

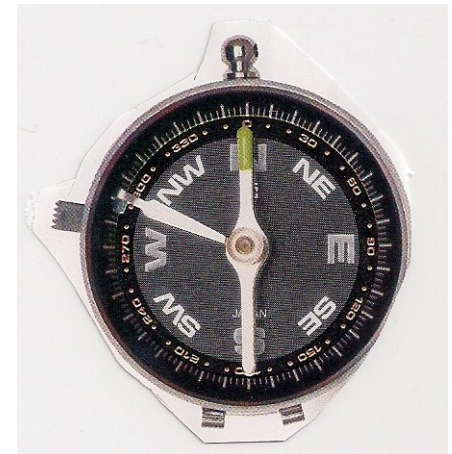
# Magnetismo y Electromagnetismo

Ing. Arturo Gustavo Tajani

Algo de historia: En la antigua Grecia, hace mas de 2000 años, se sabía que ciertas piedras procedentes de una región del Asia Menor (Magnesia), tenían la extraña propiedad de atraer a trozos de hierro; hoy las llamamos “magnetitas” y también incorporamos la palabra “magnetismo” para referirnos al fenómeno.

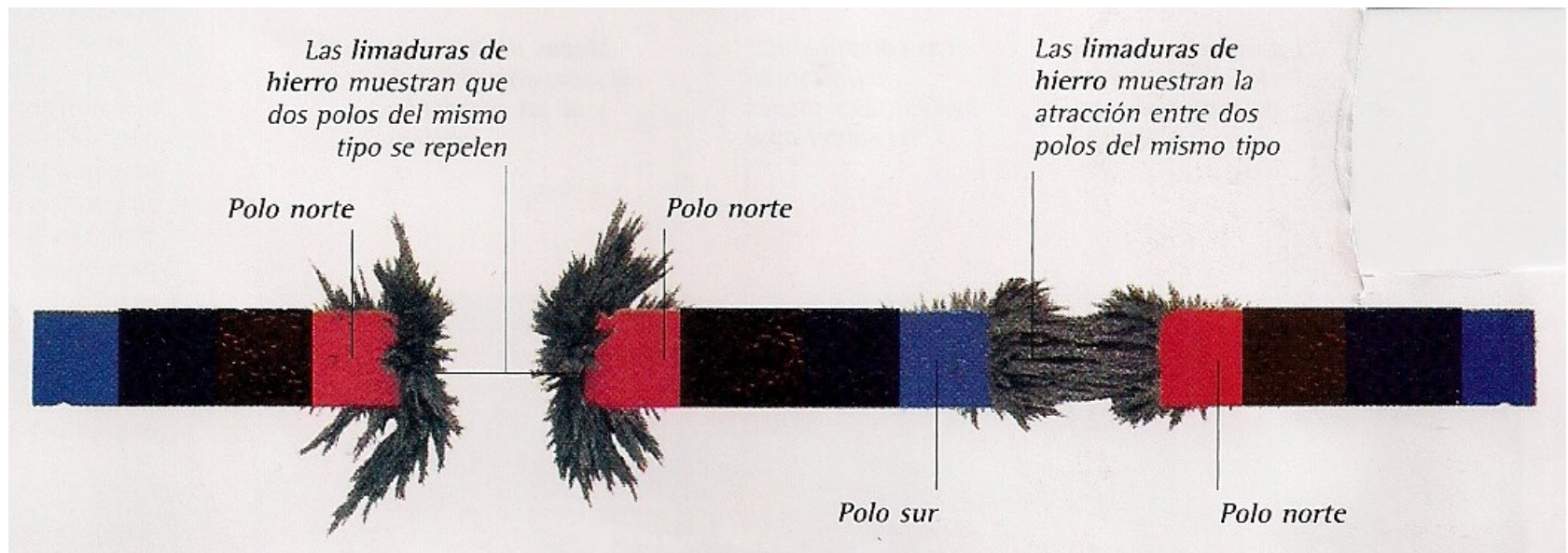
Hay algunos indicios de que exploradores chinos hace unos 3000 años, conocían el uso de magnetitas que, suspendidas libremente, siempre apuntaban hacia el norte.

No se sabe con exactitud cuando se usó un imán (obtenido por frotamiento de magnetitas con hierro), para ayuda en la navegación, pero existen referencias de su empleo en el siglo XII (años 1100 de nuestra era).



En el año 1600 William Gilbert (inglés 1544-1603), descubrió la razón de la orientación natural de la aguja de una brújula y habló concretamente de “polos magnéticos”. En 1750 John Michell (inglés 1724-1793), estudió la atracción y repulsión de los polos magnéticos y dio una expresión matemática.

Hacia 1770 el francés Charles Coulomb (1736-1806), confirmó los resultados anteriores e introdujo la idea fundamental de la *imposibilidad de existencia de polos magnéticos aislados*; es decir que todo imán presenta en forma excluyente dos zonas diferenciadas que se llamaron “norte” y “sur”.



Recordemos que “*La Tierra*” se comporta como un *inmenso imán natural*, que presenta, por supuesto, dos polos.

El extremo de la brújula que apunta al polo norte geográfico se lo calificó como “polo norte”, aunque magnéticamente debiera ser al revés.

El *campo magnético terrestre* se extiende desde el núcleo interno de la [Tierra](#) hasta el límite en el que se encuentra con el [viento solar](#), una corriente de partículas energéticas que emana de Sol.

Su magnitud en la superficie de la Tierra varía de 25 a 65  $\mu\text{T}$  (0,25-0,65  $\text{G}$ ).

Los dos polos magnéticos terrestres no coinciden exactamente con los polos norte y sur geográficos siendo las distancias que los separan, del orden de 1800 km para el polo norte y de 2700 km para el polo sur.

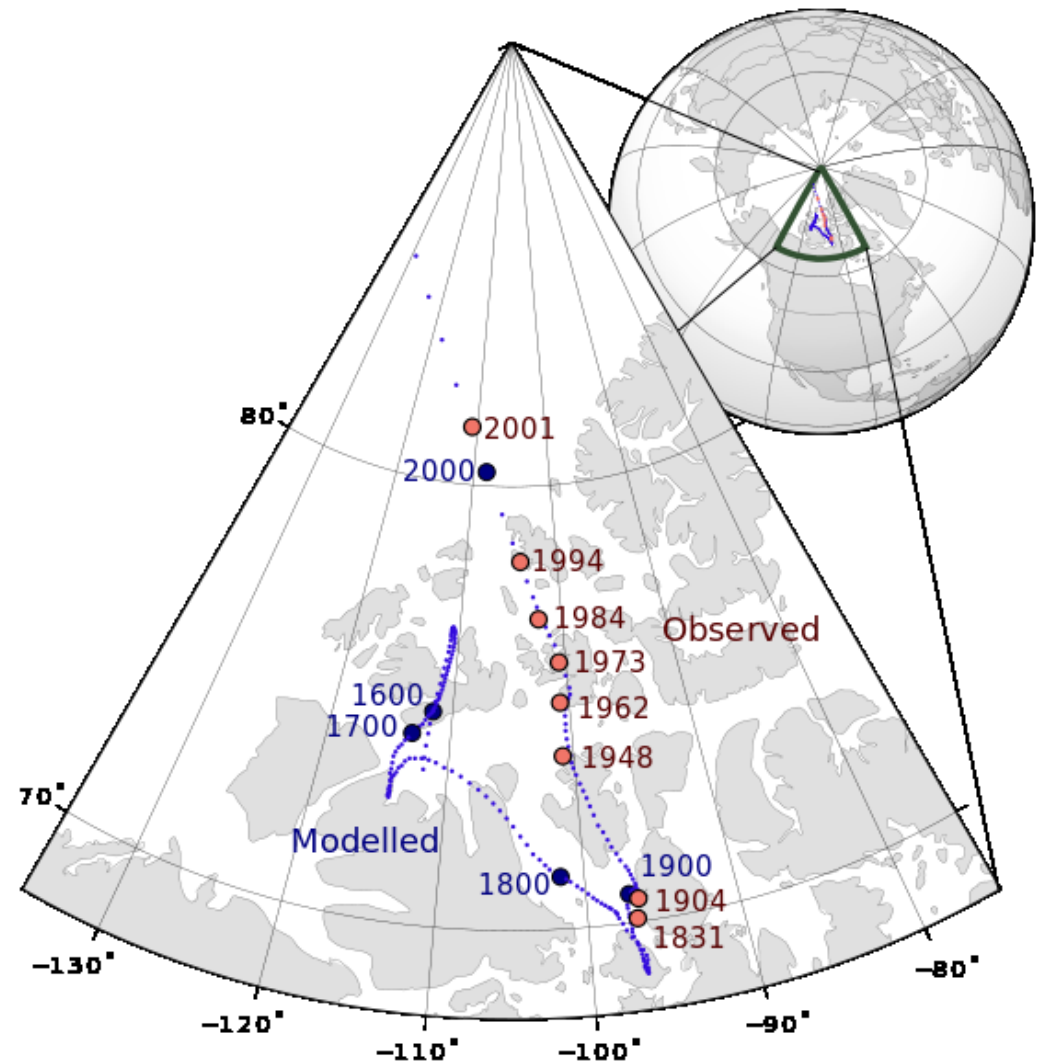
En realidad los polos magnéticos varían de posición con el transcurso de los años. Se desplazan independientemente uno del otro y no están situados perfectamente enfrentados en puntos opuestos del globo. La recta que une a los polos magnéticos “no pasa” por el centro de la tierra

A lo largo de los últimos 180 años, el polo norte magnético ha estado migrando hacia el noroeste, siempre en el norte de Canadá.

En efecto, en 1831 estaba ubicado en el Cabo Adelaida en la península Boothia, mientras que en el 2001 se había corrido hasta la bahía Resolute a 600 km de distancia.

(Todos estos datos se han tomado de “Wikipedia”).

Por comprobaciones geológicas se sabe que el campo terrestre ha invertido su polaridad (hace aprox. 780000 años).





Una experiencia práctica real nos muestra que haciendo circular por una bobina una corriente eléctrica, aparecen efectos magnéticos sobre trozos de hierro que normalmente no estaban imantados.

Son los llamados “electroimanes”, cuyas aplicaciones tecnológicas son muy difundidas.

Quando no  
circula corriente  
no aparecen  
efectos  
magnéticos.



Al hacer circular  
corriente,  
en forma  
inmediata, la  
atracción  
magnética se  
manifiesta.



En septiembre de 1820 Hans Christian Oersted (dinamarqués, 1777- 1851), descubrió el campo magnético producido por una corriente eléctrica y el desvío de la aguja de una brújula por la acción de esa corriente cercana.

En forma inmediata los franceses J.B. Biot (1774-1862) y F. Savart (1791-1841) trabajando en conjunto y A.M. Ampere (francés 1775-1836) por separado, ampliaron los experimentos y elaboraron toda una teoría.

La simultaneidad histórica de las experiencias realizadas y las consecuencias teóricas publicadas, hacen que distintos autores adjudiquen en forma diferente la paternidad de algunas expresiones.

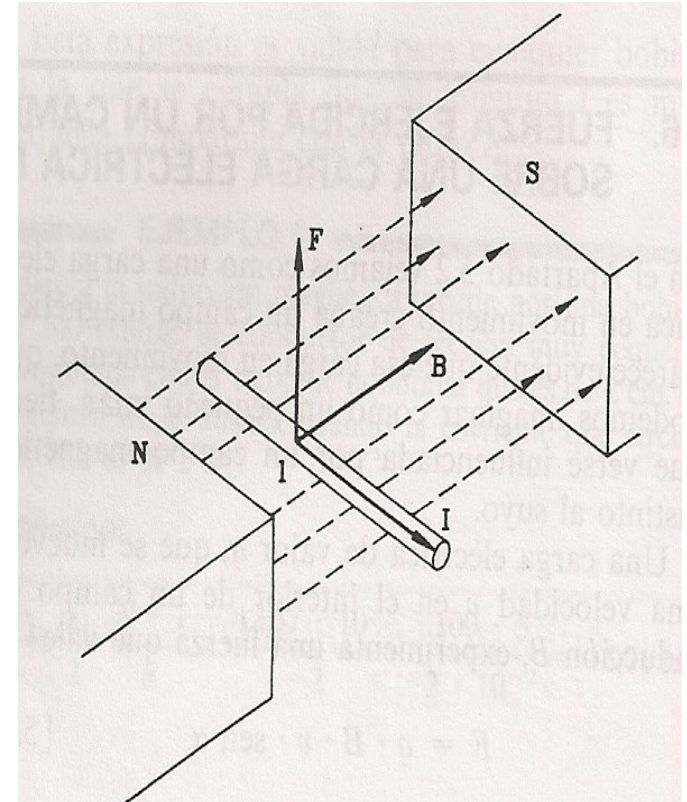
El estudio teórico-matemático del magnetismo, hace necesario definir con claridad el concepto de “campo magnético”, es decir la región del espacio donde un “imán” experimenta fuerzas de atracción o de repulsión.

Veremos seguidamente la expresión matemática fundamental que relaciona el vector “campo magnético  $B$ ” en un punto del espacio, con el “elemento de corriente” que lo produce. Se definirá asimismo la unidad correspondiente.

Si una corriente eléctrica de intensidad “ i ” circula por un conductor de longitud “ l ”, influenciado por un campo magnético que llamaremos “ B ” y siendo  $\Theta$  el ángulo entre B e l, aparece naturalmente una fuerza “ F ”, expresada matemáticamente por el producto vectorial:

$$F = i (l \times B) = i \cdot l \cdot B \cdot \text{Sen } \Theta$$

La dirección y el sentido de la fuerza definida, que suele llamarse “fuerza de Laplace”, se determina con la “regla de la mano izquierda”: Las líneas del campo B entran por la palma, los dedos se extienden en la dirección de la corriente y el pulgar separado, señala F.



Despejando B se tiene:  $B = \frac{F}{i l \text{ sen}\Theta}$

y si B e l son perpendiculares entre si,  $\text{sen } 90^\circ = 1$  :

$$B = \frac{F}{i l}$$



Así la expresión anterior permite definir la unidad en que se mide “B” en el Sistema Internacional:

$$B(\text{Tesla}) = \frac{F(\text{Newton})}{i(A).l(m)} ; \quad T = \text{N/Am}$$

Señalamos que la definición del Tesla, queda expresada en función de valores medibles con cierta facilidad.

B es obviamente una magnitud vectorial. Por razones históricas B se solía llamar “*Inducción Magnética*” o también “*Densidad del flujo Magnético*”, pero es conveniente en la actualidad llamarlo solo “Campo Magnético B” (ó simplemente “*campo B*”).

Obsérvese que en las consideraciones anteriores no se menciona en absoluto el origen del campo B.

No debe confundirse con el concepto de “*intensidad del campo*” que veremos mas adelante.

En algunos textos antiguos se emplea la unidad cgs. de campo mag.: el Gauss. La equivalencia es: 1 Tesla = 10000 Gauss.

## Líneas de inducción magnética

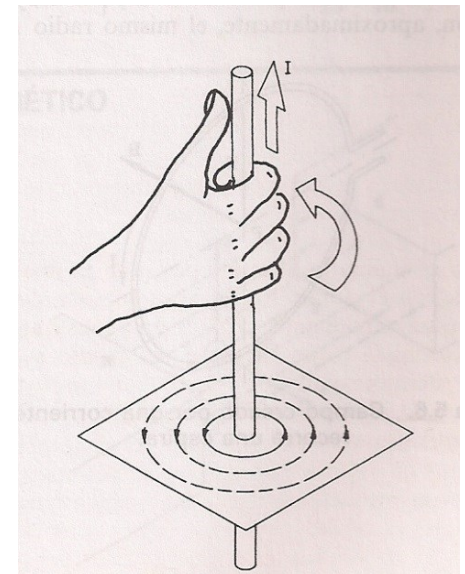
Es habitual (y también conveniente), describir un *campo magnético* gráficamente, dibujando líneas que sean paralelas al *campo*  $B$  en cada punto del espacio.

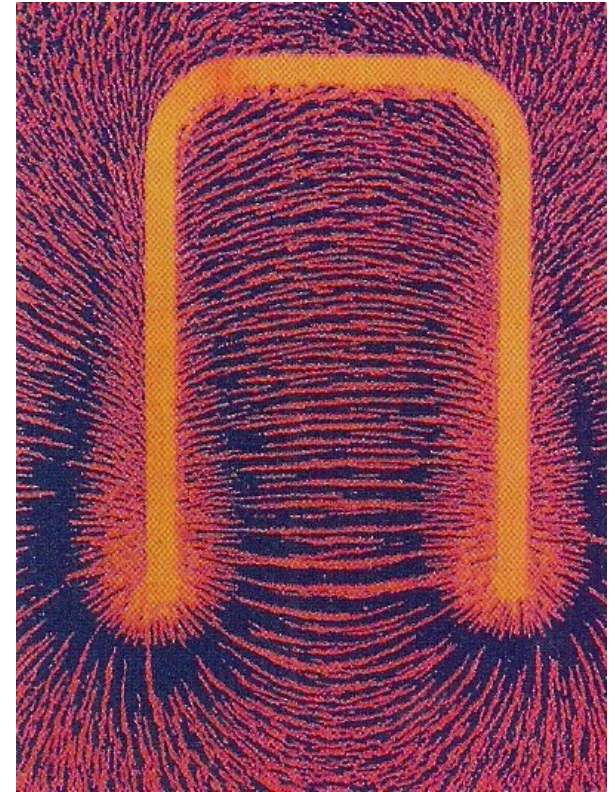
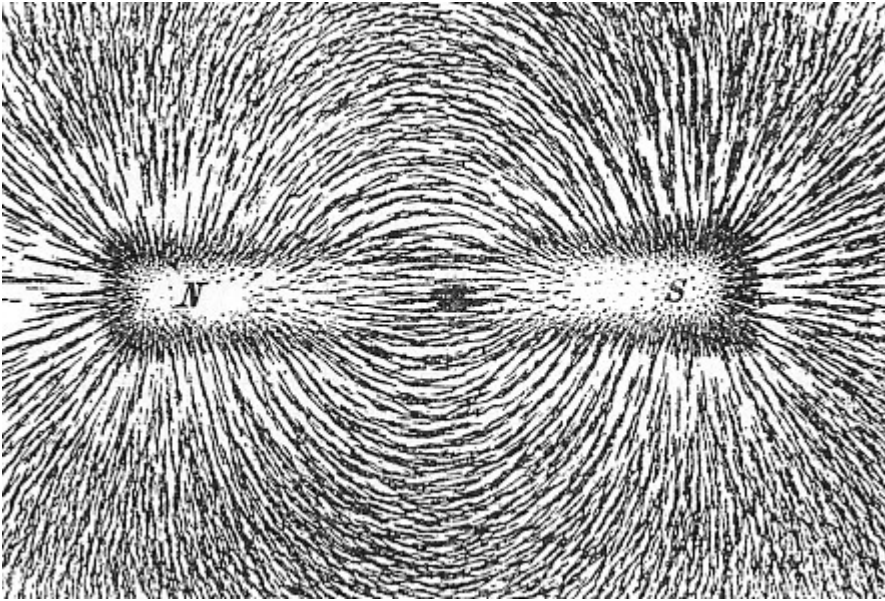
La *densidad* de las líneas se hace proporcional al *módulo del vector*  $B$ , y se les adjudica una dirección, mediante una flecha, siempre orientadas del polo Norte magnético al polo Sur. Debe de tenerse en claro que estas líneas *nunca se cruzan*.

Esta representación permite “ver” una cómoda representación *cualitativa del campo*  $B$ .

En el caso particular del campo magnético producido por un conductor rectilíneo, las líneas de inducción se disponen alrededor del conductor, en planos normales al mismo y en forma circular.

*El sentido de las líneas de inducción está dado por la regla de la mano derecha, o del sacacorchos o del tornillo:*

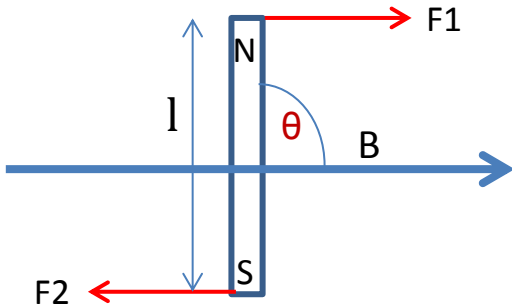




Líneas de Inducción o de fuerza, materializadas mediante limaduras de hierro esparcidas sobre una cartulina colocada sobre imanes artificiales.

Los imanes son de acero, con forma de barra y de herradura respectivamente.

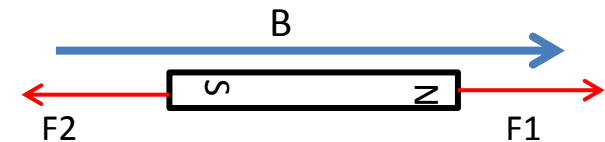
## Comportamiento de un “imán” en el interior de un campo magnético “B”:



En forma espontánea aparecen sobre los polos del imán dos fuerzas  $F_1$  y  $F_2$ . La primera sobre el polo “norte”, con la dirección y el sentido de  $B$  y la segunda, sobre el polo “sur”, con igual dirección pero de sentido contrario al campo.

Suele definirse la “intensidad del polo ( $q^*$ )” del imán como:  $q^* = F / B$  (Ampere metro) (Am). (recordar que “ $q$ ” señala una carga eléctrica, mientras que “ $q^*$ ” designa a un polo magnético). *Se debe tener presente que NO existen polos magnéticos aislados.*

Si el imán esta libre y puede girar, tenderá a alinearse con el campo magnético  $B$ , (es el caso de una brújula). Es importante recordar esta alineación espontánea del imán con  $B$ .

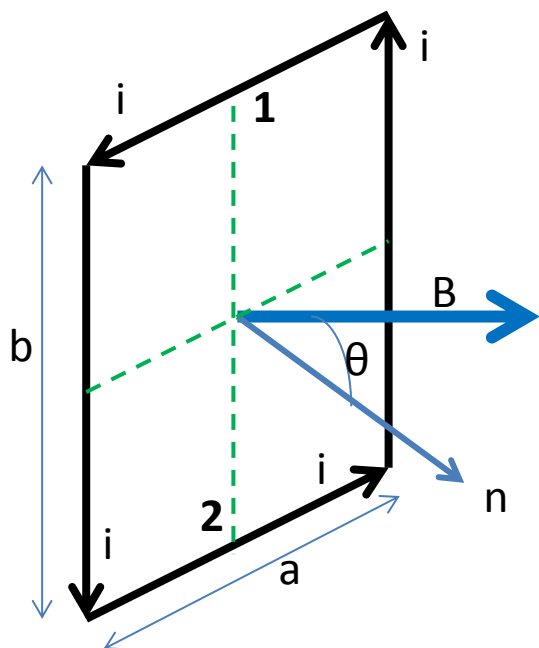


Mecánicamente el cambio de orientación se debe a la aparición de un “momento”:  $M = F.l = q^*.l.B.\text{sen } \theta$ , donde “ $q^*.l$ ” es un valor propio del imán que se conoce como momento magnético del mismo.

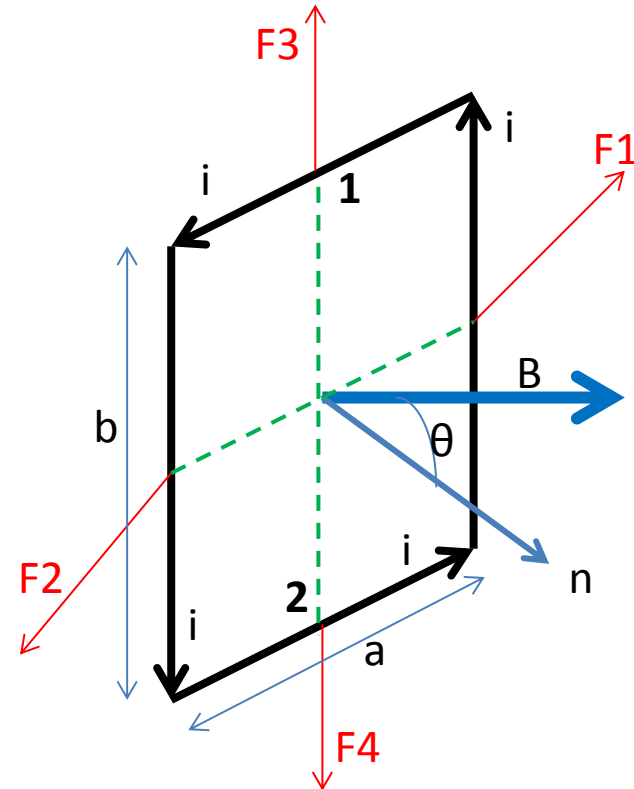


Momento que actúa sobre una espira rectangular,  $(a.b)$ , por la que circula una corriente “ $i$ ” en el interior de un campo magnético “ $B$ ”:

-La espira rectangular de alambre conductor, está suspendida por los puntos **1** y **2**. Actúa un campo  **$B$**  uniforme, que forma un ángulo  **$\theta$**  respecto del plano de la espira “ **$n$** ”. Por la espira circula la corriente  **$i$** .



Momento que actúa sobre una espira rectangular, (a.b), por la que circula una corriente “i” en el interior de una campo magnético “B”:



-La espira rectangular de alambre conductor, está suspendida por los puntos 1 y 2. Actúa un campo  $B$  uniforme, que forma un ángulo  $\theta$  respecto del plano de la espira “n”. Por la espira circula la corriente  $i$ .

-Según la expresión vista, sobre cada lado de la espira aparece una fuerza:  $F = i.l.B.\text{sen}\theta$ .

-Las fuerzas  $F_1, F_2, F_3$  y  $F_4$ , las suponemos aplicadas, por simetría, en los puntos medios de cada lado de la espira rectangular.

El momento de giro que actúa sobre la espira, está dado solo por  $F_1$  y  $F_2$ :  $M = F_1 \cdot a = F_2 \cdot b$ , ya que  $F_3$  y  $F_4$  accionan en la dirección del vínculo (suspensión).

Los valores serán:  $M = i b B a \text{sen } \theta$ ; pero:  $a \cdot b = A$  (área del rectángulo);

con lo que la expresión del momento de giro queda:  $M = i A B \text{sen } \theta$

Si la espira de corriente está libre de girar, lo hará hasta que el plano de la espira sea perpendicular al campo  $B$  ( $\theta = 0$ ).

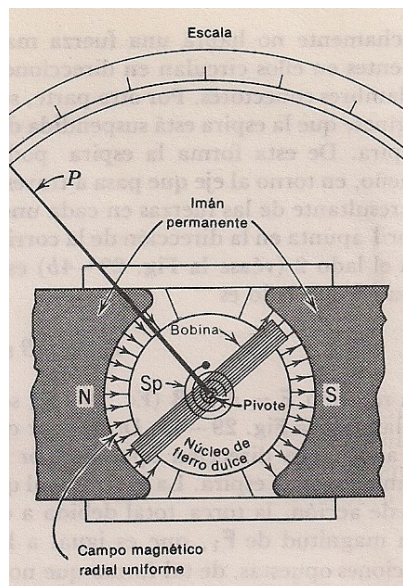
Se puede señalar, por analogía con el caso del imán permanente, que hay un momento magnético de la espira:  $m = i \cdot A$  ( $\text{Am}^2$ ).

Por supuesto que para una “bobina chata” de  $N$  espiras, se multiplicará todo por  $N$ :

$$M = N i A \sin\theta$$

$$m = N i A$$

Una aplicación importante de esto es el “*galvanómetro D’arsonval*”, también conocido como instrumento de “*imán permanente y bobina móvil*”.



Como se ve en la figura, el campo  $B$  es radial a la bobina, de modo que el ángulo  $\theta$ , entre  $B$  y la normal al plano de las espiras sea de  $90^\circ$ , independientemente de la orientación del sistema móvil.

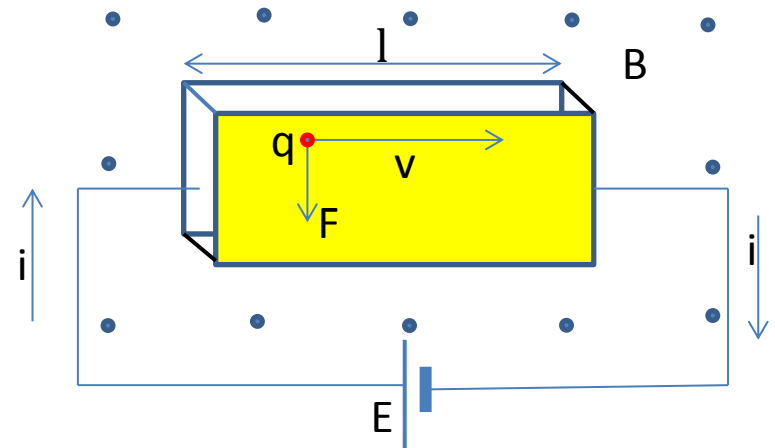
El momento producido es proporcional a “ $i$ ” y se equilibra con el par antagónico de los resortes planos de suspensión, par que es proporcional al ángulo de giro de la bobina.

El ángulo de equilibrio “ $\alpha$ ” es proporcional a la corriente “ $i$ ”.

$$\alpha = k \cdot i$$

## Efecto Hall:

Supongamos que una cinta conductora ancha, por la que se hace circular una corriente “i”, está influenciada por un campo magnético “B”, perpendicular (dirigido hacia afuera de la pantalla).



Aparecerá una fuerza  $F = i.l.B$

Si admitimos que la corriente consiste en un flujo de partículas cargadas puede expresarse “i” como “q/t” y la longitud “l” como “v.t”.

Reemplazando se tiene:  $F = q/t \cdot v.t \cdot B = q.v.B$ .

Esta fuerza aplicada a los portadores de carga (electrones), los desvían hacia una de las caras laterales, donde se acumulan y originan una diferencia de potencial medible, llamada “fem de Hall -  $V_h$ ” (Edwing H. Hall . Norteamericano 1855-1938).



Por supuesto que la “fem de Hall” depende en forma complicada no solo de las medidas geométricas de la cinta, sino fundamentalmente del material empleado (un metal o un semiconductor).

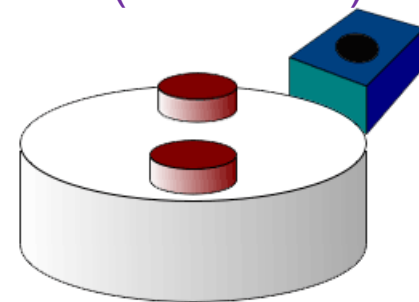
Pero una cinta determinada en medidas y material, puede calibrarse, midiendo la fem Hall ( $V_h$ ), para una intensidad de corriente fijada y dentro de un campo magnético conocido. Se obtendrá en cada caso una constante ( $K_h$ ).

$$V_h = K_h \cdot I \cdot B$$

Actualmente se mide el valor de B de un campo desconocido con este método, haciendo circular una corriente conocida y midiendo la  $V_h$ .

Analizando cuidadosamente todas las polaridades se pudo determinar experimentalmente que la corriente es un flujo de cargas negativas (electrones).

Asimismo se usa este efecto en muchos e ingeniosos sensores actuales, incorporado a muy variados dispositivos.



## Fuentes del campo magnético:

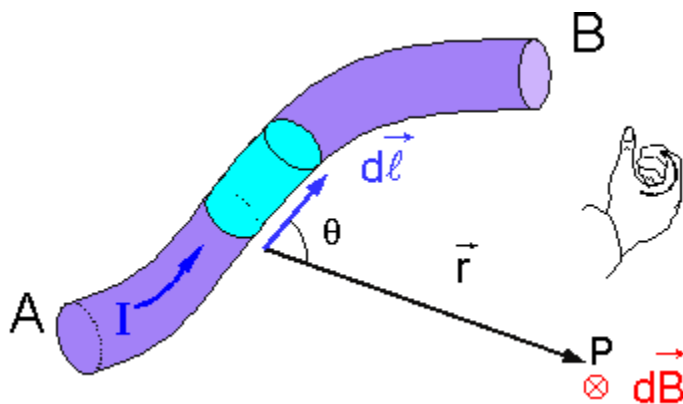
Las primeras fuentes de campos magnéticos fueron los imanes permanentes, ya sean “piedras naturales” (magnetitas) o bien trozos de hierro imantados por contacto.

Pero cuando se descubrió la posibilidad de crear campos magnéticos mediante corrientes eléctricas, nació el electromagnetismo, que estudiaremos con cierto detalle.

Como ya se mencionó, Biot y Savart y también Ampere, fundaron las bases teóricas que relacionaban la intensidad de la corriente eléctrica y la configuración geométrica de los conductores, con el campo producido  $B$ , en un punto del espacio.

El planteo matemático llevó a una “ecuación diferencial”:

## Ley de Biot-Savart - Ley de Ampere:



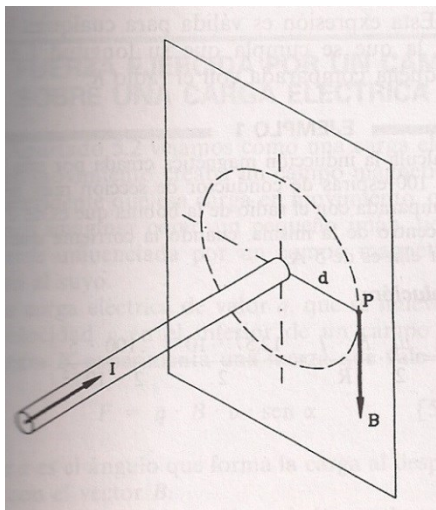
$$dB = K_m \frac{I dl}{r^2} \sin \Theta$$

Donde “B” es el campo magnético (en Tesla), “ $I dl$ ” es el elemento de corriente (en Ampere, que se definirá mas adelante), “ $r$ ” la distancia al punto considerado (en metro), y  $\Theta$  el ángulo formado por  $\vec{I dl}$  y  $\vec{r}$ .

La constante  $K_m$  se requiere para hacer que una ley experimental, sea compatible con el sistema de unidades. Su valor para el SI es exactamente  $K_m = 10^{-7} \frac{N}{A^2}$  y suele expresarse en función de otra,  $\mu_0$ , llamada “permeabilidad del espacio libre o del vacío”:

$$K_m = \mu_0 / 4\pi \longrightarrow \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} = 1,256 \cdot 10^{-6} \frac{N}{A^2} \text{ o } \frac{Tm}{A}$$

La ecuación diferencial de Biot-Savart o Ampere se ha integrado para diferentes configuraciones geométricas de uso frecuente y los resultados son:

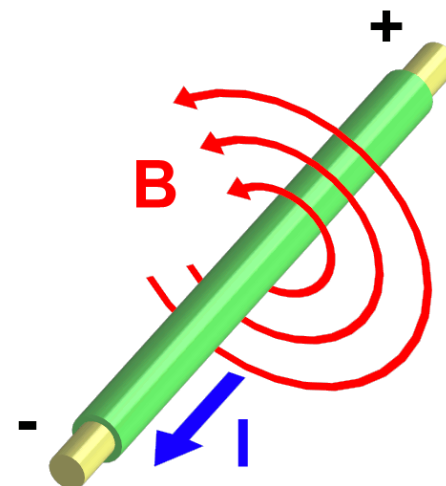


1. Campo magnético creado en un punto “P”, a una distancia “d” de un conductor rectilíneo infinito, por el que circula una corriente “I” :

$$B(T) = \frac{\mu_0}{2\Pi} \frac{I(A)}{d(m)} = K \frac{I}{d}$$

donde la constante K vale  $= \frac{\mu_0}{2\Pi} = 10^{-7} \frac{N}{A^2}$

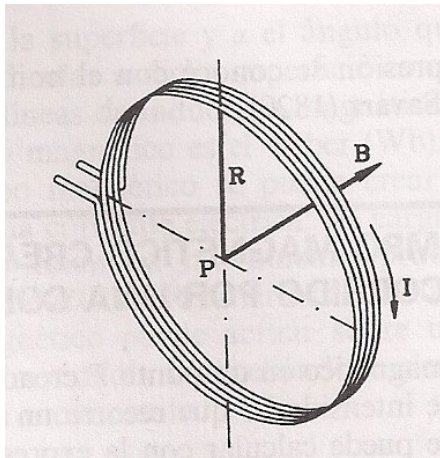
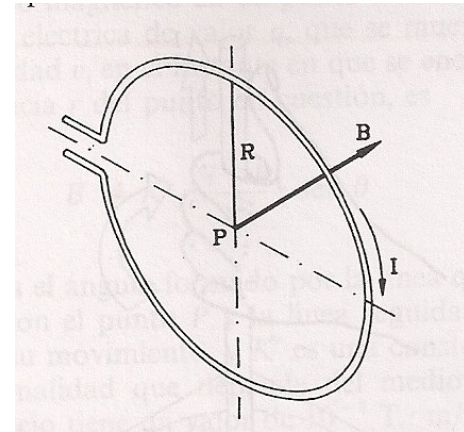
Se aclara que “B” es un vector aplicado en el punto “P”, cuya dirección es la recta tangente a la circunferencia de radio “d” que yace en un plano perpendicular al conductor rectilíneo. El sentido lo da, como ya vimos, la regla de la mano derecha.





2. Campo creado en el centro de una espira circular de radio "R", recorrida por una corriente "I":

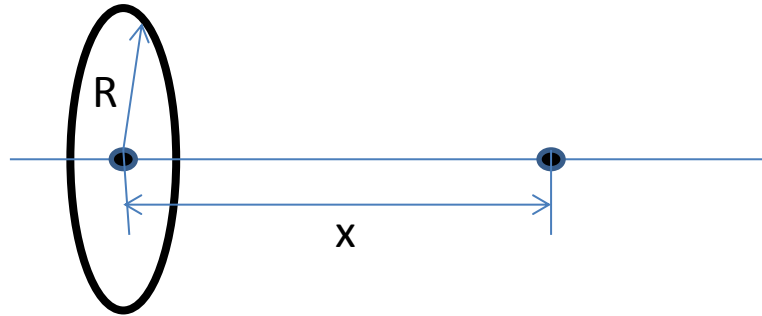
$$B = \frac{\mu_0}{2} \frac{I}{R} = \frac{\mu_0}{2 R} I$$



3. Si la estructura sigue siendo circular, con N espiras, pero se la puede considerar como "chata", se tendrá:

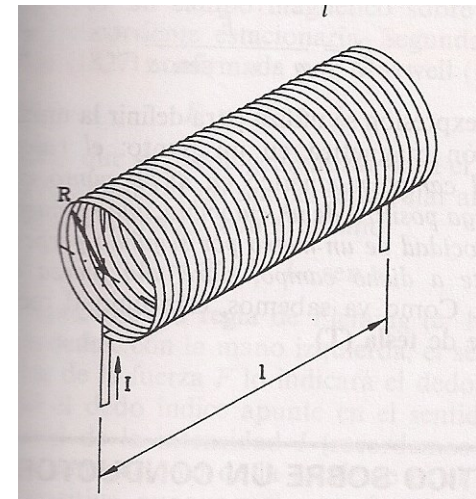
$$B = \frac{\mu_0}{2} \frac{IN}{R} = \frac{\mu_0 N}{2 R} I$$

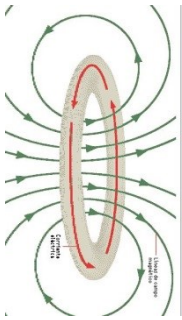
4. En el caso de una espira circular, se estudia el campo creado en un punto situado en el eje de la espira, pero a una distancia “x” del centro:


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

5. Un caso particular, pero muy generalizado e importante, es el de una “bobina” o “solenoides”, que consiste en varias espiras arrolladas sobre una superficie cilíndrica y dispuestas una a continuación de la otra, con un mismo radio y ocupando una longitud grande comparada con el diámetro de las espiras que lo forman.

Puede eventualmente estar formado por varias capas de alambre conductor (espiras encimadas).

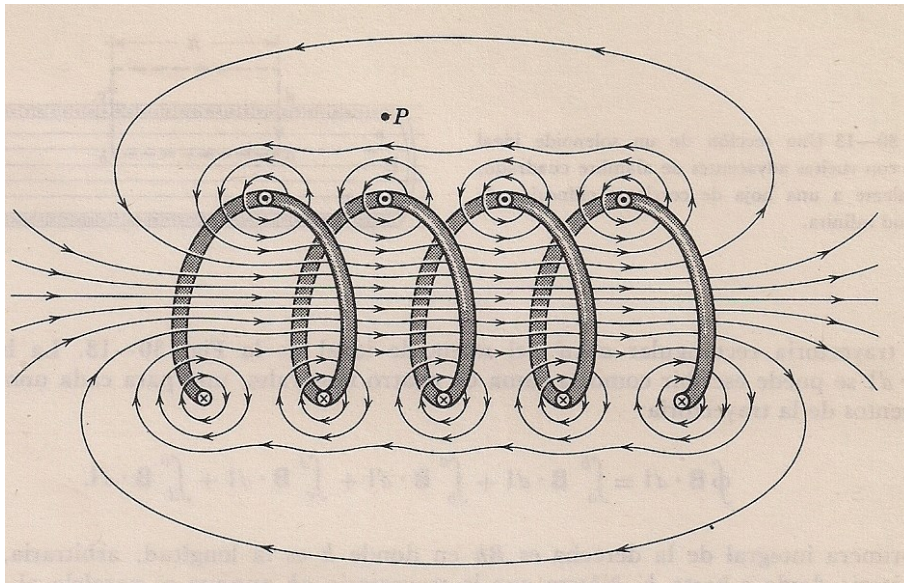




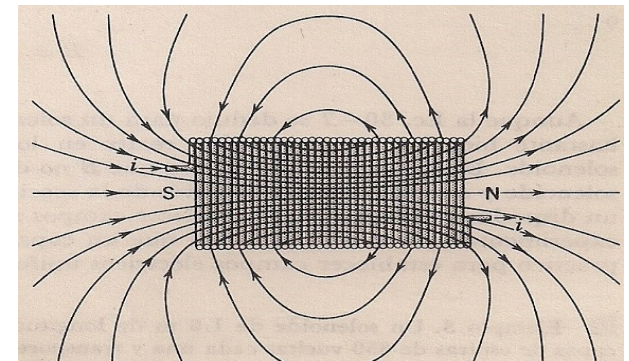
Se muestran en la figura las líneas de inducción que se producen al circular corriente por una espira.

En el solenoide real las espiras adyacentes se disponen sin espacio entre ellas.

En el dibujo que sigue se ve claramente como resultan las líneas magnéticas al sumarse vectorialmente los campos parciales.



En el interior de la bobina el campo se refuerza y tiende a ser paralelo al eje, por lo que el comportamiento del conjunto es semejante al de una barra sólida imantada.



El campo B tiene un valor constante en la parte central, con líneas de inducción aproximadamente paralelas al eje y uniformemente espaciadas. Se debilita algo hacia los extremos y en la parte exterior del solenoide el valor es algo mas pequeño.

El campo B generado en el interior, tiene un valor dado por:

$$B = \mu_0 \cdot \frac{N}{l} \cdot I = \mu_0 \cdot n \cdot I \quad \text{donde el cociente } n = \frac{N}{l}$$

es el número de espiras por unidad de longitud.

La expresión nos muestra que el campo B no depende del diámetro de la bobina.

Ejemplo: Calcular el valor de “B” en el eje de un solenoide, bobinado con espiras juntas, en 3 capas de 500 vueltas cada una, si ocupan una longitud de 500 mm y es recorrido por una corriente de 2 A.

$$B = \mu_0 \cdot \frac{N}{l} \cdot I = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Tm}{A} \cdot \frac{1500}{0,5m} \cdot 2A = 2,4\pi \cdot 10^{-3} T$$



En los ejemplos anteriores, la producción de un campo  $B$ , dada por las respectivas expresiones matemáticas, muestra que, independientemente del arreglo geométrico de cada caso, siempre  $B$  es función lineal de la corriente  $I$ :

$$B = f(I) \quad \Longrightarrow \quad B = a.I$$

Donde la constante “a” puede englobar no solo la constante magnética  $K_m$ , sino también a los distintos valores geométricos tales como radios, distancias, longitudes o número de espiras correspondientes.

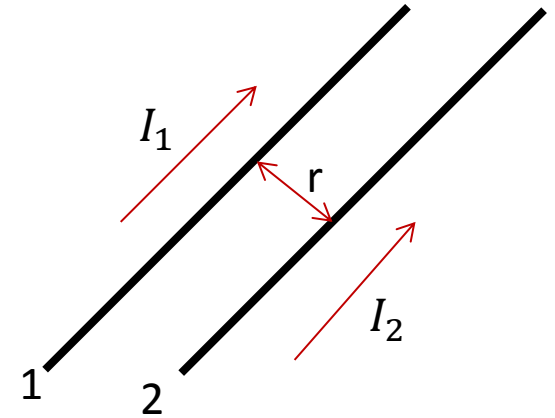
Si la corriente aumenta o disminuye, el campo también aumenta o disminuye en forma proporcional, sin que haya alinealidad ni saturación y en forma independiente del arreglo geométrico de que se trate.

Este concepto es fundamental y es válido siempre que nuestro sistema esté en el vacío o normalmente sumergido en aire.

Veremos luego que la relación entre  $I$  y  $B$  se hace mas compleja, cuando el medio material donde se desarrolla el campo, deja de ser *el vacío o el aire* y pasa a ser una *sustancia diferente*.

## Fuerza electrodinámica entre dos conductores paralelos.

Si dos conductores paralelos “1 y 2”, están a una distancia “r” y por ellos circulan dos corrientes “ $I_1$  e  $I_2$ ”, resulta claro que el campo magnético que produce  $I_1$  actúa reaccionando con el que origina  $I_2$  y viceversa.



Puede comprobarse en forma experimental que la mutua reacción hace aparecer entre los conductores, una fuerza de atracción si las corrientes son del mismo sentido o una fuerza es de repulsión, si ambas son de sentido contrario.

En los dos casos la magnitud de la fuerza electrodinámica, que se calcula por unidad de longitud, resulta:

$$\frac{F}{l} = 2 K_m \frac{I_1 \cdot I_2}{r} = \frac{\mu_0}{2\Pi} \frac{I_1 \cdot I_2}{r}$$

El fenómeno electrodinámico descrito, junto con la expresión algebraica dada, permite definir de una manera rigurosa la unidad fundamental de “*intensidad*” en el *sistema internacional* (SI), empleando en la experiencia práctica solo un recurso puramente “mecánico”.

En efecto, “si por dos conductores paralelos de longitud infinita (muy largos), separados entre si por una distancia de un metro (1 m), circulan corrientes iguales, ésta valdrá un Ampere (1 A), si ambos experimentan una fuerza por unidad de longitud de  $2 \cdot 10^{-7}$  Newton / metro (N/m)”.

$$\frac{F(N)}{l(m)} = 2 \cdot 10^{-7} \left( \frac{N}{A^2} \right) \cdot \frac{1 A^2}{1 m}$$

Esta definición de Ampere, hace que la constante magnética  $K_m$ , valga exactamente  $2 \cdot 10^{-7} \frac{N}{m}$ .

Se señala que anteriormente (antes de 1961), se definía el Ampere de una forma imprecisa, en función del depósito de plata en un electrodo de una cuba electrolítica. La definición dada permite determinar también con rigurosidad la unidad de carga eléctrica Q, el “Coulomb C”.

## Flujo Magnético:

El flujo del campo magnético B, a través de una superficie A, se define igual que el flujo del campo eléctrico:

$$\Phi_m = \int B \cdot dA ; \quad \Phi_m (\text{Tm}^2) = B (\text{T}) \cdot A(\text{m}^2)$$

El “Tesla metro cuadrado” también se conoce como “Weber”:  $1\text{Tm}^2 = 1 \text{ Wb}$

Si la superficie considerada forma un ángulo  $\theta$  con B, entonces:

$$\Phi_m = B \cdot A \cdot \cos \theta$$

El flujo a través de un solenoide se incrementa con el número de espiras:

$$\Phi_m = B \cdot A \cdot N = \mu_0 \cdot \frac{N}{l} I \cdot A \cdot N$$

Señalamos que el  $\Phi_m$  neto que atraviesa una superficie que envuelve totalmente a un polo de un imán, es “cero”.

Todas las líneas de inducción que salen por un lado de una superficie, entran a la misma por el lado opuesto.

Debemos recordar asimismo que *no existen polos magnéticos aislados*.

## Producción de una FEM mediante magnetismo : “Ley de Faraday-Lenz” .

De la expresión anterior:  $\Phi_m = B \cdot A \cdot \cos \theta$  , podemos concluir fácilmente que un flujo magnético " $\Phi_m$ ", variará de valor cuando:

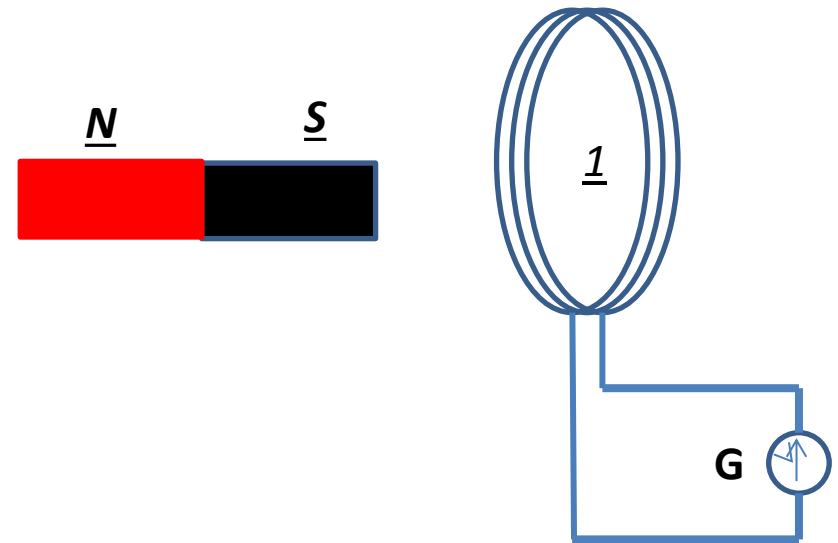
1. varía el campo magnético “B” que lo produce, o
2. **cambia el área geométrica “A”, en la que se manifiesta, o bien**
3. se modifica el ángulo “ $\theta$ ” que forma el vector B con el área A.

**Estas posibles variaciones son independientes de la forma en que se origine el campo “B”, ya sea que esté producido por un imán permanente o por una corriente eléctrica.**

Podemos imaginar ciertas experiencias que describiremos, pero aunque parezcan redundantes, la importancia del concepto que se quiere introducir, justifica el detalle de su tratamiento.

Primero consideremos que la bobina “1” tiene conectado en sus terminales un galvanómetro “G”, con cero central, es decir que su aguja indicadora puede deflexionar hacia la derecha o a la izquierda, según sea el sentido de la corriente que lo atraviere.

Un imán permanente es colocado en la cercanía.



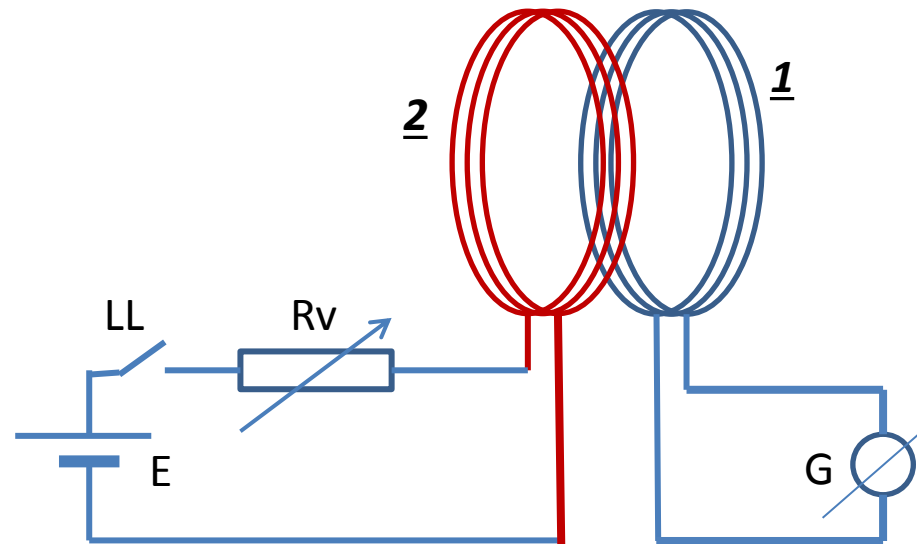
Mientras el imán esté quieto, ya sea alejado de la bobina, cerca de ella o en su interior, la indicación de G es “cero”.

Pero la indicación de G es “distinta de cero” ante cualquiera de las siguientes circunstancias:

1. Acercamiento o introducción del imán permanente en la bobina.
2. Alejamiento o extracción de la barra imantada.
3. Movimiento del imán dentro de la bobina o en su cercanía.



Ahora, al arrollamiento “1”, lo enfrentamos con la bobina “2”, que está conectada a la fuente de fem “E” a través de una llave LL y una resistencia variable Rv. **No hay ninguna conexión eléctrica entre “2” y “1”.** La indicación de “G” es **rojo**, cuando LL está abierta y no circula corriente por “2” o con LL cerrada y circula una corriente constante determinada por E y Rv.



Nuevamente “G” indica un valor de corriente **distinto de rojo**, en cualquiera de las situaciones siguientes:

1. Instante de la conexión de la bobina “2” a la fem “E”, mediante la llave “LL”
2. Momento de la desconexión de la misma.
3. Con E conectada circulando cierta corriente, si varía ésta, accionando la resistencia variable “Rv”.
4. Con E conectada y Rv fija, moviendo la posición de “2” respecto de “1”.

Los casos presentados, aunque son hechos experimentales, permiten justificar la **“Ley de Faraday - Lenz”** (1831), que se puede enunciar así:

1. *“Todo conductor sumergido (o influenciado) por un flujo magnético variable, es asiento de una fuerza electromotriz”.*
2. *“Su valor está dado por la rapidez de variación del flujo magnético concatenado. (derivada de  $\Phi_m$  con respecto del tiempo)”.*
3. *“El sentido de la fem inducida (y eventualmente de la corriente) es tal, que tiende a oponerse a la causa que la produce”.*

La expresión matemática que engloba las tres frases es:

$$E = - \frac{d\phi_m}{dt}$$

Los enunciados 1 y 2 se conocen como “**Ley de Faraday**” y están expresados por la derivada de  $\Phi_m$  respecto del tiempo.

El punto 3, que habla del sentido de la fem, se enuncia a veces como “**Ley de Lenz**” y está *representado en la expresión por el signo negativo*. Este debe tener una interpretación *física* y no puramente *matemática*. **Su aplicación directa en algunos casos, evita complicar el estudio con reglas parciales.**

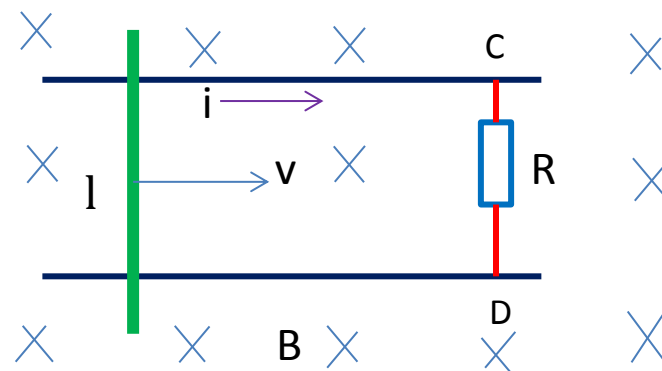
Tomar a las dos leyes en conjunto y nombrarla como Ley de Faraday-Lenz, nos parece conveniente, por ser fenómenos ligados estrechamente.

Nos permitimos insistir en estos conceptos fundamentales:

1. Una corriente eléctrica produce siempre un campo magnético. Si la corriente es variable, el campo también será variable.
2. Un campo magnético **fijo** sobre un conductor, **no produce** una fem.
3. **Para que se produzca** una fem sobre un conductor, el campo magnético tiene que ser **variable**.

Analizaremos un caso concreto:

Una varilla metálica de longitud “ $l$ ” se desliza a velocidad constante “ $v$ ”, con movimiento perpendicular al campo magnético “ $B$ ” y está en contacto permanente con dos alambres paralelos también metálicos. En los puntos C y D hay conectada una resistencia “ $R$ ”.



El flujo  $\Phi = f(t)$  en el rectángulo formado es:

$$\Phi = B \cdot S = B \cdot l \cdot v \cdot t$$

Y aplicando la expresión de Faraday (derivando):

$$\frac{d\Phi}{dt} = e = B \cdot l \cdot v$$

La fem “ $e$ ” origina una corriente:

$$i = \frac{e}{R}$$

Que reaccionando con el campo  $B$ , genera una fuerza:

$$F_m = B \cdot l \cdot i$$

Por la Ley de Lenz, sin tener en cuenta los signos parciales, se puede afirmar que esta fuerza  $F_m$  tiende a oponerse al movimiento de la varilla.

También se puede decir que la fuerza externa  $F_{ext}$  que origina el movimiento de la varilla, implica un trabajo mecánico de entrada que, por “conservación de la energía”, tiene que ser igual a la energía eléctrica producida.

## Inductancia:

Para una bobina aislada y sumergida en aire o en el vacío se puede comprobar en forma experimental que el flujo magnético “ $\phi_m$ ” que se produce, depende en forma lineal de la intensidad de corriente “ $I$ ” que circula por ella, es decir que:

$$\phi_m = L \cdot I$$

Donde  $L = \frac{\phi_m}{I}$  se llama “coeficiente de autoinducción” o simplemente “Inductancia”.

La unidad en el “SI” es el “henry (H)”:  $L(H) = \phi_m(T.m^2) / I(A) = \phi_m / I \text{ (V.s/A)}$

El elemento de un circuito eléctrico cuya característica principal es la inductancia  $L$ , es comúnmente llamado “inductor”. En general el valor de  $L$  no es fácilmente calculable en forma teórica; depende de la geometría de la bobina, de la forma del arrollamiento del alambre conductor y fundamentalmente de la sustancia que ocupa el interior del elemento (ampliaremos esta última afirmación).

No obstante lo afirmado y para dar algunas ideas, se han hecho ciertas apreciaciones empíricas que permiten obtener una expresión aproximada, deducida para un solenoide largo, bobinado con espiras muy juntas y con núcleo de aire.

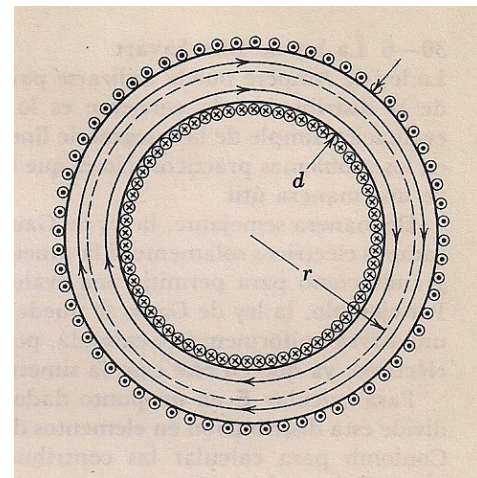
Será en nuestro caso, la sección circular de la bobina “A”, correspondiente a un diámetro “d”, el número de espiras “N” y la longitud “l”. (se considera un solenoide largo cuando :  $l \geq 5.d$  ).

$$L = \mu_0 \cdot N^2 \cdot A / l \text{ y haciendo } n = \frac{N}{l} \text{ (espiras por unidad de longitud)}$$

$$\text{Se tiene: } L = \mu_0 \cdot n^2 \cdot A \cdot l$$

Para el caso de un “toroide” de sección transversal circular “A”, correspondiente al diámetro “d”, un radio medio “r” y una cantidad de espiras “N”, también con núcleo de aire, la inductancia vale aproximadamente:

$$L = \frac{\mu_0 \cdot N^2 \cdot A}{2 \cdot \pi \cdot r}$$





Por todo lo dicho anteriormente, cuando a un inductor se le aplica una fem exterior comienza a circular una corriente que produce en su interior un campo magnético. Su crecimiento desde cero, origina otra fem inducida (Faraday-Lenz), que se opone a la aplicada.

Dicho de otra forma “*se autoinduce*” una fem dada por:

$$e = - \frac{d\phi_m}{dt}$$

Y reemplazando el valor anterior de  $\phi_m = L.I$  se tiene:

$$e = - L \frac{di}{dt}$$

Esta fundamental expresión permita hacer cálculos en un circuito, tomando solo variaciones de corriente.

Suele a veces llamársela “fuerza contraelectromotriz (fcem)” por su condición de “oponerse a la fem aplicada”.

Es oportuno definir un inductor con una inductancia de un Henry (1 H), si cuando es recorrido por una corriente que varía a razón de un Amper por segundo (1 A/s), aparece una “fcem” de un Volt (1 V)

## Intensidad de campo.

Ya demostramos que en la parte central de un solenoide largo, de longitud “ $l$ ”, con “ $N$ ” espiras, recorrido por una corriente “ $I$ ” y en el vacío, se produce un campo magnético “ $B$ ”, dado por:

$$B = \mu_0 \cdot \frac{N}{l} \cdot I = \mu_0 \cdot n \cdot I$$

Se puede considerar al campo  $B$  como originado por otro vector, producido solo por la excitación eléctrica y la geometría, que llamaremos “intensidad de campo  $H$ ”, es decir que:

$$B = \mu_0 \cdot H \quad \text{siendo} \quad H = \frac{N \cdot I}{l} = n \cdot I$$

También puede afirmarse que la existencia del vector campo magnético  $B$ , se debe a una causa o excitación caracterizada por un vector “intensidad de campo magnético  $H$ ”, que depende de la geometría del sistema y de la corriente que lo produce y es independiente de la naturaleza del medio.

Vale la pena hacer la siguiente aclaración:

Los nombres de campo magnético, intensidad del campo magnético e inducción magnética, se suelen aplicar a dos magnitudes que pueden confundirse. Tenían sentidos ligeramente diferentes a los actuales, sobre todo agravado por la antigua aplicación de sistemas de unidades, como el de Gauss, hoy en desuso.

Actualmente y en forma excluyente la Intensidad de campo magnético se representa con **H**. Por supuesto vale solo para electromagnetismo. Históricamente se nombraba como campo magnético H.

En segundo lugar, lo que antes se citaba como inducción magnética B, en la actualidad se considera como el auténtico **campo magnético B**, con independencia de la forma de su creación. Es deseable nombrarlo de esta última forma.

Veremos como B y H se diferencian en medios materiales con el fenómeno de la magnetización.

## Magnetismo en los cuerpos

Puede comprobarse en forma experimental que si se coloca en el interior del solenoide anterior una sustancia material cualquiera, el campo  $B$  en general varía, aún manteniendo todos los parámetros originales constantes.

La relación del nuevo campo  $B$ , originado al introducir una sustancia, respecto del valor original en el vacío  $B_0$ , se llama “permeabilidad relativa”:  $\mu_r = \frac{B}{B_0}$

De acuerdo con lo visto se puede calcular el valor del campo en el interior de un solenoide con un medio material cualquiera, con la expresión:  $B = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \frac{N}{l} I$  donde el producto  $\mu_r \cdot \mu_0 = \mu$ , se suele llamar “permeabilidad absoluta”.

Como consecuencia puede finalmente expresarse:

$$B = \mu \cdot H = \mu \cdot \frac{N \cdot I}{l}$$

Las sustancias que pueden ocupar un campo magnético se dividen en tres grupos:

1. Diamagnéticas: El valor de  $B$  disminuye frente al valor  $B_0$  en el vacío:  $\mu_r < 1$  (Bismuto, Plata, Agua, Cobre, Oro, Mercurio, Sodio, etc.).
2. Paramagnéticas: El valor de  $B$  aumenta respecto de  $B_0$ :  $\mu_r > 1$  (Aluminio, Magnesio, Titanio, Tungsteno, Oxígeno, Aire, etc.).
3. Ferromagnéticas:  $B$  aumenta en gran proporción respecto de  $B_0$ :  $\mu_r \gg 1$  (Hierro, Cobalto, Níquel, Gadolinio y algunas aleaciones como el acero).  
Por ejemplo para el acero,  $\mu_r$  puede valer entre 100 y 100000.

Se ha dicho que los materiales *diamagnéticos* y los *paramagnéticos* tienen un valor numérico de  $\mu_r$ , menor y mayor que “1” respectivamente, pero se destaca que en ambos casos la diferencia con la unidad es muy pequeña, de un orden menor que la quinta cifra decimal ( $\mu_{\text{vacío}} = 1, \mu_{\text{aire}} = 1,000\,004$ ).

Veremos en forma especial el comportamiento de las sustancias “ferromagnéticas”.

## Ferromagnetismo.

La expresión  $B = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot H$ , ya vista, es válida para cualquier sustancia diamagnética o paramagnética, para la cual  $\mu_r$  sea una constante conocida; pero no es aplicable en algunos materiales como el níquel, el cobalto y en especial el hierro y sus aleaciones.

No ha sido posible hasta ahora establecer una relación matemática  $B = f(H)$ . La permeabilidad magnética relativa pasa a ser un valor que solo puede determinarse experimentalmente y expresar los resultados en forma de curvas gráficas o tablas de valores.

Nos referiremos al hierro y a sus aleaciones, por su importancia tecnológica. En efecto,  $\mu_r$  depende en términos generales de:

1. Pureza, clase de aleación y tratamientos térmicos para los aceros.
2. Intensidad del campo de excitación.
3. Estado magnético previo del material o historia magnética.

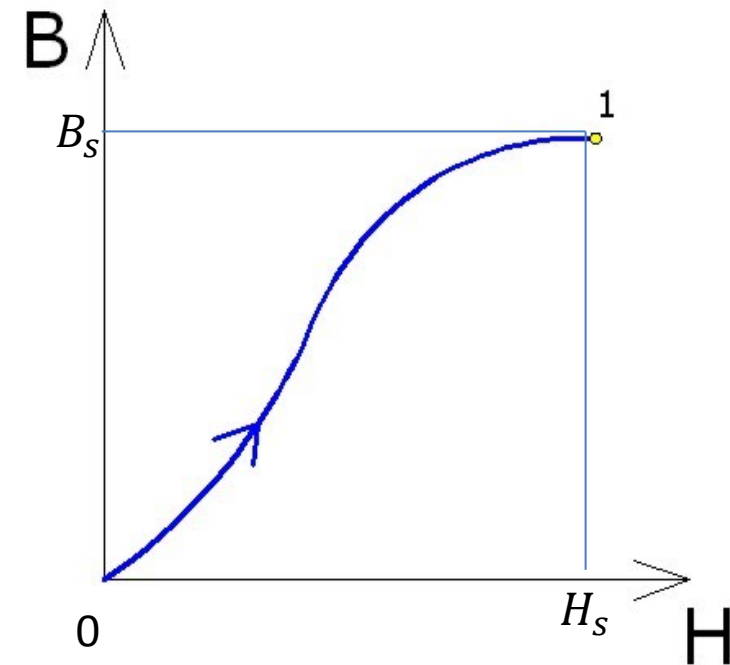


Si a un trozo de acero desimantado se lo somete a un campo magnético variable desde “0” hasta un valor  $H_s$  y registramos los valores de  $B$  correspondientes a cada valor intermedio de  $H$ , se obtiene una curva como la que se muestra, llamada *curva virgen de imanación*.

Se puede ver el comportamiento alineal de la magnetización.

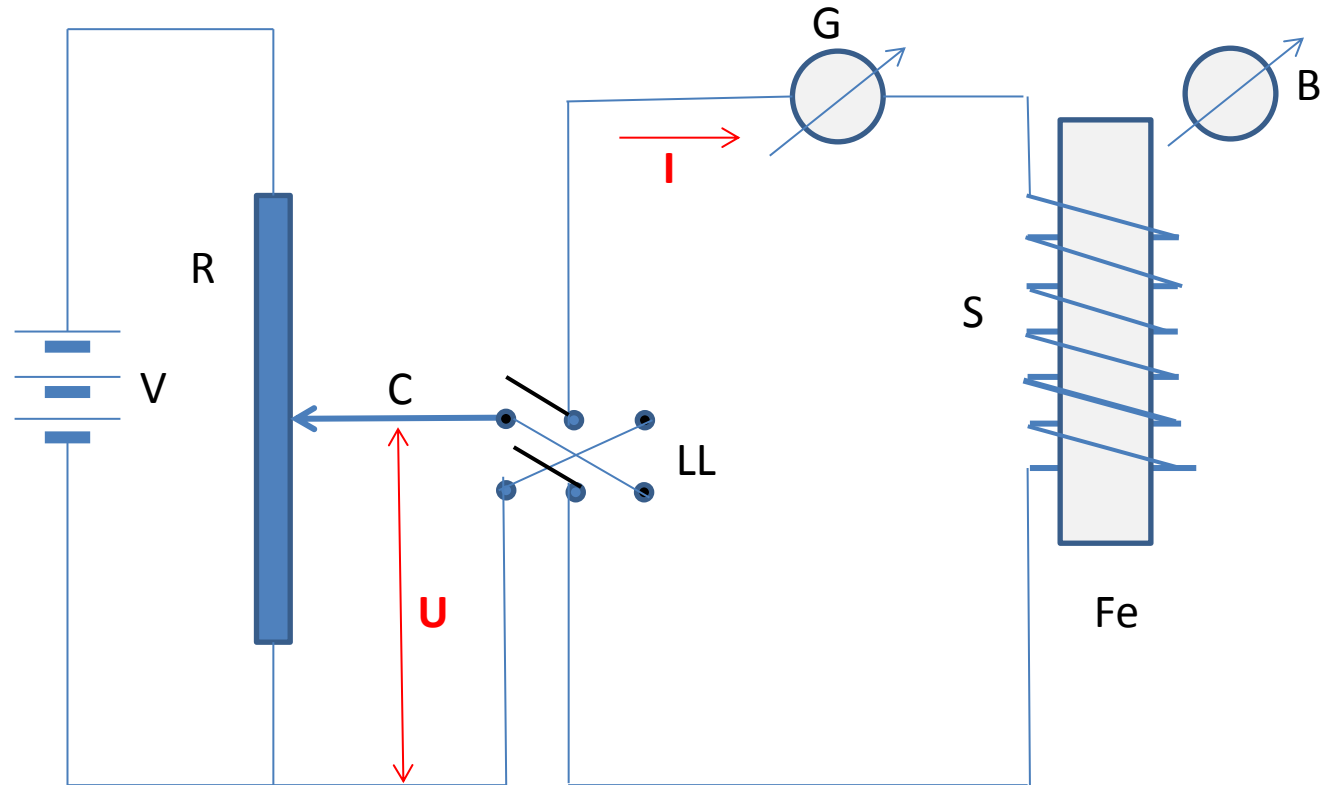
Mas allá de  $H_s$  el valor de  $B$  no aumenta; se dice que la muestra está “saturada”(punto 1)

Veremos con cierto detalle el comportamiento completo de la magnetización, cuando el acero es sometido a un ciclo completo, en que a partir de una excitación “0”, se lo lleva a cierto valor en un sentido; luego disminuye ese campo, se invierte, después aumenta, seguidamente disminuye y finalmente todo vuelve a comenzar.



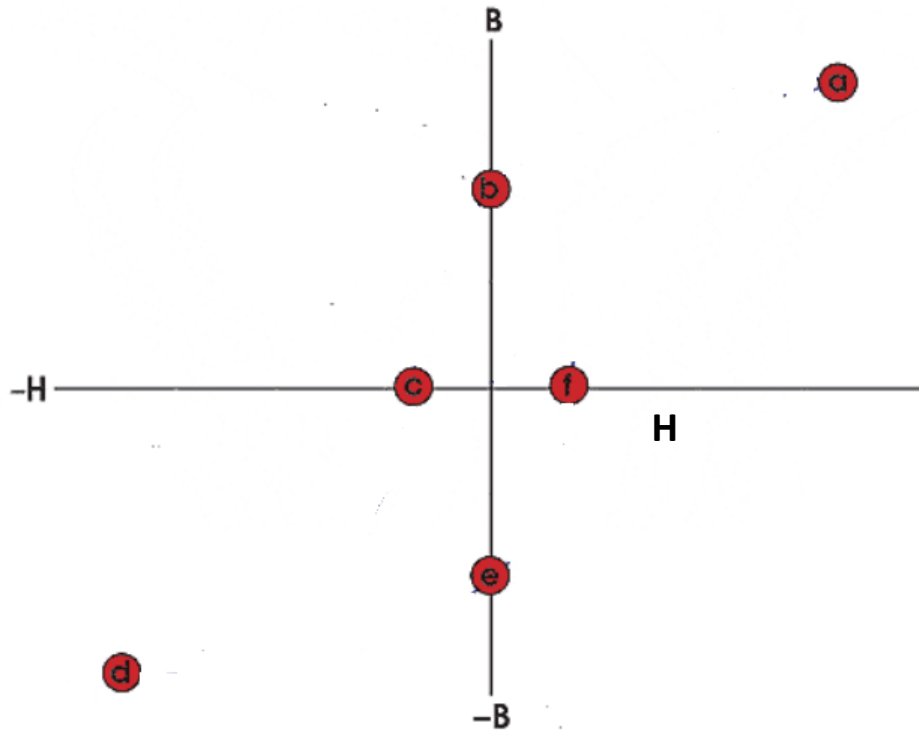
## Circuito para el ensayo de "histéresis magnética"

"V" es la "fem" que alimenta a la resistencia con cursor "R".  
El cursor "C" al deslizarse, varia la tensión "U", que se aplica al solenoide "S", controlando así la corriente "I".  
La bobina contiene en su interior la muestra de acero "Fe" en ensayo.  
La llave LL permite invertir el sentido de la corriente de excitación.

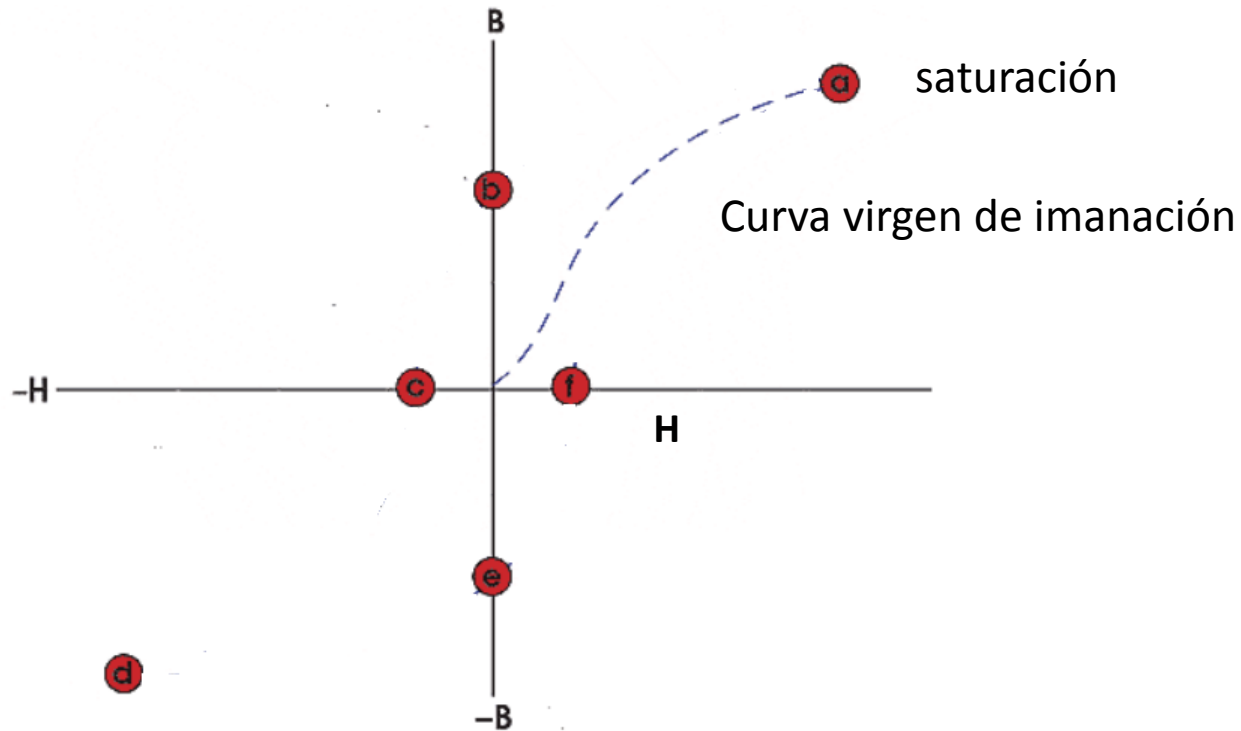


La corriente que circula por la bobina, medida por "G", fija el valor de la excitación magnética "H" aplicada; mientras el campo magnético "B" se determina por un medidor adecuado.

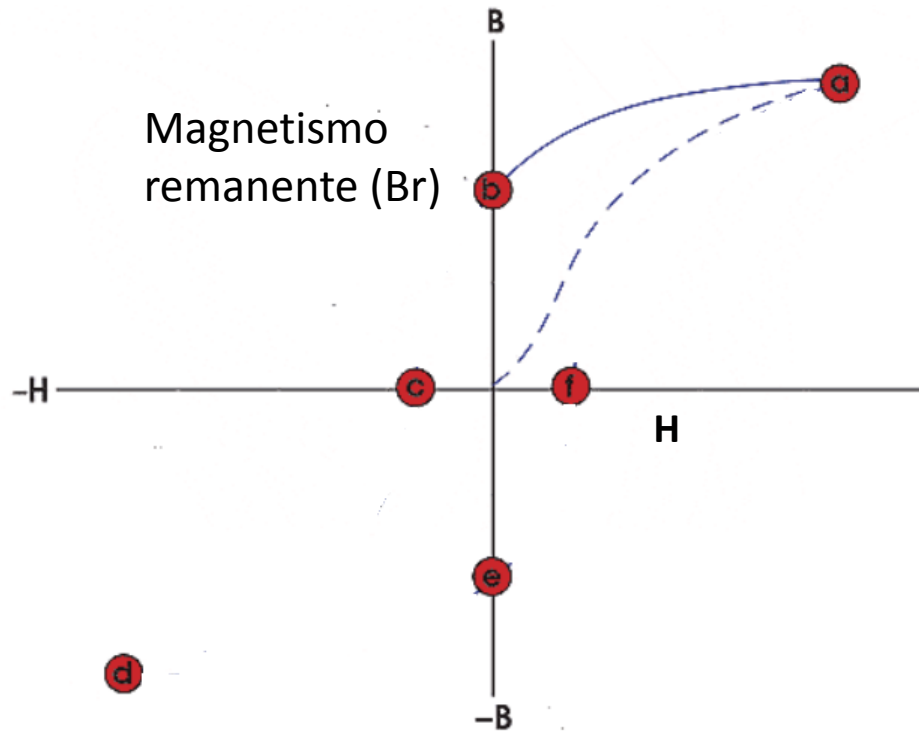
## Ciclo o curva de histéresis de materiales ferromagnéticos.



## Ciclo o curva de histéresis de materiales ferromagnéticos.

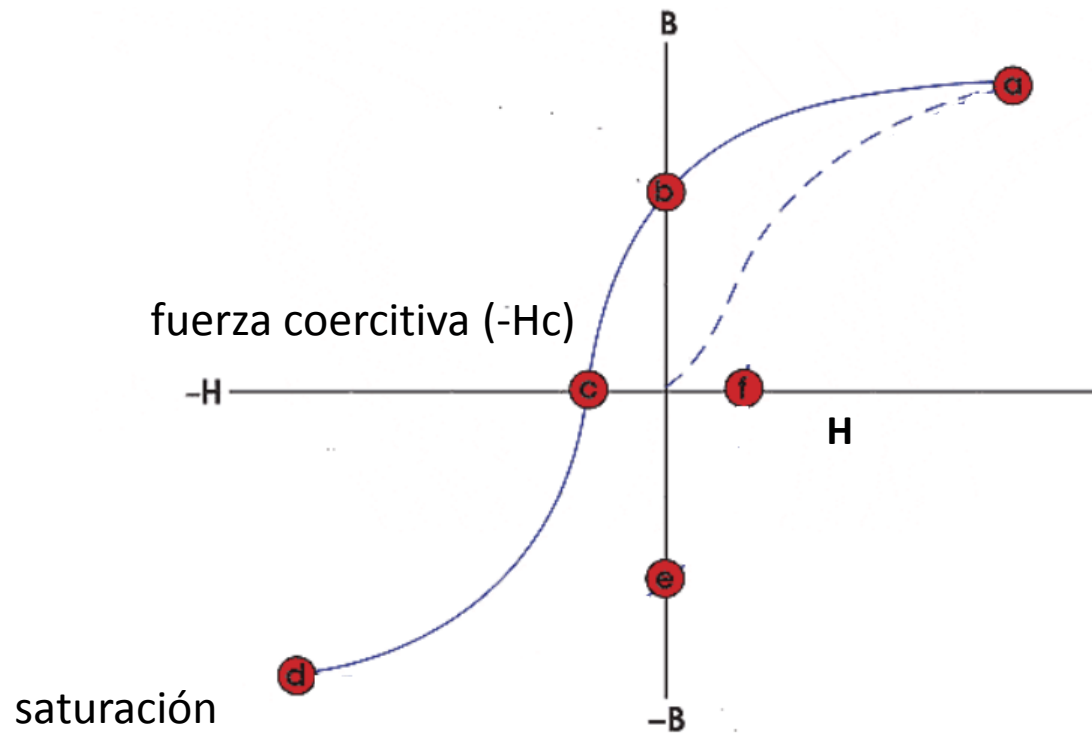


## Ciclo o curva de histéresis de materiales ferromagnéticos.

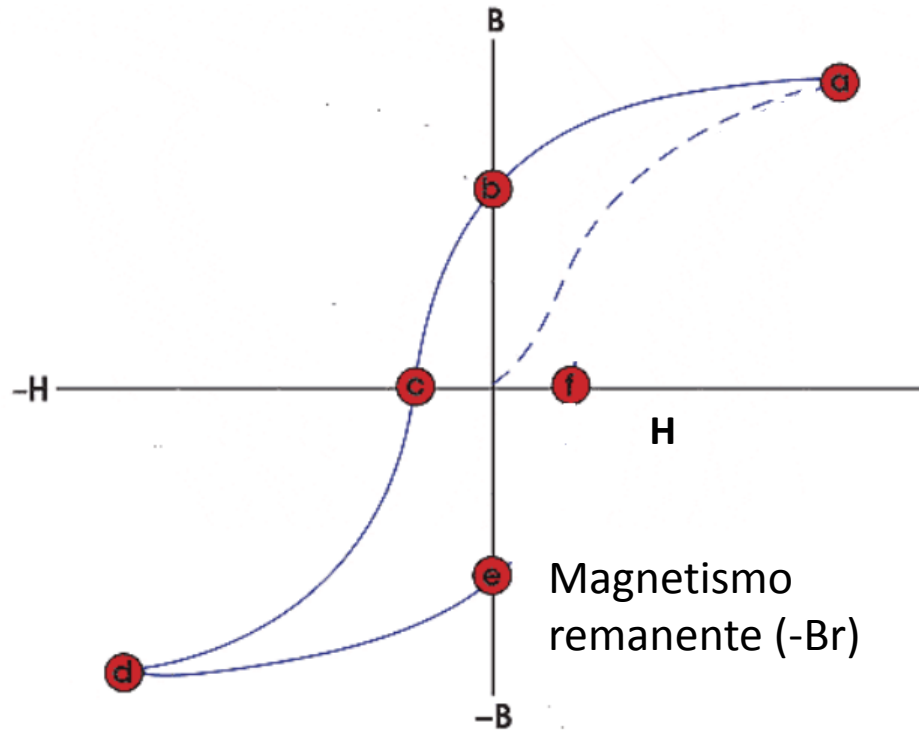




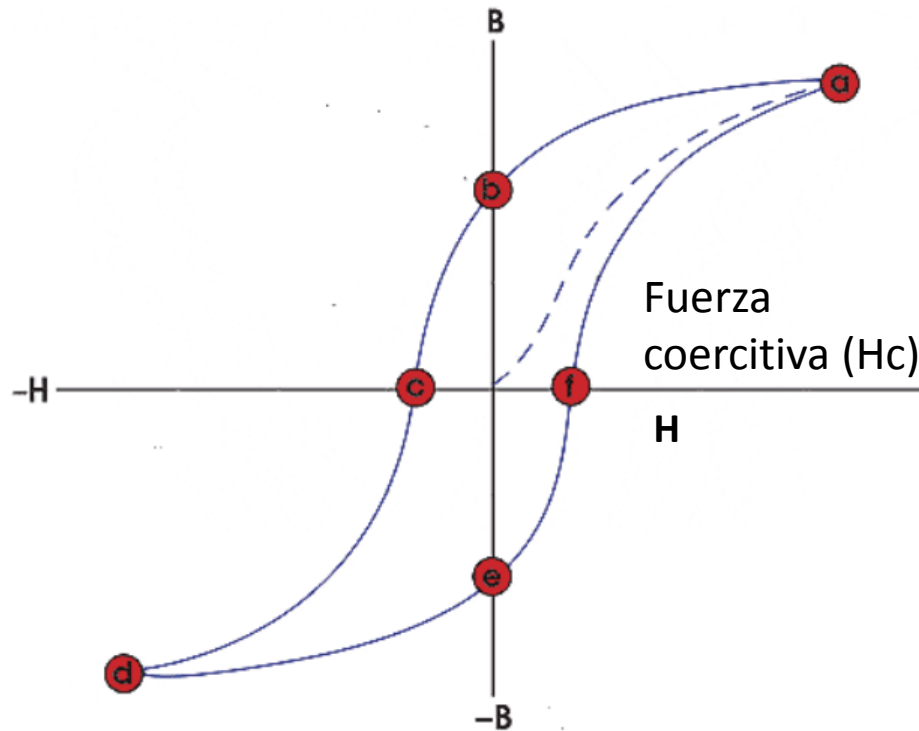
## Ciclo o curva de histéresis de materiales ferromagnéticos.



## Ciclo o curva de histéresis de materiales ferromagnéticos.

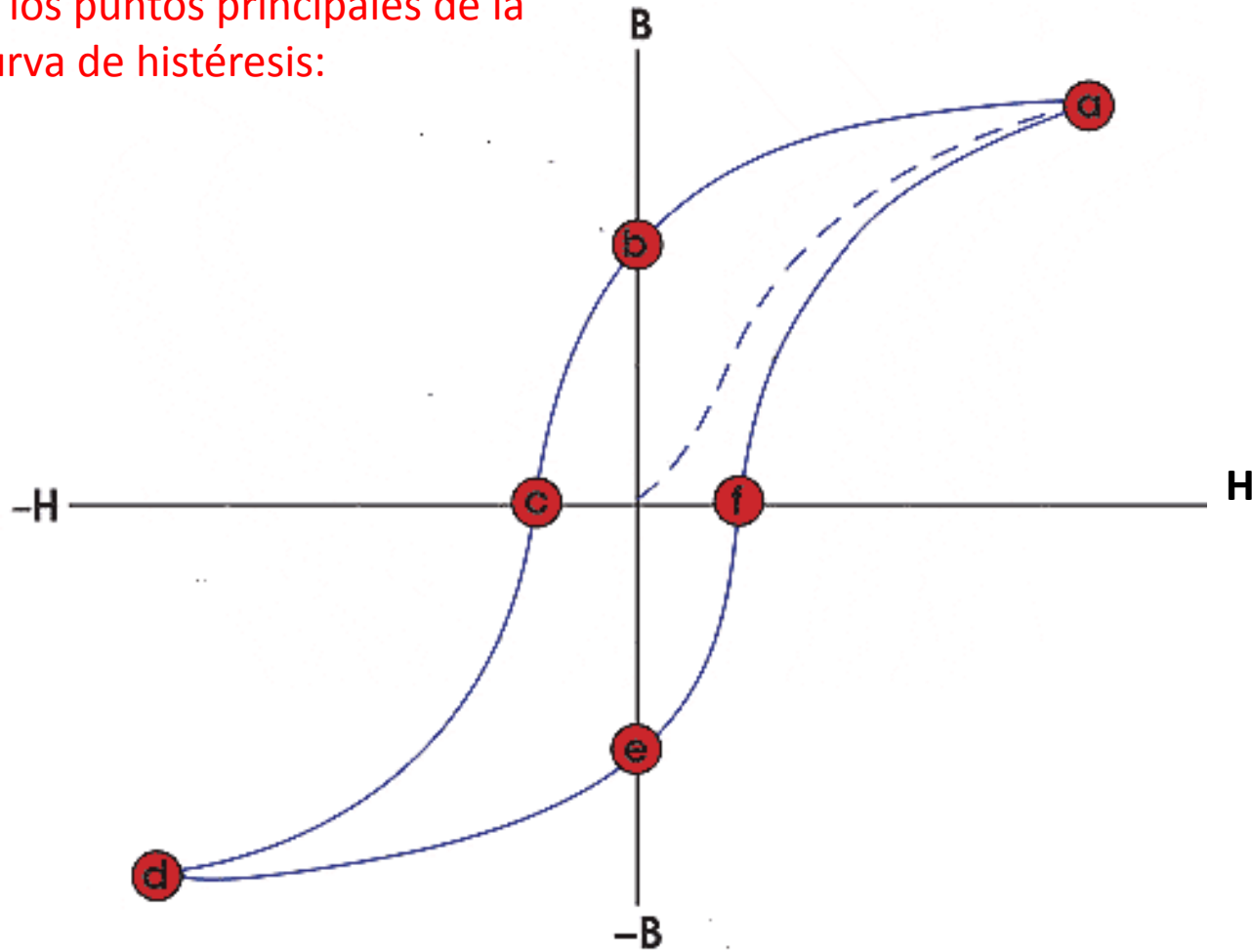


## Ciclo o curva de histéresis de materiales ferromagnéticos.



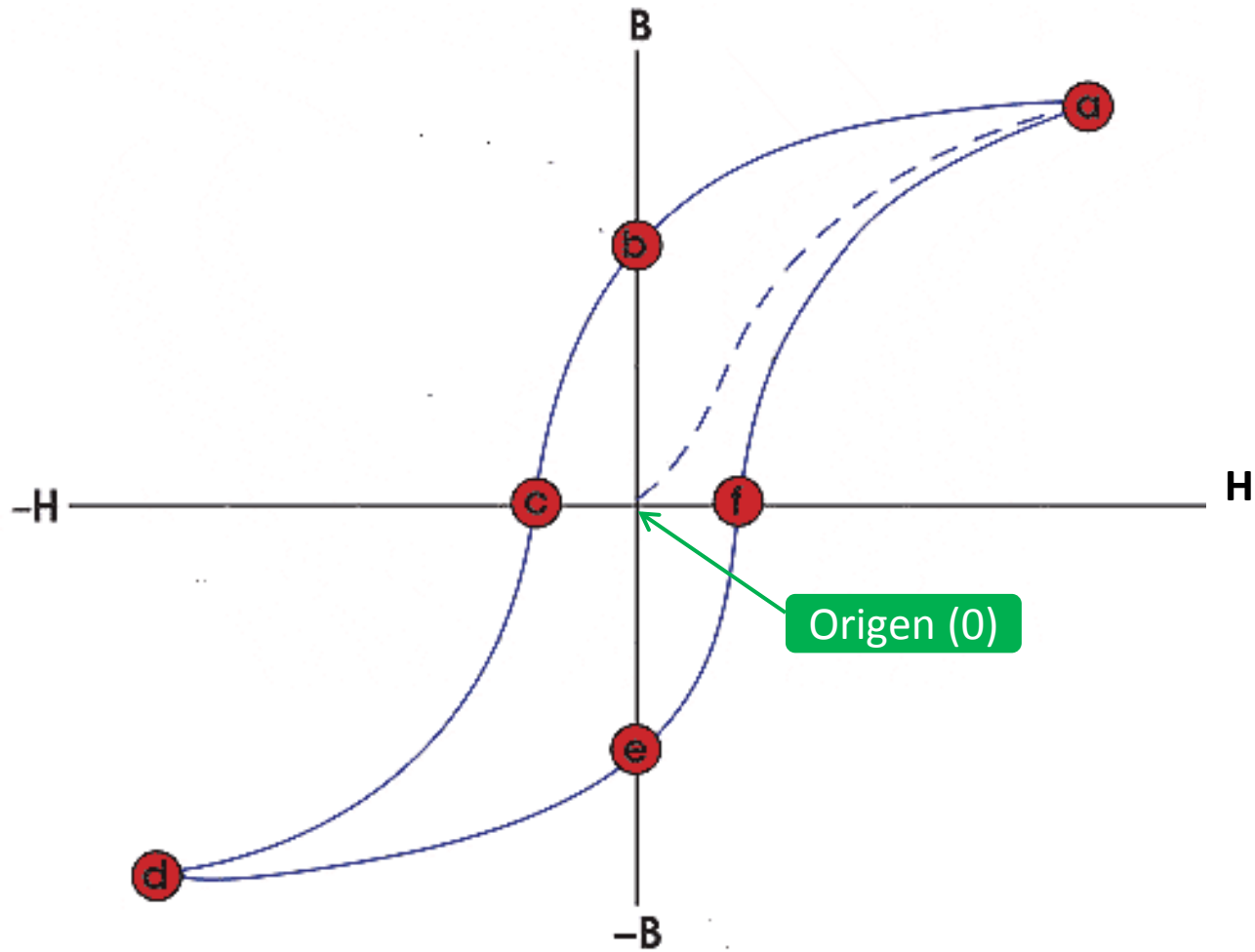
## Ciclo o curva de histéresis de materiales ferromagnéticos.

Recordamos los puntos principales de la curva de histéresis:



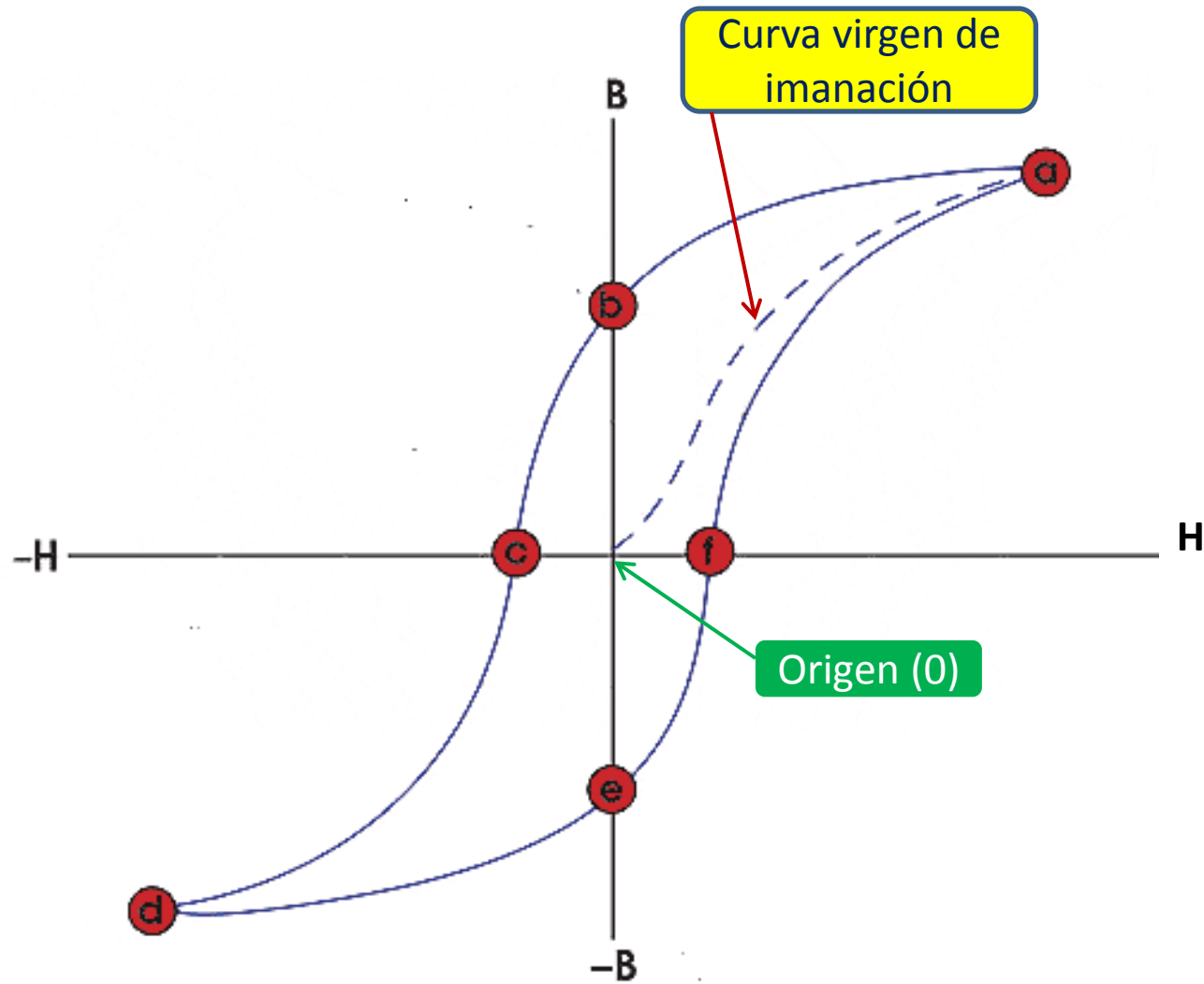
Histéresis

## Ciclo o curva de histéresis de materiales ferromagnéticos.



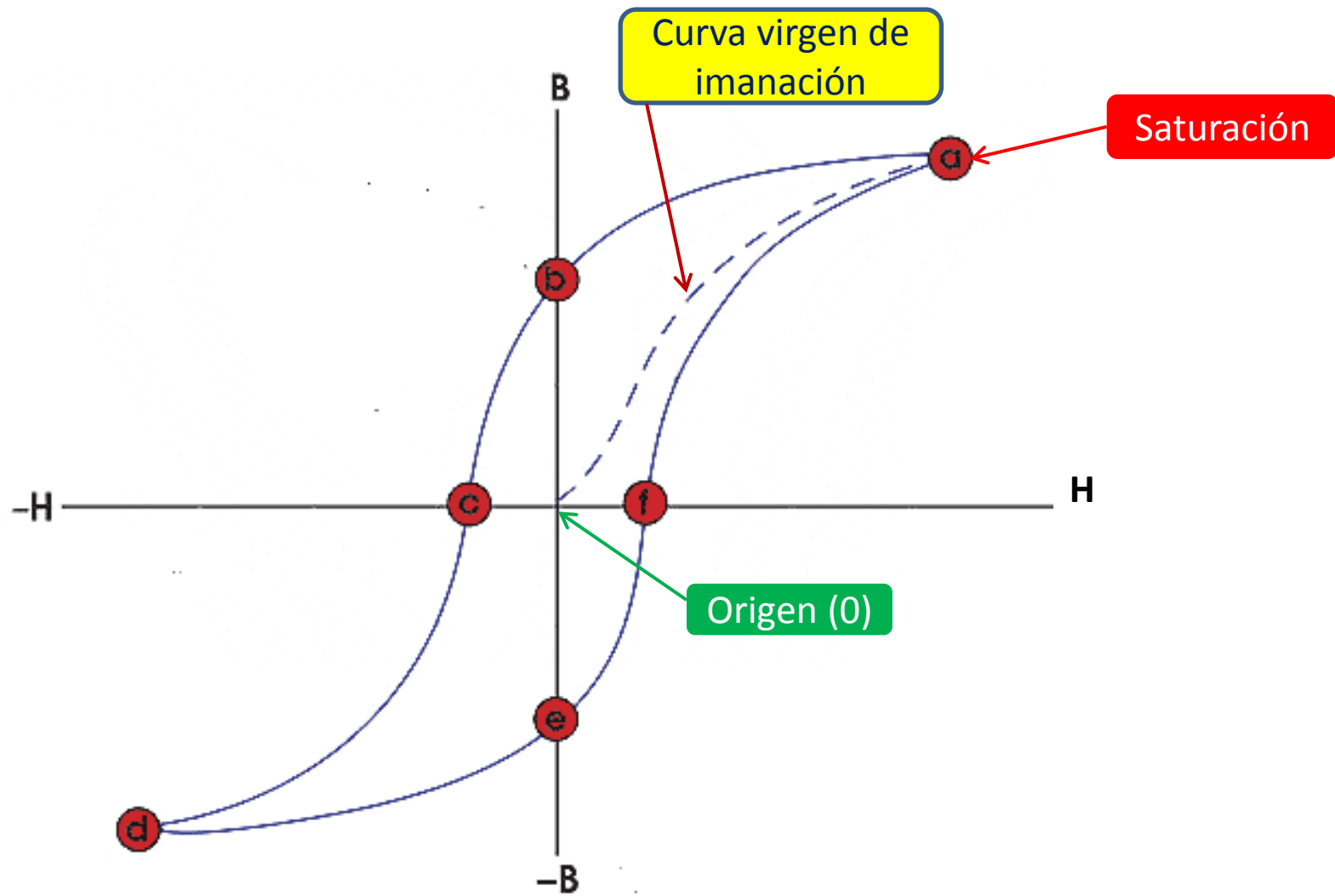
Histéresis

## Ciclo o curva de histéresis de materiales ferromagnéticos.



Histéresis

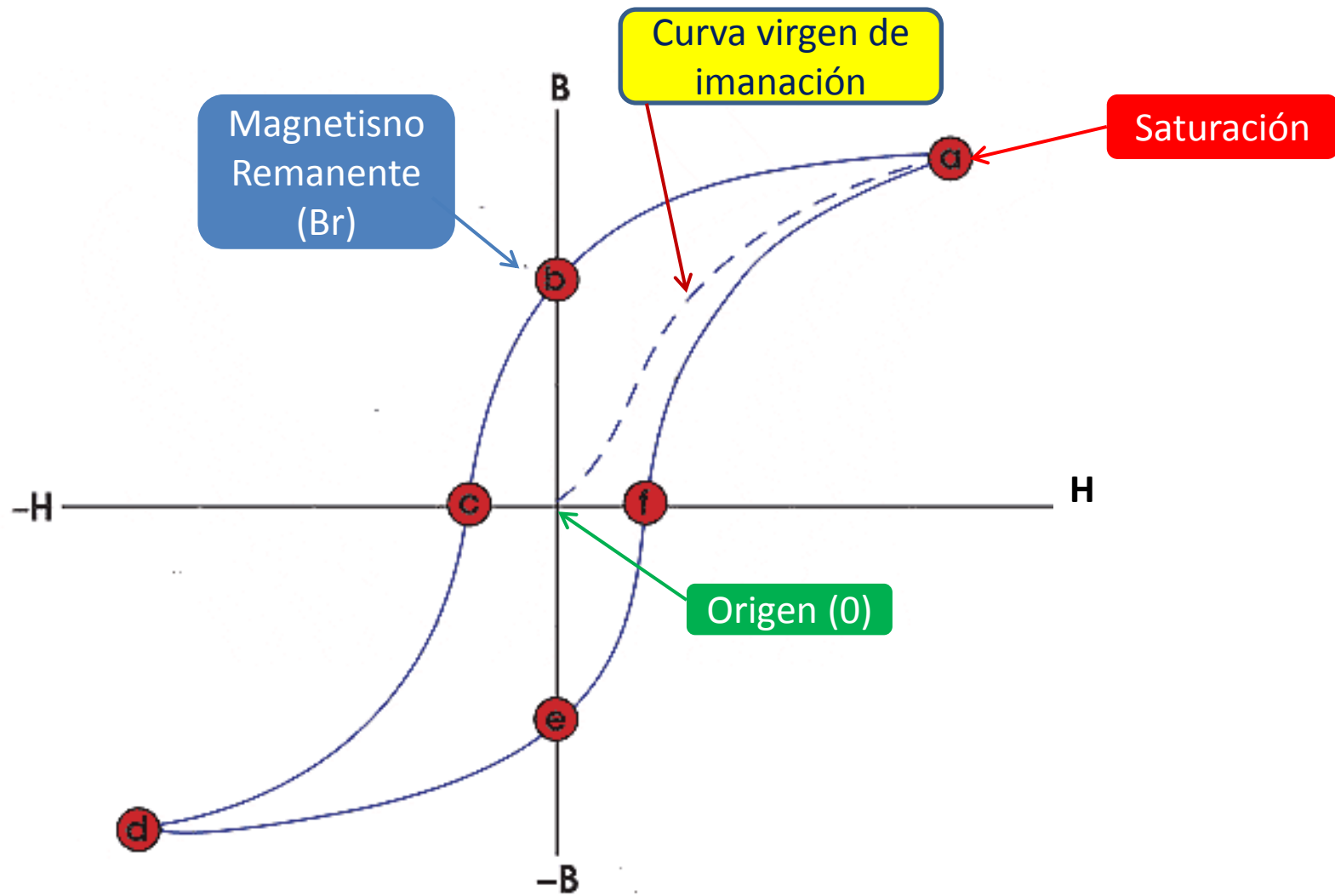
## Ciclo o curva de histéresis de materiales ferromagnéticos.



Histéresis

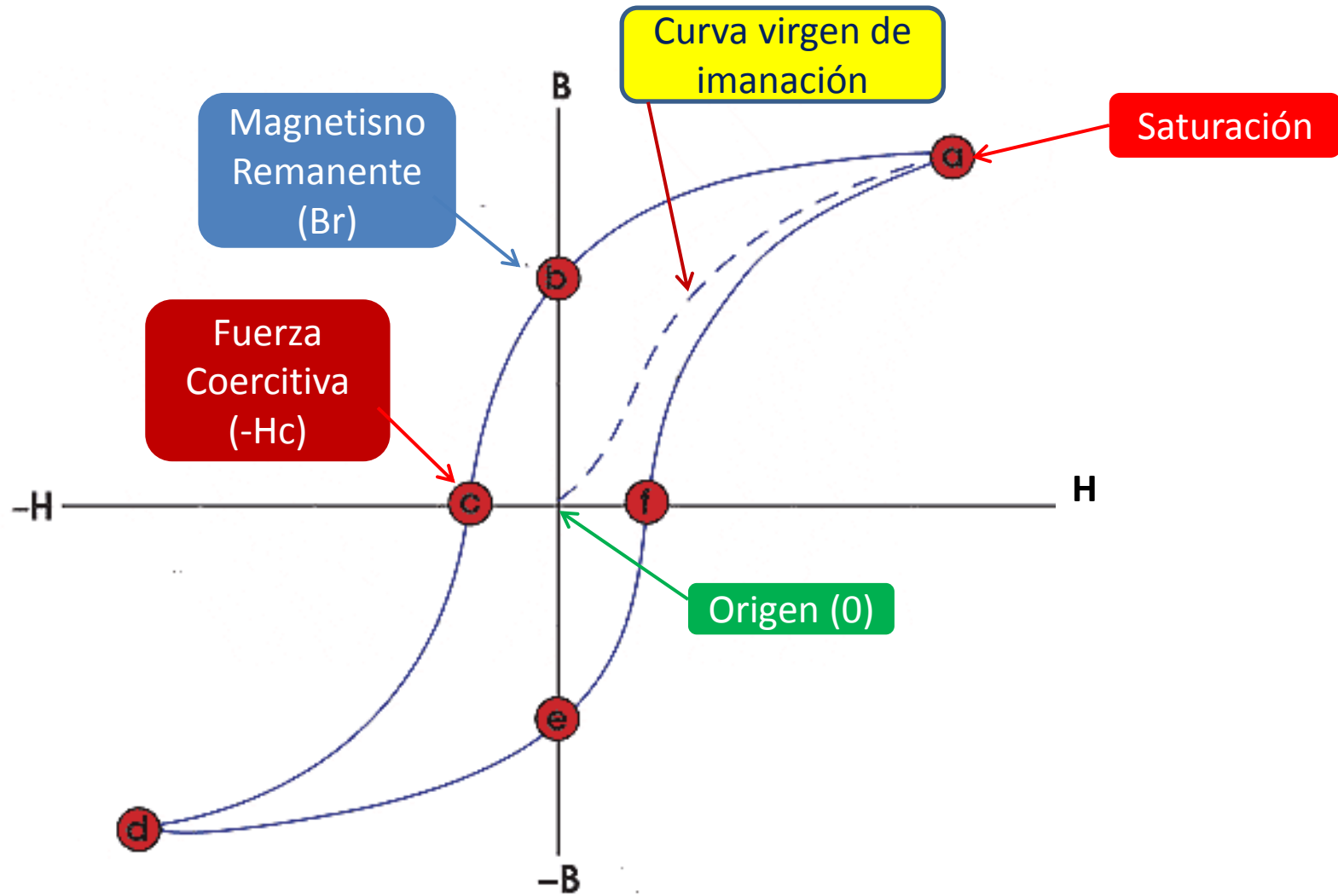


## Ciclo o curva de histéresis de materiales ferromagnéticos.



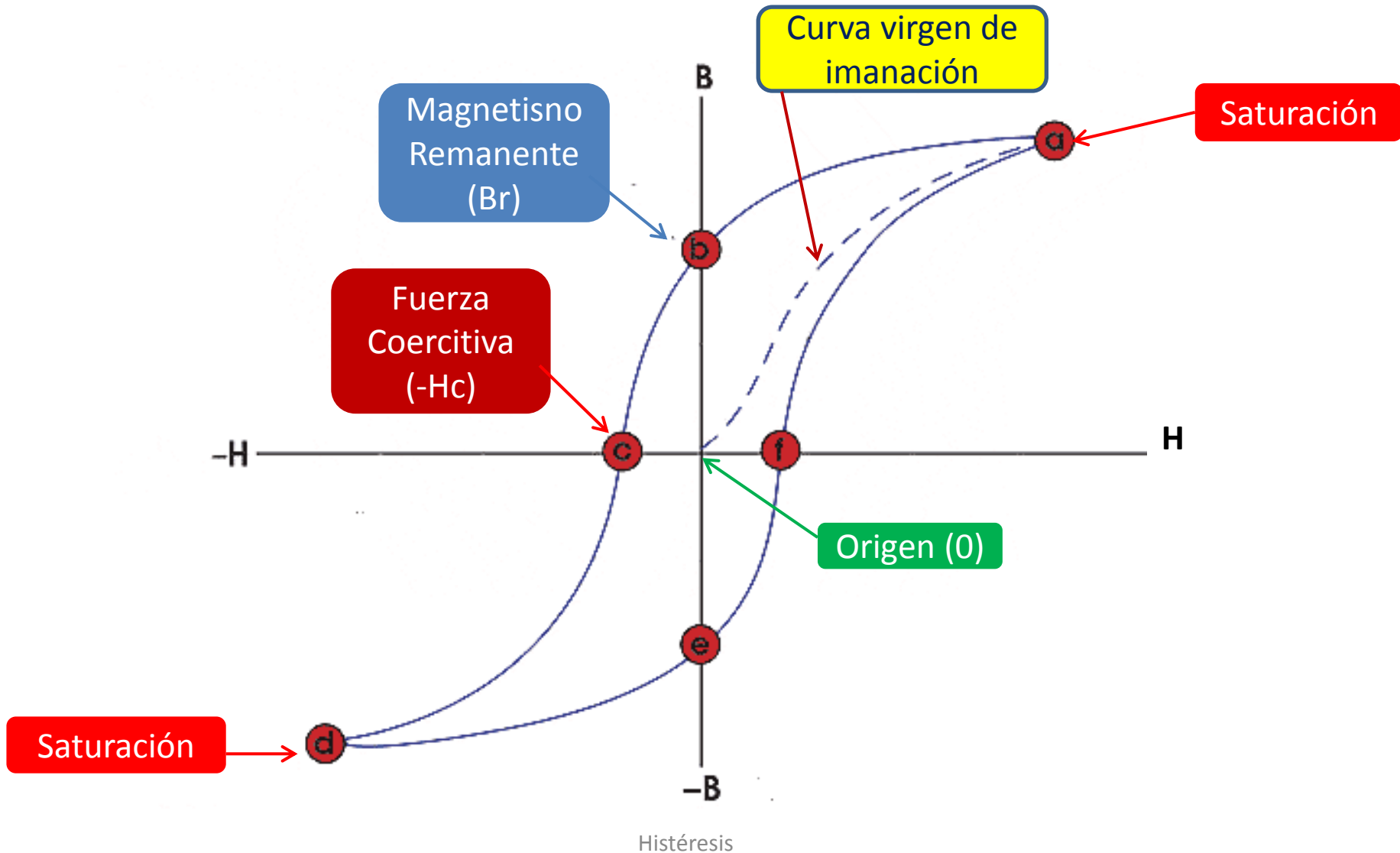
Histéresis

## Ciclo o curva de histéresis de materiales ferromagnéticos.

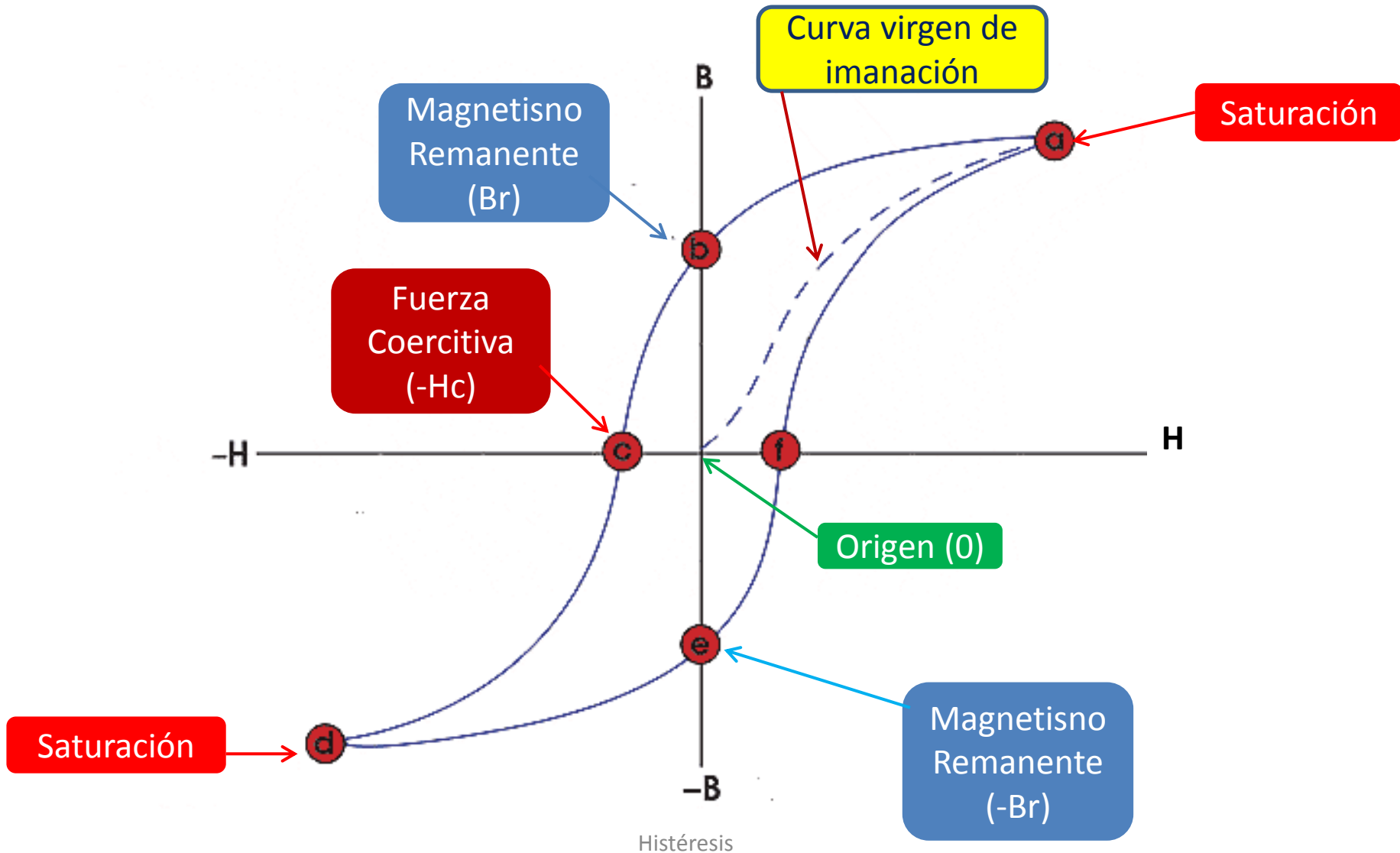


Histéresis

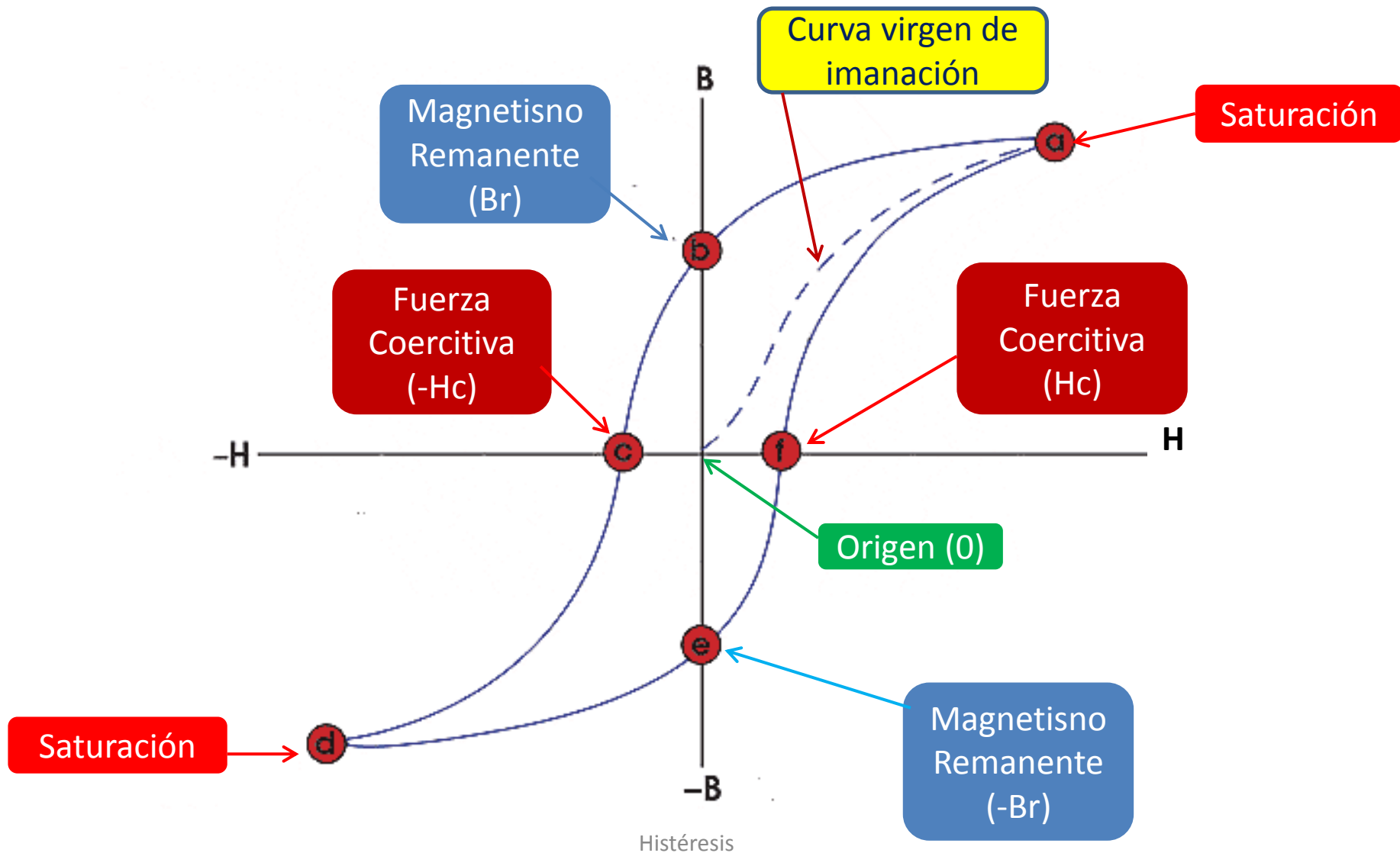
## Ciclo o curva de histéresis de materiales ferromagnéticos.



## Ciclo o curva de histéresis de materiales ferromagnéticos.



## Ciclo o curva de histéresis de materiales ferromagnéticos.

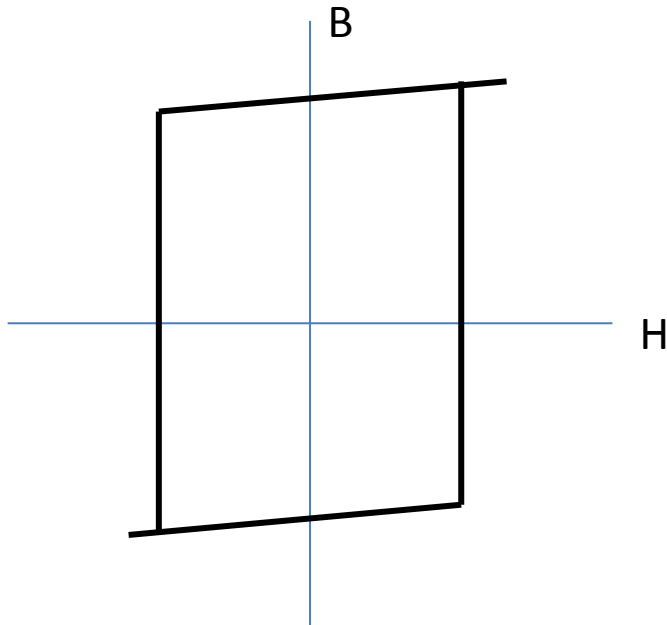


Es conveniente aclarar que toda vez que el hierro está aleado con carbono, aunque sea en una mínima proporción, recibe el nombre de “acero”. El hierro común (chapas, varillas, barras, etc.) es en realidad un acero llamado “hierro dulce” con un contenido de carbono del orden de 0,5%.

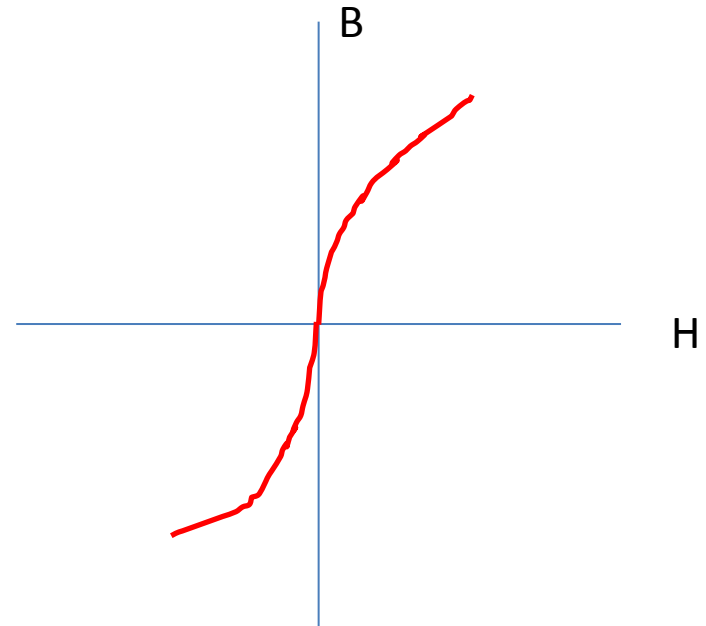
Se señala que mientras la forma general del lazo de histéresis visto, es común para todas las aleaciones de aceros, se tienen en cada caso valores numéricos de las relaciones entre  $H$  y  $B$ , que difieren para cada variedad.

Precisamente la caracterización en cuanto al comportamiento magnético de cada tipo de acero es su particular ciclo de histéresis.

La elección del tipo de acero a utilizar depende de la aplicación práctica. En efecto si se trata de fabricar un “imán permanente”, se elegirá un acero de elevado valor de magnetismo remanente (aceros duros), mientras que si el caso es hacer un “electroimán” para una grúa destinada a mover “chatarra”, el valor de  $B_r$  deberá ser muy bajo (idealmente 0) (hierro dulce).



Lazo de Histéresis de un material magnéticamente “duro”, utilizado para imanes permanentes.



Curva de histéresis de un material “blando”, empleado en un electroimán para una “grúa”.



Si el solenoide que contiene a la muestra en ensayo en lugar de ser alimentado con una tensión continua se lo somete a una tensión alterna sinusoidal, el lazo de histéresis visto será recorrido una y otra vez, en correspondencia con cada ciclo.

La aparición del magnetismo remanente y la fuerza coercitiva necesaria para vencerlo, hace que en cada ciclo sobre el acero se realice un trabajo.

La energía correspondiente la proveerá, por supuesto, la fuente de tensión alterna aplicada.

Se demuestra que la energía absorbida por el fenómeno de histéresis depende de la frecuencia de la tensión alterna, pero fundamentalmente del área encerrada por el particular “ciclo de histéresis” del acero en cuestión.

Este fenómeno se tendrá en cuenta al diseñar bobinas (transformadores, motores y electroimanes) con núcleo de acero, para lo cual señalamos que es de uso común en la técnica el llamado “hierro-silicio” o “acero-silicio” que además de carbono tiene un contenido de silicio de entre 1% y 4% con una superficie de lazo muy estrecha.

Gracias por su atención

Se recomienda discutir el tema

**FIN**