materiales ferromagnéticos es la construcción de electroimanes. Un electroimán es un tipo de imán en el que el campo magnético es producido por el flujo de una corriente eléctrica. Estos tienen normalmente la forma de solenoides con núcleos de hierro. Las propiedades ferromagnéticas del núcleo de hierro hacen que sus dominios magnéticos se alineen

con los campos magnéticos más pequeños producidos por la corriente en el solenoide, ampliando así el campo magnético por factores de centenas o miles de veces.

En medicina, los materiales ferromagnéticos se utilizan, por ejemplo, para tratamientos contra el cáncer (con partículas nanomagnéticas), o en la resonancia magnética nuclear.

- Antiferromagnetismo

Al igual que en los ferromagnéticos, los átomos de este tipo de materiales también están divididos en dominios magnéticos. Los momentos magnéticos de los átomos adyacentes se alinean en la misma dirección, pero en sentido opuesto, de modo que el momento magnético total es cero en ausencia de un campo magnético externo.

Este estado natural hace difícil que el material se magnetice. Un campo externo los afecta de forma muy débil.

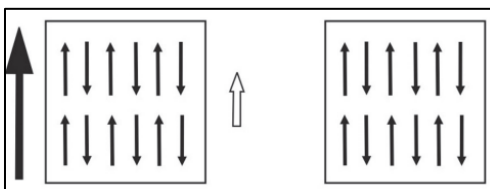


Figura 20: comportamiento magnético de un material antiferromagnético. La flecha rellena indica el campo aplicado y la vacía la magnetización del material bajo el campo aplicado (lado izquierdo) o en ausencia del campo (lado derecho). En estos materiales, en ausencia del campo no hay magnetización.

Al igual que ocurre en los materiales ferromagnéticos con la temperatura de Curie, en los antiferromagnéticos existe una temperatura, denominada temperatura de Neel, encima de la cual no se aprecia el antiferromagnetismo. Al superarla, los materiales empiezan a comportarse como paramagnéticos.

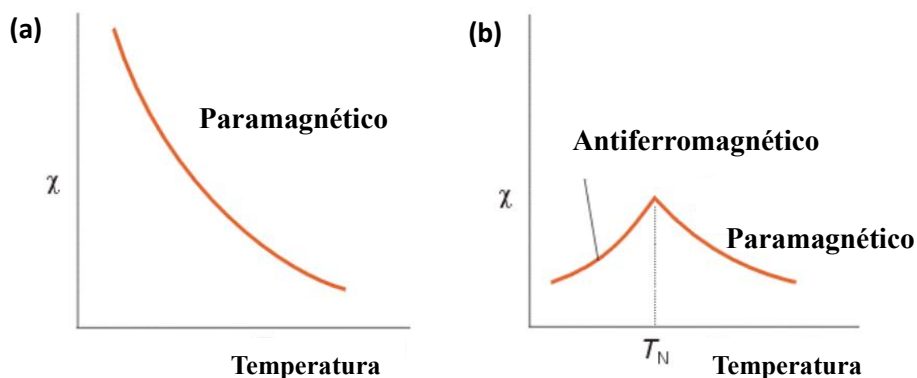


Figura 21: Comparación de las gráficas de las susceptibilidades magnéticas dependiendo de la temperatura en un material paramagnético (respondiendo a la Ley de Curie) y en uno antiferromagnético. En el gráfico b, se puede observar en cambio en el comportamiento a partir de la temperatura de Neel (T_N).

Algunos ejemplos de materiales antiferromagnéticos son el óxido de manganeso y la hematita.

- Ferrimagnetismo

En este tipo de material, al igual que ocurre con los antiferromagnéticos, los momentos magnéticos de los átomos adyacentes están alineados en la misma dirección y sentido opuesto ante la ausencia de un campo magnético externo, pero los momentos no son iguales, por lo que existe un momento magnético neto (aunque mucho menor que en los materiales ferromagnéticos).

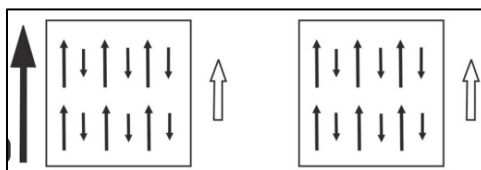


Figura 22: comportamiento magnético de un material ferrimagnético. La flecha rellena indica el campo aplicado y las vacías la magnetización del material bajo el campo aplicado (lado izquierdo) o en ausencia del campo (lado derecho).

A pesar de que sus efectos magnéticos son más débiles, algunos de estos materiales (conocidos como ferritas), tienen una baja conductividad eléctrica que los hace útiles en los núcleos de inductores de corriente alterna y en transformadores, ya que las corrientes parásitas son menores y se reducen las disipaciones térmicas.

Un ejemplo de este material es la magnetita mineral.

- Superparamagnetismo

Este tipo de material está compuesto por partículas ferromagnéticas suspendidas en una malla o matriz dieléctrica (no ferromagnética). Aunque los dominios magnéticos existen dentro de las partículas ferromagnéticas individuales y pueden lograr un ordenamiento magnético por debajo de la temperatura de Curie, las fuerzas de intercambio no son lo suficiente fuertes para poder penetrar en las partículas adyacentes y extender este ordenamiento a todo el sistema.

Este tipo de material se utiliza para la fabricación de cintas magnéticas que se usan en sistemas de grabado de información, en audio y video. Las partículas ferromagnéticas suspendidas en una cinta plástica delgada pueden cambiar rápidamente su magnetización dentro de una pequeña distancia de la cinta. De esta forma, se puede almacenar gran cantidad de información.

Conclusión

En este trabajo se expusieron los orígenes y las causas de las propiedades magnéticas que determinan la clasificación de los materiales en diamagnéticos, paramagnéticos, ferromagnéticos, antiferromagnéticos, ferrimagnéticos y superparamagnéticos. Se precisaron algunas aplicaciones actuales de los mismos, en la ciencia y en la tecnología.

Para su correcta comprensión, se analizaron las nociones de momento dipolar magnético y magnetización. Se introdujeron y explicaron, además, los conceptos de dominios magnéticos, histéresis y ciclos de histéresis, temperaturas de Curie y Neel y corrientes parásitas.

La figura 23 resume qué ocurre con la alineación de los momentos dipolares magnéticos dentro de cada tipo de material y la magnetización de los mismos, en ausencia de un campo externo, y en respuesta a la presencia de uno.

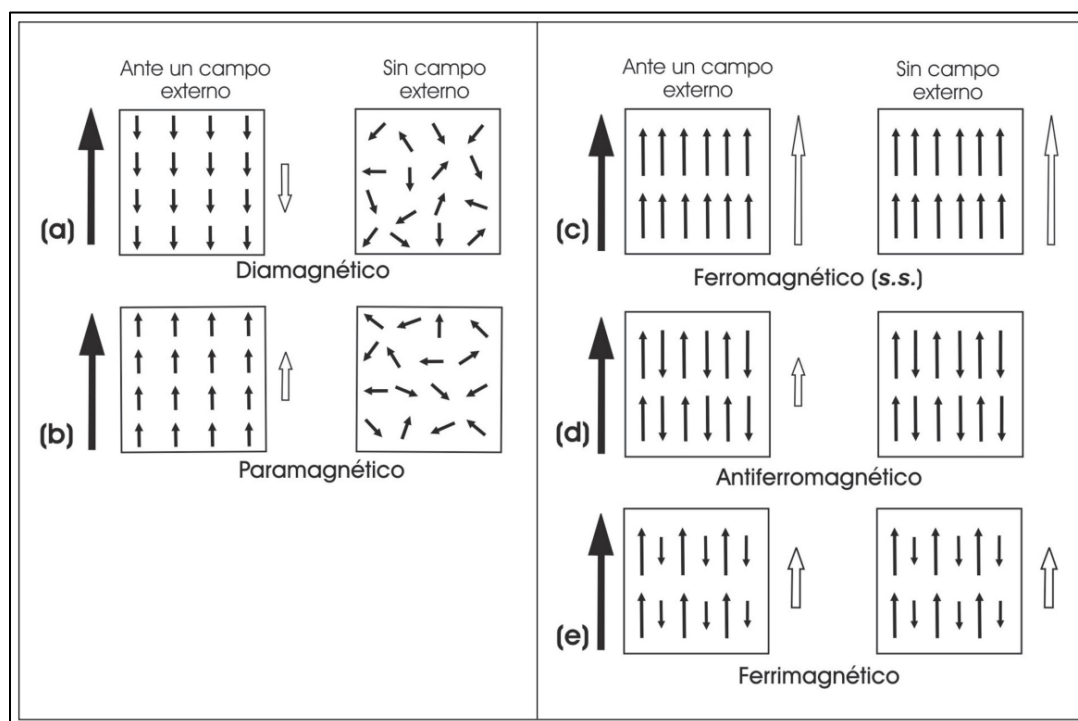


Figura 23: Diferentes tipos de comportamiento magnético. Las flechas rellenas indican el campo aplicado y las vacías la magnetización del material bajo el campo aplicado (lado izquierdo) o en ausencia del campo (lado derecho).

Bibliografía

- Reitz J. R., Milford F. J., Christy R. W., *Fundamentos de la teoría electromagnética* (4a ed.), Addison-Wesley Iberoamericana.
- Kraus J. D., Fleisch D. A., *Electromagnetismo con aplicaciones* (5a ed.), McGraw-Hill.
- Young H. D., Freedman R. A., *Física universitaria con física moderna, volumen 2* (13a ed.), Pearson, México, 2013.
- Griffiths D. J., *Introduction to electrodynamics* (3a ed.), Prentice Hall.
- Quel E. J., *Notas sobre electricidad y magnetismo, Física III*, Instituto Tecnológico de Buenos Aires.