



Instituto
Nacional
de Tecnología
Industrial

INTI  CÓRDOBA

Generalidades sobre imanes permanentes y su caracterización

Córdoba, octubre de 2008

Instituto Nacional de Tecnología Industrial

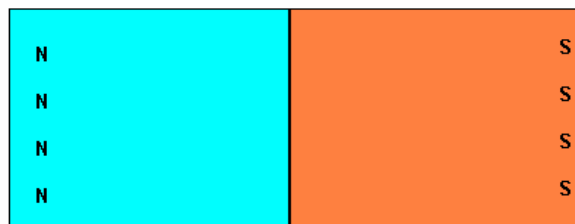
Centro Regional Córdoba

Av. Vélez Sársfield 1561
X5000JJC – Córdoba
Teléfonos: 0351-4698304/4603974
Fax: 0351-4681021

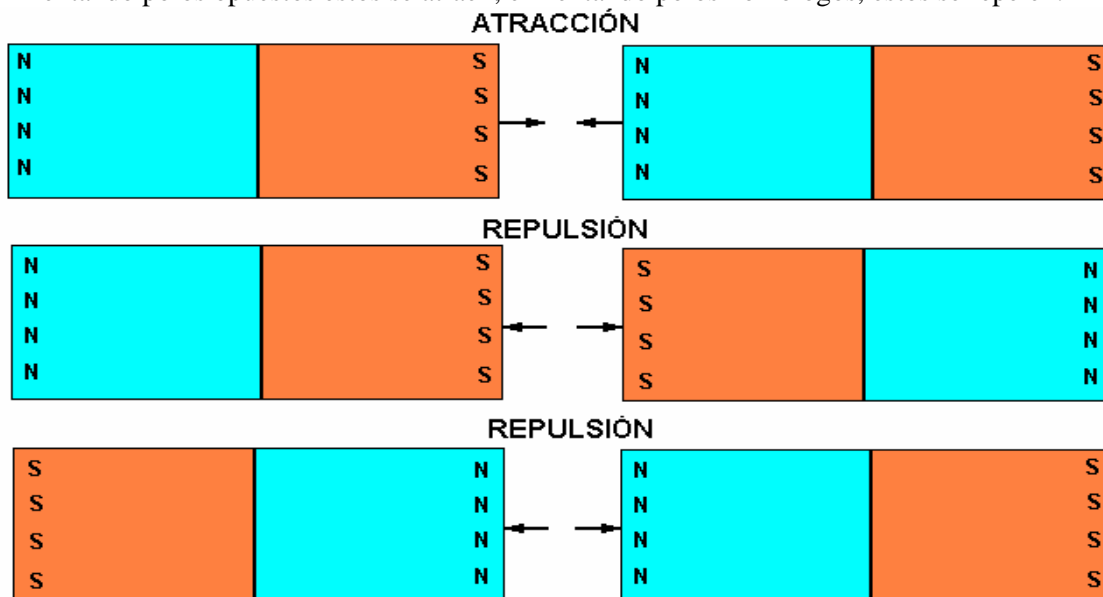
Capítulo I: Definición de magnetismo y evolución histórica de su estudio.

I.a) Introducción: De acuerdo a la definición de la Real Academia Española el magnetismo es la *“Propiedad de los imanes y las corrientes eléctricas de ejercer acciones a distancia, tales como atracciones y repulsiones mutuas, imanación por influencia y producción de corrientes eléctricas inducidas”*. Esta es una definición que obviamente se ajusta al momento actual de la tecnología. Antes del descubrimiento de la electricidad, la definición de magnetismo hubiera sido probablemente la siguiente: *“Propiedad de los imanes de ejercer acciones a distancia, tales como atracciones y repulsiones mutuas e imanación por influencia”*. Porque estos eran los fenómenos que los antiguos observaban en ciertos minerales encontrados en la naturaleza, donde fragmentos separados de ciertos tipos de “roca” eran atraídos por la roca de la cual provenían, o pequeños fragmentos de la misma se atraían o repelían entre sí. Se observó también que estas rocas podían imanar otros materiales como el hierro y que además, si se suspendía uno de estos fragmentos de forma que pudiera girar libremente alrededor de un eje vertical, dicho fragmento se orientaba siempre en una dirección determinada en relación a la tierra. Para dar una explicación a estos fenómenos surgió la idea del **campo magnético** como una magnitud vectorial que ciertos cuerpos establecían sobre el espacio circundante. Entonces se concluyó en que algunos cuerpos, como trozos de minerales ferrosos, o como el planeta tierra, tenían la propiedad de establecer un campo magnético cuya existencia se demostraba por las acciones mecánicas que aparecían en otros cuerpos magnetizados. Haciendo una analogía con otros campos ya conocidos, como el de la gravedad, surgió la idea de las **“masas magnéticas”**. Según esta analogía, así como el campo gravitatorio está asociado a la atracción de masas (dos cuerpos se atraen en forma directamente proporcional al producto de sus masas, e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa), el campo magnético estaría asociado a la atracción de “masas magnéticas”. Pero mientras en el campo gravitatorio sólo hay atracción de masas, en el campo magnético hay atracción y también repulsión. Por ello debió inventarse el concepto de “masa magnética norte” y “masa magnética sur”. Las masas magnéticas norte y sur se atraen entre sí. Pero dos masas magnéticas sur (o norte) se repelen entre sí.

Sea un imán con forma de barra magnetizado de forma de tener masas magnéticas norte en un extremo y masas magnéticas sur en el otro:

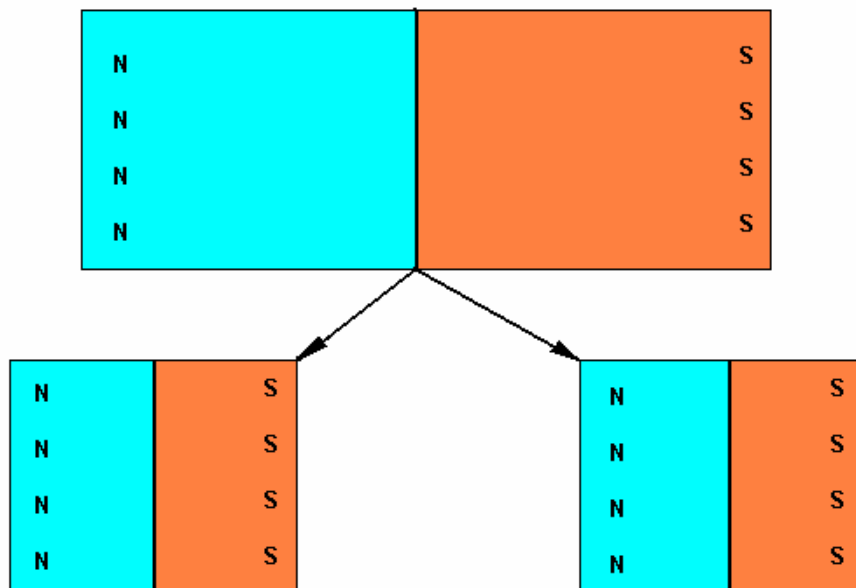


Enfrentando polos opuestos estos se atraen; enfrentando polos homólogos, estos se repelen:



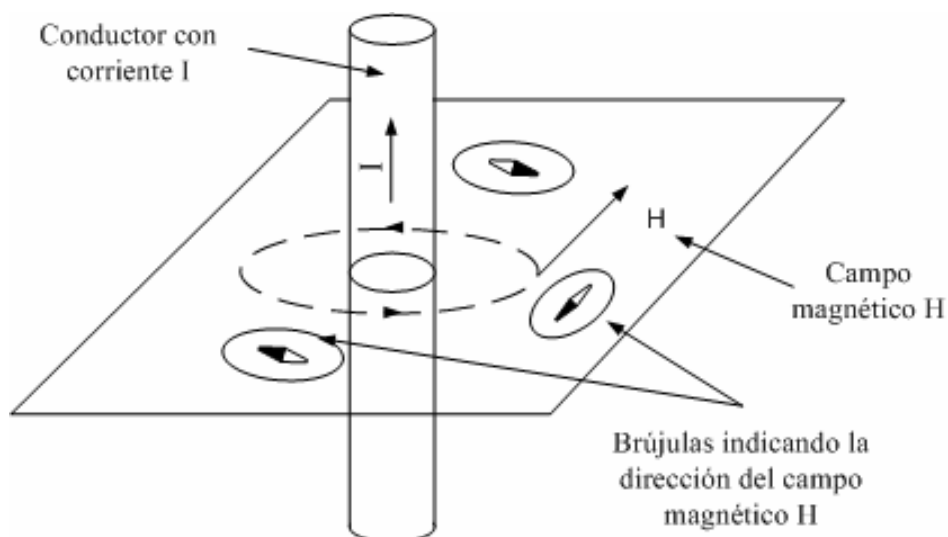
Generalidades sobre imanes permanentes y su caracterización

Si bien la explicación antigua era intuitivamente aceptable, resulta que las denominadas “masas magnéticas” no tienen una verdadera existencia física como se verá a continuación. Si un imán se parte en dos trozos con la pretensión de tener todas las masas magnéticas norte en uno y todas las sur en otro, resulta que, en lugar de ello, se transforma en dos imanes que a su vez tienen un norte y un sur:



La imposibilidad de separar físicamente las masas magnéticas era algo que la teoría de las masas magnéticas no podía explicar. Estaban faltando nuevos descubrimientos que gradualmente darían luz al tema, sentando las bases para un enfoque completamente distinto.

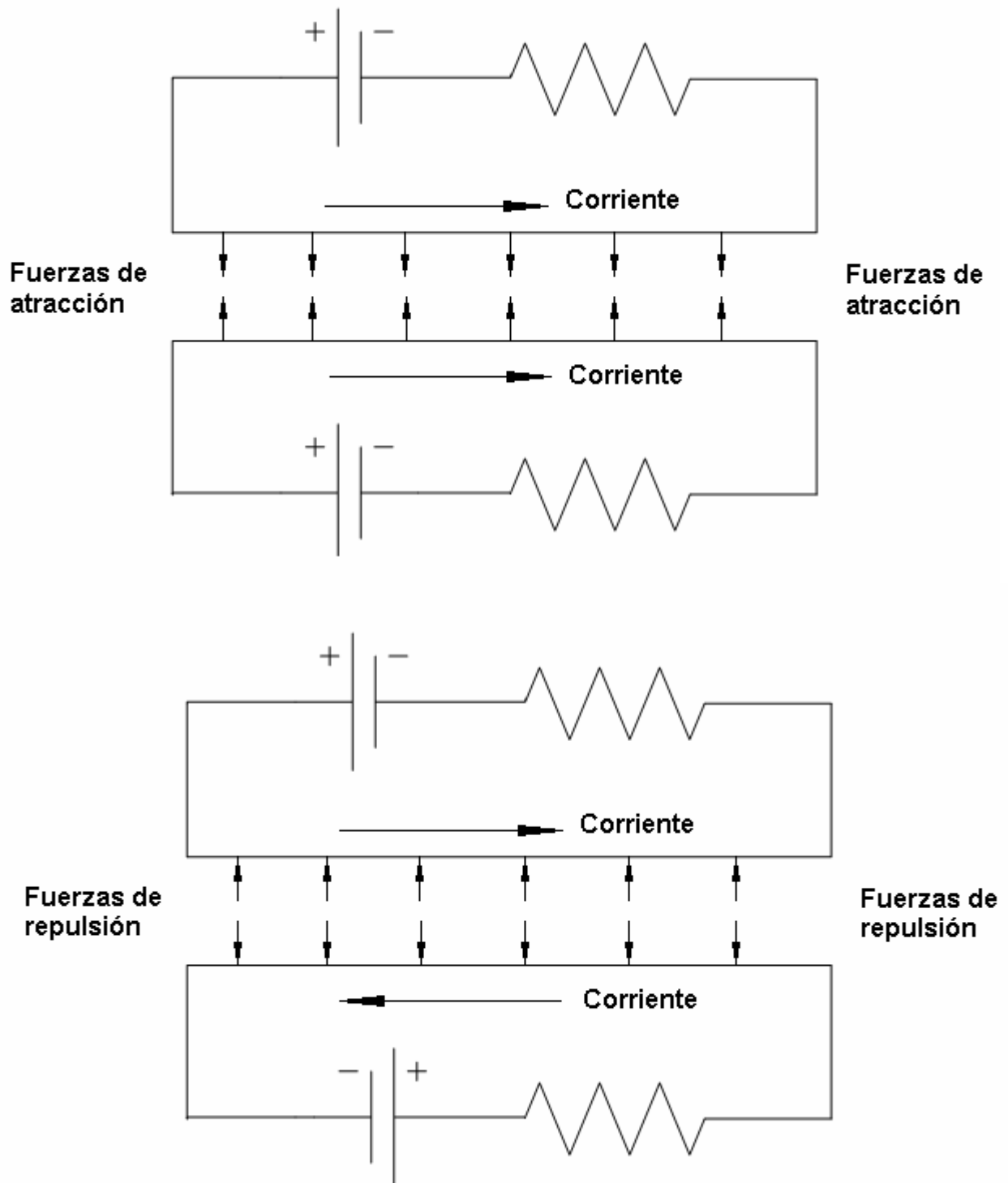
I.b) Experiencia de Oersted: En el año 1821, mientras realizaba experiencias con electricidad, Hans Christian Oersted descubrió que cuando hacía circular una corriente eléctrica por un conductor, este hecho provocaba la deflexión de una brújula que se encontraba en las proximidades. *Así comprobó que la circulación de una corriente eléctrica establece o induce un campo magnético en el espacio y que este campo magnético tiene efectos mecánicos sobre cuerpos magnetizados.*



Cuando en el conductor no circula corriente las brújulas indican la dirección del campo terrestre. Cuando circula corriente continua por el conductor, las brújulas se orientan como indica la figura. **De esta experiencia Oersted dedujo que cuando circula una corriente por un conductor rectilíneo se establece un campo magnético circunferencial alrededor de dicho conductor.**

Generalidades sobre imanes permanentes y su caracterización

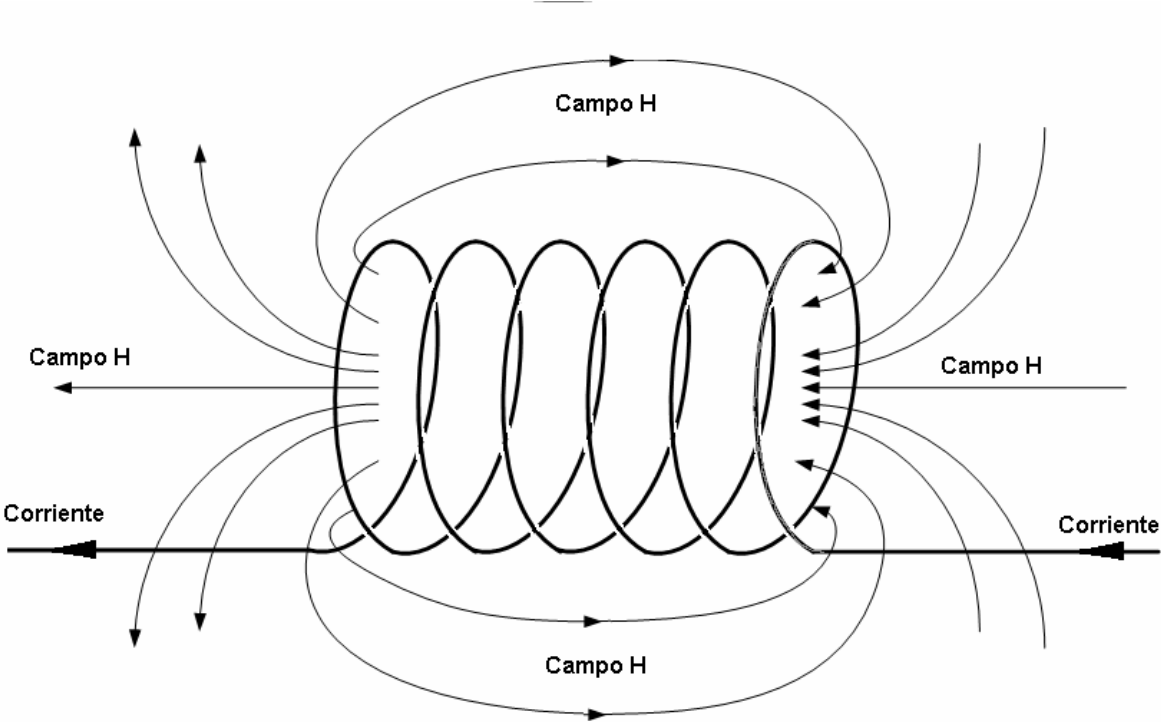
I.c) Experiencia de Ampere: Poco tiempo después **Ampere** descubrió que también existía un efecto mecánico de atracción o repulsión entre dos conductores recorridos por corrientes del mismo sentido o de sentidos opuestos respectivamente:



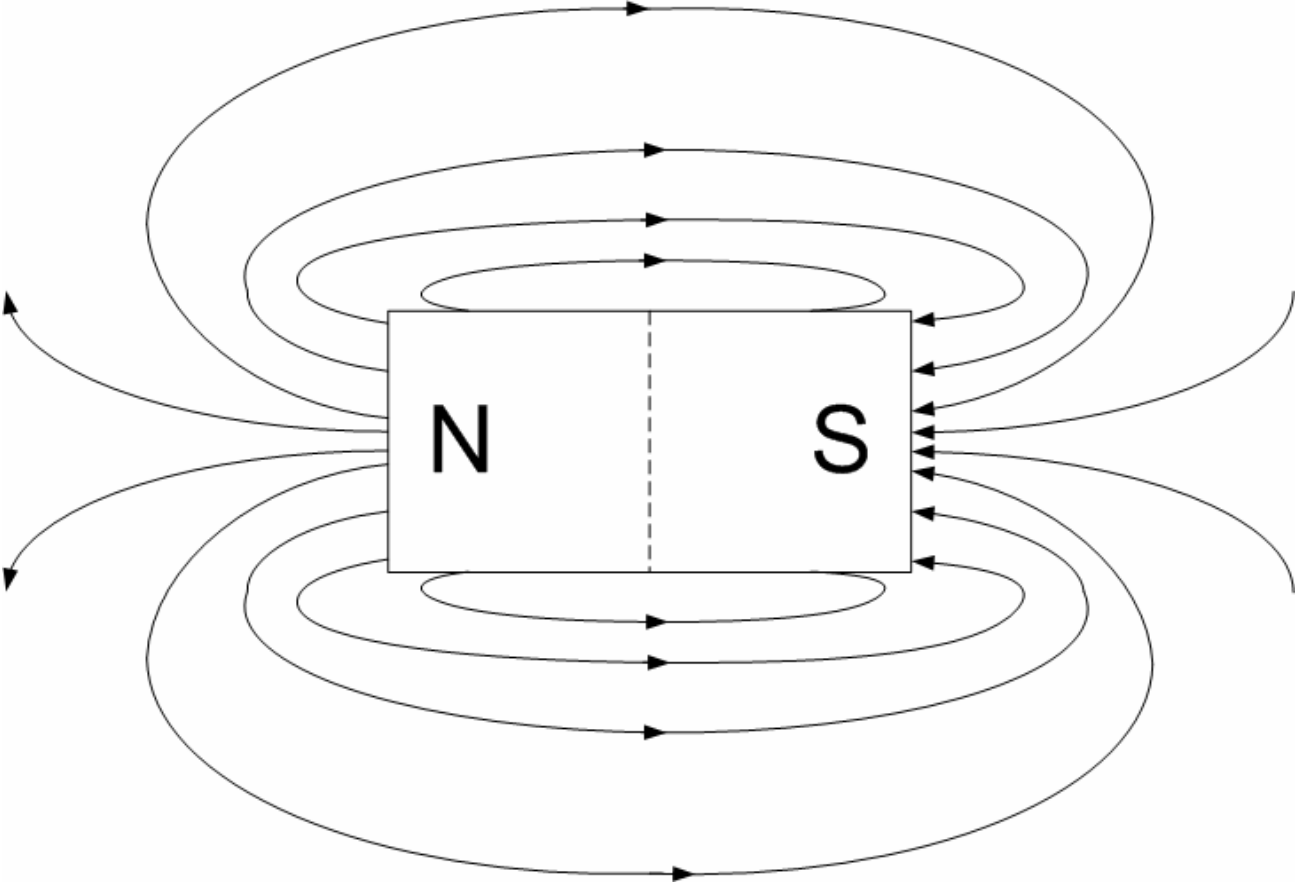
Las experiencias de Oersted y Ampere demostraron la vinculación entre magnetismo y electricidad. La circulación de corriente genera un campo magnético el cual interacciona mecánicamente, no sólo con cuerpos magnetizados, sino también con otro campo magnético generado por otra corriente.

Generalidades sobre imanes permanentes y su caracterización

Cuando la corriente circula por una bobina, el campo magnético adopta una configuración como la siguiente;



La configuración de campo de una bobina es análoga a la de un imán permanente:

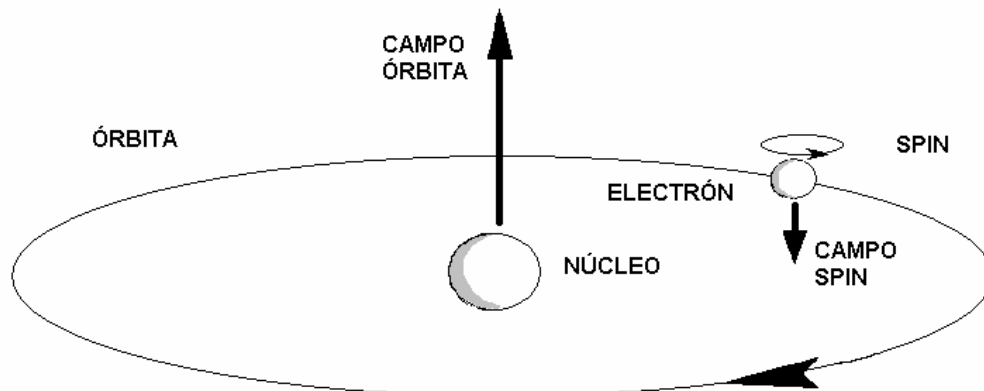


Generalidades sobre imanes permanentes y su caracterización

I.d) El magnetismo y la teoría atómica.

Los descubrimientos de las relaciones entre corrientes eléctricas y magnetismo, complementados con la profundización del conocimiento de la estructura interna del átomo en los siglos XIX y XX dieron los fundamentos para elaborar teorías que pudieran explicar el magnetismo que presentaban ciertos materiales. Estas teorías se esbozan en los párrafos siguientes.

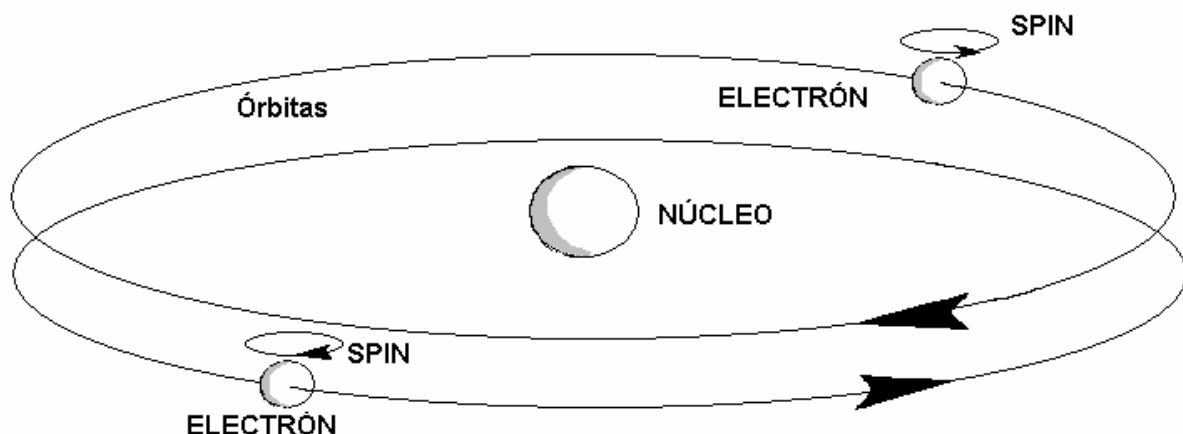
Dado que los electrones que orbitan el núcleo de un átomo pueden ser considerados como una corriente que circula por una espira microscópica, es de esperar que dicha corriente genere un campo magnético, de la misma forma que la corriente que circula por una espira real. También el spin de los electrones (giro sobre sí mismos) generaría un campo magnético.



De acuerdo a esta teoría, cada electrón generaría dos campos magnéticos, uno debido a su movimiento de traslación alrededor del núcleo y otro debido al giro sobre sí mismo. Así, el átomo de hidrógeno que consiste simplemente en un electrón girando alrededor de un protón, debería tener un campo neto y de esta forma reaccionar frente al campo magnético externo. Pero como los átomos de hidrógeno se agrupan en moléculas, resulta que cuando dos átomos se combinan, lo hacen de tal forma que los campos individuales de sus electrones se cancelan, dando un efecto macroscópico prácticamente nulo.

I.e) Electrones apareados y desapareados

Cuando dos electrones, ya sea en un átomo o en una molécula, se agrupan de forma tal que giran en sentido contrario en sus órbitas y sus spines son opuestos, provocando que el campo magnético resultante sea prácticamente nulo, se dice que son “**electrones apareados**”:



Los materiales que poseen la totalidad de sus electrones apareados se denominan diamagnéticos. Por otro lado, cuando en la molécula hay electrones desapareados, la misma posee un campo neto resultante. Los materiales formados por este tipo de moléculas se denominan paramagnéticos o ferromagnéticos y tienen, en mayor o menor medida, la posibilidad de magnetizarse en el mismo sentido del campo externo.

Si bien todos los elementos de la tabla periódica tienen la propiedad de orientar sus campos magnéticos en alguna medida en relación a un campo externo, la inmensa mayoría (entre diamagnéticos y paramagnéticos) sólo presenta efectos muy débiles. Únicamente los elementos ferromagnéticos (hierro, cobalto y níquel) tienen la propiedad de magnetizarse muy por encima del campo aplicado. Esto se debe a

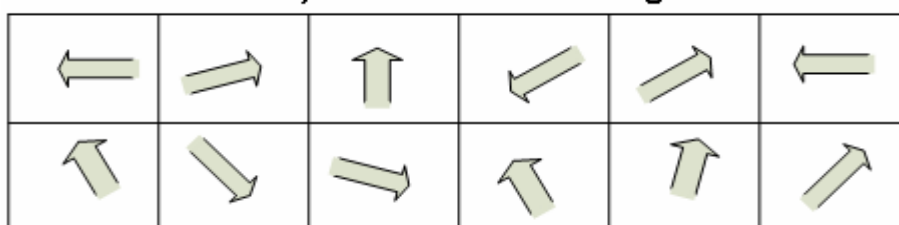
Generalidades sobre imanes permanentes y su caracterización

que además de presentar electrones desapareados, estos materiales tienen la propiedad de agrupar grandes cantidades de moléculas con sus orbitales ordenados de forma tal, que los campos de los mismos se combinan aditivamente dando una resultante a nivel macroscópico. Así, mientras que el diamagnetismo y el paramagnetismo son propiedades que se definen a nivel atómico o molecular, el ferromagnetismo sólo se explica por una propiedad atómica, que tiene trascendencia a nivel molecular, pero que además está ligada a fenómenos más masivos que se extienden a conjuntos muy grandes de moléculas.

I.f) La teoría de los dominios magnéticos:

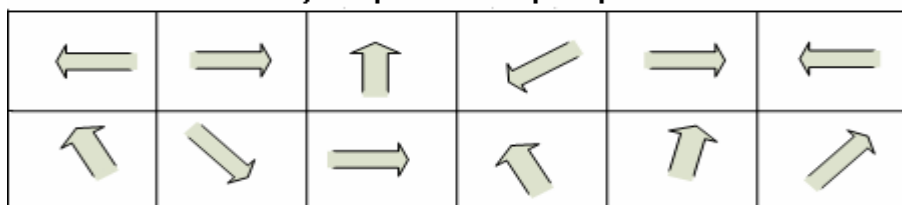
Como se expresó en el punto anterior, las propiedades magnéticas superlativas que presentan los materiales ferromagnéticos no pueden ser explicadas solamente a partir de los campos individuales que presentan sus átomos. Dichas propiedades están relacionadas además a la capacidad de estos elementos de orientar sus orbitales dentro del material. Una de las teorías desarrolladas para explicar este singular comportamiento, es la teoría de los **dominios magnéticos**. Según ésta, dentro de un material ferromagnético existen zonas denominadas “dominios” dentro de las cuales las moléculas están ordenadas de tal forma que sus campos netos individuales están alineados. En un material virgen, estos dominios tienen orientaciones aleatorias resultando en un campo macroscópicamente nulo.

I) Material en estado original



Cuando se aplica un campo externo, los dominios que poseen una orientación similar a la del campo aplicado comienzan a ordenarse según el campo aplicado, comenzando por aquellos que presentan una orientación más favorable.

II) Pequeño campo aplicado

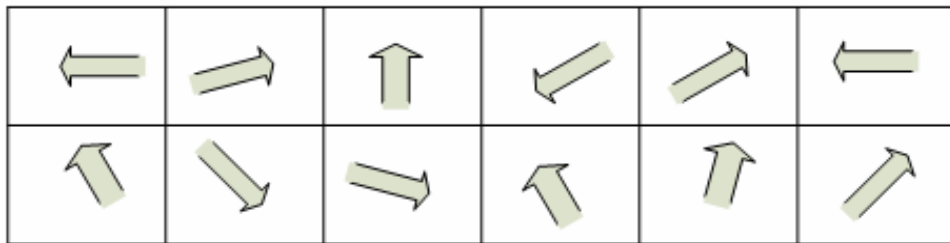


A medida que va aumentando el campo aplicado hay cada vez menos dominios para reorientar y a su vez, los dominios aún no reorientados son los que presentaban el estado inicial más desfavorable. Finalmente, llega un momento en que ulteriores aumentos del campo aplicado ya no incrementan la magnetización; esto es lo que se denomina saturación del material.

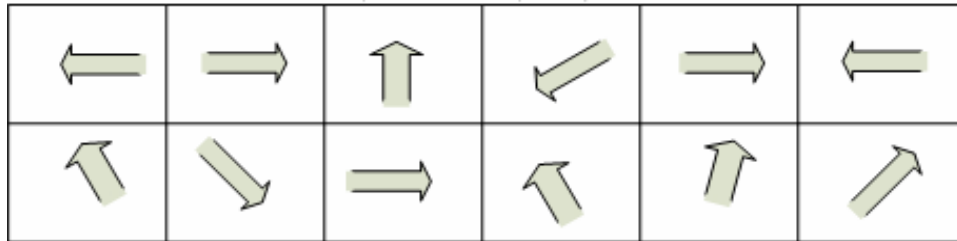
La teoría de los dominios está apoyada por la experiencia que se describe a continuación. Si se efectúa un corte plano de un material ferromagnético no magnetizado, se pule la sección y se espolvorea con material ferromagnético muy finamente dividido, puede observarse mediante un microscopio que las virutas se agrupan en pequeñas zonas con orientaciones individuales distintas. Aplicando un campo magnético externo puede observarse como van evolucionando los dominios. Cabe aclarar que sólo pueden observarse mediante el método descrito los dominios de los materiales magnéticos blandos (aquellos que pierden la magnetización al desaparecer el campo aplicado). Los dominios de los materiales magnéticos duros (los que retienen la magnetización una vez desaparecido el campo externo) son mucho más pequeños y sólo pueden ser observados mediante otras técnicas, como la utilización de luz polarizada.

El ferromagnetismo no se explica sólo por las propiedades de átomos individuales, sino por su comportamiento macroscópico dentro del material. Los átomos individuales tienen la propiedad de orientar sus orbitales combinando en forma aditiva sus campos magnéticos individuales, sin cambiar sus posiciones dentro de la red cristalina.

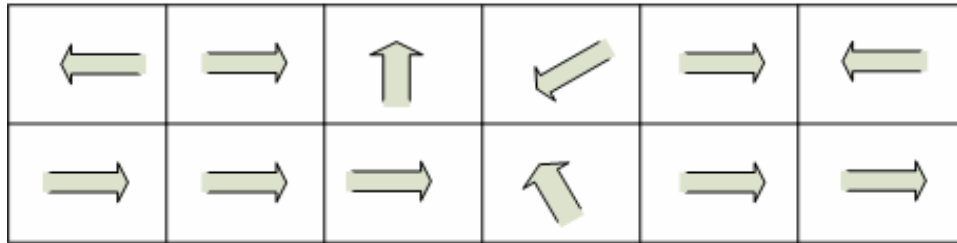
I) Material en estado original



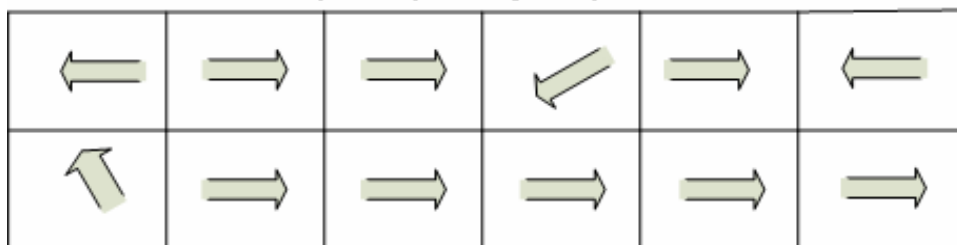
II) Pequeño campo aplicado



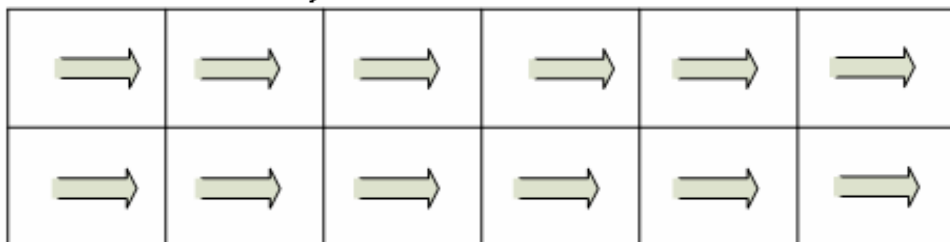
III) Campo mediano aplicado



IV) Campo mayor aplicado



V) Material Saturado



El proceso de progresiva alineación de los dominios según el campo aplicado puede interpretarse también como el crecimiento de dominios individuales, orientados más favorablemente, a expensas de los circundantes

De acuerdo a la teoría expuesta, el campo magnético que exhiben los imanes es originado en corrientes sub-microscópicas que hacen las veces de pequeñas bobinas que combinan aditivamente sus campos individuales. Así se explica el antiguo dilema de porqué no podían separarse las masas magnéticas sur y norte.

Generalidades sobre imanes permanentes y su caracterización

I.g) Concepto de permeabilidad magnética. Clasificación de los materiales magnéticos.

Cuando un material cualquiera es sometido a la acción de un campo magnético de un valor determinado, teóricamente pueden ocurrir tres cosas:

- 1) El campo magnético que se establece dentro del material es igual al campo aplicado.
- 2) El campo magnético que se establece dentro del material es menor que campo aplicado.
- 3) El campo magnético que se establece dentro del material es mayor que el campo aplicado.

1) Este material no presentaría respuesta alguna al campo magnético, por lo que no sería atraído ni repelido por un imán. La relación o cociente entre el campo total que existe dentro del material y el campo magnético aplicado externamente, se denomina **permeabilidad magnética**. Un material tal que el campo magnético en su interior es igual al campo aplicado, tendría permeabilidad magnética unitaria. En la práctica, la permeabilidad exactamente unitaria es una propiedad que sólo tiene el vacío, ya que todos los materiales, en mayor o menor medida, presentan algún grado de magnetización.

2) Si el campo resultante dentro del material es menor que el campo aplicado, la permeabilidad es menor que 1. Este tipo de materiales, denominados **diamagnéticos**, tienen la propiedad de magnetizarse negativamente es decir, oponiéndose al campo externo, por lo que serían repelidos por un imán permanente. Cabe aclarar que la magnetización que presentan estos materiales es muy débil (Por ejemplo, la permeabilidad del agua es 0,999991) y desaparece junto con el campo externo aplicado. Sin embargo, aplicando campos muy intensos los efectos pueden ser fácilmente comprobables, como el famoso experimento en el que se hace levitar una rana en un campo muy intenso generado por bobinas de material superconductor.



Existe una gran cantidad de elementos diamagnéticos, pudiendo citarse como ejemplo a metales como el cobre, la plata, el oro, el mercurio, etc., como así también gases, como los gases raros, el nitrógeno, etc.

3) En este caso la permeabilidad es mayor que 1. Estos materiales tienen la propiedad de magnetizarse en el mismo sentido del campo aplicado, lo cual redundaría en un aumento del campo interno, que es la suma del campo externo más la magnetización propia. Entre los materiales con permeabilidad magnética mayor que la unidad pueden distinguirse dos grupos muy diferenciados:

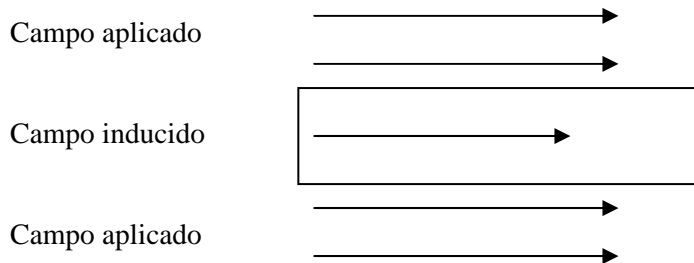
- **Materiales Paramagnéticos:** se magnetizan en forma débil (Por ejemplo, la permeabilidad del aluminio es 1,000022) y positiva (en el mismo sentido del campo aplicado, por lo que son atraídos por el imán). Pueden citarse como ejemplos de materiales paramagnéticos el platino, el osmio, el litio, el oxígeno, etc.
- **Materiales Ferromagnéticos:** Si se considera la tabla periódica de los elementos en su conjunto, puede decirse que del orden de la mitad de los elementos que la constituyen son diamagnéticos y la otra mitad son paramagnéticos. Tanto unos como otros, poseen permeabilidades muy próximas a la unidad, es decir que si bien se magnetizan, lo hacen muy débilmente. Pero de todos los elementos de la tabla, hay tres que presentan un comportamiento magnético radicalmente distinto: es la llamada tríada o terna del hierro, el cobalto y el níquel. Estos tres elementos tienen la extraordinaria propiedad de magnetizarse en una proporción enormemente mayor que todos los restantes. Particularmente el hierro presenta una permeabilidad magnética del orden de 10^4 , es decir que desarrolla en su interior un campo magnético 10000 veces superior al que se le aplica externamente.

Generalidades sobre imanes permanentes y su caracterización

Resumen

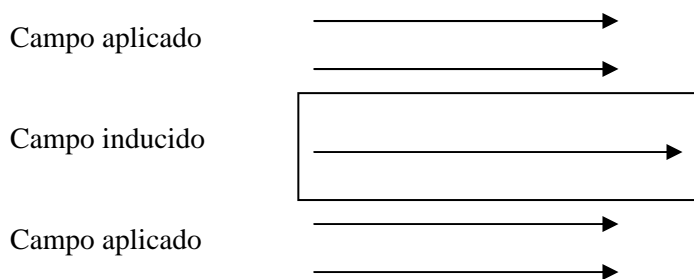
- **Materiales diamagnéticos:**

Se magnetizan en forma débil y negativa (se magnetizan oponiéndose al campo aplicado).



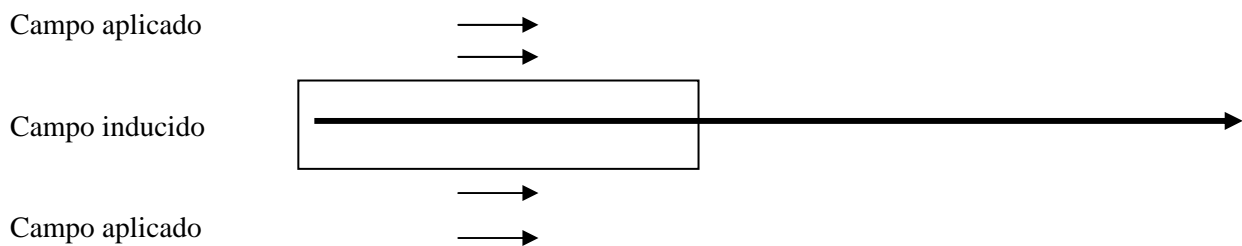
- **Materiales paramagnéticos:**

Se magnetizan en forma débil y positiva (se magnetizan reforzando al campo aplicado).



- **Materiales ferrromagnéticos:**

Se magnetizan en forma intensa y positiva (refuerzan en gran proporción el campo aplicado).



Nota: existen otras categorías como los materiales ferrimagnéticos y antiferrimagnéticos que no consideraremos en este trabajo.

Capítulo II: Historia de los imanes:

El fenómeno del magnetismo ya fue advertido por los griegos varios siglos antes de Cristo en ciertos minerales encontrados en la naturaleza, aunque los primeros estudios científicos acerca de tema recién se realizan en el siglo XVII. Sin embargo, mucho antes de esto la humanidad hizo amplio uso de un trascendente invento basado en un imán permanente: la brújula. Si bien los chinos alegan haber utilizado la brújula 2500 años antes de cristo, en occidente los primeros usos documentados de la misma datan del siglo XII. Pero, recién en el siglo XVIII, con el avance de la metalurgia y el desarrollo de los aceros aleados, aparecen las primeras generaciones imanes permanentes específicamente fabricados como tales. El siglo XX marca un enorme progreso en el tema ya que se desarrolló un amplio conjunto de compuestos para imanes permanentes, muchos de los cuales siguen siendo fabricados actualmente. Se enumeran a continuación, en orden cronológico, los compuestos más notables de imanes permanentes que fue desarrollando la tecnología:

Imanes de acero al carbono:

Los aceros de medio y alto carbono poseen la propiedad de magnetizarse por medios mecánicos o físicos y de retener en cierta medida este magnetismo. Golpes, deformación plástica, tensiones mecánicas elevadas, etc. son ejemplos de acciones mecánicas que pueden inducir magnetización de aceros. La aplicación de campo magnético externo, la circulación de corriente, etc., son ejemplos de acciones físicas que pueden generar el mencionado efecto. Con el avance de la metalurgia del acero se exploró el efecto de diversos elementos aleantes, lo que permitió descubrir que la adición de cromo, tungsteno, etc., además de modificar las propiedades mecánicas, también modificaba su capacidad de retener la magnetización. Los diversos grados de imanes de acero que se desarrollaron de esta forma en los siglos XVIII y XIX, fueron la única alternativa tecnológica práctica disponible, hasta que se crearon imanes más avanzados recién en el siglo XX. Diversas máquinas eléctricas de la época fueron posibles merced a este tipo de imanes, como por ejemplo los llamados “magnetos”(dispositivos que generaban la alta tensión para el encendido en los motores a explosión).

Ejemplos de imanes de acero:	Acero al cromo	3% Cr, 0,9% C, 0,3 % Mn.
	Acero al tungsteno	6% W, 0,7% C, 0,3% Cr.
	Acero 15 cobalto	15% Co, 5% Cr, 1% C, 1% W, 1 % Mo.

Imanes de Alnico:

“Alnico” es el nombre genérico de una familia de imanes permanentes que comenzaron a desarrollarse en la década de 1930 y que recibió esta denominación porque generalmente, además de hierro, estos imanes contienen aluminio, níquel y cobalto como elementos de aleación. Existen diversos grados de Alnico dependiendo de la tecnología de fabricación y de las proporciones que guarden los elementos mencionados (pueden contener además cobre). Su aspecto es metálico, similar al de un acero, aunque mecánicamente son más frágiles. Cada grado posee propiedades particulares que son de interés para un uso determinado. Estos imanes constituyeron un importante avance respecto a los de acero al carbono (mayor resistencia a la desmagnetización o sea, coercitividad) y presentan algunas propiedades que los hacen actualmente insustituibles en ciertos usos particulares (Ejemplo: instrumentos de medición, donde se requiere independencia de las propiedades magnéticas con respecto a la temperatura, además de estabilidad en el tiempo).

Ejemplos:	Alnico 1	59 % Fe, 21 % Ni, 12 % Al, 5 % Co, 3 % Cu.
	Alnico 4	56 % Fe, 27 % Ni, 12 % Al, 5 % Co.
	Alnico 5A	50 % Fe, 15 % Ni, 8 % Al, 24 % Co, 3 % Cu.

Imanes de ferrite:

Las ferritas o ferrites deben su nombre a la denominación en inglés del compuesto químico del que están hechas (Ej.: Barium ferrite, $BaFe_{12}O_{19}$). Presentan un color gris oscuro, son frágiles e inmunes a la corrosión. Estos compuestos superaron ampliamente la coercitividad del Alnico y a un costo mucho menor. Desarrolladas a partir de 1950, son actualmente insustituibles para gran número de aplicaciones en la cuales el costo es una variable importante, pero el volumen y peso no son muy limitantes. Ejemplos de utilización son los parlantes, los motores de corriente continua para industria automotriz, etc.

Ejemplos:	Ferrita de Bario	$BaO \cdot 6Fe_2O_3$ (13,8 % BaO, 86,2 % Fe_2O_3).
	Ferrita de Estroncio	$SrFe_{12}O_{19}$

Generalidades sobre imanes permanentes y su caracterización

Imanes de tierras raras:

Antes del desarrollo de esta nueva generación de imanes, la tecnología disponía en la práctica de dos opciones: los diversos grados de Alnico (alta remanencia y baja coercitividad) y ferritas (baja remanencia y alta coercitividad). Con los imanes de tierras raras la tecnología logra condensar en un solo compuesto las mejores prestaciones de las generaciones anteriores de imanes, obteniendo imanes de alta remanencia y alta coercitividad. Los primeros imanes de tierras raras que se desarrollaron (1960) fueron los de **Samario-Cobalto**, que presentaban propiedades magnéticas superlativas en relación los Alnico y las ferritas, pero que tenían el inconveniente de ser muy costosos. De cualquier forma, sus propiedades magnéticas les permitían reemplazar a las viejas generaciones con un peso mucho menor, lo que los hizo particularmente aptos en aquellas utilidades donde la disminución de peso (Por ejemplo en la industria aeronáutica) o la miniaturización (Por ejemplo motores de Discman) son de tal importancia que justifican el incremento del precio.

Posteriormente, en 1984 aparece comercialmente un nuevo compuesto basado en una tierra rara, el llamado **Neodimio-Hierro-Boro**, que supera las propiedades magnéticas del samario cobalto a precio menor, aunque con una temperatura máxima de operación también menor. El compuesto básico del neodimio-hierro-boro ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$) presenta algunas limitaciones para su uso práctico (además de desmagnetizarse a temperaturas menores que otros compuestos, presenta una baja resistencia a la corrosión) que se fueron mejorando mediante ajustes de la composición y otros recursos.

Tanto los imanes de samario-cobalto como los de neodimio-hierro-boro presentan diversos grados comerciales que les permiten adaptarse a distintas condiciones de utilización.

Capítulo III: Ecuaciones fundamentales y sistemas de unidades magnéticas.

Quien haya tenido la necesidad de realizar cálculos relacionados con magnitudes magnéticas habrá comprobado que inmediatamente aparecen algunas dificultades. La primera dificultad es que las magnitudes magnéticas pueden expresarse en tres sistemas distintos de unidades, el cgs, el mks y el Sistema Internacional. Para colmo, del sistema mks, hay dos versiones: el mks y el mks racionalizado. El Sistema Internacional no es en rigor un cuarto sistema sino que adopta para el magnetismo las unidades del mks racionalizado. Lamentablemente, como ocurre en otros campos, aunque la mayoría de los países hayan adoptado oficialmente el Sistema Internacional de Unidades, los restantes sistemas siguen existiendo, tanto en el campo de la enseñanza y la ciencia, como en la técnica y la industria. Por tal motivo, dado que quien tenga que trabajar en este campo deberá tomar indefectiblemente contacto con diferentes sistemas de unidades, en este seminario, si bien se utilizarán principalmente las unidades del Sistema Internacional se hará también referencia a otras unidades. Para colmo de la confusión, el pasaje de un sistema a otro no se limita a la conversión de unidades mediante un factor numérico porque algunas magnitudes están definidas con distinto criterio.

III.1) Algunas ecuaciones relacionadas a las magnitudes magnéticas:

III.1.a) Definición de permeabilidad.

La permeabilidad magnética de un material se define como el cociente entre el campo total que se induce dentro del material (inducción magnética B) y el campo magnético aplicado (campo H). La ecuación que lo expresa matemáticamente es la siguiente:

$$\mu = \frac{B}{H} \quad \text{O lo que es lo mismo:} \quad B = \mu \cdot H$$

Dicho de otra forma, en un campo magnético de magnitud H, se introduce un material con permeabilidad μ , por lo que dentro de dicho material se establece un campo magnético total B cuya magnitud es μ veces el campo H aplicado.

III.1.b) Permeabilidad en el sistema c.g.s.:

Comenzaremos por expresar esta ecuación en unidades del sistema cgs, por resultar más intuitivo:

$$B \text{ [Gauss]} = \mu \cdot H \text{ [Oersted]}$$

Gauss: Unidad de medición de la inducción magnética en el sistema c.g.s.

Oersted: Unidad de medición de campo magnético H en el sistema c.g.s.

La permeabilidad en el sistema c.g.s. es un valor adimensional que expresa la relación que existe entre el campo inducido (B) y el campo inductor (H). En el vacío, dado que dicho medio no se opone al campo aplicado ni lo refuerza, la permeabilidad es unitaria y por lo tanto $B = H$. El Gauss y el Oersted son iguales en magnitud y poseen la misma dimensión. Es decir que ambas unidades, aunque son dimensional y numéricamente iguales y miden una misma magnitud física (campo magnético), tienen distinto nombre. El sentido de esto es diferenciar conceptualmente el campo magnético inductor, del campo magnético total que se induce dentro de un material. Por tal motivo el campo magnético B se suele denominar también “inducción magnética”, aunque también se lo denomina “densidad de flujo magnético”, por el motivo que veremos más adelante. Entonces, en el vacío, un campo de 1 Oersted induce un campo de 1 Gauss:

$$1 \text{ G} = 1 \text{ Oe}$$

Generalidades sobre imanes permanentes y su caracterización

III.1.c) Permeabilidad en el Sistema Internacional:

En el Sistema Internacional la inducción magnética B se mide en Tesla y el campo H en A/m (esta última unidad no tiene nombre específico, aunque alguna vez se propuso denominarlo “Lenz”). Ambas magnitudes no son ni numérica, ni dimensionalmente iguales. Por ende, la permeabilidad no puede ser ni unitaria, ni adimensional. En el Sistema Internacional:

$$B = \mu.H = \mu_0\mu_r.H$$

Donde:

B [Tesla]: Inducción magnética

H [A/m]: Campo inductor

μ_0 = permeabilidad magnética del vacío = $4\pi \times 10^{-7}$ H/m = $4\pi \times 10^{-7}$ Wb/A.m

μ_r = permeabilidad relativa del medio relativa al vacío, igual a la permeabilidad en el sistema cgs, igual a la unidad para el vacío.

En el vacío y con un campo H de 1 Oe = 79,557 A/m:

$$B = 1 \text{ Gauss} = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb/A.m} \times 1 \times 79,557 \text{ A/m} = 1 \times 10^{-4} \text{ Wb/m}^2 = 10^{-4} \text{ Tesla}$$

De donde se deduce que:

1 Gauss = 10^{-4} T

ó

1 T = 10^4 G

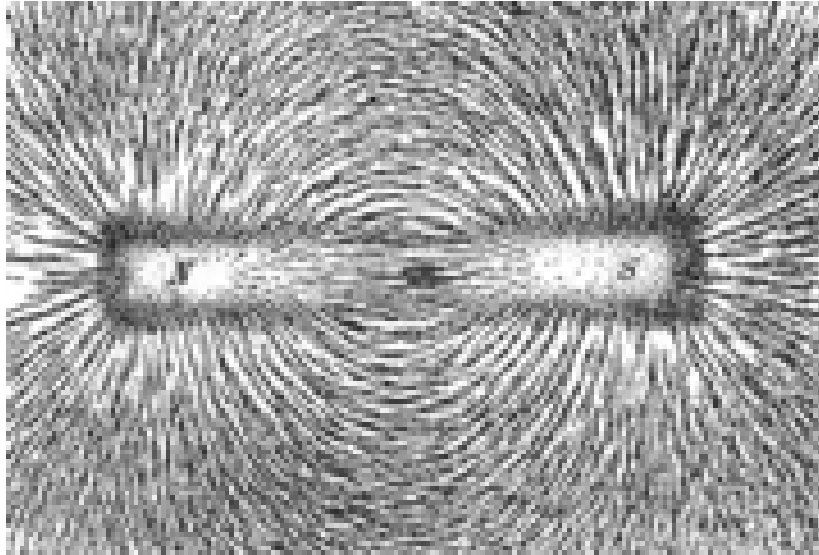
III.1.d) Tabla resumen comparativa de permeabilidad en sistema c.g.s vs. Sistema Internacional:

Sistema c.g.s	Sistema internacional
$B = \mu.H$	$B = \mu.H$
En el vacío: $B = H$	En el vacío: $B = \mu_0.H$
Permeabilidad magnética del vacío = 1	Permeabilidad magnética del vacío = μ_0
Permeabilidad magnética adimensional	$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m = $4\pi \times 10^{-7}$ Wb/A.m
En un medio cualquiera: $B = \mu.H$	En un medio cualquiera: $B = \mu_0.\mu_r.H$
μ = Parámetro adimensional	μ_r = Parámetro adimensional
μ del sistema c.g.s = μ_r del sistema internacional	$\mu = \mu_0 . \mu_r$

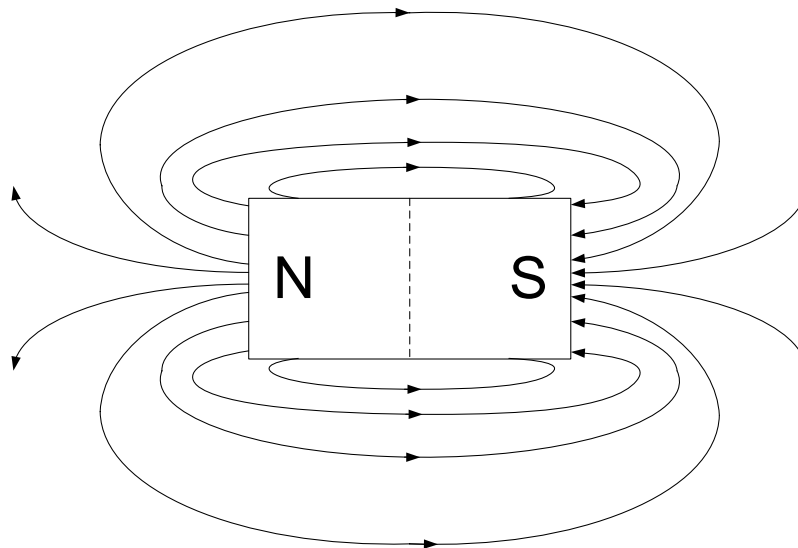
Generalidades sobre imanes permanentes y su caracterización

III.1.e) Idea de “línea de fuerza”:

Expondremos a continuación un concepto que si bien es antiguo, contribuye a la comprensión del tema. Si se espolvorean virutas de hierro finamente divididas sobre un papel y se acerca por debajo de éste un imán en forma de barra, se observa el efecto que muestra la figura siguiente:



Por un lado las virutas se ordenan de tal forma que se reconoce fácilmente la sección rectangular del imán que se encuentra por debajo del papel. Por otro lado, las virutas se agrupan formando cordones o líneas que van desde un polo magnético hasta el otro mostrando la dirección del campo magnético en los alrededores del imán. De este experimento surge una forma muy intuitiva de representación gráfica de los campos magnéticos la cual consiste en dibujar un conjunto de “líneas de fuerza” que indican la dirección del campo magnético, dándose además una idea de la intensidad del mismo por la “densidad de líneas” en cada lugar:

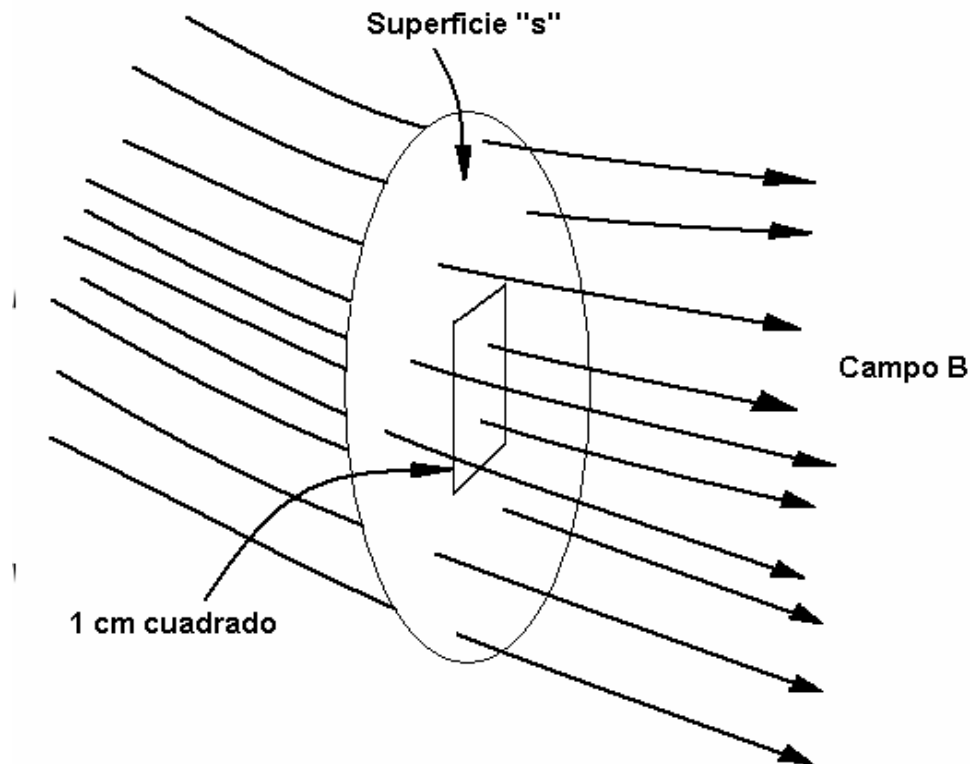


Por este motivo, antiguamente el campo magnético B se medía en “líneas por centímetro cuadrado”, por lo que:

$$1 \text{ Gauss} = 1 \text{ línea} / \text{cm}^2$$

III.1.f) Flujo y densidad de flujo.

Sigamos con la idea del punto anterior. Así como se puede imaginar al campo B en un punto determinado como densidad de líneas, o sea cantidad de líneas por unidad de superficie, también se podría imaginar que una superficie abierta cualquiera sería atravesada por una cantidad determinada de líneas. La cantidad de líneas de fuerza que atraviesan una superficie determinada se denomina flujo magnético. En una visión simplificada, la cantidad de líneas que atraviesan una superficie puede considerarse que es igual al producto de la densidad de líneas multiplicada por el área considerada.



En la figura anterior podría decirse que la densidad de líneas es de 2 líneas/cm². Ahora bien, la cantidad total de líneas que atraviesan la superficie "s" es de 10 líneas. Si aceptamos que en la figura anterior las líneas de fuerza están representadas bajo el sistema c.g.s. tendremos que el campo magnético B es de 2 Gauss y que el flujo a través de toda la superficie es de 10 líneas. La unidad "línea" para el flujo magnético dejó de utilizarse hace muchos años. Sólo hacemos referencia a ella a fines didácticos. Actualmente la antigua "línea" del sistema c.g.s. se denomina Maxwell:

$$1 \text{ G} = 1 \text{ Maxwell} / \text{cm}^2 = 1 \text{ Mx} / \text{cm}^2$$

En la figura anterior, el flujo magnético a través de la superficie "s", expresado en el sistema c.g.s. sería entonces de 10 Maxwell.

Según una definición más rigurosa, el flujo magnético es el flujo del vector campo magnético a través de una superficie determinada, que tiene en cuenta, además de la densidad de flujo en cada punto, la orientación del área considerada en relación a la dirección del campo:

$$\phi = \iint_s B \cdot dA$$

La cuantificación del flujo magnético es muy importante desde el punto de vista tecnológico. La tensión eléctrica que se induce en una espira (o en un bobinado) está directamente relacionada con el flujo magnético concatenado. La cupla de un motor está directamente relacionada con el flujo magnético en los polos.

Generalidades sobre imanes permanentes y su caracterización

III.1.g) Tabla resumen comparativa de flujo en el sistema c.g.s vs. Sistema Internacional:

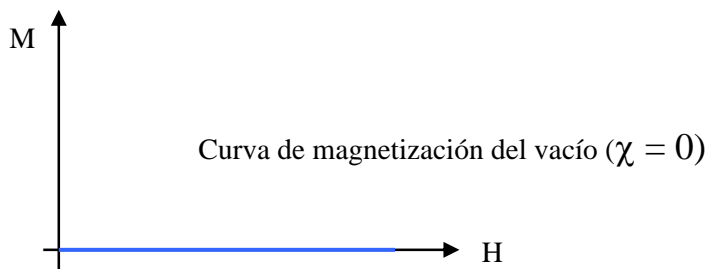
Sistema c.g.s	Sistema internacional
Flujo [Maxwell]	Flujo [Weber]
Inducción magnética o Densidad de flujo [Gauss] o [Maxwell / cm ²]	Inducción magnética o Densidad de flujo [Tesla] o [Wb / m ²]
$1 \text{ Mx} = 1 \text{ G.cm}^2 = 10^{-4} \text{ T} \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 = 10^{-8} \text{ Wb}$	

III.1.h) Ecuación de la magnetización:

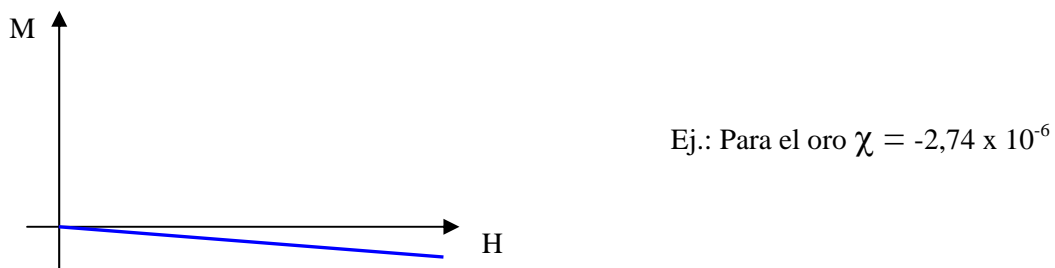
Es la ecuación conceptualmente más simple:

$$M = \chi \cdot H \quad \text{o} \quad \chi = M / H$$

Esta ecuación expresa que la magnetización de un material es proporcional al campo aplicado y a un parámetro denominado susceptibilidad (χ) que es característico de cada material. La ecuación anterior es vectorial, pudiendo adoptar el parámetro adimensional χ valores positivos o negativos. Si se representa en un sistema de coordenadas cartesianas la magnetización del material vs. el campo aplicado, la susceptibilidad magnética χ resulta ser la pendiente de la curva M vs. H. Cabe aclarar que M es la magnetización propia o intrínseca del material. Es el campo que genera el material como producto de la modificación de la orientación de los orbitales electrónicos de los átomos y moléculas que lo componen. Así, por ejemplo, la **susceptibilidad del vacío es nula**, ya que cualquiera sea el campo aplicado, el vacío no puede reforzarlo ni disminuirlo:

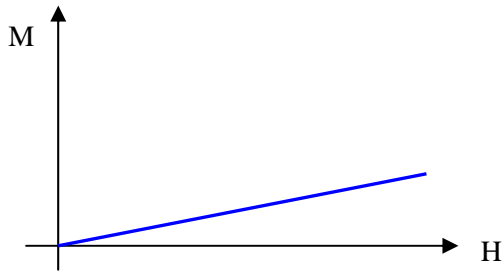


La susceptibilidad de los **materiales diamagnéticos es pequeña y negativa**:



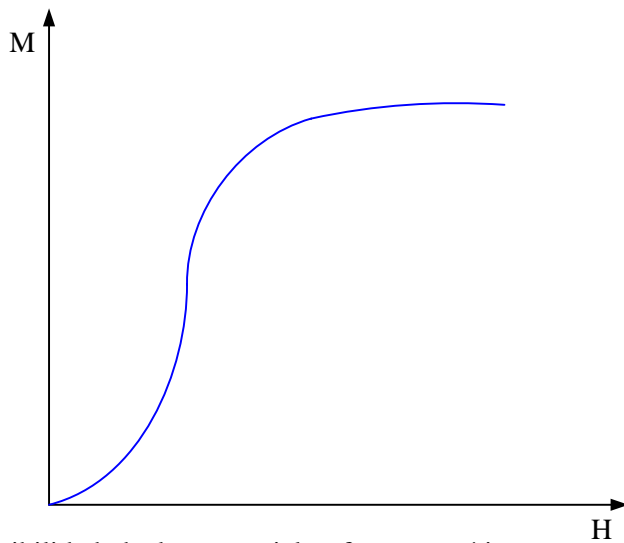
Generalidades sobre imanes permanentes y su caracterización

La susceptibilidad de los materiales **paramagnéticos es pequeña y positiva:**



Ej.: Para el platino $\chi = 21 \times 10^{-6}$

La susceptibilidad de los **materiales ferromagnéticos es grande y positiva:**



Ej.: Para el cobalto $\chi = 250$

La susceptibilidad de los materiales ferromagnéticos, por estar ligada a otros mecanismos, presenta un comportamiento alineal. Como se observa en la figura, para valores bajos de H, χ (pendiente de la curva M-H) es pequeña, luego aumenta y finalmente llega a una saturación, es decir que ya no aumenta más frente a ulteriores aumentos de H. En este punto ya se han alineado con el campo H todos los dominios del material y la magnetización llega a la llamada magnetización de saturación que es un parámetro característico de cada material ferromagnético.

Generalidades sobre imanes permanentes y su caracterización

III.1.i) Ecuaciones de la inducción magnética (Ecuación de Sommerfield):

Si bien la idea de la magnetización intrínseca del material es simple, resulta que en la práctica dicha magnitud no puede ser medida directamente. Como para que el material se magnetice es necesario aplicarle un campo magnético, resulta que cuando aparece la magnetización intrínseca, ésta está necesariamente superpuesta al campo inductor. Como ambas magnitudes son físicamente iguales, no es posible en este estado distinguir una de la otra. Por tal motivo se define la inducción magnética B , como el campo total resultante dentro de la muestra, que resulta de la suma del campo H inductor, más la magnetización que el campo H induce en el material. Como el campo H aplicado es conocido y el campo B puede ser medido, la magnetización M se calcula a partir de la diferencia de ambos valores.

Expresando la idea anterior en una ecuación:

$$B = H + M \quad \Rightarrow \quad M = B - H$$

Nota 1: Las ecuaciones anteriores son válidas para el sistema cgs.

Nota 2: Las ecuaciones anteriores también pueden verse bajo la forma $B = H + 4\pi M$. El factor 4π se introduce con el objeto de que los valores de susceptibilidad del sistema c.g.s., que se supone son parámetros adimensionales que caracterizan un material, coincidan con los del Sistema Internacional, que es como dijimos un m.k.s racionalizado (factor 4π).

B = Densidad de flujo magnético, Inducción Magnética, Campo B , es el campo total dentro del material, que es la suma de:

H = Campo magnético, Intensidad de Campo Magnético, Fuerza magnetizante, Campo H , es el campo magnético inductor originado, por ejemplo, en la corriente que circula por una bobina o por un conductor, etc.

M = Magnetización, es el campo magnético generado por el material, por la orientación de los campos magnéticos generados por corrientes a nivel atómico o molecular, por el movimiento de electrones en su órbitas o por el giro sobre sí mismos (spin).

Considerando que la magnetización es el producto del campo H por la susceptibilidad:

$$B = H + M = H + \chi H = (1+\chi) H$$

El parámetro $(1+\chi)$ es lo que se denomina permeabilidad magnética del material:

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

Por lo que la ecuación anterior queda:

$$B = \mu.H$$

El significado de esta ecuación es el siguiente:

La ecuación $B = H + M$ ya descripta, puede verse bajo distintas formas dependiendo del sistema de unidades utilizado y de la nomenclatura:

$$B = H + Bi$$

$$B = H + 4\pi M$$

$$B = \mu_0 (H + M) = \mu_0 (H + \chi H) = \mu_0 (1 + \chi)H = \mu_0 \mu_r H \quad \text{siendo } \mu_r = (1 + \chi)$$

$$B = \mu_0 (H + M) = \mu_0 H + \mu_0 M = \mu_0 H + I = \mu_0 H + J$$

Siendo J una magnitud que se denomina intensidad de magnetización o polarización magnética

Generalidades sobre imanes permanentes y su caracterización

III.1.g) Tabla resumen comparativa relativa a la ecuación de Sommerfield en el sistema c.g.s vs. Sistema Internacional:

Sistema c.g.s	Sistema internacional
Magnetización [Gauss]	Magnetización [A/m]
Ecuación de Sommerfield $B = H + M$ ó $B = H + 4\pi M$	Ecuación de Sommerfield $B = \mu_0 (H + M)$ ó $B = \mu_0 H + \mu_0 M$ ó $B = \mu_0 H + I$ ó $B = \mu_0 H + J$
-----	I [T] equivalente a J [T]: Polarización magnética o intensidad de polarización

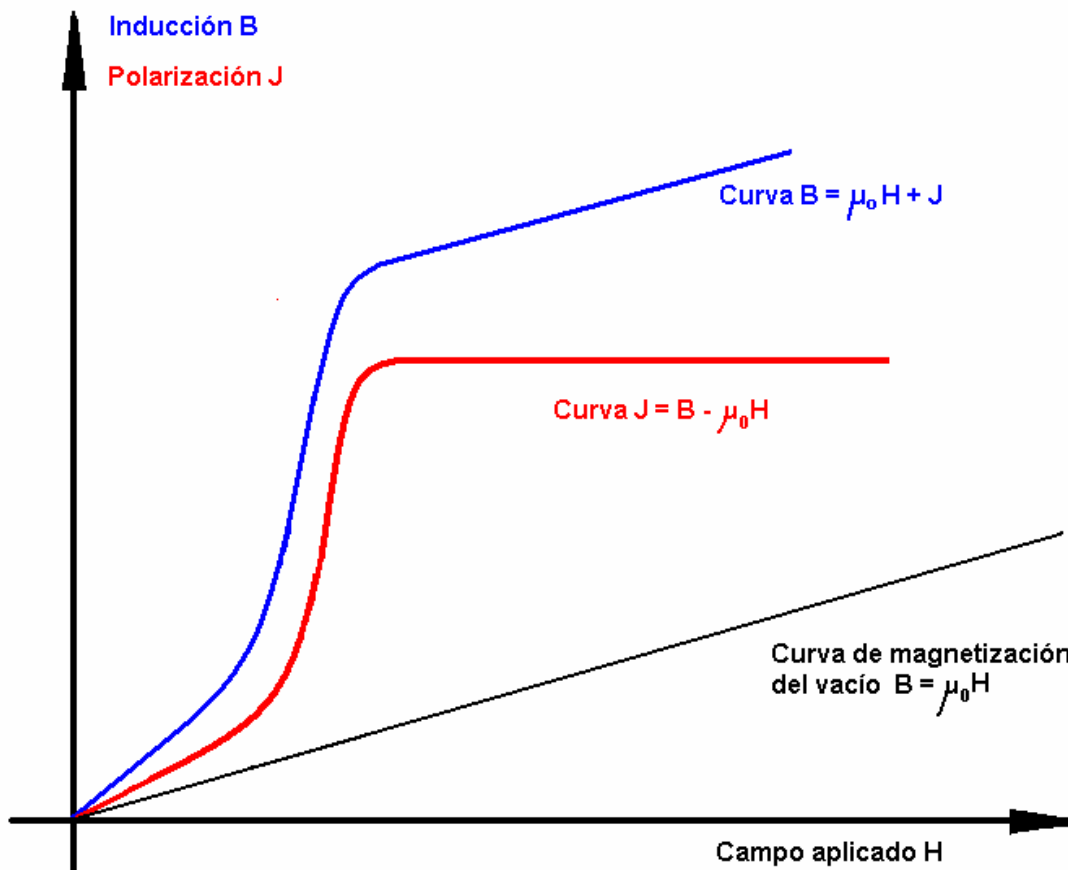
Tabla resumen de unidades y factores de conversión

Magnitud Física	Sistema cgs	Sistema Internacional	Factor de conversión (cgs a S.I)
Inducción magnética (B)	G (Gauss)	T (Tesla)	10^{-4}
Campo aplicado (H)	Oe (Oersted)	Am^{-1} (Ampere/metro)	$10^3/4\pi$
Magnetización (M)	emu cm^{-3}	Am^{-1} (Ampere/metro)	10^3
Magnetización (4 π M)	G (Gauss)	---	---
Polarización Magnética (J)	---	T (Tesla)	---
Magnetización específica (s)	emu g^{-1}	$\text{J T}^{-1} \text{kg}^{-1}$ (Joule/Tesla.kg)	1
Permeabilidad (μ)	Adimensional	H m^{-1} (Henry/m)	$4\pi \cdot 10^{-7}$
Permeabilidad relativa (μ_r)	---	Adimensional	---
Susceptibilidad (χ)	$\text{emu cm}^{-3} \text{Oe}^{-1}$	Adimensional	---
Producto de Energía Máximo (BHmax)	MGOe (Mega Gauss Oersted)	kJ m^{-3} kilo Joule / m^3	$10^2 / 4\pi$
Flujo magnético	Maxwell	Weber	10^{-8}

Capítulo IV: Curvas de Magnetización de imanes – Recta de carga.

IV.1) Curvas de magnetización de materiales ferromagnéticos:

En el gráfico siguiente pueden observarse las ecuaciones analizadas en el capítulo anterior representadas gráficamente. En negro se observa la curva de magnetización del vacío, la cual no es otra cosa que una recta con pendiente unitaria en el sistema c.g.s. y con pendiente μ_0 en el Sistema Internacional. Esto se debe a que en el sistema c.g.s. la ecuación de la curva de magnetización del vacío es $B = H$, ya que en el vacío $J = 0$ y $\mu = 1$. Por otro lado, en el sistema internacional la ecuación de la curva de magnetización del vacío es $B = \mu_0 H$ ya que $J = 0$ y $\mu_r = 1$.



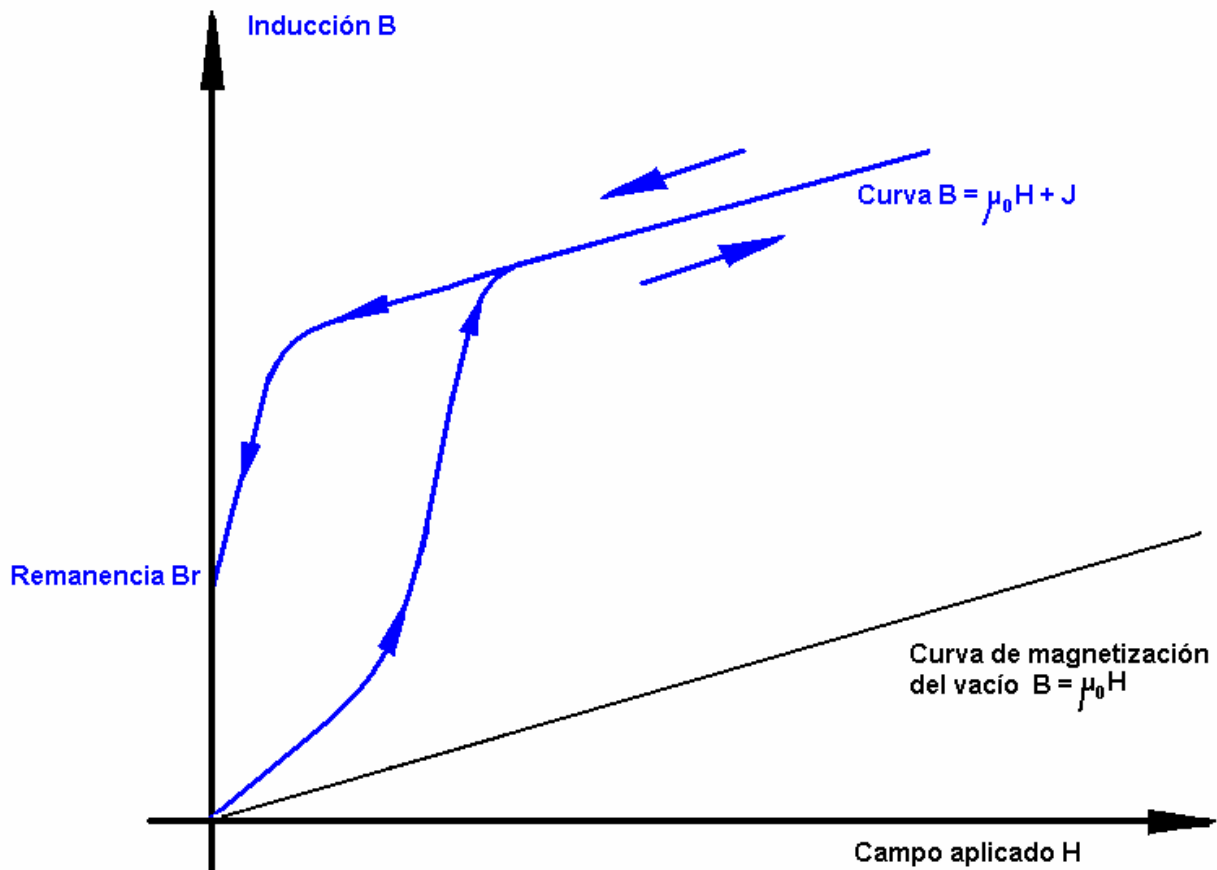
En rojo se observa la curva de polarización magnética J , típica de un material ferromagnético. Esta curva representa la magnetización propia del material frente al campo aplicado H . Se observa que el material ferromagnético adquiere una polarización significativamente mayor que la que correspondería al vacío (curva en negro). Se observa además, que la polarización magnética no aumenta indefinidamente con el campo aplicado, sino que llega a un máximo denominado polarización de saturación, cuando ya todos los dominios se reorientaron según la dirección del campo aplicado.

En azul puede observarse la curva $B = \mu_0 H + J$ (Sistema Internacional), que representa la inducción magnética, o sea el campo total que existe dentro del material, que es la suma del campo aplicado más la polarización. Se observa que la inducción B aumenta rápidamente al principio por la contribución de la polarización J , pero una vez que el material llega a saturación, sólo puede seguir aumentando por el aporte del campo aplicado H , razón por la cual continúa paralela a la curva de polarización magnética del vacío.

Generalidades sobre imanes permanentes y su caracterización

IV.2) Histéresis

Los materiales ferromagnéticos presentan la propiedad de “retener” en mayor o menor medida la magnetización. Dicho de otra forma, estos materiales presentan lo que se denomina técnicamente histéresis y que se manifiesta en la curva de magnetización de la siguiente forma:



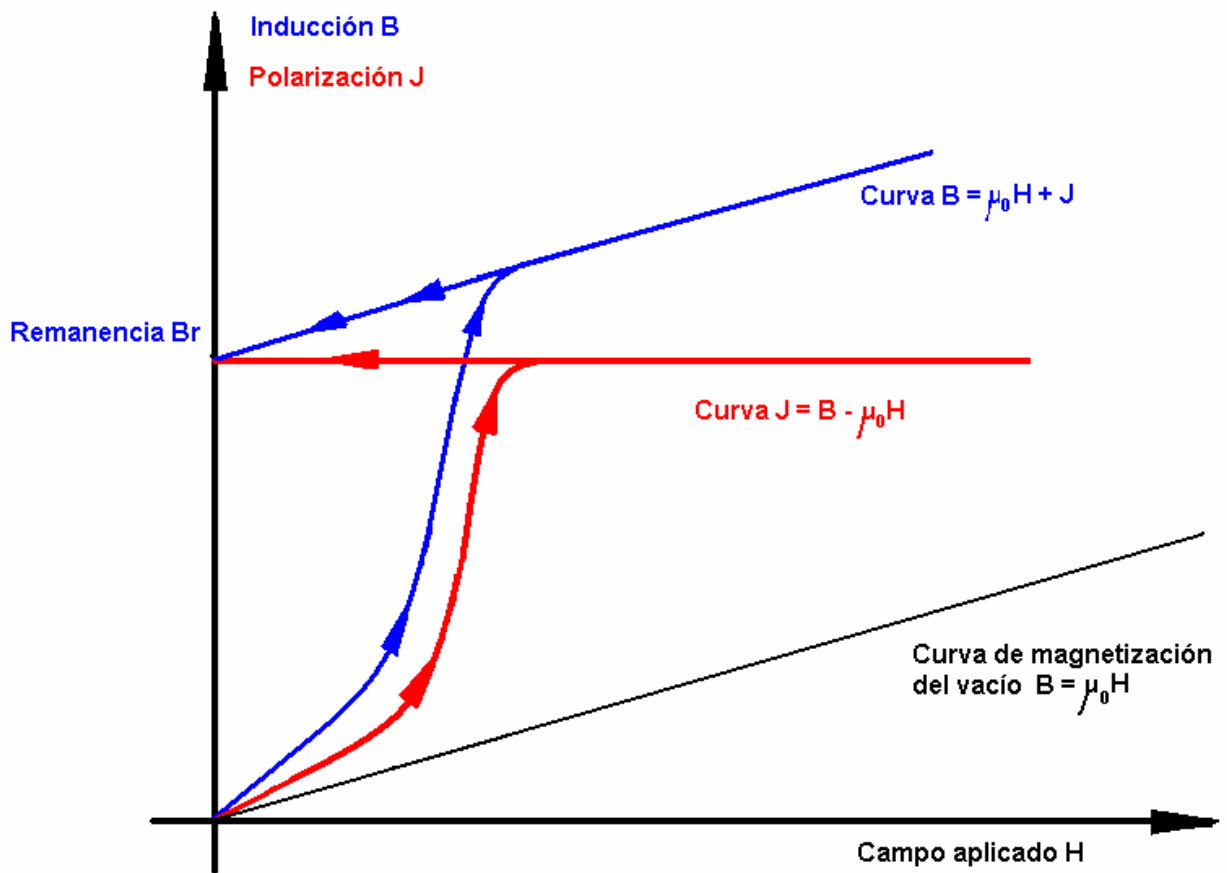
Se observa, que la curva parte del origen del sistema de coordenadas con campo aplicado nulo y campo inducido nulo. Al aumentar el campo aplicado, la inducción magnética B va creciendo según una típica forma de “S”. Luego de la saturación, la inducción sigue aumentando sólo por el aporte de H, puesto que el material ya no puede aumentar más su polarización intrínseca. Al disminuir el campo aplicado, se observa que la inducción no retorna por la misma curva, sino que sigue un camino distinto. Se observa además, que al suspender totalmente el campo aplicado (cuando $H=0$), sigue existiendo una inducción residual que se denomina remanencia, o inducción remanente y se representa como B_r . Cuando el material se magnetizó hasta la saturación, la remanencia se denomina remanencia de saturación y es un parámetro característico de cada material.

Los materiales que presentan una remanencia baja se denominan **materiales magnéticos “blandos”**, dado que oponen poca resistencia a la magnetización y desmagnetización. En estos materiales la remanencia es una propiedad indeseable y se procura por diversos medios tecnológicos que sea lo más baja posible.

Los materiales que presentan una remanencia alta, se denominan materiales magnéticos duros, o imanes permanentes. En estos materiales la remanencia es una propiedad buscada y por lo general resulta de interés práctico que sea lo más alta posible.

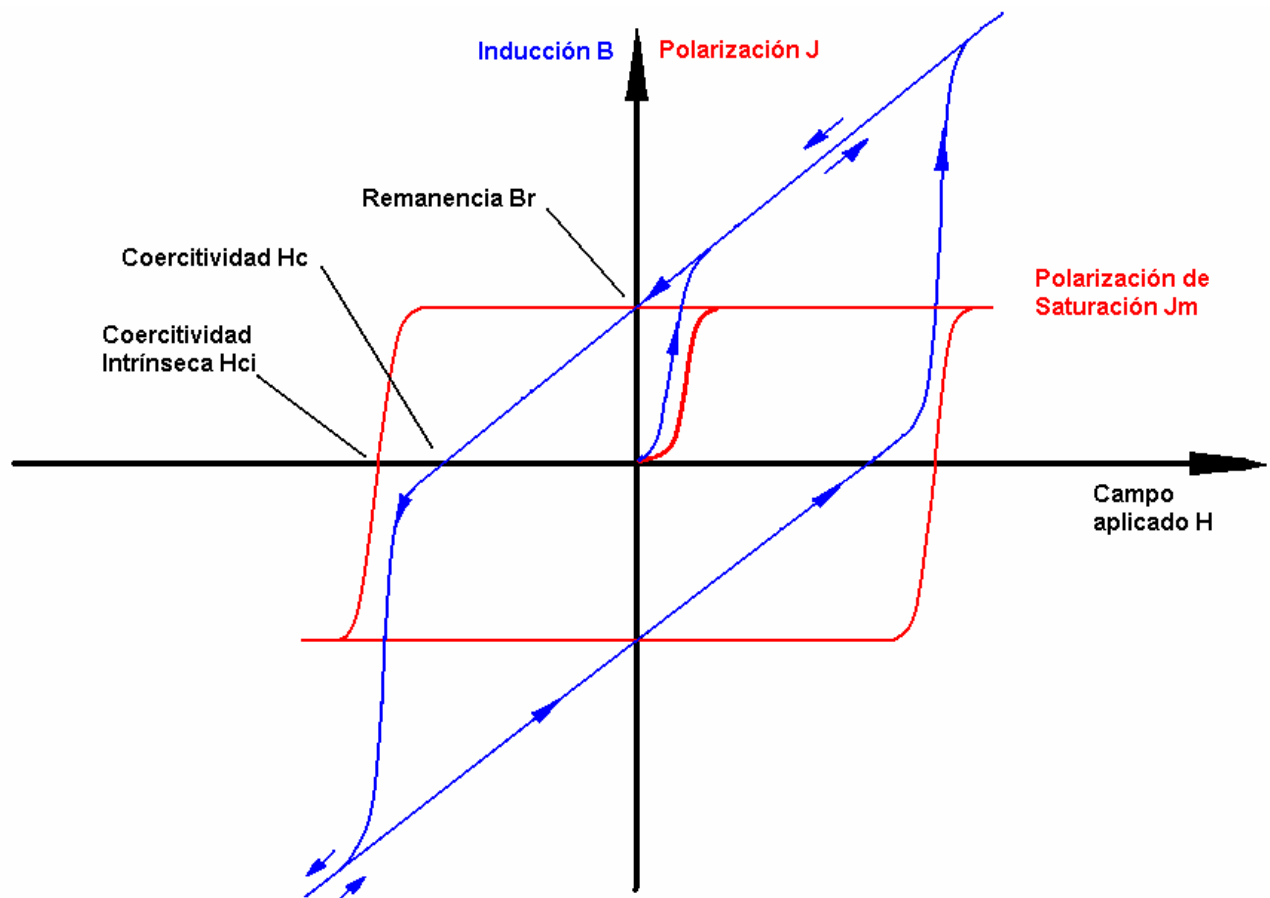
IV.3) Comportamiento de materiales ferromagnéticos duros.

En los materiales magnéticos duros, la remanencia es próxima a la polarización de saturación:



Hasta ahora hemos analizado las curvas de magnetización en el primer cuadrante. Pero para el análisis de los materiales magnéticos duros lo que resulta de interés es el segundo cuadrante, por los motivos que se verán más adelante.

IV.4) Curva de magnetización en los cuatro cuadrantes.

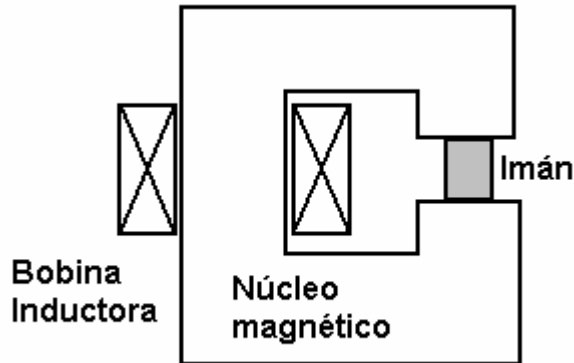


En las curvas anteriores puede verse la evolución de B y J en función de H, cuando éste partiendo de cero llega a un máximo positivo (suficiente como para saturar el material), vuelve a cero, adquiere un valor negativo para saturar la muestra en sentido contrario y nuevamente llega a un máximo positivo completando el ciclo. El diagrama parte de las coordenadas $[0;0]$, es decir, campo aplicado nulo y material totalmente desmagnetizado (magnetización remanente nula). Al aumentar el campo aplicado, la inducción describe la consabida forma de “S” hasta llegar a la saturación. Cuando el campo aplicado disminuye a cero, el material retiene una magnetización que se denomina remanencia. Si se empieza a aplicar campo en sentido contrario, el material aún permanece magnetizado en el mismo sentido. Si se continúa aumentando el campo en sentido contrario, se comienzan a reordenar los dominios en sentido contrario, comenzando por los más débiles, hasta que, aplicado un campo suficientemente grande (denominado campo coercitivo o coercitividad), dicho campo vence la remanencia y el material queda con una inducción nula. Se observa que hay una sola remanencia (con $H = 0$ las curvas de B y J se cruzan), pero dos coercitividades. La denominada H_{ci} (a veces H_{cJ}) o coercitividad intrínseca, es el campo aplicado que anula la polarización magnética. La H_c , a veces denominada H_{cB} , es el campo aplicado que anula la inducción magnética B.

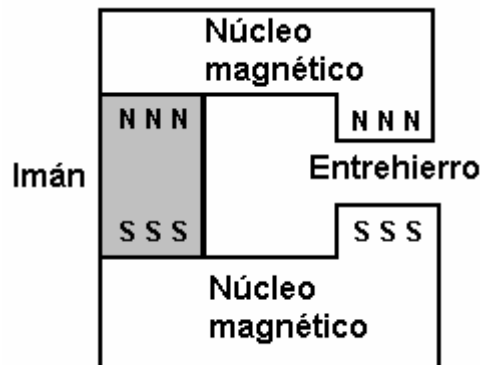
Generalidades sobre imanes permanentes y su caracterización

IV.5) Circuitos magnéticos.

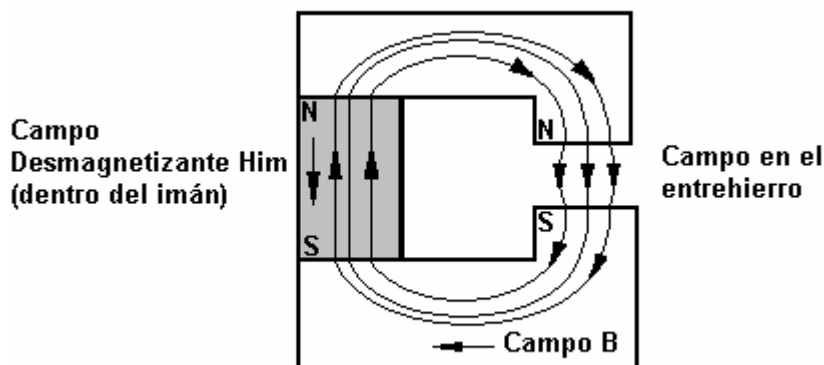
Las curvas de magnetización, como se verá más adelante, se trazan colocando la muestra en un circuito magnético cerrado, es decir, que el flujo del imán queda cortocircuitado por un circuito ferromagnético de muy baja reluctancia. Por tal motivo, luego de saturar la muestra el campo vuelve a cero (la corriente de la bobina inductora es nula), el imán queda con una inducción remanente B_r (ordenada al origen del diagrama B-H).



Pero en la mayoría de las utilizaciones prácticas de los imanes, el flujo no está en corto circuito sino que debe atravesar un entrehierro:



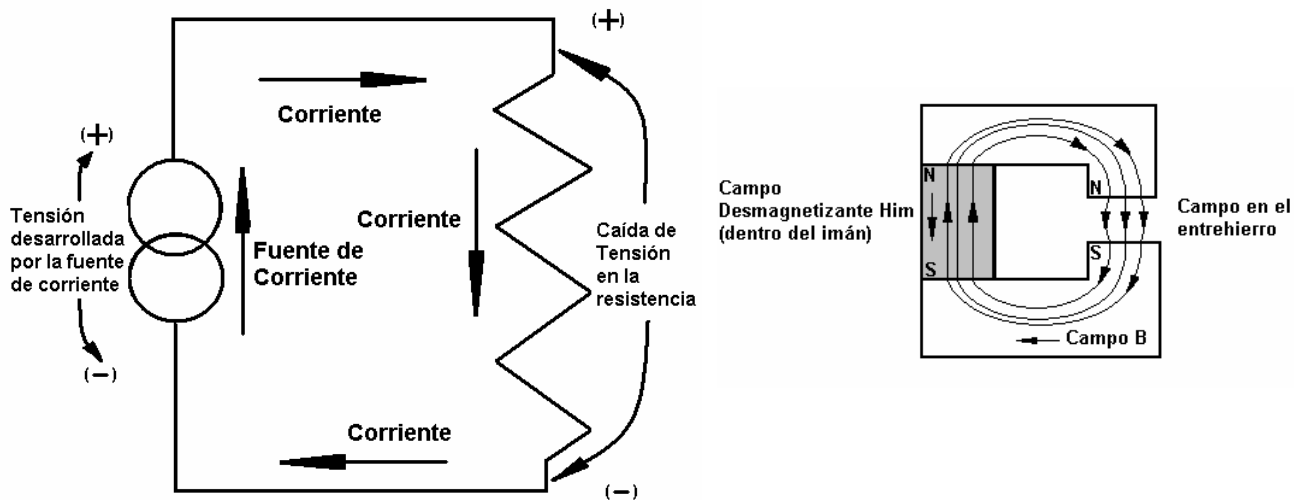
Esto hace aparecer dentro del imán lo que se denomina “campo desmagnetizante”, por lo que **el punto de trabajo del mismo ya no es la intersección del diagrama con el eje B**, sino que se sitúa en algún otro punto de la curva de desmagnetización.



La inducción B sigue siendo positiva (la remanencia del imán mantiene el flujo magnético en el mismo sentido en que se magnetizó en el primer cuadrante), pero dentro del imán aparece un campo desmagnetizante $-H_{im}$, en sentido opuesto al campo inductor que originalmente magnetizó el material. Por tal motivo (B positivo y H negativo), el imán adopta un punto de trabajo en el segundo cuadrante de la curva de desmagnetización.

IV.6) Analogía eléctrica de un circuito magnético:

Suele utilizarse el recurso didáctico de comparar un circuito magnético con uno eléctrico para facilitar la comprensión de los fenómenos asociados. Salvando las obvias diferencias, puede compararse el flujo magnético con una corriente y la fuerza magneto motriz con una tensión. Así como en un circuito eléctrico la misma corriente recorre todo un circuito cerrado con el mismo sentido, en un circuito magnético el flujo “recorre” todo el circuito magnético con el mismo sentido. Siguiendo con la analogía, el imán del circuito magnético puede compararse con una fuente de corriente que en lugar de hacer circular corriente, hace “circular” flujo magnético. Así como la corriente que circula por una resistencia genera una caída de tensión eléctrica proporcional a la corriente, el flujo magnético que “circula” por un entrehierro genera un campo magnético proporcional al flujo. En un circuito eléctrico cerrado, la suma de las caídas de tensión a lo largo del mismo son nulas. Esto implica, en un circuito sencillo como el de la figura, que la caída de tensión en la resistencia es igual y de sentido contrario a la de la fuente.



Cuanto más alta es la resistencia, mayor tensión deberá desarrollar la fuente si se pretende mantener la corriente. Cuanto mayor sea la longitud del entrehierro, mayor campo desmagnetizante H deberá aparecer dentro del imán para mantener el flujo.

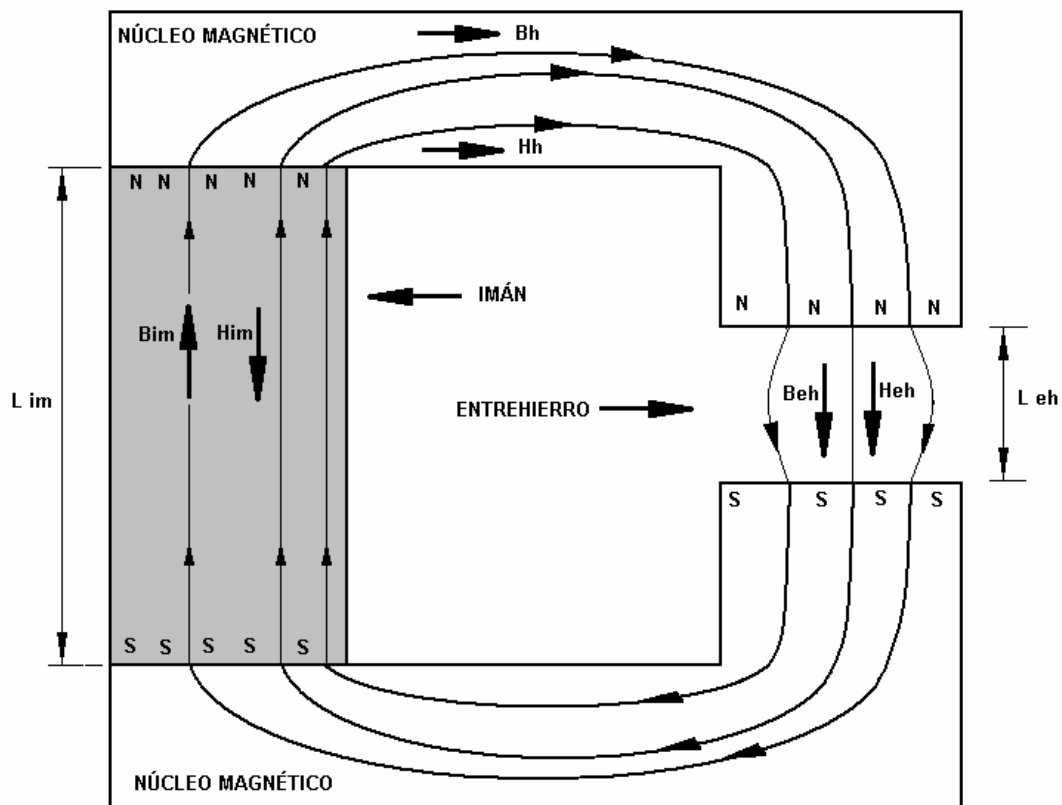
Deben siempre tenerse presentes las limitaciones de la analogía planteada. Mientras un circuito eléctrico eroga una determinada potencia (tensión por corriente) un circuito magnético con un imán permanente no eroga potencia alguna, aunque sí impone una cierta cantidad de energía en el espacio.

IV.7) Ecuaciones fundamentales de los circuitos magnéticos

El punto de la curva de desmagnetización en que se va a operar el imán una vez colocado en un circuito magnético determinado, es decir los valores de B y H que efectivamente van a existir dentro del mismo, dependen de la geometría del imán, del núcleo y del entrehierro. Para calcular el punto de trabajo del imán en un circuito magnético es necesario utilizar dos ecuaciones fundamentales de los circuitos magnéticos.

$$\oint H \cdot dl = 0 \quad [1] \quad \text{y} \quad \oiint B \cdot dA = 0 \quad [2]$$

La primera ecuación expresa que la integral curvilínea del campo aplicado a lo largo de una línea cerrada, es nula. La segunda expresa que en cualquier superficie cerrada el flujo entrante a la misma es igual al flujo saliente. Aplicaremos ambas ecuaciones a un circuito magnético como el de la figura siguiente:



Aplicaremos la primera ecuación a una línea de fuerza cualquiera. Introduciremos algunas simplificaciones como que el campo H es constante a lo largo del imán. Adoptamos la misma simplificación para el núcleo magnético y el entrehierro. Con tales simplificaciones la ecuación queda:

$$H_{im} \cdot L_{im} + H_h \cdot L_h + H_{eh} \cdot L_{eh} = 0$$

A los fines didácticos, suponemos que la permeabilidad del núcleo magnético es muy grande en relación a la del aire del entrehierro, es decir supondremos que: $H_h \cdot L_h \ll H_{eh} \cdot L_{eh}$. Entonces la ecuación queda:

$$H_{im} \cdot L_{im} + H_{eh} \cdot L_{eh} = 0 \quad \text{O lo que es lo mismo: } H_{im} \cdot L_{im} = - H_{eh} \cdot L_{eh}$$

Esta ecuación permite determinar el campo desmagnetizante que existirá dentro del imán, teniendo como datos el campo requerido en el entrehierro, la longitud del entrehierro y la longitud del imán:

$$H_{im} = - H_{eh} \cdot L_{eh} / L_{im} \quad [3]$$

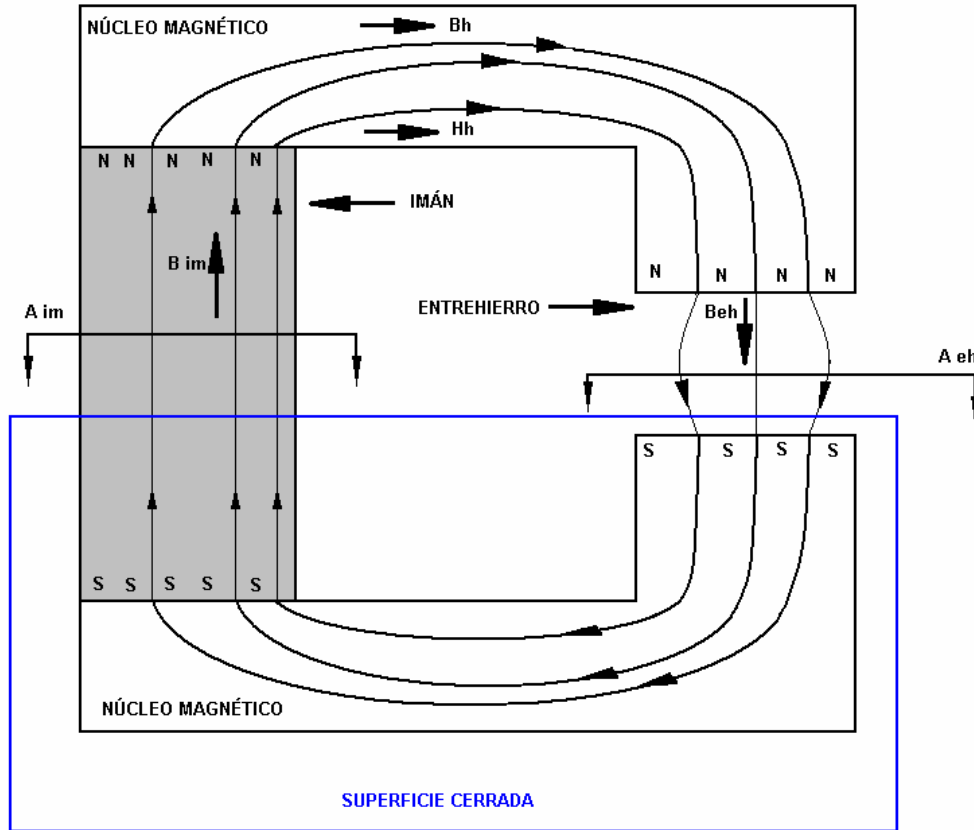
De esta ecuación se deduce que:

A mayor longitud de entrehierro, mayor campo desmagnetizante en el imán.

A mayor longitud de imán, menor campo desmagnetizante en el mismo.

Generalidades sobre imanes permanentes y su caracterización

Aplicaremos la segunda ecuación a una superficie cerrada que corte al imán y al entrehierro. Admitiremos a los fines didácticos que todo el flujo del imán pasa por el entrehierro (que no hay flujo disperso) y que todo el flujo del entrehierro está contenido en un área igual a la del entrehierro (suponemos que las líneas de campo son paralelas dentro del mismo).



$$\oint B \cdot dA = 0 \Rightarrow B_{im} \cdot A_{im} - B_{eh} \cdot A_{eh} = 0$$

De la anterior se deduce que:

$$B_{im} = B_{eh} \cdot A_{eh} / A_{im} \quad [4]$$

Como en el entrehierro podemos aceptar que la permeabilidad es μ_0 :

$$B_{eh} = \mu_0 H_{eh}$$

$$B_{im} = \mu_0 H_{eh} \cdot A_{eh} / A_{im}$$

$$B_{im} = (-\mu_0 L_{im} A_{eh} / L_{eh} \cdot A_{im}) H_{im}$$

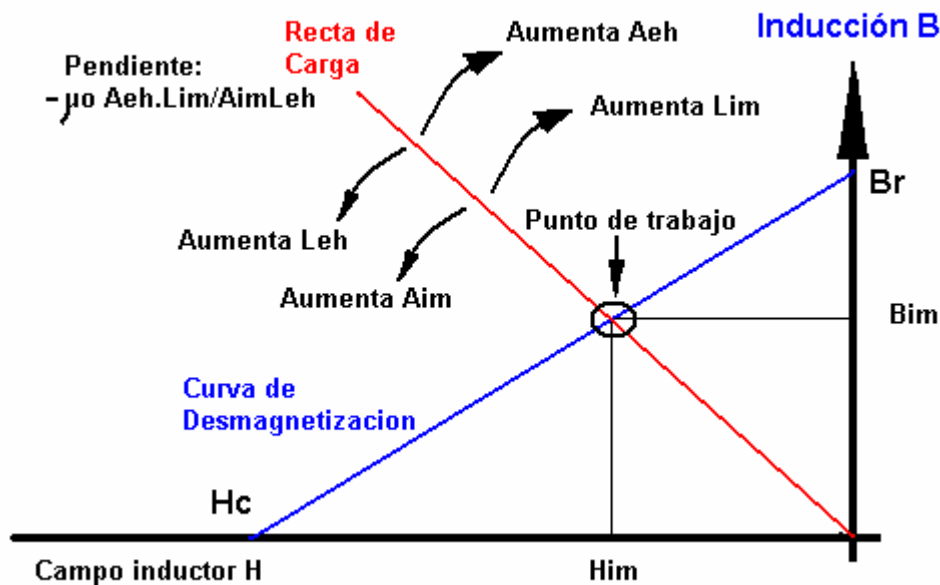
Esta última expresión es la ecuación de una recta con pendiente $\mu_0 L_{im} A_{eh} / L_{eh} \cdot A_{im}$.

IV.8) Concepto de recta de carga

El punto de trabajo del imán es la intersección de la curva de desmagnetización del imán con la recta de carga. La curva de desmagnetización es propia del material con el que está construido el imán y expresa cual será la densidad de flujo magnético B para cada campo H . Este último puede ser el campo inductor aplicado externamente o el campo desmagnetizante que se establece dentro del imán en las distintas condiciones de trabajo. En la mayoría de los casos reales de utilización existirán simultáneamente dentro del imán un campo desmagnetizante determinado por la reluctancia del circuito magnético y otro campo debido a la fuerza magnetomotriz inducida en el núcleo magnético por la circulación de corrientes en las bobinas asociadas.

La recta de carga introduce la geometría del circuito magnético en general, incluyendo medidas propias del imán (Área y longitud del imán) y las del entrehierro (Área y longitud del entrehierro). El punto de trabajo satisface simultáneamente ambas cosas y expresa los parámetros magnéticos que se establecerán dentro del imán en una situación de trabajo determinada. Del gráfico de la figura puede deducirse cuales son las condiciones que “alivian” el trabajo del imán y cuales la complican:

- 1) Cuanto mayor sea la longitud del entrehierro (mayor reluctancia) mayor será el campo desmagnetizante, menor será la densidad de flujo dentro del imán y por lo tanto menor también el flujo aportado al circuito.
- 2) Cuanto mayor sea el área del imán, a igualdad de los otros parámetros, mayor será el flujo aplicado a una misma reluctancia, lo que hará aumentar el campo en el entrehierro y por ende también el campo desmagnetizante, con la consiguiente disminución de la densidad de flujo dentro del imán.
- 3) Cuanto mayor sea el área del entrehierro (menor reluctancia), menor será el campo desmagnetizante, mayor la densidad de flujo dentro del imán y por lo tanto mayor el flujo que el imán aportará al circuito.
- 4) Cuanto mayor sea la longitud del imán, menor será el campo desmagnetizante, mayor la densidad de flujo dentro del imán y por lo tanto mayor el flujo que el imán aportará al circuito.

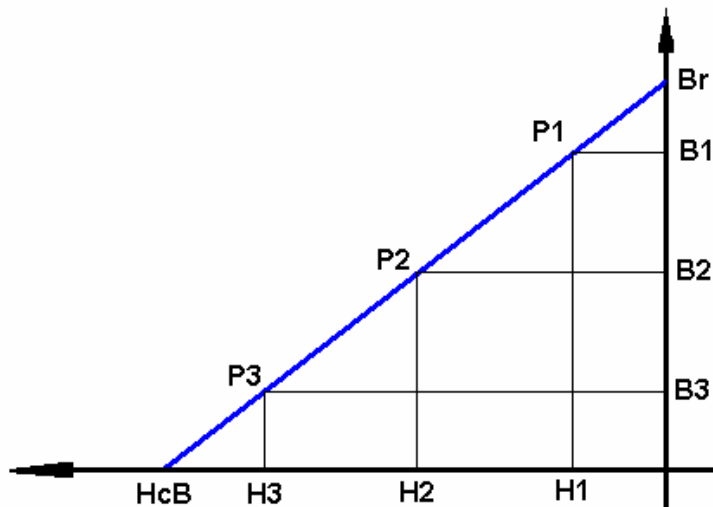


**La curva de desmagnetización es propia del material con el que está construido el imán.
La recta de carga es propia del circuito magnético en el que trabaja el imán.**

Generalidades sobre imanes permanentes y su caracterización

IV.9) Concepto de “Producto de Energía.”

Cualquier punto de una curva de desmagnetización está caracterizado por un B y un H determinados. Por ejemplo, en la siguiente figura se marcaron tres puntos: P1, P2 y P3. Cada uno de estos puntos tiene coordenadas particulares [Bn;Hn].



Veamos cual es el significado físico el producto B.H. Analizando el producto dimensionalmente se llega a la siguiente conclusión:

$$B \text{ [Wb/m}^2\text{]} \times H \text{ [A/m]} = B \times H \text{ [Wb.A/m}^3\text{]} \quad \text{Pero Wb} = \text{Volt.s, entonces:}$$

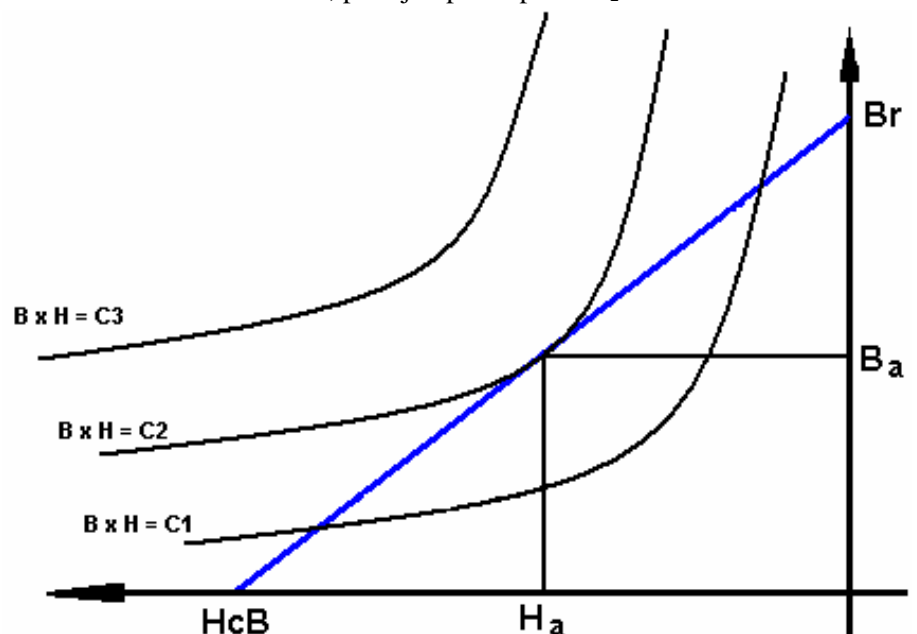
$$B \times H \text{ [Wb.A/m}^3\text{]} = B \times H \text{ [V.A.s / m}^3\text{]} = B \times H \text{ [W.s / m}^3\text{]} = B \times H \text{ [Joule / m}^3\text{]}$$

Entonces, el producto BxH tiene dimensión de energía por unidad de volumen.

Para cualquier punto de la curva de **desmagnetización** de un material magnético, el producto de las coordenadas B y H de dicho punto, indica la cantidad de energía que 1 m³ de dicho material puede imponer al espacio cuando está polarizado para trabajar en dicho punto.

El producto de energía asociado a un punto de la curva de desmagnetización puede representarse gráficamente como el área del rectángulo determinado por dicho punto y los ejes de coordenadas. A medida que el punto de trabajo se acerca a uno de los ejes, el área del rectángulo tiende a ser nula. El área máxima de rectángulo estará asociada a un punto intermedio de la curva, por ejemplo el punto P₂.

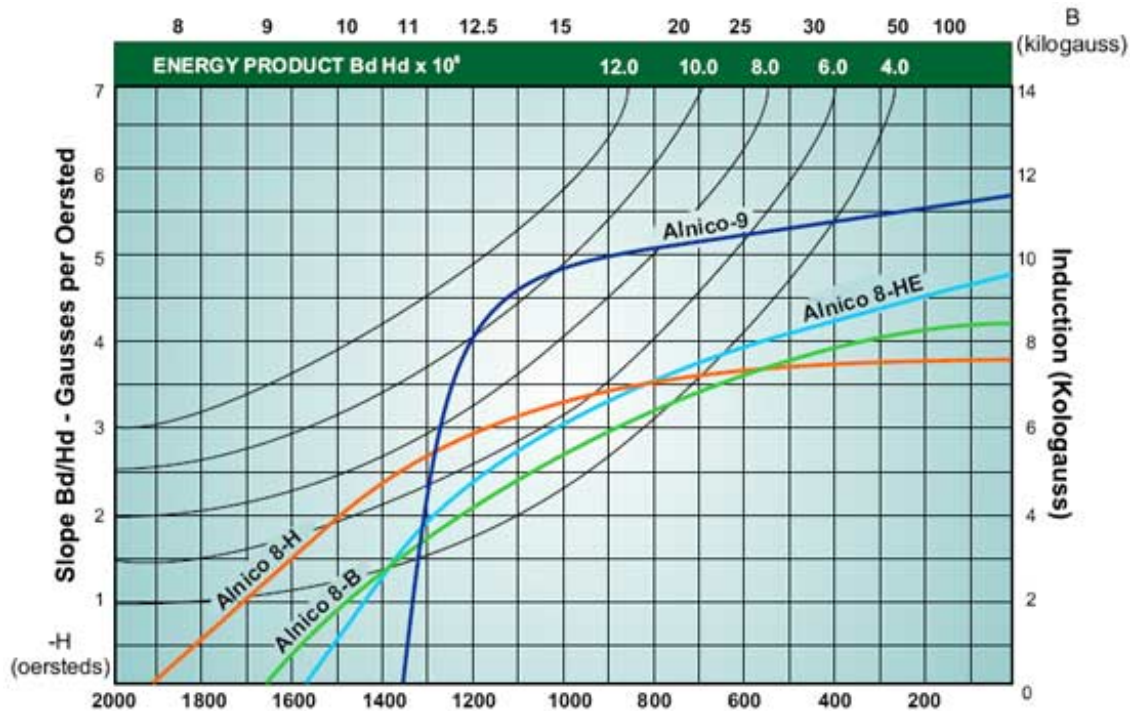
Las curvas de desmagnetización de los imanes comerciales (Ver capítulo siguiente) contienen un conjunto de hipérbolas sobre cada una de las cuales el producto BxH es constante. En la figura de la derecha, la curva de desmagnetización interseca a la hipérbola de BxH = C₂. El producto de energía máximo con que puede trabajar este material es C₂ [Joule/m³], siendo B_a y H_a las coordenadas de dicho punto.



Generalidades sobre imanes permanentes y su caracterización

Capítulo V Análisis de curvas reales de materiales magnéticos duros

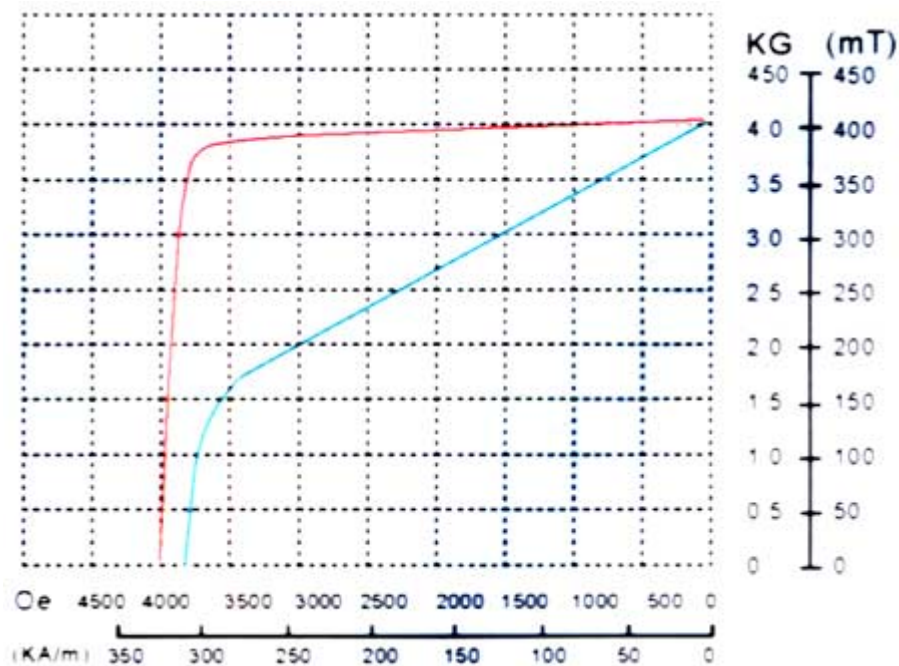
V.1) Curvas B vs. H de diversos grados de comerciales Alnico:



Por ejemplo, para el Alnico 9 las curvas indican:

Remanencia: 11,4 kG	Equivalente a 1,14 Tesla
Coercitividad: 1350 Oe	Equivalente a 107,4 kA/m
Producto de energía = 10,5 MGOe	Equivalente a 83,6 kJ/m ³

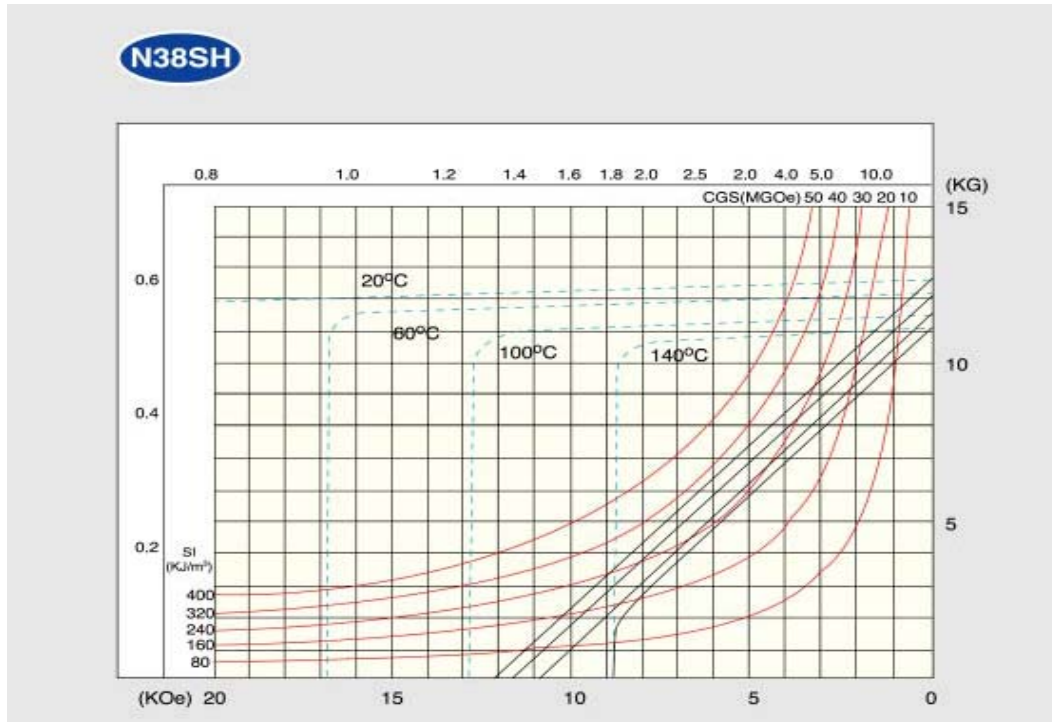
V.2) Curvas J vs. H (rojo) y B vs. H (azul) de una ferrita:



Remanencia: 4 kG	Equivalente a 0,4 T
Coercitividad 3800 Oe	Equivalente a 302 kA/m
Producto de energía = 6 MGOe	Equivalente a 75,5 kJ/m ³

Generalidades sobre imanes permanentes y su caracterización

V.3) Curvas J vs. H (azul) y B vs. H (negro) de un grado comercial de Neodimio-Hierro-Boro:



Por ejemplo para 20 °C

Remanencia: 12,5 kG

Coercitividad: 12000 Oe

Producto de energía = 38 MGOe

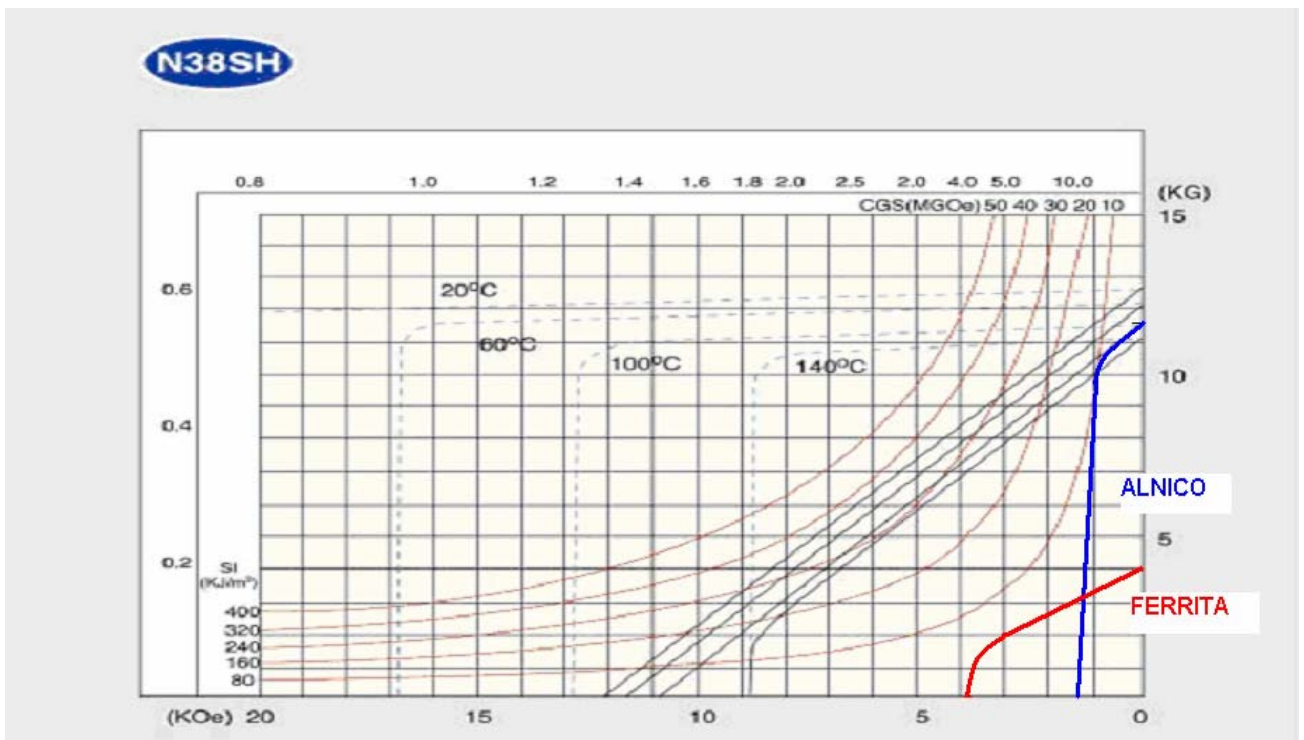
Equivalente a 1,25 Tesla

Equivalente a 955 kA/m

Equivalente a 302 kJ/m³

V.4) Comparación Nd-Fe-B vs. ALNICO vs. Ferrita:

A continuación, sobre el gráfico correspondiente a las curvas de magnetización del Nd-Fe-B se superpusieron curvas de un ALNICO (en azul) y de una ferrita (en rojo), representando a estas últimas en la misma escala que las del Nd-Fe-B a los efectos de poder compararlas.

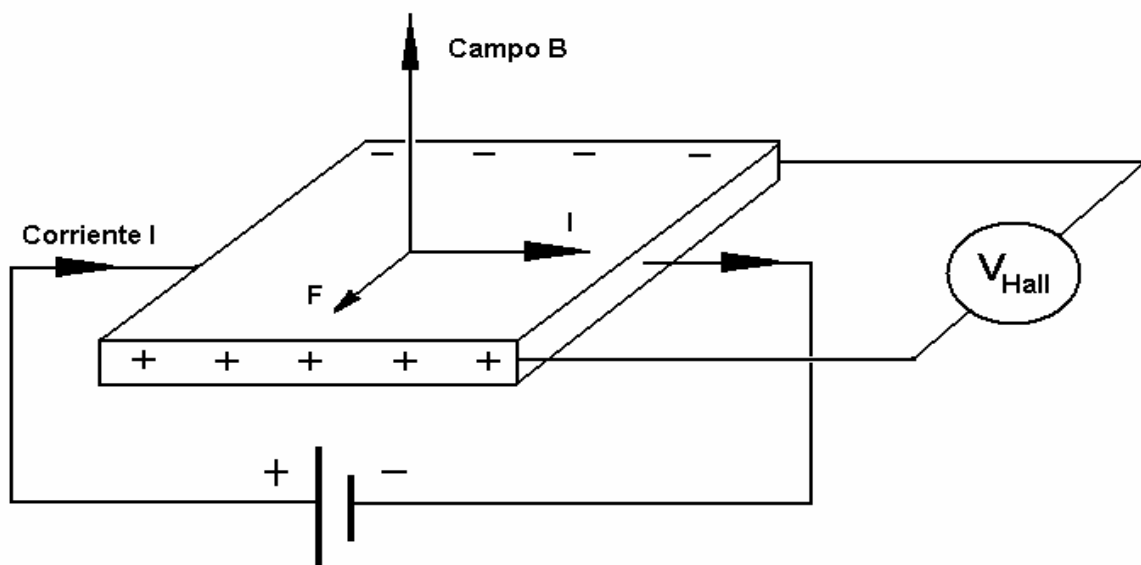


Capítulo VI: Instrumental de medición de parámetros magnéticos

VI.1) Gaussímetro o Teslámetro de efecto Hall.

VI.1.a) Introducción: Cuando una corriente circula por un conductor y este conductor está inmerso en un campo magnético, aparecen fuerzas sobre las cargas en movimiento tales que generan una diferencia de potencial en dirección perpendicular a la corriente y al campo. Este fenómeno se denomina efecto Hall. Si bien este efecto se presenta en cualquier conductor, la tensión de Hall que se genera tiene, en la mayoría de los materiales, una magnitud demasiado pequeña para ser medida en forma práctica. Pero en algunos materiales, como ciertos semiconductores, el efecto Hall tiene una magnitud mucho mayor, siendo las tensiones de Hall que aparecen lo suficientemente grandes como para ser fácilmente procesadas electrónicamente, aún con campos B muy pequeños. Algunos de estos materiales semiconductores son el arseniuro de indio, el arseniuro de galio y el antimonio de indio.

Esquema de un sensor Hall



VI.1.b) El instrumento:

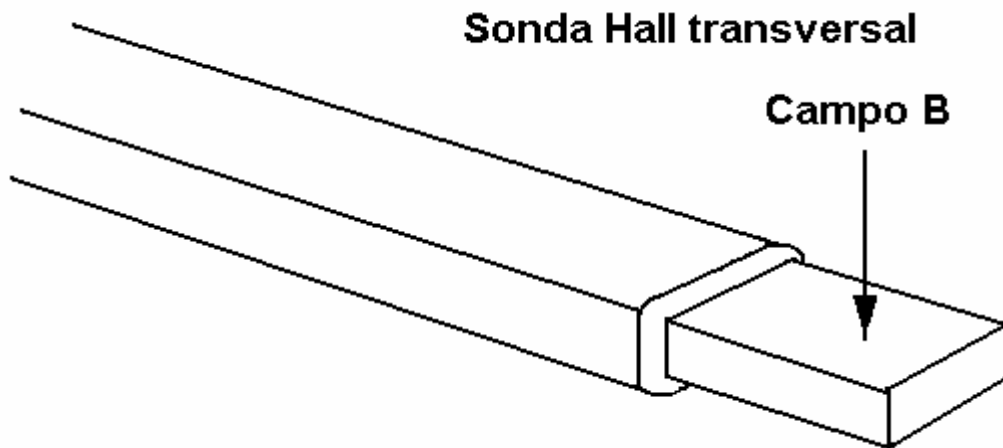
El sensor Hall se aloja en el extremo de una sonda, como la que el operador de la fotografía sostiene con su mano derecha, la cual se conecta a un instrumento electrónico que provee una corriente estabilizada al sensor y procesa la tensión de Hall que se genera al introducir la sonda en un campo magnético, la cual es indicada finalmente en un display. Algunos instrumentos pueden arrojar la indicación en distintas unidades (Gauss, Tesla o A/m) poseyendo además varios rangos de medición, como así también la posibilidad de medir campo continuo o campo alterno, hasta frecuencias de varios kHz. Algunos tienen la función adicional de almacenar el pico del campo medido, siendo aptos para evaluar fenómenos rápidos como la magnetización de imanes por impulso. Las sondas Hall son estables en el tiempo y tienen asociada una incertidumbre relativamente baja, siendo el principal inconveniente de su utilización la sensibilidad al ruido. La sonda, así como es sensible al campo magnético a medir, también capta campos magnéticos espurios (campo terrestre, masas ferromagnéticas próximas, emisión de transformadores, etc.).



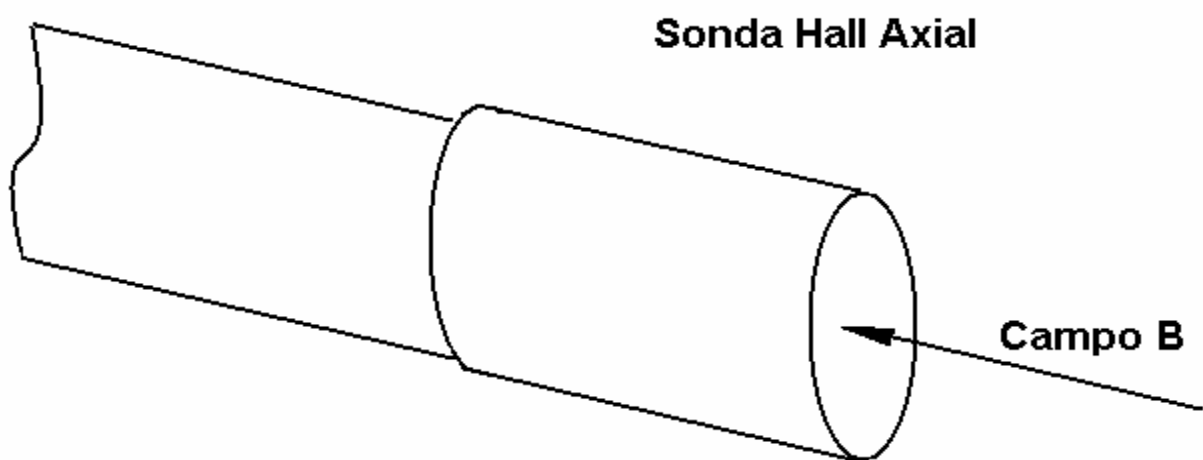
Generalidades sobre imanes permanentes y su caracterización

VI.1.c) Distintos tipos de sonda:

Para adaptarse a distintas condiciones de medición las sondas Hall pueden ser transversales o axiales. Las transversales miden la componente del campo perpendicular al eje de la sonda. Una utilización típica de estas sondas es la medición del campo en entrehierros. A tal efecto existen sondas capaces de ser introducidas en entrehierros muy pequeños, de hasta 0,25 mm.



Las sondas axiales miden la componente del campo B según el eje de la misma. Son adecuadas para medir el campo por ejemplo, en el eje de un volumen cilíndrico que no presenta acceso radial, o el campo sobre superficies, etc..



VI.1.d) Comentarios generales:

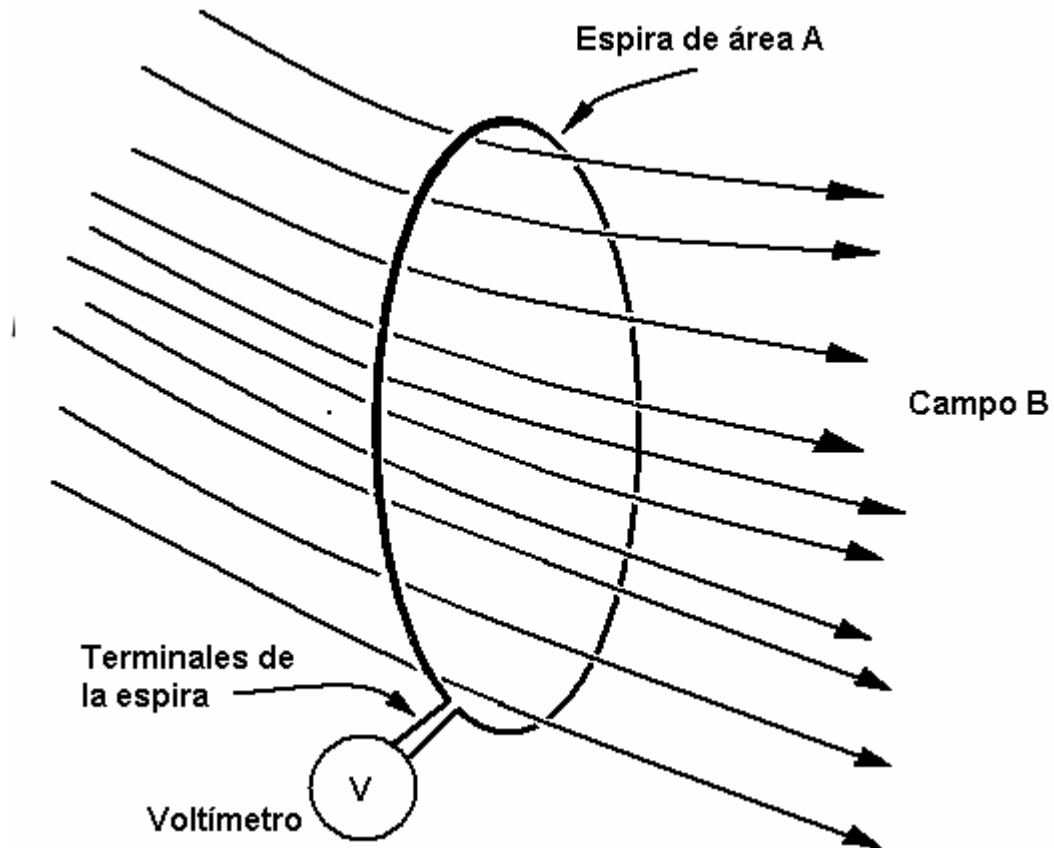
Tanto las sondas transversales como las axiales tienen un rango de medición asociado. Generalmente para cubrir un rango amplio se requieren varias sondas. Se pueden medir a través del efecto Hall desde campos muy pequeños (inferiores al campo terrestre) hasta campos muy grandes (como los picos de campo que generan los cargadores a impulso). Los gaussímetros por lo general poseen sondas intercambiables, de manera que un mismo instrumento puede usarse con sondas de distintos rangos y tipos. En estos casos cada sonda tiene una constante de calibración asociada, que debe ser ingresada a la programación del gaussímetro o teslámetro cuando se sustituye una sonda por otra.

Debe tenerse en cuenta que los gaussímetros de efecto Hall con una utilización tal como la descripta, siempre miden el campo existente en aire. O sea que en rigor, lo que se está midiendo es el campo H, expresado en el display como campo B (Gauss o Tesla), aunque algunos instrumentos también pueden expresar el resultado en A/m. La denominación de Gaussímetros o teslámetros proviene del hecho que la utilización más común es la medición de campos en entrehierros, donde el campo medido en el aire expresa con buena aproximación el campo que existe en el hierro de las expansiones polares.

VI.2) Fluxómetro, flujómetro o flujímetro

VI.2.a) Introducción: Como se vio anteriormente, el flujo magnético a través de una superficie está dado por la integral del vector campo extendida a dicha superficie:

$$\phi = \iint_A B \cdot dA$$



Si el campo B es constante en toda el área considerada y su dirección es perpendicular a la superficie, se llega a la siguiente fórmula simplificada:

$$\phi = B \cdot A$$

Por otro lado, cuando una espira concatena un flujo magnético, la tensión eléctrica que se induce a bornes de la misma, es representada por la siguiente ecuación:

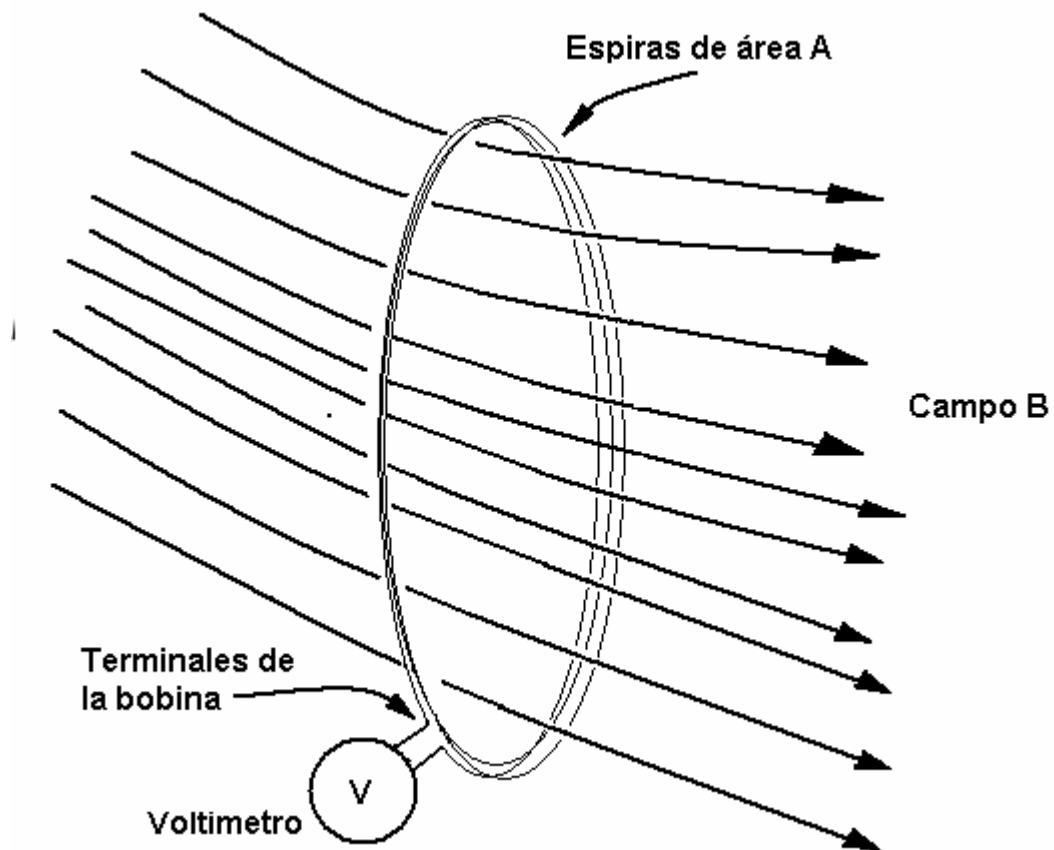
$$V(t) = - \frac{d\phi}{dt}$$

La tensión eléctrica inducida en la espira es igual a la derivada del flujo con relación al tiempo. Dicho de otra forma, la tensión eléctrica inducida es proporcional a la velocidad de variación del flujo. Cuanto más rápidamente varía el flujo, mayor será la tensión inducida. Por otro lado, si el flujo es constante, la tensión inducida es nula.

Generalidades sobre imanes permanentes y su caracterización

Cuando en lugar de una sola espira se trata de una bobina de N espiras, por estar las mismas en serie, la tensión inducida en la bobina es N veces la tensión de la espira individual:

$$V(t) = -N \frac{d\phi}{dt}$$



La expresión que permite calcular el flujo en función de la tensión inducida se obtiene de integrar la expresión anterior:

$$\Delta\phi = -\frac{1}{N} \int_{t_1}^{t_2} U(t).dt$$

Esta ecuación expresa la variación de flujo a través de la espira desde el tiempo t_1 hasta el tiempo t_2 , para una bobina de N espiras en función de la integral de la tensión generada en función del tiempo. De la ecuación anterior surge la dimensión del Weber:

[Wb] = [Volt.segundo] o lo que es lo mismo: [Weber / segundo] = [Volt]

Cuando la tensión inducida es de 1 V significa que el flujo está variando a razón de 1 Wb en cada segundo.

Generalidades sobre imanes permanentes y su caracterización

VI.2.a) Principio de funcionamiento del fluxómetro

Por una cuestión de simplicidad tecnológica, los fluxómetros no miden el flujo directamente, sino que lo obtienen en forma indirecta basándose en la siguiente ecuación:

$$\Delta\phi = -\frac{1}{N} \int_{t_1}^{t_2} U(t).dt$$

Los fluxómetros integran electrónicamente la tensión inducida en una bobina exploradora cuyo número de vueltas es conocido, obteniendo así la variación del flujo concatenado. Para que el resultado de la medición sea el flujo total concatenado por la bobina exploradora, en el tiempo t_1 la misma debe concatenar el flujo incógnita y en el tiempo t_2 no debe concatenar ningún flujo. En la práctica, el procedimiento de medición es el siguiente:

- 1) Se introduce a la programación del fluxómetro el número de vueltas de la bobina utilizada.
- 2) Se ubica la bobina exploradora de forma que concatene el flujo a medir.
- 3) Se pone en cero la indicación del fluxómetro.
- 4) Se retira la bobina hasta una zona de campo nulo.

Procediendo de la forma descripta, el “ $\Delta\phi$ ” que indica el fluxómetro, es el flujo total que concatenaba la bobina.

La medición se puede realizar también en forma inversa, obteniéndose una indicación del mismo valor pero con signo contrario:

- 1) Se ubica la bobina en una zona de campo nulo.
- 2) Se pone en cero la indicación del fluxómetro.
- 3) Se ubica la bobina exploradora de forma que concatene el flujo a medir.

Obtenido el flujo concatenado por la bobina, si se conoce el área de la misma, se puede obtener la densidad del flujo, o sea la inducción B

$$\frac{\phi}{A} = B \left[\frac{Wb}{m^2} \right]$$

ϕ = Indicación del fluxómetro en Weber.

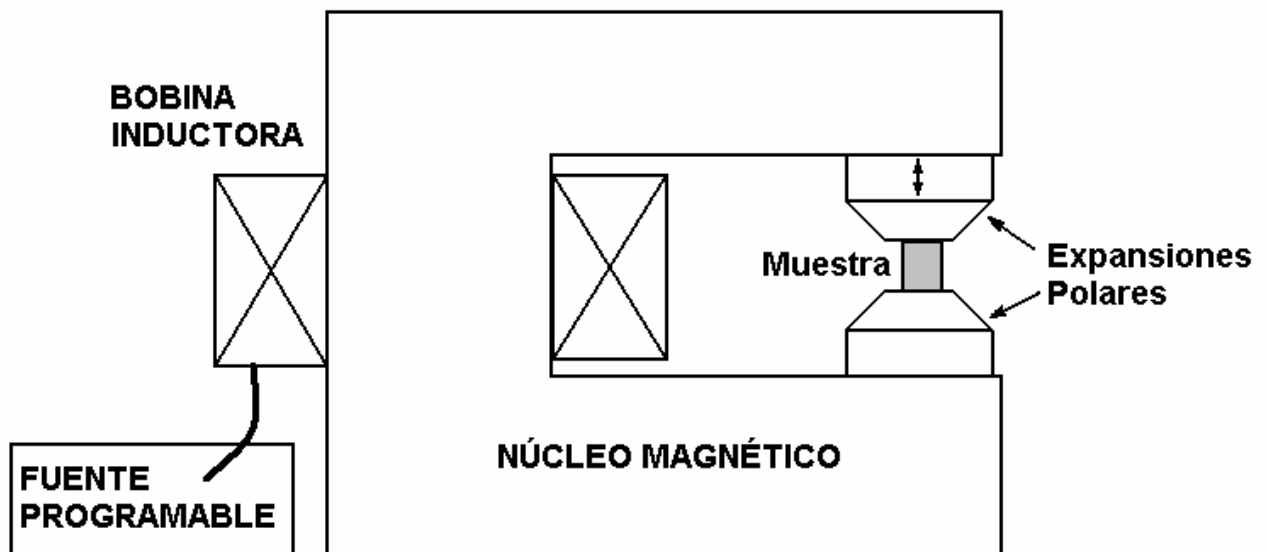
A = Área de la bobina en m^2 .

B = Inducción magnética o densidad de flujo promedio en el área A , en Wb/m^2 .

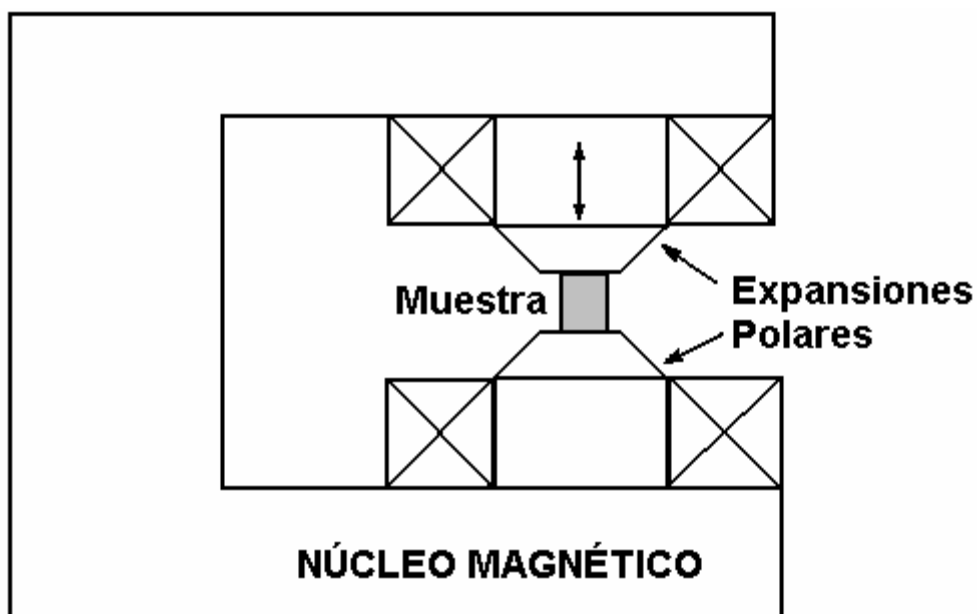
Cabe aclarar que el campo B determinado de esta forma es un promedio en el área de la bobina. Esta forma de medir el campo B es razonablemente exacta cuando el flujo es uniforme o cuando la bobina es pequeña. Basándose en la ecuación anterior, algunos fluxómetros además de medir flujo, también pueden ser usados para medir inducción magnética mediante las llamadas bobinas de punto. Estas bobinas son suficientemente pequeñas como para que la medición de campo pueda considerarse una medición puntual. En estos fluxómetros debe programarse, además del número de vueltas, el área de la bobina, o un parámetro denominado NA , que es el producto del número de vueltas por el área media de las espiras.

VI.3) Histeresígrafo:

El histeresígrafo es un instrumento destinado a obtener diagramas B vs. H , también denominados lazos de histéresis, con el objeto de caracterizar materiales desde el punto de vista magnético. El elemento central del equipo es un núcleo magnético destinado a aplicar los campos requeridos a la muestra a ensayar. Este núcleo posee una o más bobinas las cuales son alimentadas por una fuente capaz de suministrar corriente en función del tiempo según una programación que puede ser modificada por el operador. El circuito magnético está dotado de expansiones polares las cuales tienen una forma adecuada para lograr una distribución uniforme de campo en el entrehierro. La longitud de este entrehierro es modificable con el objeto de adaptarse a distintas longitudes o espesores de muestra. A tal efecto, una de las expansiones puede ser desplazada según su eje mediante un dispositivo mecánico, que además de proporcionar un ajuste fino de la distancia, permite aprisionar las muestras muy firmemente entre las expansiones, para minimizar los entrehierros y resistir los esfuerzos mecánicos emergentes durante la magnetización.

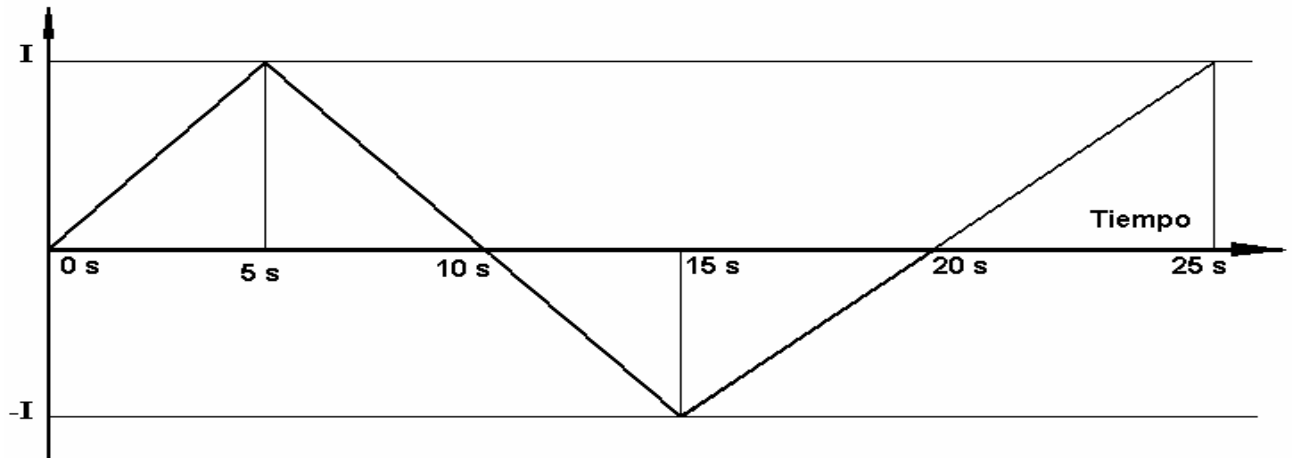


Los histeresígrafos destinados a caracterizar muestras de alta coercitividad poseen dos bobinas ubicadas como muestra el diagrama siguiente. Con esta disposición, además del campo inducido en el circuito magnético, ambas bobinas suman campo directamente sobre la muestra, permitiendo al aparato aplicar valores de campo por encima de la saturación de las expansiones polares.

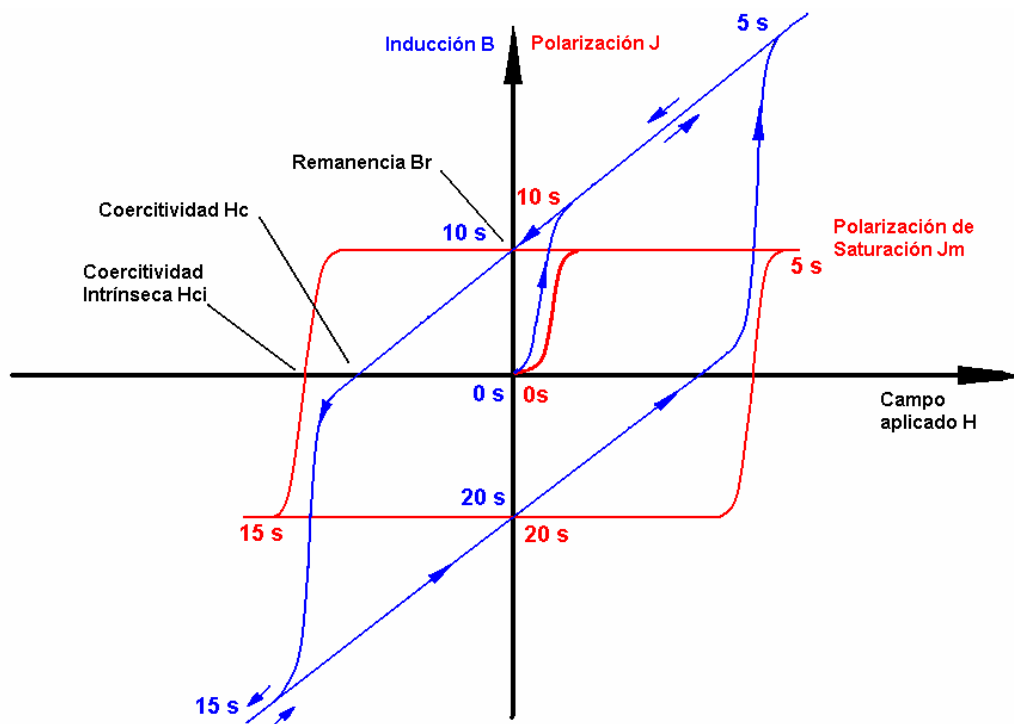


Generalidades sobre imanes permanentes y su caracterización

Para trazar el lazo de histéresis de la muestra ensayada, el campo H aplicado debe variar en el tiempo de forma que los instrumentos de medición asociados al histeresígrafo obtengan la información correspondiente a los 4 cuadrantes del diagrama para así poder cerrar el lazo, por lo que la corriente aplicada a las bobinas podría tener una ley de variación como la siguiente:



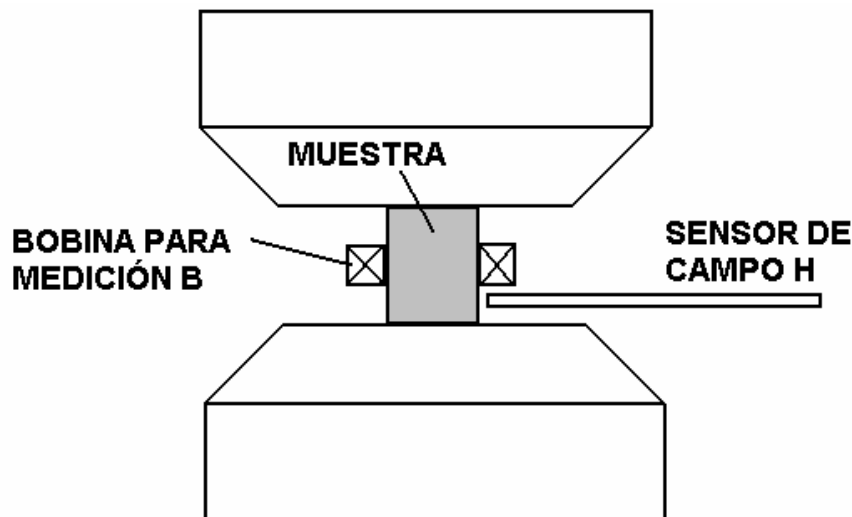
Cuando la corriente describe el primer segmento de la programación (0 a 5 s), como el ensayo se inicia con la muestra totalmente desmagnetizada, el lazo de histéresis parte del cero del diagrama [$H=0; B=0$] en el instante $t=0$ s y termina con la muestra saturada en sentido positivo en $t=5$ s. Luego, la corriente describe el segundo segmento de la programación (5 a 10 s), partiendo de la corriente máxima positiva hasta corriente nula. En el instante $t=10$ s, la corriente es nula, por lo tanto $H=0$, pero como la muestra fue previamente saturada en sentido positivo, la muestra no vuelve a $B=0$, sino que queda en $B=B_r$ (remanencia). Por consiguiente en el instante $t=10$ s, el diagrama se encuentra en las coordenadas [$H=0; B=B_r$]. Seguidamente la corriente comienza a recorrer el tercer segmento de la programación (10 a 15 s), el campo H se hace negativo, terminando en un máximo negativo que satura la muestra en sentido contrario en el instante $t=15$ s. Luego comienza el cuarto segmento (15 a 20 s). En el instante $t=20$ s, el diagrama se encuentra en las coordenadas [$H=0; B=-B_r$]. Recién el quinto segmento de la programación (20 a 25 s) cierra el lazo de histéresis volviendo a saturar la muestra en sentido positivo, por lo que terminan coincidiendo en valores magnéticos los tiempos $t=5$ s y $t=25$ s:



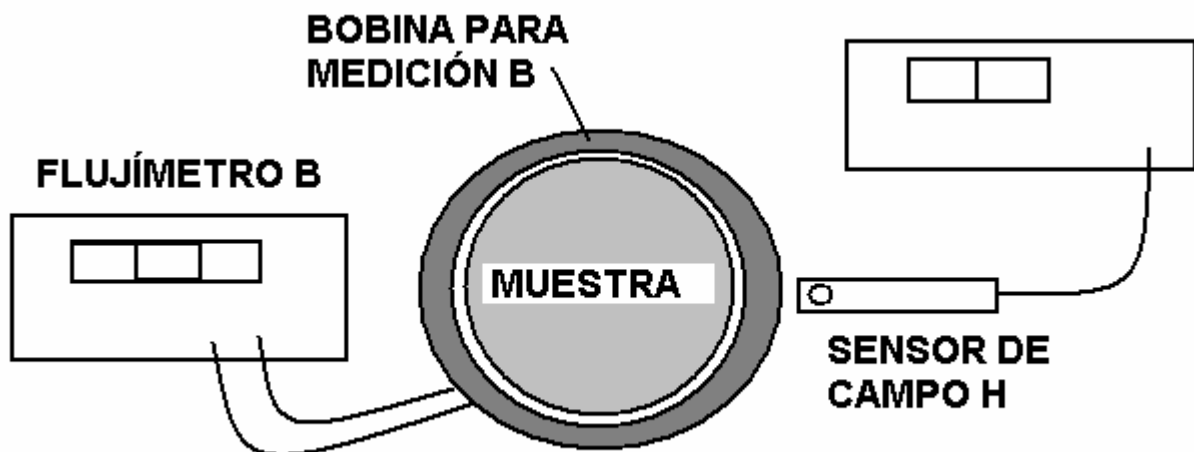
-

Generalidades sobre imanes permanentes y su caracterización

Ahora bien, para poder trazar el lazo de histéresis del material de la muestra, simultáneamente con la excursión de corriente en la bobina y con la consiguiente variación el campo aplicado, es necesario medir B y H a lo largo del ciclo y relacionar los valores medidos en un diagrama como el de la página anterior. La forma más conveniente de medir la inducción magnética B es la utilización de una bobina que rodeando la muestra, concatena el flujo inducido en la misma. Esta bobina se conecta a un fluxómetro el que previamente se programa con el área de la muestra, además del área y número de vueltas de la bobina utilizada, de forma que en base al flujo medido y los parámetros ingresados, el fluxómetro correspondiente pueda calcular la inducción magnética media instantánea en la muestra.



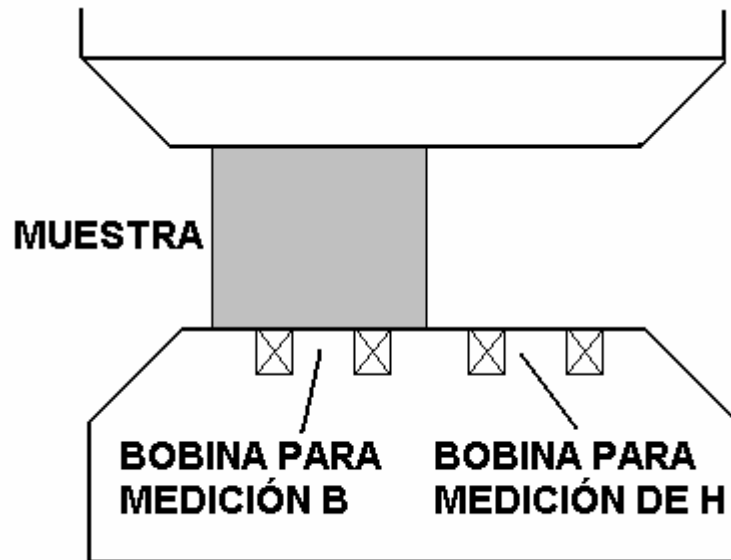
La medición del campo H aplicado puede realizarse con una sonda Hall conectada a un Gaussímetro o Teslámetro. También, puede usarse una bobina de punto conectada a un fluxómetro, a cuya programación deberán ingresarse los parámetros de la bobina de punto utilizada:



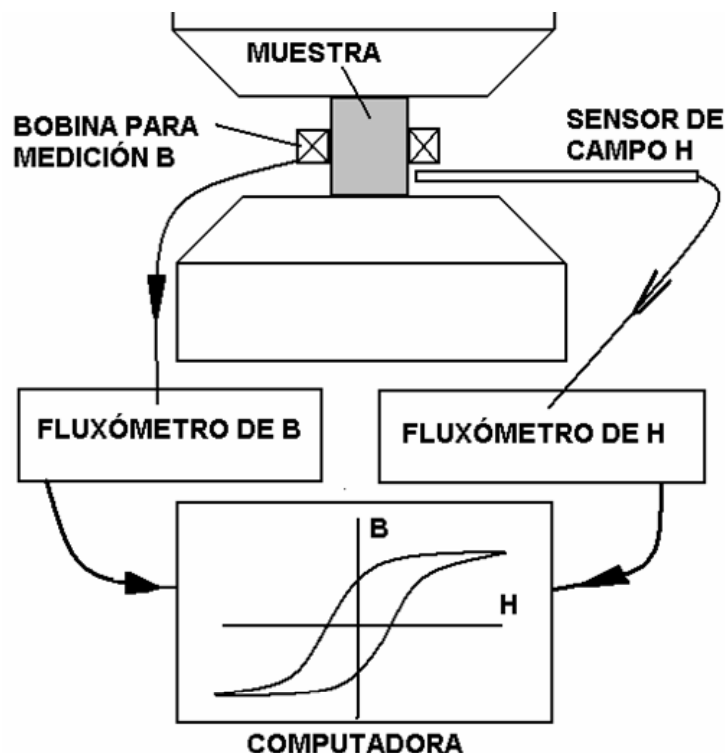
Para la medición del campo H, se utiliza la aproximación de medir el campo existente en el aire en una zona próxima a la muestra. La aproximación está basada en la suposición de que el campo H en esa zona es igual al campo H que las expansiones polares están aplicando a la muestra. Dicho de otra forma, se está suponiendo que la presencia de la muestra no altera la distribución de campo del entrehierro, lo cual nunca es totalmente cierto. Sin embargo, aunque la muestra captará más flujo magnético que el aire circundante, dado que las expansiones polares se construyen con un material de muy alta permeabilidad, que la sección de las expansiones es mucho mayor que la de la muestra y que los materiales magnéticos duros tienen una permeabilidad magnética baja, resulta que la aproximación descrita introduce un error bajo en la medición.

Generalidades sobre imanes permanentes y su caracterización

La disposición de medición anteriormente descrita mide el campo B medio en toda la muestra. Además es necesario introducir en cada medición los datos de diámetro de la muestra, además de área y número de vueltas de la bobina de medición de B. Para mejorar estos aspectos algunos histeresígrafos presentan el siguiente esquema de medición:



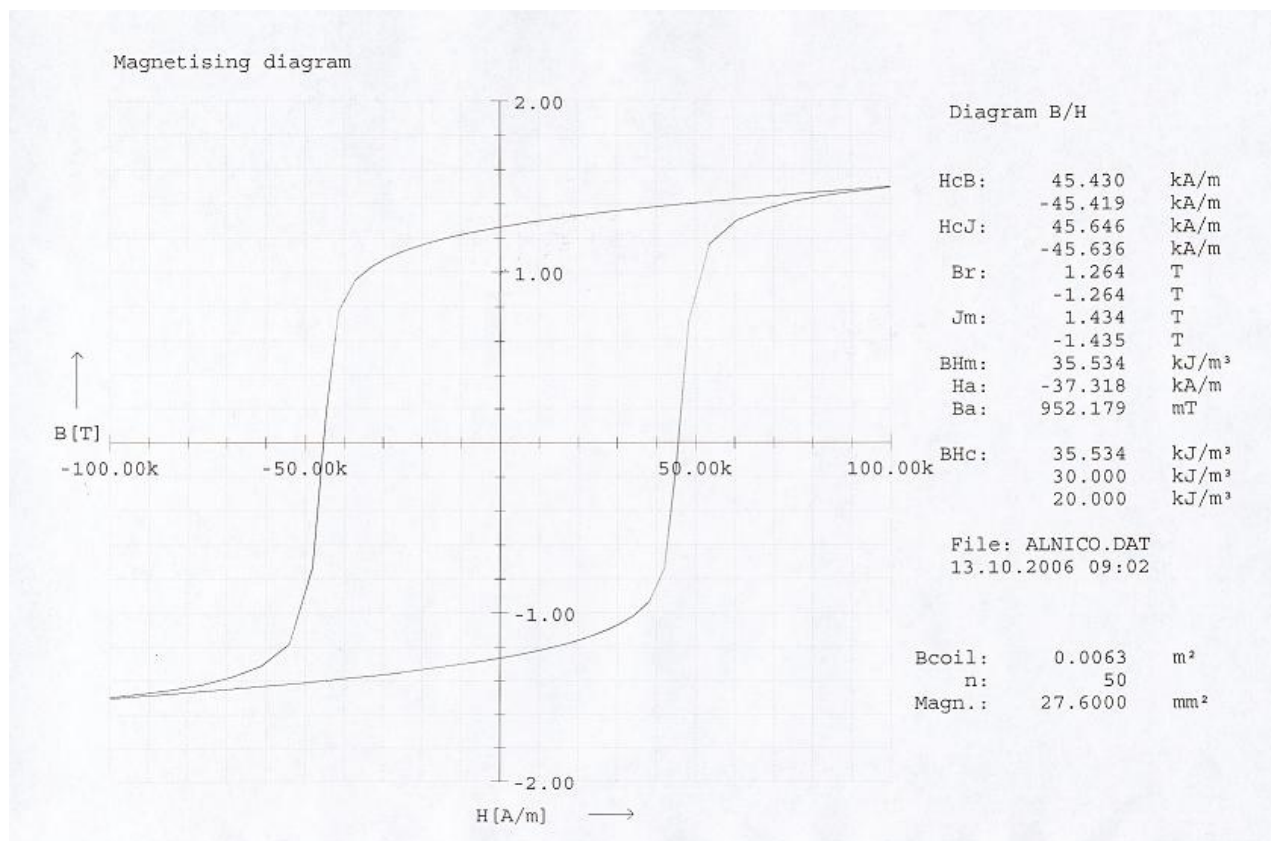
La expansión polar presenta alojamientos para dos bobinas las cuales se conectan a sendos fluxómetros. Las muestras pueden exceder el tamaño de la bobina para medición de B ya que la bobina sólo medirá el flujo que corresponde a su área, por lo que el resto del flujo no será medido. De esta forma el área a la que el fluxómetro tiene que asignar el flujo medido es siempre igual. Además, la muestra puede ser medida en varias posiciones para evaluar su anisotropía. El esquema completo de medición puede verse en la figura siguiente:



Generalidades sobre imanes permanentes y su caracterización

Una PC recibe los valores instantáneos de B y H con los que elabora el diagrama correspondiente. El software de la PC permite procesar la información recibida de distintas formas, por ejemplo, puede trazar el diagrama B-H, el J-H, modificar las escalas de los ejes, acceder a cualquier punto del diagrama para apreciar sus coordenadas con mayor resolución que la que brinda el gráfico, etc.

El siguiente es un lazo de histéresis B-H de un Alnico V trazado por el histeresígrafo del INTI-Córdoba:



Además de trazar el diagrama para su observación el software proporciona un listado de valores numéricos que corresponden que pueden observarse en el costado derecho de la figura y que son los siguientes:

- 1) HcB: Coercitividad de B
- 2) HcJ: Coercitividad de J
- 3) Br: Inducción remanente
- 4) Jm: Polarización de saturación
- 5) BHm: Producto de energía máximo
- 6) Ha y Ba, coordenadas del producto de energía máximo

Los demás parámetros caracterizan condiciones particulares de ensayo

Generalidades sobre imanes permanentes y su caracterización

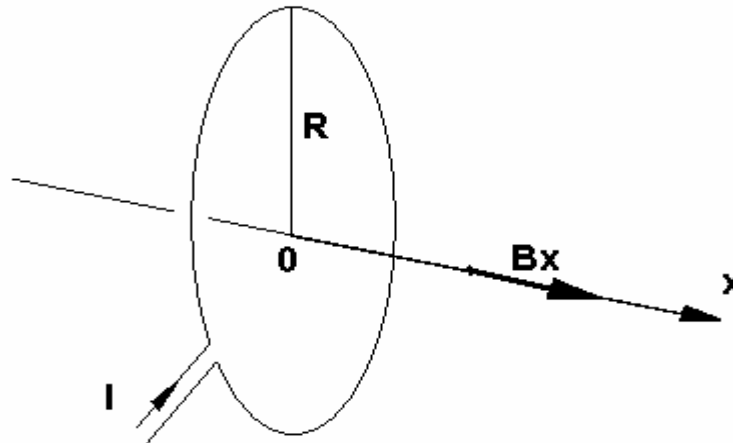
VI.4) Bobinas de Helmholtz

VI.4.1) Introducción:

El campo magnético generado sobre el eje de una espira circular de radio R, recorrida por una corriente I, está dado por la siguiente expresión:

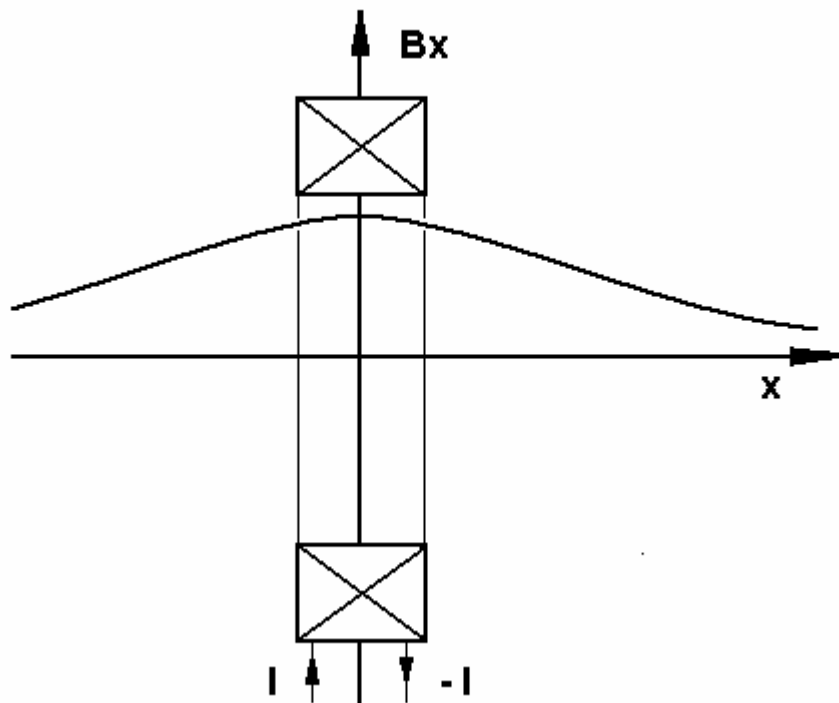
$$B(x) = \frac{1}{2} \mu_0 I R^2 (R^2 + x^2)^{-3/2}$$

CAMPO EN EL EJE DE UNA ESPIRA



La expresión anterior, multiplicada por el número de vueltas, representa el campo en el eje de una bobina de N espiras, de radio medio R, recorrida por una corriente I. Graficando el campo en función de la distancia x medida sobre el eje de la bobina, la curva tiene una forma como muestra el siguiente gráfico:

CAMPO EN EL EJE DE UNA BOBINA

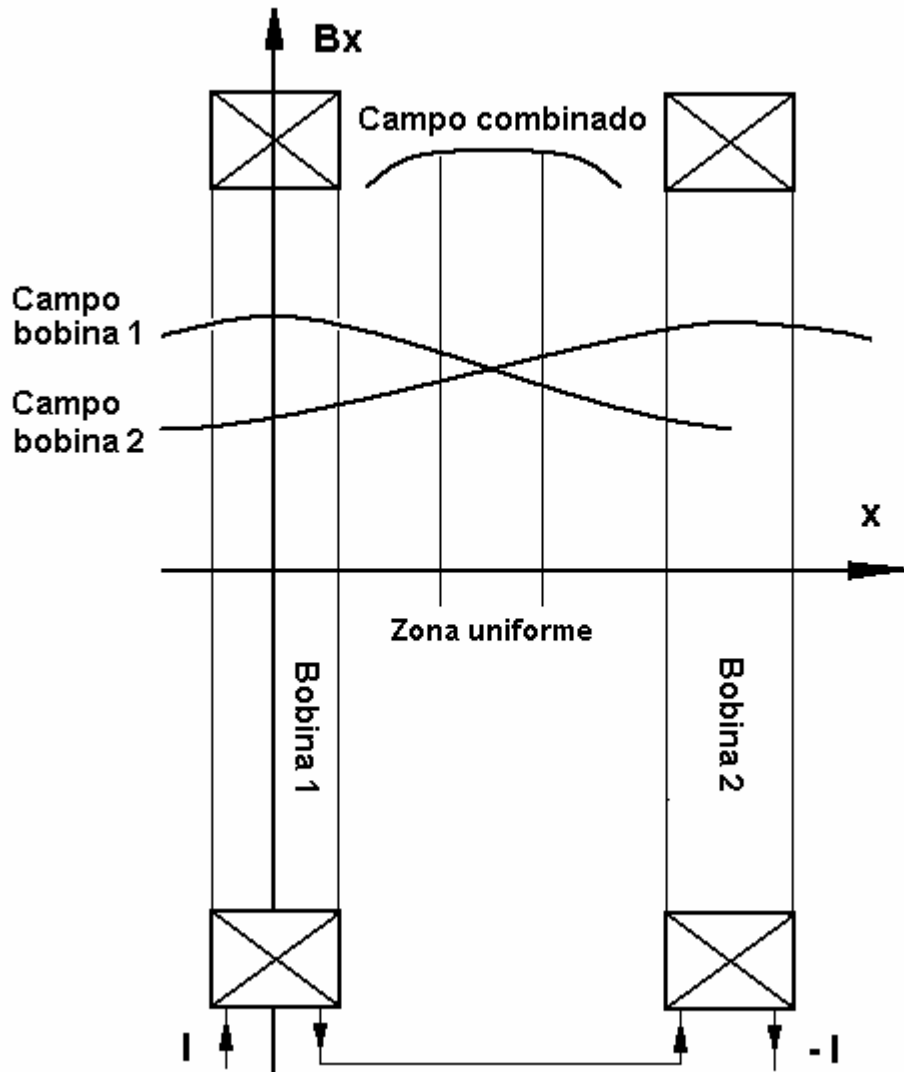


Se observa que la curva de B en función de la distancia tiene una forma de "S". En las proximidades del punto de inflexión de esta curva, la ley de variación es aproximadamente lineal. Si se montan dos bobinas como la anterior a una distancia adecuada y de forma de sus ejes coincidan, se conectan en serie y se hace circular una corriente, resulta que en la zona intermedia de ambas bobinas, se obtiene una amplia zona en la cual el campo es constante. Este conjunto se denomina "Bobinas de Helmholtz" en honor al físico alemán Hermann von Helmholtz.

VI.4.2) Las bobinas de Helmholtz como generador de campo conocido:

En el punto medio entre ambas bobinas, los dos arrollamientos imponen campos iguales, por lo que el campo total es el doble del que impondría una sola bobina. Fuera del punto central, siempre según el eje, resulta que la disminución del campo que aporta la bobina que quedó más lejos es compensado por el aumento de la que quedó más cerca, por lo cual el campo total permanece aproximadamente constante:

CAMPO EN EL EJE DE UN PAR DE BOBINAS DE HELMHOLTZ



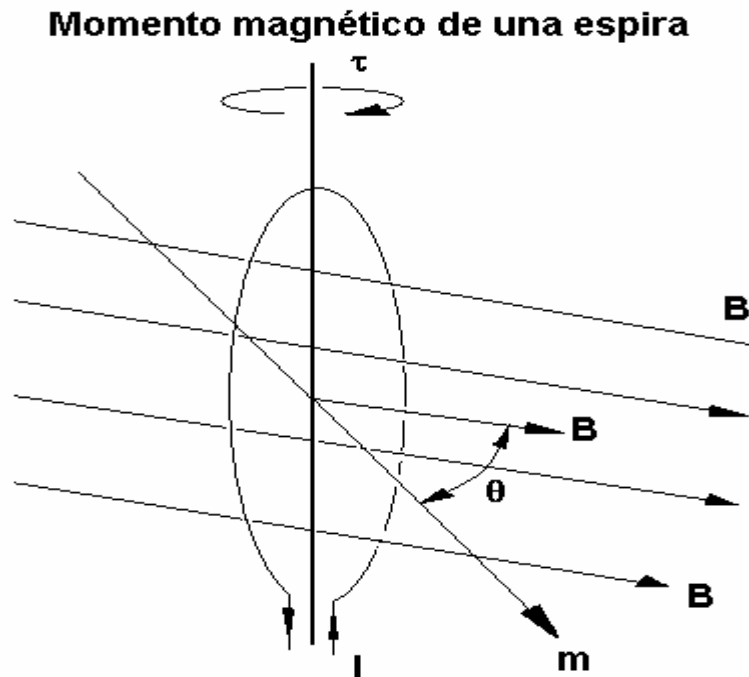
Cuando las bobinas están construidas de forma tal que su separación es igual a su radio, se obtiene la mejor compensación. En estas condiciones hay una zona con una longitud igual a un tercio del radio de las bobinas, cuya uniformidad es del orden del 1 %. Por ejemplo, si las bobinas tienen un radio medio de 120 mm, deberán estar separadas 120 mm y se tendrá una zona de 40 mm (20 mm a cada lado punto central) cuyo campo diferirá en menos del 1 % del campo en centro. Por otro lado, el campo en el centro se calcula en función de las dimensiones de las bobinas, el número de vueltas y la corriente que circula.

Con una construcción medianamente cuidadosa, las dimensiones físicas y el número de vueltas pueden conocerse con suficiente exactitud como para que introduzcan una incertidumbre menor que 1%. La corriente puede medirse con una incertidumbre mucho menor que el 1%. Combinando todas las fuentes de error, un juego de bobinas de Helmholtz permite generar campos magnéticos continuos o alternos con una incertidumbre mejor que el 2 % en la mencionada zona de uniformidad. Extremando las precauciones constructivas o midiendo la constante (Gauss/Ampere) de un juego particular de bobinas, puede mejorarse la incertidumbre mencionada.

VI.4.2) Las bobinas de Helmholtz como medio de caracterización de materiales magnéticos:

Introducción:

Momento magnético de una espira:



Sobre una espira de área A, contenida en un plano cuya normal forma un ángulo θ con la dirección del campo magnético B, recorrida por una corriente I, inmersa en un campo magnético B, aparece una cupla τ , cuya magnitud responde a la siguiente ecuación:

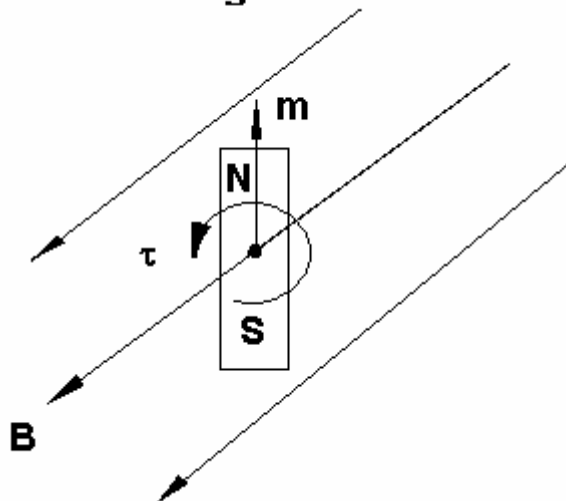
$$\tau = B \times I \times A \times \text{sen } \theta$$

El producto $I \times A$ se define como momento magnético (m) de la espira. Entonces:

$$\tau = B \times m \times \text{sen } \theta$$

Cuando en lugar de insertarse en el campo magnético una espira recorrida por una corriente, se inserta un imán, sobre éste también aparece una cupla:

Momento magnético de un imán



Generalidades sobre imanes permanentes y su caracterización

En este caso el momento mecánico que aparece es el siguiente:

$$\tau = B \times \Phi \times L_m \times \sin \theta$$

Siendo Φ el flujo del imán y L_m la distancia entre polos magnéticos de mismo (que no necesariamente es la longitud física del mismo).

Poniendo el flujo en función de la polarización y el área:

$$\tau = B \times J \times A \times L_m \times \sin \theta$$

El producto $J \times A \times L_m$ se denomina momento magnético del imán (m), por lo que la fórmula queda:

$$\tau = B \times m \times \sin \theta$$

Como $m = J \times A \times L_m = J \times V$, siendo V el volumen del imán, se tiene que $J = m/V$, por lo que la polarización magnética intrínseca J , se puede definir como el momento magnético por unidad de volumen del material.

Medición de momento magnético con bobinas de Helmholtz:

Si se coloca un imán dentro del volumen de campo uniforme de un juego de bobinas de Helmholtz, dicho imán interactuará con el campo de las bobinas. Sobre dicho imán aparecerá un par mecánico proporcional al momento magnético de la muestra y al campo generado por las bobinas. Por el principio de reciprocidad, si en lugar de insertar corriente a las bobinas se las conecta a un fluxómetro, al insertar el imán en el volumen mencionado de forma que el campo magnético del imán sea coaxial con las bobinas, se inducirá una tensión en las bobinas, tal que convertida en flujo por el fluxómetro, arrojará un valor de flujo proporcional al momento magnético de la muestra.

En términos matemáticos:

$$m = k \Phi$$

m = momento magnético de la muestra

k = constante del juego de bobinas de Helmholtz

Φ = Flujo medido por el fluxómetro conectado a las bobinas de Helmholtz.

Una vez obtenido el momento magnético de la muestra, se obtiene la polarización magnética de misma en función de su volumen:

$$m = J \times V \quad \Rightarrow \quad J = m / V$$

Si el imán estaba saturado, la polarización que se mide es la polarización de saturación. Mediante la permeancia del imán (parámetro que se obtiene a partir de su geometría), se puede trazar la recta de carga. La intersección de la recta de carga con la recta $J = J$ medida, determina la coordenada H del punto de trabajo. A partir del punto de trabajo, se traza una recta cuya pendiente es la denominada permeabilidad de reciclado (recoil permeability) que es parámetro que puede obtenerse de la hoja de datos del material magnético. El método descrito es apto particularmente para imanes de alta coercitividad, los cuales pueden mantener una polarización intrínseca próxima a la polarización de saturación, fuera del circuito magnético. Se está suponiendo además que el material ensayado no presenta codo en el segundo cuadrante.

Obtención de parámetros con bobinas de Helmholtz

