




**MASTER DE FORMACIÓN
B1.1 y B1.3
MÓDULO 3
FUNDAMENTOS DE ELECTRICIDAD**

Edición: 3
Revisión: 9
Fecha: 31/07/2017

ÍNDICE M3

Capítulo

	MASTER DE FORMACIÓN B1.1 y B1.3 MÓDULO 3 FUNDAMENTOS DE ELECTRICIDAD	Edición: 3 Revisión: 9 Fecha: 31/07/2017
---	---	--

CAPÍTULO 10

MAGNETISMO

10.1. TEORIA DEL MAGNETISMO. PROPIEDADES DE UN IMAN.

Un imán se define como un material que tiene la propiedad de atraer al hierro y que, si se le permite girar libremente, girará hasta colocarse en una dirección definida. Los materiales que pueden ser atraídos por los imanes se llaman sustancias magnéticas. Existen dos clases principales de imanes: los imanes naturales y los imanes artificiales.

El imán natural o magnetita es un mineral negro que tiene propiedades magnéticas de forma natural, o sea que se encuentra ya imantado en la naturaleza. Históricamente ha jugado un papel muy importante en la Edad Media por usarse para imantar las agujas de las brújulas. Hoy, tiene muy poco valor por tener una estructura físicamente inestable y una fuerza magnética baja.

El imán artificial se fabrica con hierro o acero que se imantan o por inducción o golpeándolo con otro imán o colocándolo en el campo de un electroimán.

El acero retiene el magnetismo inducido por un largo periodo de tiempo, por lo que se le llama imán permanente, mientras que el hierro dulce puede ser imantado con facilidad pero también pierde el magnetismo muy rápidamente.

La propiedad que tiene una sustancia que le permite mantenerse imantada se llama retentividad y el magnetismo que permanece se llama magnetismo remanente. El acero tiene una alta retentividad mientras que el hierro dulce la tiene baja.

10.2. POLOS MAGNETICOS.

Cuando un imán se sumerge en limaduras de hierro, se observa que las limaduras se pegarán al imán en sus extremos y casi ninguna en el centro, lo que demuestra que el magnetismo se halla concentrado en los extremos del imán. Estos extremos se llaman polos del imán. La fuerza magnética en ambos polos del imán es la misma. Si se permite girar libremente a un imán, éste se colocará en dirección norte sur, alineándose con el campo magnético de la tierra. El polo del imán que apunta al norte magnético se llama polo norte mientras que el polo que apunta al sur magnético se llama polo sur.

Experimentalmente, se demuestra que si se acerca el polo sur de un imán al polo norte de otro, se producirá una fuerza de atracción entre ambos imanes, mientras que si se acercan los polos norte se producirá una fuerza de repulsión entre ellos. Esto es la ley básica del magnetismo, coincidente con las leyes de atracción y repulsión universales, que establece que polos del mismo signo se repelen y de distinto signo se atraen. La fuerza de atracción o repulsión entre dos polos se expresa por la fórmula:

$$F = \frac{M_1 M_2}{\mu D^2}$$

Donde M1 y M2 son las fuerzas de los polos, D es la distancia que los separa y μ es la permeabilidad magnética del medio que los separa, que se puede definir como la facilidad con que una sustancia o medio magnético puede conducir las líneas de fuerza magnéticas.

10.3. CAMPO MAGNETICO.

Campo magnético es la región alrededor de un imán en la que se pueden apreciar sus efectos. Cuando una masa polar se sitúa en un campo magnético, se ejercerán sobre la misma, fuerzas que varíen en dirección y en intensidad. La dirección queda definida por la dirección en que se aplicaría la fuerza a la unidad de polo magnético y la intensidad o la fuerza (numero de líneas de fuerza por unidad de área) es la fuerza que el campo ejerce sobre una unidad de polo colocada en ese punto del campo magnético. Esta relación se representa con la ecuación:

$$H = \frac{F}{M} \quad \begin{array}{l} H \text{ (Oerted)} \\ F \text{ (dinas)} \\ M \text{ (Unidades de polo)} \end{array}$$

Donde H es la intensidad de campo, M es la unidad de polo colocado en el campo y F es la fuerza que el campo ejerce en este polo.

La intensidad de campo no es uniforme en el entorno de un polo, sino que disminuye según aumenta la distancia al polo. Se ha demostrado que la intensidad de campo alrededor del polo es directamente proporcional a la unidad de polo, e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia al polo, lo que se expresa por la fórmula:

$$H = \frac{M}{\mu d^2}$$

Siendo μ la permeabilidad magnética del medio, que en el vacío y en el aire es la unidad.

10.4. LINEAS DE FUERZA. ACCION DE UN IMAN SUSPENDIDO EN EL CAMPO MAGNETICO TERRESTRE.

Si tomamos una lámina de vidrio, le colocamos debajo un imán y se espolvorean por encima limaduras de hierro se puede observar que, tras golpear ligeramente el vidrio, adoptan la forma que se muestra en (A) de la figura 3.10.1 siguiente:

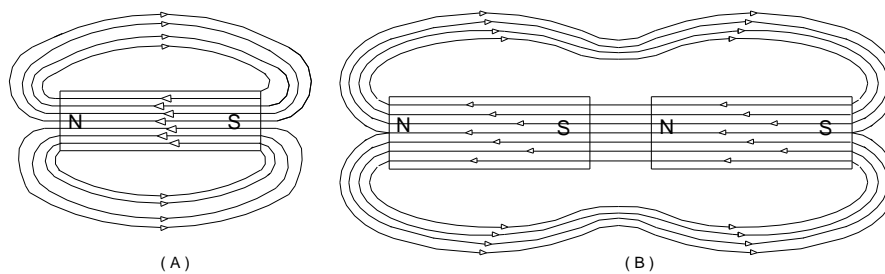


Fig. 3.10.1. Líneas de fuerza de campo magnético

Las limaduras se alinean en los alrededores del imán formando unas líneas como consecuencia de la fuerza que ejerce el imán sobre las unidades de polo de los imanes de las limaduras.

Las líneas que se forman en el campo magnético de ese imán se llaman líneas de fuerza. Se ha adoptado el criterio de considerar que las líneas de fuerza de un campo magnético van del polo norte al sur por el exterior y del sur al norte por el interior del imán. Las líneas de fuerza de un campo magnético son aproximadamente paralelas y nunca se intersectan.

Cuando dos imanes se unen, si se aproxima un polo norte a un polo sur, las líneas de fuerza se oponen en las proximidades de los polos debilitándose mientras que se refuerzan en el exterior sumándose su intensidad, como se aprecia en (B) de la figura 3.10.1 anterior. Si se siguieran aproximando los dos imanes, llegarían a formar un solo imán uniéndose el polo norte con el sur.

Si el imán tuviese la forma de herradura, las líneas de fuerza irían igualmente del polo norte al polo sur por el exterior del imán adoptando la forma mostrada en (A) de la figura 3.10.2. Pero si se situara una sustancia magnética, como el hierro dulce, en las proximidades de los polos del imán, las líneas de fuerza se concentrarían en esa sustancia provocando un incremento del campo magnético en las proximidades de la sustancia magnética, o sea las líneas de fuerza se confinan en el material ferromagnético como se ve en (B) de la misma figura 3.10.2. Este fenómeno debe ser tenido en cuenta por su aplicación directa en el funcionamiento de motores y generadores.

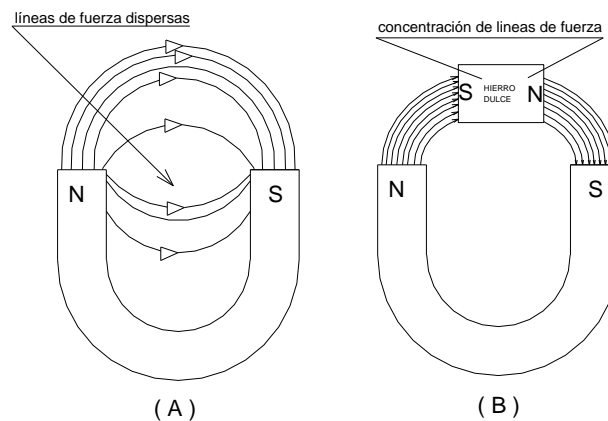


Fig. 3.10.2. Líneas de fuerza de dos campos magnéticos

La figura 3.10.3 muestra el campo magnético terrestre.

En la superficie de la Tierra se aprecia la existencia de un campo magnético considerado como uniforme en un espacio próximo a un punto. Gauss hizo las primeras determinaciones teóricas sobre la equivalencia entre el campo magnético terrestre y un imán único situado cerca del centro de la Tierra y orientado según los polos magnéticos terrestres.

Estos datos varían lentamente cada año. Se observó asimismo que no están alineados los ejes geográfico y magnético terrestres, sino que forman un cierto ángulo conocido como DECLINACIÓN MAGNETICA o ángulo que forma el meridiano geográfico con el magnético siendo el meridiano magnético el comprendido en el plano perpendicular a la Tierra y que pasa por los polos magnéticos.

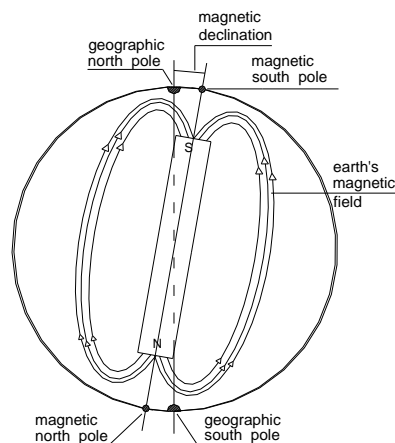


Fig. 3.10.3 Campo magnético terrestre

Las líneas de la Tierra que poseen igual declinación magnética se llaman ISÓGONAS y convergen en los polos magnéticos. Las isógonas son líneas variables según variaciones diurnas, anuales y seculares. Las variaciones diurnas y anuales no están bien definidas y las seculares dependen de la posición geográfica del punto considerado.

Dado que la tierra tiene dos polos magnéticos, uno cerca del polo norte geográfico y otro cerca del polo sur geográfico, y que las líneas de fuerza magnéticas rodean la tierra, del mismo modo que en un imán, se produce el hecho de que un imán se alinee con las líneas de fuerza magnética terrestres con su polo norte apuntando siempre al polo norte terrestre. Este es el fundamento de la brújula magnética.

Las diferencias fundamentales entre un campo eléctrico y un campo magnético son:

1°. Las líneas de fuerza del campo magnético son cerradas, mientras que las del campo eléctrico “nacen” en la carga positiva y “mueren” en la carga negativa.

2°. En electricidad se pueden separar cargas positivas y negativas, mientras que en magnetismo no se pueden separar polos norte y sur (equivalente a cargas positivas y negativas en electricidad).

10.5. MAGNETIZACION Y DESMAGNETIZACION.

Si un imán se parte en dos, se obtienen dos imanes. Esto continuado hasta que las partes sean del tamaño de una molécula, cada molécula sería un imán con sus polos norte y sur. Esto se conoce como teoría molecular del magnetismo. De acuerdo con esta teoría los imanes moleculares que hay en un material magnético que no ha sido imantado no están ordenados, sino que forman pequeños grupos estables apuntando diversas direcciones. Cuando este material se coloca en un campo magnético, los imanes moleculares tienden a alinearse con el campo magnético apuntando todos en la misma dirección. El acero precisa de un campo magnético fuerte para ser imantado, pero al eliminar el campo magnético, retiene la imantación mucho tiempo. Se dice que el acero tiene una permeabilidad baja y una retentividad alta. Sin embargo, el hierro dulce se imanta con un campo magnético débil, pero sus moléculas se desalinean con facilidad. Se dice que el hierro dulce tiene una permeabilidad alta y una retentividad baja.

La figura 3.10.4 siguiente muestra en A) un material desmagnetizado y en B) un material magnetizado. Obsérvese cómo en B) los imanes elementales están perfectamente orientados.

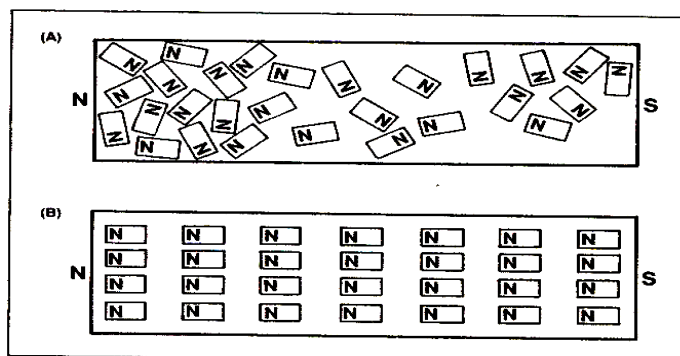


Fig. 3.10.4. Materiales magnéticos, desmagnetizados y magnetizados

10.6. TIPOS DE MATERIALES MAGNETICOS.

Muchos materiales, como el cobre, la plata, el plomo, etc. que no tienen propiedades magnéticas apreciables, debido a que sus átomos tienen las órbitas de los electrones de modo tal que sus campos magnéticos se cancelan los unos con los otros.

Hay otros materiales, conocidos con el nombre de ferromagnéticos, que tienen la propiedad de ser atraídos por el imán. Estos últimos se clasifican en dos tipos: blandos y duros.

Definiendo la permeabilidad magnética como la facilidad que tiene una sustancia magnética para adquirir magnetización o para magnetizarse y la retentividad magnética como la dificultad de una sustancia magnética para desmagnetizarse, se puede decir que:

Son materiales blandos aquellos que son fáciles de imantar en un campo magnético, pero se desimantan con facilidad, luego tienen una permeabilidad alta y una retentividad baja. Comprenden desde el hierro dulce y la fundición hasta las aleaciones hierro-níquel, incluyendo los aceros al silicio, de propiedades elásticas. Se emplean en aplicaciones en las que no es deseable un campo magnético constante, como altavoces, transformadores etc.

Son materiales duros aquellos que tienen gran fuerza coercitiva y un alto magnetismo remanente, o sea se imantan y desimantan con gran dificultad conservando su imantación con gran fuerza, luego tienen una permeabilidad baja y retentividad alta por lo que se emplean como imanes permanentes en donde es deseable un campo magnético constante como generadores etc. Entre estos se encuentra el acero y el Álnico, una aleación de aluminio, níquel y cobalto.

10.7. BLINDAJE MAGNETICO.

Si en un campo magnético se introduce un tubo de gruesas paredes de material ferromagnético con su eje perpendicular a las líneas de fuerza del campo magnético, se observa que las líneas de fuerza se concentran en las paredes del tubo y se debilitan en el hueco, como se aprecia en la figura 3.10.5 siguiente.

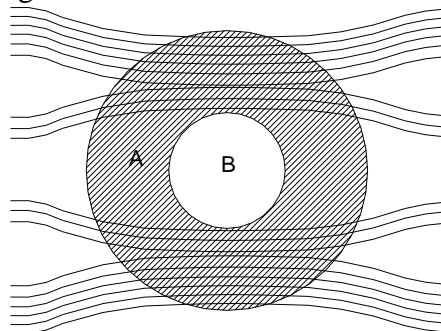


Fig. 3.10.5. Efectos del blindaje magnético

De hecho, se puede decir que casi todas las líneas de fuerza pasan por el material, A en la figura, no pasando casi ninguna por el hueco, B en la figura.

Por lo tanto, un tubo de las características expuestas, situado perpendicularmente a las líneas de fuerza de un campo magnético crea en su interior un blindaje magnético, ya que la inducción en su interior se ha debilitado tanto que llega a ser despreciable.

10.8. PRECAUCIONES EN LA CUSTODIA Y ALMACENAJE DE IMANES.

En todos los imanes todo ocurre como si existiesen multitud de pequeños imanes, tal como se vio en la pregunta de “imantación y desimantación”. Pues bien, con el tiempo estos pequeños imanes sufren una acción desmagnetizante hasta que llegan a quedar completamente desorientados y provocando la desmagnetización del imán. Por ello, para conservar los imanes, es preciso almacenarlos con sus armaduras colocadas de modo que los circuitos magnéticos estén cerrados y no presenten el fenómeno que corresponde a esos pequeños imanes que con sus polos libres tienden a la desimantación. Cuando los imanes son de herradura, basta con una simple barra, pero cuando son barras magnéticas se deben colocar opuestos, paralelos y con dos armaduras que unen los polos opuestos, como se ilustra en la figura 3.10.6 siguiente, de modo que siempre esté cerrado el circuito magnético.

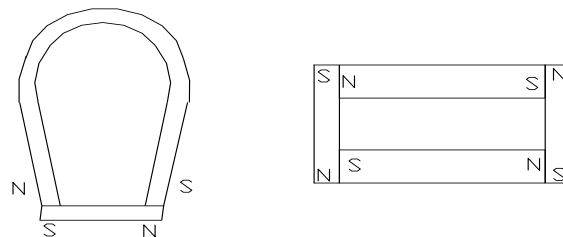


Fig. 3.10.6. Imanes preparados para almacenamiento

Las vibraciones y los golpes pueden ejercer una acción decisiva sobre la imantación de un imán, llegando incluso a perder su magnetismo cuando se producen, como consecuencia de un golpe brusco, fenómenos de resonancia.

10.9. ELECTROMAGNETISMO.

10.9.1. Regla de la mano derecha para determinar el campo magnético alrededor de un conductor que transporta corriente eléctrica.

Oersted descubrió que un conductor por el que circula una corriente crea un campo magnético a su alrededor. Este campo tiene una dirección que es tangencial a un círculo imaginario con centro en cada punto del conductor y una intensidad que disminuye según se aleja del conductor y que las líneas de fuerza o líneas de inducción son concéntricas al conductor, como se muestra en la figura 3.10.7 siguiente.

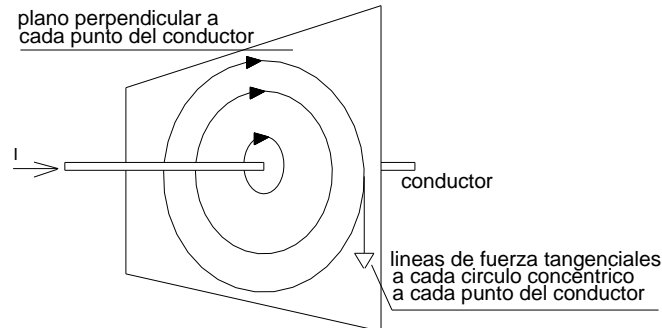


Fig. 3.10.7. Campo creado por una corriente eléctrica rectilínea

En la figura 3.10.7, la corriente circula en el conductor penetrando en la página y la dirección del campo es en el sentido de las agujas del reloj.

Esto se define como la ley de la mano derecha (o de la mano izquierda, según textos americanos) o Regla de Maxwell, que dice: Tomando un conductor con la mano derecha (o mano izquierda, ya que según los textos americanos la corriente circula de negativo a positivo) de tal manera que el dedo pulgar indique la dirección de la corriente, los demás dedos indican la dirección de las líneas de fuerza. También se define como la ley del sacacorchos que dice que las líneas de fuerza del campo magnético creado por una corriente eléctrica rectilínea son círculos concéntricos con la corriente y su sentido es el del avance del sacacorchos en la dirección de la corriente.

El número total de líneas de fuerza que ocupan una región de actividad magnética se conoce como campo magnético y se suele representar por la letra B. La unidad de campo magnético, en el sistema Giorgi es el Tesla. El número de líneas que pasan perpendicularmente por un metro cuadrado se llama densidad de flujo o, simplemente, flujo magnético y su unidad es el weber que es igual a un Tesla por metro cuadrado y se representa por la letra griega ϕ , fí.

Los fenómenos descritos se expresan matemáticamente:

$$B = \mu \frac{I}{r}$$

B = Campo (tesla)
 μ = Permeabilidad del medio
 (en el vacío: $4\pi \cdot 10^{-7}$ T. m / A)
 I = Intensidad del conductor (A)
 r = distancia del punto del campo al conductor (metros).

En definitiva, se puede decir que **$B = K I$**

$$\phi = B \times S$$

ϕ = Flujo magnético en Weber
 B = campo magnético en Tesla
 S = Superficie en metros cuadrados

10.10. CAMPO CREADO POR UNA CORRIENTE CIRCULAR. SOLENOIDE.

El campo creado por una espira circular recorrido por una corriente tiene la forma de la figura siguiente (considerado el plano del estudio el perpendicular a los puntos opuestos del conductor).

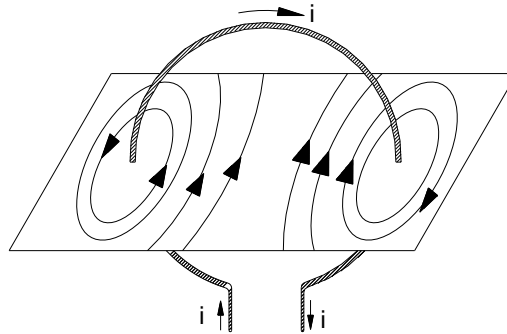


Fig. 3.10.8. Campo creado por una corriente eléctrica circular

En ella se ha aplicado la ley de la mano derecha (considerado el sentido de la corriente de positivo a negativo) para determinar el sentido del campo creado en cada punto de la espira (considerada la espira en el papel y el campo en un plano perpendicular al papel) habiéndose obtenido el campo de la figura con las líneas de fuerza en el sentido mostrado. Por analogía con un imán en el que las líneas de fuerza van de sur a norte por el interior, se dice que la cara por donde entran las líneas de fuerza se llama cara sur de la espira y la cara por donde salen se llama cara norte de la espira. Se puede demostrar que la inducción en el centro de una espira de radio r por la que circula una corriente I viene dada por la fórmula:

$$B = \mu_0 \frac{I}{2r} \quad \text{ó} \quad B = k \times I$$

Siendo μ_0 la permeabilidad del medio, que en el vacío se sabe es igual a $4\pi \cdot 10^{-7}$ tesla . metro / amperio. La intensidad del campo magnético depende directamente de la intensidad de la corriente.

Si en lugar de una espira, se tratase de una bobina con N espiras, el campo sería N veces mayor.

Cuando la longitud de la bobina es mucho mayor que su radio, la bobina se llama solenoides. Si se hace circular una corriente por un solenoide se crea un campo magnético que tiene la misma forma que el creado por una barra imantada y es muy uniforme en su interior, sobre todo si la longitud del solenoide es mucho mayor que su diámetro. De aquí que habitualmente se use el solenoide para reemplazar al imán, dado que el campo creado por el solenoide es muy superior al de un imán natural. La figura siguiente muestra el campo creado por un solenoide.

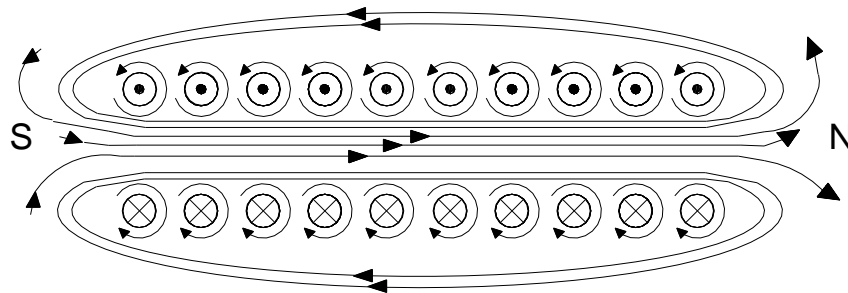


Fig. 3.10.9. Campo creado por un solenoide

En el interior del solenoide, en el que la longitud es mayor que el radio, el valor de la inducción sería:

$$B = \mu_0 \frac{NI}{L} \quad \text{ó} \quad B = k \times NI$$

Expresión válida en el interior de la bobina, en la que N es el número de vueltas de la bobina, I es la intensidad en amperios y L es la longitud de la bobina en metros, no la longitud del hilo. El término **NI** se conoce como “**amperios / vuelta**”.

Una bobina, o solenoide, es, en definitiva, un electroimán ya que se comporta como un imán cuando por ella circula una corriente eléctrica. La figura 3.10.10 siguiente muestra cómo se forma el campo magnético, alrededor de un hilo bobinado sobre un núcleo, igual al de un imán.

Nótese que la corriente se ha considerado de negativo a positivo por lo que se ha aplicado la ley de la mano izquierda para determinar los campos creados alrededor del conductor.

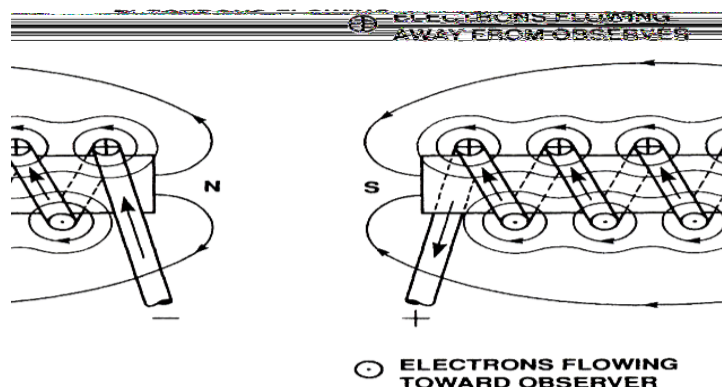


Fig. 3.10.10. Determinación de los polos magnéticos de un solenoide (criterio USA)

En la figura 3.10.11 siguiente se muestra cómo determinar los polos norte y sur de una bobina, mediante la regla de la mano izquierda: “Si se agarra una bobina con la mano izquierda de modo que los dedos abracen a la bobina apuntando al sentido de la corriente (de negativo a positivo), el dedo pulgar apunta al polo norte de la bobina”.

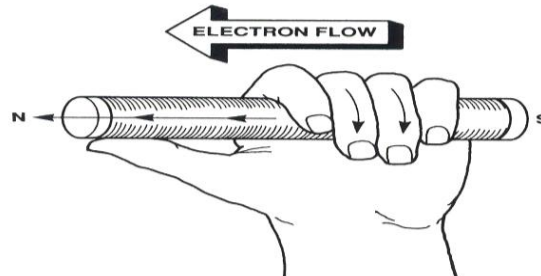
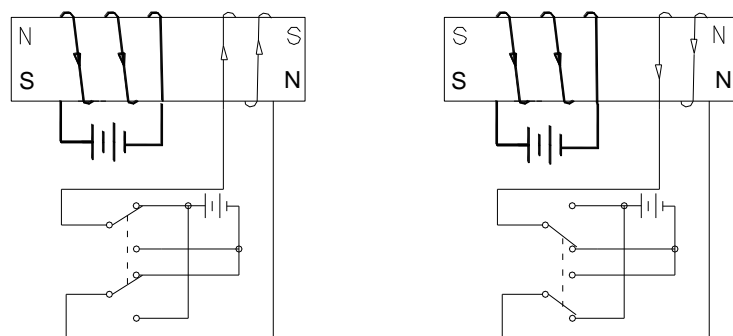


Fig. 3.10.11. Regla de la mano izquierda para determinar los polos de una bobina (criterio USA)

Es importante reseñar el hecho de que más de un solenoide se puede bobinar en un núcleo consiguiéndose actuar sobre el campo magnético creado para objetivos diversos. La figura 3.10.12 muestra un ejemplo.



a) Campos opuestos. Se anulan **b) Campos iguales. Se suman**

Fig. 3.10.12. Bobinas con doble devanado

En el caso a), se aprecia que si las fuentes son de la misma f.e.m., los campos tendrían sus líneas de fuerza en sentido contrario anulándose. El campo magnético resultante sería nulo.

En el caso b), se ha invertido la polaridad de una de las fuentes, de modo que los campos magnéticos creados por cada bobina se suman dando como resultante un campo magnético reforzado.

10.11. CIRCUITO MAGNETICO. FUERZA MAGNETOMOTRIZ, INTENSIDAD DE CAMPO MAGNETICO, PERMEABILIDAD, RELUCTANCIA.

Los circuitos eléctricos, ya estudiados, y los circuitos magnéticos tienen muchas similitudes. La fuerza que produce el flujo de electrones se conoce como fuerza electromotriz y la que produce el flujo magnético en un circuito magnético se llama fuerza magnetomotriz (f.m.m.). Asimismo, si resistencia es la oposición al flujo de electrones, la reluctancia es la oposición del medio al flujo magnético al igual que si la conductancia indica en un circuito eléctrico la facilidad con que fluye la corriente eléctrica, la permeabilidad es la facilidad con que las líneas de fuerza magnéticas fluyen en un circuito magnético.

No se ha dado ningún nombre a la unidad de reluctancia, que se define como la reluctancia de un circuito magnético de un centímetro de longitud y un centímetro cuadrado de sección, con una permeabilidad magnética de una unidad. Matemáticamente se expresa:

$$R = \frac{L}{\mu S}$$

donde R es la unidad de reluctancia, L es la longitud del circuito magnético, S es la sección del circuito magnético y μ es la permeabilidad del medio.

Al igual que en un circuito eléctrico la ley de Ohm relaciona ddp, intensidad de corriente y resistencia, en un circuito magnético la relación entre fmm, flujo magnético y reluctancia tiene la expresión

$$fmm = \phi \times R$$

siendo fmm la fuerza magnetomotriz en gilbert, ϕ el flujo magnético en Maxwell y R la reluctancia en unidades de reluctancia. Se define, pues, el gilbert como la fuerza magnetomotriz requerida para establecer un flujo de un Maxwell en un circuito magnético de una unidad de reluctancia.

10.12. CICLO DE HISTERESIS, MAGNETISMO REMANENTE, FUERZA COERCITIVA, PUNTO DE SATURACION.

Si se introduce un material ferromagnético, en forma de núcleo, en el interior de una bobina y se hace variar la corriente que circula por la bobina, el campo no crece linealmente, sino que lo hace lentamente al principio, luego más rápidamente y de forma lenta al final cuando el núcleo empieza a saturarse hasta que se alcanza el **punto de saturación A**, como se ve en la figura 3.10.13.

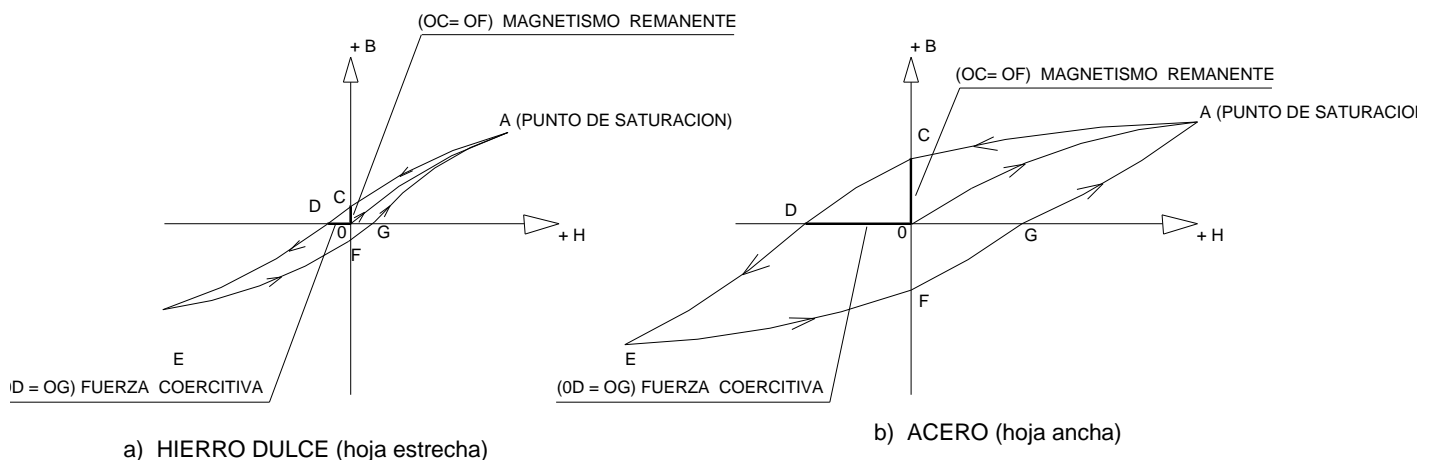


Fig. 3.10.13. Ciclo de Histéresis

Si, una vez imantado el núcleo, se hace disminuir la intensidad en el solenoide, el campo en el núcleo no disminuye al mismo ritmo que creció, sino que lo hace más lentamente dando lugar a la curva AC. Esto es debido a que parte de los imanes que forman el núcleo se quedan ordenado. El valor OC del campo en el núcleo cuando la intensidad es nula, o la corriente es cero en el solenoide, se llama **magnetismo remanente**. Si ahora se invierte el sentido de la corriente, creando un campo magnético de sentido opuesto al anterior, el campo del núcleo sigue disminuyendo hasta hacerse cero en el punto D. La intensidad OD necesaria para anular el campo del núcleo se llama **fuerza coercitiva**. Al continuar haciendo la intensidad más negativa, el núcleo se imanta en sentido contrario al igual que ocurrió al principio obteniéndose el punto E. Volviendo a reducir la intensidad hasta cero se alcanza el punto F y volviendo a aumentarla se pasaría al punto G y finalmente al punto A. La curva así obtenida, ACDEFGA, se llama **ciclo de histéresis** o efecto producido en el campo magnético de una bobina en el que se hace variar de positiva a negativa la corriente que circula por ella. Para imantar y desimantar el núcleo ha sido preciso realizar un trabajo que se ha convertido en calor aumentando la temperatura del núcleo. Esta energía gastada es proporcional al área del ciclo de histéresis.

Los materiales blandos, como el hierro dulce, (a) de la figura 3.10.13) que se imantan y desimantan con facilidad, tienen una “hoja de histéresis” estrecha; se dice que son materiales ferromagnéticos de bajas pérdidas mientras que los materiales duros (b) de la figura 3.10.13), como el acero, que se imantan y desimantan con dificultad, tienen una “hoja de histéresis” ancha o son materiales ferromagnéticos de altas pérdidas.