

MODULO N° 5

MAGNETISMO

IMANES NATURALES Y ARTIFICIALES

Se define como imán a todo elemento que tiene la propiedad de atraer a un trozo de hierro o material ferromagnético. Los imanes naturales son rocas que en la naturaleza se encuentran con óxido salino de hierro. Además del Hierro el Níquel y la Cobalto son atraídos pero con menor intensidad por otros imanes. Si tenemos un trozo de hierro un determinado tiempo en contacto con imán, el hierro adquiere características similares a los de un imán, el hierro en este caso se llama imán artificial.-

Polos de un imán

Vamos a usar una aguja magnética, consiste en una aguja metálica cuya longitud es mayor comparada con sus dimensiones, siendo esta de hierro. Para el estudio de sus propiedades tomaremos dos agujas magnéticas y marcaremos sus extremos para diferenciarlos, veremos que ambos tienen la propiedad de atraer al hierro y su fuerza está en sus extremos. Esto podemos demostrarlo poniendo en contacto la aguja en contacto con limaduras de hierro, veremos que al retirar la aguja las limaduras se adhieren solo en las puntas. Diremos que en las puntas se encuentran las zonas magnéticas.

Si realizamos la siguiente experiencia y acercamos una aguja a otra, veremos los siguientes efectos: cada uno de los extremos atrae al otro. Este experimento nos demuestra que los polos distintos se atraen y polos iguales se repelen. Si suspendemos una aguja por su punto medio podremos observar que esta se orienta aproximadamente en iguales direcciones que el meridiano terrestre, es decir que uno de sus extremos está orientado al norte y el otro al sur geográfico.-

La zona que no tiene acción magnética, se llama "zona neutra"

No existe sustancia alguna capaz de detener la acción magnética. El Fe, el níquel, pueden desviar esa acción, mas no suprimirla.-

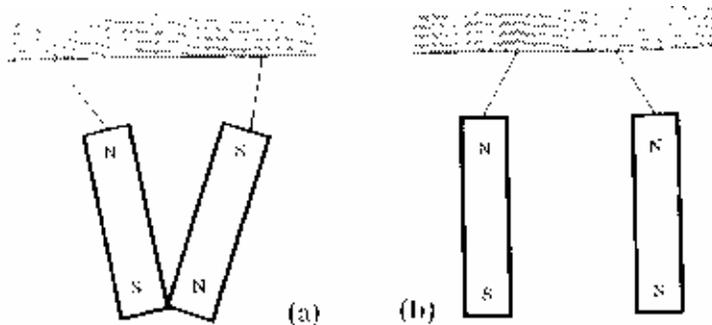


Gráfico G 1

MAGNETISMO INDUCIDO

Cuando un hierro está unido a un imán adquiere las propiedades de este, entonces decimos que se ha imanado por inducción. Es importante destacar que las acciones magnéticas en un imán: atracción, repulsión y fenómenos de inducción se ejercen igual si interponemos un cuerpo cualquiera entre el imán y el cuerpo sobre el cual actúa, es decir, no existe ninguna barrera capaz de impedir la acción magnética.

MASA MAGNÉTICA

Para el estudio cuantitativo de la acción de los polos de un imán se presenta un problema, que es imposible separar los polos magnéticos, pues sabemos que todo imán presenta dos y al acercarse a otro imán, actúan sobre ellos fuerzas magnéticas.-

Esto se puede solucionar usando imanes cuya longitud sea suficientemente grande como para poder despreciar la acción de los polos más alejados.

Consideramos la siguiente balanza magnética, si una vez equilibrada esta balanza, le acercamos el polo norte de un imán, al polo norte de la balanza, la fuerza que se produce entre los dos polos desequilibra la balanza, esta fuerza se puede conocer una vez determinada la carga "P", que se coloca en el platillo que restablece el equilibrio. Cuando dos polos distintos colocados sobre la balanza ejercen igual fuerza, diremos que tienen igual masa magnética. Cuando esas fuerzas sean distintas admitiremos que serán proporcionales a la masa de cada imán.-

Se comprueba que ambos polos de un imán les corresponde igual masa magnética que el polo opuesto, es decir que todo imán lleva dos masas magnéticas de distinta polaridad.-

LEY DE COULOMB

Experimentalmente se comprueba que dos polos magnéticos se atraen o repelen con una fuerza que es directamente proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa, como lo indica la siguiente expresión :

Donde :

m = a la masa magnético

d = distancia de separación entre polos ;

k = constante de proporcionalidad que depende de las unidades y sí está en el vacío.

$$F = K \frac{m_1 \cdot m_2}{d^2} = \left[\text{dyn} = k \cdot 1.1(\text{Ues}/q)^2 \right]$$

Las unidades: se elige como unidad de masa magnético a aquella que en el vacío o en el aire repele o atrae a otra con una fuerza "F= 1 dyn " cuando están separadas por 1 campo magnético. , la constante es igual a una unidad de masa magnético llamada Ues de masa magnético , sí hacemos que valgan una unidad podremos expresarla así :

$$1 \text{ues} /_{\text{mag}} = \sqrt[3]{\text{dyn} \cdot \text{cm}^2}$$

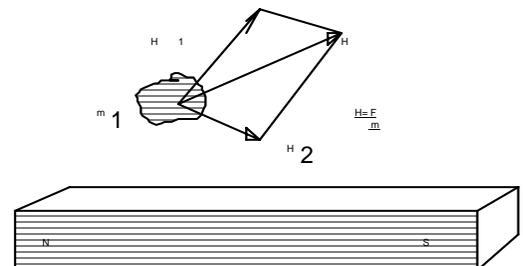
CAMPO MAGNÉTICO

La acción de los imanes se caracteriza por la fuerza que actúa sobre otros polos magnéticos o por los fenómenos de inducción que se ejercen sobre todo el espacio que lo rodea , a ese espacio lo llamaremos campo magnética .

Teóricamente consideramos que se extiende hasta el infinito, pero en la practica la influencia de la masa magnética llega a un limite dado por dicha masa la cual produce el campo magnética . Cada punto del campo magnético actúa sobre las masas magnética colocado sobre el , por medio de una fuerza, cuya dirección no depende del punto pero su sentido depende del signo, el cual es independiente del valor de la masa magnética.-

Para estudiar el campo magnético supongamos que colocamos una masa magnético. enorme en distintos puntos del campo magnético , determinaremos así la intensidad , dirección , y sentido de las fuerzas que actúan sobre él .

Llamaremos intensidad , dirección y sentido del campo magnético a la fuerza que actúa sobre la masa magnética norte colocada en ese campo . En esta definición suponemos que se ha aislado un polo magnético. y además su masa magnética es tan pequeña como para no modificar el campo magnético que se estudia. Luego colocamos una masa magnética norte en un punto del campo magnético , sobre esta actuará una fuerza cuya intensidad , dirección y sentido es el siguiente:



En general al estudiar el campo magnético de un imán será necesario sumar vectorialmente en cada punto los valores de H_1 y H_2 , debidos a los dos polos del imán , ósea que la resultante será la intensidad de cada fuerza .

Tendremos definido un vector característico para cada punto del campo magnético . Si suponemos que la masa magnética de prueba tomada para el estudio del campo magnético, puede moverse libremente bajo la acción de la fuerza que actúa sobre ella y carece de inercia , se moverá en condiciones tales que en cada punto el vector campo magnético será tangente a la trayectoria; donde se denomina a esa trayectoria " LINEA DE FUERZA DEL CAMPO MAGNÉTICO " y por convención se cosiera que estas líneas parten del polo norte y llegan al polo sur , como se puede ver en el gráfico G4

Se puede observar que hay infinitas líneas de fuerzas y ninguna de esta se cortan, hay regiones que las líneas de fuerzas son paralelas, la intensidad es igual en todos los puntos lo que podemos considerar como un campo magnético uniforme .Este caso se presenta en la zona central del campo magnético . producido por dos polos próximos formados por dos superficies planas como se indica en el gráfico G3

Líneas de fuerza.

El espacio que circunda a los polos de un imán, donde éste ejerce fuerzas especiales, es llamado su Campo magnético como hemos dicho anteriormente.

La presencia de dicho campo no es detectable por nuestros sentidos de manera directa, pero puede ponerse en evidencia mediante un experimento sencillo, que consiste en colocar sobre un imán permanente una lámina de plástico delgada, sobre la cual luego se derrama, rociándolas suavemente, una cantidad de limaduras de hierro mientras se golpea suavemente la lámina con la punta de los dedos para facilitar la distribución uniforme de las limaduras sobre la lámina transparente. Se verá entonces como las limaduras se acomodan sobre la lámina formando un dibujo que muestra la figura G3. Las limaduras se orientan en forma ordenada, dibujando líneas bien definidas que coinciden con la dirección de las fuerzas que actúan en el campo magnético. Estas líneas son llamadas "líneas de fuerza" del campo magnético y poseen las siguientes propiedades:

1) La dirección de las líneas de fuerza en cualquier punto de un medio no magnético, como el aire, es la del polo Norte de una brújula ubicada en dicho punto.

2) Cada una de las líneas de fuerza forma un lazo cerrado, como señalan las líneas de puntos. Esto significa que una línea de fuerza que sale de un punto del polo Norte de un imán pasa por el espacio circundante y se dirige hacia el polo Sur y así se supone que continúa dentro del imán hasta el punto por donde salió, en el polo Norte.

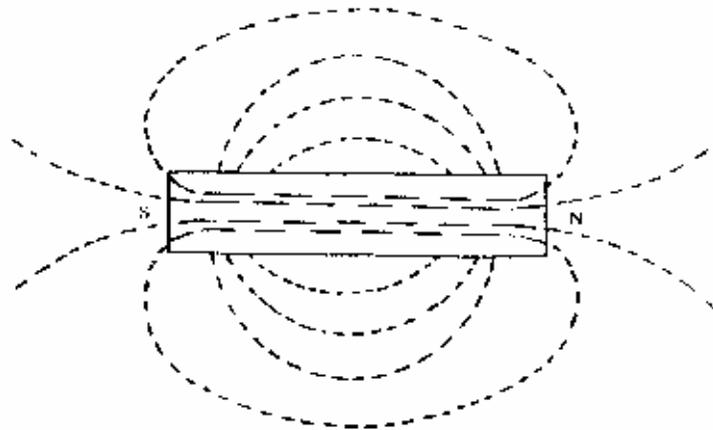


Fig. G 3..

Utilización de limaduras de hierro para determinar la distribución del campo magnético. (la representación de la figura es esquemática, debido a que el espectro real que se obtiene es sumamente apretado y cargado de líneas, lo que hace muy dificultosa su reproducción, que resultaría además muy poco clara y sí sumamente confusa).

3) Las líneas de fuerza nunca se cortan. Esto se deduce del hecho de que si se coloca una brújula en el campo magnético, su polo Norte indicará solamente una dirección o sea la dirección de las línea de fuerza en ese punto.

4) Las líneas de fuerza son como cuerdas elásticas estiradas, siempre tratando de contraerse, acortándose.

Este efecto se demuestra suspendiendo dos imanes permanentes paralelos . Si se efectuara sobre la figura la distribución del campo magnético, se apreciaría que la atracción ejercida es causada por la contracción de las líneas de fuerza que pasan por uno y otro.

5) Las líneas de fuerza paralelas y con igual sentido se repelen mutuamente. Este efecto se demuestra mediante la misma figura utilizada anteriormente, pero en la versión b, correspondiente a la repulsión magnética. Como en el caso anterior, si se trazara sobre ella la distribución del campo magnético, se vería que las líneas de fuerza entre ambos imanes son paralelas, lo que las califica como causantes de la fuerza de repulsión existente entre las barras suspendidas.

Estas sencillas propiedades de las líneas de fuerza deben tenerse siempre presentes porque ayudan en alto grado a entender los fenómenos de interacción de fuerzas magnéticas.

Aunque ya están indicadas en las figuras, las líneas de fuerza se encuentran dentro y fuera de la masa magnética, uniendo ambos polos

Las figuras G 4 a, b, c, d, ilustran la forma en que las líneas de fuerza entran y salen de los polos magnético y las formas que afectarían los campos magnéticos de dos polos de igual o diferentes signos..-

Se supone que la disposición de las líneas de fuerza sí fuera posible aislar los polos magnéticos sería la que muestran la figura. (a) y (b), donde se ven salir del polo Norte y llegar al polo Sur, las líneas de fuerza en forma radial.

La disposición de las figuras (c) y (d) permite apreciar la forma del campo magnético entre dos polos; en el primer caso cuando se trata de polos con signos diferentes y en el segundo para polos de signos

iguales. En la figura (d), puede verse, a la mitad de la distancia entre los dos polos, el punto X, donde las fuerzas de repulsión se neutralizan. Ese punto es llamado punto nulo o punto sin campo magnético.

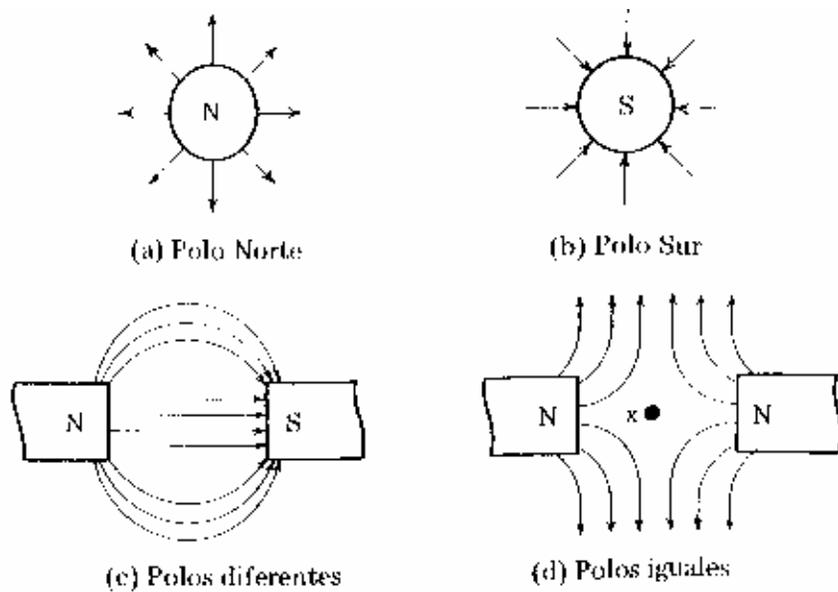


FIG 4

Flujo magnético

Densidad del flujo magnético, inducción magnética. A pesar que es útil representar el campo magnético por sus líneas de fuerza, es difícil suponer la cantidad de ellas que existen. En realidad existen tantas como se imaginen. Aún cuando se las dibuja, el espacio que queda entre ellas sólo puede estar ocupado por otras líneas. La manera de obviar la dificultad consiste en considerar el campo como un flujo magnético. Ello conduce a la idea de continuidad mejor que las líneas individuales, aunque con frecuencia se combinen ambos términos usados en la expresión " líneas de fuerza" . Las líneas de campo sirven también para representar, además de la distribución, forma del campo y su dirección, la magnitud e intensidad del campo magnético, magnitud ésta que recibe el nombre de "densidad del campo magnético" o "INDUCCIÓN MAGNÉTICA" y en la distribución del campo está representada por la concentración de las líneas de fuerza. En las proximidades de los polos puede observarse que allí, donde el campo es más intenso, la concentración de las líneas de fuerza es mayor, es decir que aparecen más apretadas, lo cual lleva a la deducción que la evaluación de esa densidad debe efectuarse a través del número de las líneas de fuerza que pasan por la unidad de superficie. La unidad que permite expresar esta magnitud numéricamente es el WEBER por metro cuadrado, o TESLA. La definición de esta unidad será concretada más adelante.

Llamando "B" a la inducción magnética, su expresión queda en la forma siguiente

$$B = \frac{\phi}{S}$$

donde:

B = inducción magnética (WEBER / metro cuadrado) o (TESLA)

ϕ = flujo magnético (WEBER)

S = superficie atravesada por el flujo magnético (metro cuadrado) normal a la dirección del campo.

De acuerdo con la expresión anterior, será entonces

$$\phi = B \cdot S \quad (Wb)$$

El símbolo para el flujo magnético está constituido por la letra griega fi (ϕ) mayúscula. . Entonces el flujo magnético puede definirse como el producto de la inducción magnética por la superficie (normal al campo) atravesada por el flujo magnético.

Magnetización por influencia magnética.

Si se acerca una barra de hierro dulce a un imán, ella es atraída de inmediato. Si se acercan a la barra unas limaduras de hierro, se verá que se ha magnetizado. Este fenómeno se llama de magnetización por influencia o inducción magnética, o sea que el magnetismo del imán se ha introducido en la barra de hierro dulce. Mediante el auxilio de una brújula puede verificarse que en el extremo alejado de la barra de hierro se ha formado un polo de igual polaridad que el del imán en que se apoyo la barra, mientras que en el extremo más próximo a él se ha formado otro polo de polaridad opuesta.



Fig. G 5. Imanación por influencia o inducción magnética.

TEORIA DE LOS DOMINIOS

Es importante destacar porque la presencia del hierro en una bobina por la que circula corriente aumenta el valor del flujo magnético y porque ocurre en el hierro el fenómeno de histéresis.

En 1823, Ampere, físico francés cuyo nombre lleva la unidad de corriente, sugirió que el aumento del flujo magnético era debido a corrientes eléctricas circulantes es dentro de las moléculas del hierro. Los descubrimientos realizados posteriormente han confirmado esa sugestión. La explicación que sigue puede dar una idea acerca de la teoría de los anillos de corriente como causa del magnetismo.

Al dividir un imán permanente en dos partes se forman dos imanes más pequeños. Es necesario llevar este hecho hasta el último paso posible, cuando sucesivas divisiones terminan en un átomo aislado. El campo magnético de un átomo se produce principalmente por el movimiento de sus electrones, que se mueven de dos formas:

- (1) Alrededor del núcleo del átomo.
- (2) Girando sobre su propio eje, como si fuera un giróscopo, en un movimiento llamado spin.

El movimiento de un electrón siguiendo su órbita alrededor del núcleo es equivalente a una diminuta corriente que circula por un anillo. Un electrón giratorio, tiene, además de los momentos debidos a su movimiento en la órbita, un momento cinético y un momento magnético debidos a su spin, momentos que también posee el núcleo. Los momentos del núcleo son de sentidos iguales y los del electrón de sentidos opuestos.

El momento magnético total del átomo es la suma vectorial de todos los momentos magnéticos componentes. El cálculo del momento resultante se simplifica por el hecho de que las capas de electrones completas no tienen momento magnético a causa de su simetría.

En un átomo de hierro existen cuatro electrones más con **spin** en un sentido que en el opuesto y los ejes del spin de esos electrones son paralelos entre sí. En consecuencia, el efecto producido es el de cuatro anillos de corriente que producen un flujo magnético en cierta dirección. Muchos átomos no tienen momento excepto cuando se hallan en presencia de un campo magnético. Ello se debe a que el campo destruye su simetría. En tal caso, el momento magnético es reducido y se dice que el átomo es diamagnético. Su permeabilidad relativa es muy baja, del orden de 10^{-6} . Es el caso del mercurio y la plata.

Ciertos grupos de átomos poseen capas internas incompletas. Por esta causa exhiben momentos magnéticos resultantes permanentes, tendiendo a alinearse por sí mismos con cualquier campo magnético externo, reforzándolo.

De estos átomos se dice que son paramagnéticos; en ellos el diamagnetismo se encuentra siempre presente, pero dominado por el paramagnetismo. Un material paramagnético tiene una permeabilidad relativa mayor que la unidad en el orden del milésimos. El platino y el tungsteno son materiales paramagnéticos.

El campo más importante es el de los materiales ferromagnéticos, principalmente el hierro, el níquel y el cobalto. En estos casos los átomos no actúan singularmente sino en grupos llamados dominios, que contienen entre 10^9 y 10^5 átomos. Los dominios son más pequeños que la grana de los materiales. Cada átomo o ion posee un momento magnético permanente y a este respecto, los iones de los ferromagnéticos son similares a los de los paramagnéticos, pero las propiedades características de los primeros no se beben en forma particular a las propiedades de los iones. Todos los iones que

forman un dominio tiene sus ejes magnéticos permanentes alineados en la misma dirección, estando alineados por un campo intramolecular que se extiende por el dominio completo.

Este campo intramolecular constituye la característica del ferromagnetismo.

Esta estructura de los dominios depende de la temperatura; con su aumento, la agitación térmica tiende a fracturar los dominios, lo cual, en el caso del hierro, sucede a los 750° aproximadamente.

Cuando un trozo de hierro no magnetizado se somete a la acción de un solenoide por el que circula una corriente, ocurren pequeños incrementos del flujo magnético, en forma brusca, y los ejes magnéticos de los dominios, que inicialmente se encuentran desordenados, con un momento magnético resultante igual cero, comienzan a reordenarse siguiendo la dirección de la f.m.m. debida al solenoide, aumentando así la magnitud del flujo magnético. Este fenómeno se conoce con el nombre de efecto Barkhausen se demuestra arrollando una bobina exploradora sobre el trozo de hierro, conectándola, mediante un amplificador, a un altoparlante. Los bruscos incrementos del flujo debidos a las sucesivas orientaciones de los diversos dominios que se producen cuando el trozo de hierro es movido dentro del solenoide, inducen impulsos de f.e.m. en la bobina de exploración, que se manifiestan por una serie de crujidos que se escuchan a través del altoparlante.

A medida que aumenta la intensidad del campo magnético, la alineación de los dominios aumenta. Este movimiento no se invierte Si se suspende la f.m.m. o sea, sí se suspende el campo magnético siempre persistirá un campo remanente debido a la alineación de los dominios.

El proceso de colocación alineada de los dominios continúa a velocidad uniforme con el aumento de la intensidad del campo magnético, hasta que la mayoría de los dominios se encuentran alineados. A causa de esta velocidad uniforme, la parte apropiada de la característica es conocida como parte recta de la característica. Cuando la mayoría de los dominios se encuentra alineada, se dice que el material se encuentra saturado. Estrictamente hablando, saturación nunca se alcanza en condiciones normales. Aún sí se completara la saturación, la inducción seguiría aumentando con la intensidad del campo magnético, pero a la velocidad apropiada a la permeabilidad relativa unidad.

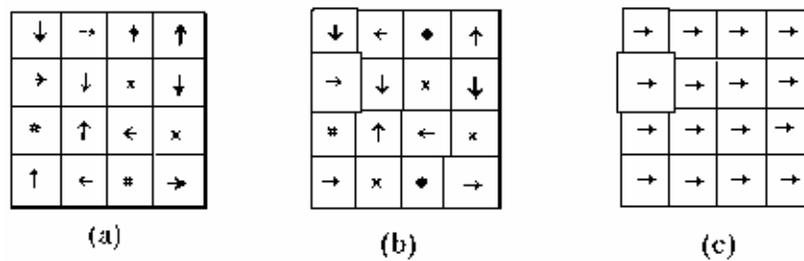


Fig. G. x.

(a) Disposición ordenada inicial. (b) Crecimiento de los dominios. (c) Saturación.

Los esquemas de la figura (G x). muestran las posiciones relativas de los dominios. Puede notarse que no alinean uniformemente mientras aumenta el efecto de la magnetización.

Se deduce que en un solenoide con núcleo de hierro, el flujo magnético puede considerarse como formado por dos componentes.

(A) El flujo producido por el solenoide sin núcleo de hierro.

(B) El flujo debido a los ampere-espira equivalentes a los anillos de corriente formados por los electrones giratorios en los dominios orientados.

(C) Puede verse que cuando la intensidad del campo magnético excede cierto valor, la inducción magnética permanece constante, es decir que el hierro está magnéticamente saturado, o en otras palabras, todos los dominios han sido orientados en la dirección del campo magnético.

La alineación de los dominios tiene cierta estabilidad, que depende de la calidad del hierro y el tratamiento que ha recibido durante su elaboración. En consecuencia, el hierro puede retener mucho de su magnetismo después que la f.m.m. externa haya sido suspendida, como ya se mencionó anteriormente, manteniéndose flujo magnético remanente debido a los anillos de corriente electrónicos en el hierro. Un imán permanente puede entonces ser considerado como un electroimán, debiéndose su relativamente intenso flujo magnético al alto valor de la f.m.m. inherente (fuerza coercitiva por la longitud del imán) retenida por el acero después de haber sido magnetizado.

El desorden de la alineación de los dominios necesita el gasto de energía, producida en una muestra de hierro durante un ciclo de magnetización. Esta energía aparecerá en la muestra bajo la forma de calor y recibe el nombre de pérdida por histéresis.

Histéresis.

Si se toma un anillo cerrado de hierro que esté completamente des magnetizado y se mide la inducción magnética con valores crecientes de la intensidad del campo magnético, la relación entre ambos valores es representada por la curva OAC de la figura siguiente.

Materiales Magnéticos.

Los metales y aleaciones utilizadas con propósitos magnéticos se dividen en dos grupos. De un lado existen los llamados materiales magnéticos blandos, que se magnetizan fácilmente por inducción, pero también pierden fácilmente su magnetismo. Por el otro lado existen los materiales magnéticos duros, que son difíciles de magnetizar, pero retienen largamente el magnetismo.

El nombre que reciben estos materiales obedece a que, frecuentemente, aunque no siempre, sus propiedades magnéticas coinciden con su dureza o blandura mecánica.

MATERIALES MAGNÉTICOS BLANDOS.

Son adecuados para la construcción de electroimanes y para ser aplicados cuando se requieren propiedades magnéticas temporarias o variables, tales como piezas de máquinas eléctricas. Los más importantes son los siguientes

:

- 1) Hierro: el hierro puro posee excelentes propiedades magnéticas, pero su producción es difícil y sumamente costosa.. Aunque contiene muchas impurezas, en la mayoría de las aplicaciones electromagnéticas se usa hierro de calidad comercial.
- 2) Hierro al silicio: como se verá más adelante, los núcleos magnéticos de las máquinas eléctricas se construyen con este material Se presenta bajo la forma de laminaciones, cortadas de hojas muy delgadas del metal, que contiene del 2% al 4% de silicio.
- 3) Acero fundido: las fundiciones para las carcasas de generadores y motores deben ser magnéticamente blandas. Con este objeto se utilizan aleaciones de acero fundido con bajo contenido de carbono.
- 4) Aleaciones de níquel-hierro: en algunas aplicaciones especiales se requiere un material que pueda ser magnetizado fácilmente en campos magnéticos débiles. Las aleaciones que poseen esta propiedad están compuestas por alrededor de tres cuartos de níquel y el resto de hierro, con pequeñas cantidades de otros metales.

MATERIALES MAGNÉTICOS DUROS.

Estos son los adecuados para construir imanes permanentes, magnetos, imanes para altoparlantes, etc.

Originalmente, el único material magnético duro disponible era el acero de alto contenido de carbono, pero posteriormente fueron desarrolladas otras aleaciones con propiedades magnéticas mejores, como los aceros al tungsteno y al cobalto.

Estos, a su vez, fueron reemplazados por las aleaciones modernas de los imanes permanentes actuales, que contienen, además de hierro, otros metales diversos, entre los cuales, el aluminio y el níquel son los más importantes. Por ejemplo, el Alnico, cuyo nombre viene del aluminio, el níquel y el cobre, que conjuntamente con el cobalto, forman la aleación.

CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES MAGNÉTICOS

Desde el punto de vista de sus propiedades magnéticas, los materiales se clasifican en tres grupos:

- 1) **Materiales Ferromagnéticos**: Se caracterizan por el valor muy elevado que puede tomar su imanación, aun con pequeños valores de intensidad de campo magnético . Entre estos materiales ferromagnéticos se incluyen : hierro, cobalto y níquel además de algunas aleaciones de estos elementos. Al magnetizarse estos materiales magnéticos se producen fenómenos.
 - a) Aparecen cargas magnéticas en la superficie del material y producen en esta parte del cuerpo un campo magnético que generalmente no tiene la misma dirección y sentido que el campo magnetizante y se llama campo desmagnetizante.
 - b) A un valor determinado del campo magnetizante, no corresponde un valor único, bien determinado de la imanación, al menos en los campos de pequeño valor; esta imanación depende esencialmente, de los valores anteriores del campo magnetizante.

2) **Materiales Paramagnéticos** : Estos materiales se imanar siempre en el mismo sentido del campo magnético y se anula cuando este se anula, la susceptibilidad magnética es positiva, pero siempre muy pequeña.

Entre estos cuerpos paramagnético de pueden citar:

Metales: Platino, Sodio, potasio, aluminio, manganeso, cromo, etc

Aleaciones: A base de cobre, cromo, manganeso, vanadio, etc

Gases: oxígeno, ozono, oxido nítrico, etc.

3) **Materiales Diamagnéticos**: estos materiales se imanar en sentido contrario del campo magnético. Colocados en un campo no uniforme, son rechazados hacia las partes en que el campo es mas débil. Su imanación es proporcional al campo, su susceptibilidad magnética es muy pequeña y negativa.

En este grupo se encuentran los siguientes materiales:

a) Metaloides distintos del oxígeno

b) Metales como el oro, plata, mercurio, cobre, plomo. Etc

Casi todas las sustancias orgánicas.

Blindaje magnético.

Algunas veces es necesario proteger un espacio de la influencia magnética externa. Alternativamente, puede ser necesario confinar el campo de un sistema magnético dentro de una zona delimitada. El flujo magnético no puede ser necesario confinar el campo de un sistema magnético dentro de una zona delimitada. El flujo magnético no puede ser aislado ya que no existen aisladores magnéticos, pero sin embargo, puede ser desviado del espacio que se desea proteger.

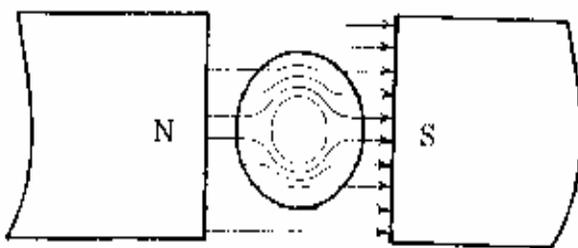


Fig. G6 . Blindaje magnético.

En la figura G6 se demuestra el principio del blindaje magnético, ubicando un anillo o arandela de hierro plano entre los polos del imán. Aunque el flujo penetra en el anillo por un lado y sale por el otro, sigue una trayectoria curva a través del mismo anillo, dejando el espacio interior relativamente libre de influencia magnética. Para un blindaje completo el espacio tendrá que ser completamente cerrado, aunque ello no es siempre

posible, como sucede en los instrumentos eléctricos de medición.

Para el blindaje puede usarse cualquier material magnético blando. Una aleación de níquel-hierro es particularmente eficaz.

Electromagnetismo.

Experimento de Oersted: al colocar un conductor por el que circula una corriente eléctrica sobre la aguja magnética de una brújula, se observa que la aguja se desvía y tiende a colocarse en ángulo recto con el conductor. Figura G 7. (a); sí se invierte el sentido de la corriente, como en la figura G7. (b) se encuentra que la aguja se desvía hacia el lado contrario. Esto demuestra que el paso de la corriente eléctrica produce un campo magnético que influye sobre la aguja magnética y que el sentido de circulación de esa corriente determina también el sentido de la desviación de la aguja.

El campo generado por la corriente que pasa por un conductor recto puede ser explorado con el auxilio de una aguja magnética colocada en diversos puntos circundantes del conductor. Ello dará como resultado la demostración de que ese campo es diferente al establecido por un imán permanente, ya que las líneas de fuerza no entran ni salen por polo alguno, sino que describen círculos concéntricos alrededor del conductor, en la forma demostrada en la figura G 8.;

además las líneas no divergen ni convergen, ni es posible localizar polo magnético alguno

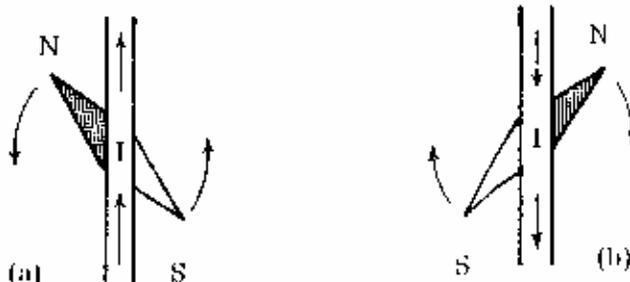
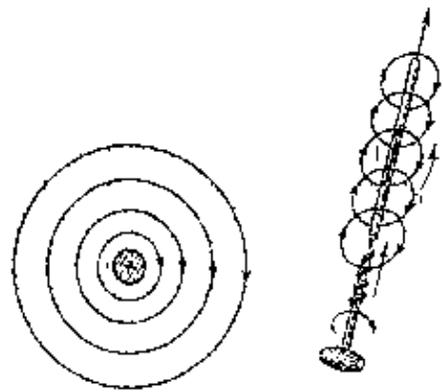


Fig. G 7 a y b. Flujo magnético debido a la corriente en un conductor recto

Puede observarse la convención utilizada en la figura para indicar la dirección de la corriente. La corriente que circula alejándose del observador, atravesando el plano del dibujo, se dibuja representada por una cruz, que significa la cola de la flecha que se aleja. En cambio, para representar la corriente que circula acercándose al observador, alejándose del plano del dibujo, se utiliza un punto, que representa la punta de la flecha que se acerca. Ello está representado en las figuras G8.

La relación entre la dirección de las líneas de fuerza del campo y la dirección de la corriente, se expresa mediante la regla siguiente, llamada regla del tornillo o del sacacorchos: "sí se imagina un sacacorchos (o cualquier tornillo de rosca a la derecha) que avanza en la dirección de la corriente su sentido de rotación indica el sentido de las líneas, de fuerza del campo magnético".



Líneas de inducción magnética del campo de corriente directa

fig. G8

También se utiliza la llamada regla de la mano derecha: "tomando el conductor con la mano derecha, con el pulgar extendido de modo que su dirección coincida con la dirección de la corriente, la dirección de los dedos indicará el sentido de las líneas de fuerza del campo magnético".

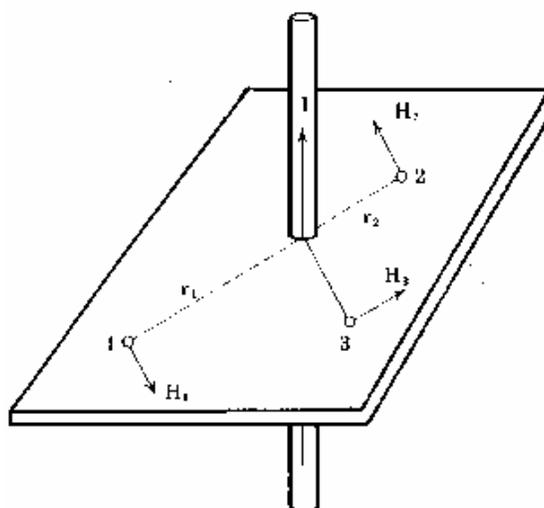
INTENSIDAD DEL CAMPO MAGNÉTICO -

Fuerza magneto motriz.

De acuerdo con lo anteriormente expuesto, las líneas de fuerza del campo magnético creado por un conductor rectilíneo son concéntricas con éste. Haciendo pasar un conductor que conduce corriente por un plano que le sea perpendicular es relativamente sencillo, mediante experiencias adecuadas, demostrar que la intensidad del campo en diversos puntos del plano mencionado, multiplicada por la distancia que los separa del conductor, es constante:

$$H_1 r_1 = H_2 r_2 = H_3 r_3 = \dots = H_n r_n = \text{cte.}$$

Fig.G9. Campo magnético en un conductor rectilíneo



También, para diversas intensidades de corriente, puede demostrarse que la intensidad de campo en diversos puntos, es

$$H.r = C.I$$

Este resultado se debe a cuidadosas experiencias realizadas por Biot y Savart. La constante C depende del sistema de medidas elegido. Para el sistema SI (sistema internacional) , esa constante vale $\frac{1}{2\pi}$.

luego la ley de Biot y Savart queda :
$$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{I}}{2\pi r}$$

H : intensidad del campo magnético en un punto.

I : intensidad de la corriente que circula por el conductor alrededor del cual se produce el campo magnético.

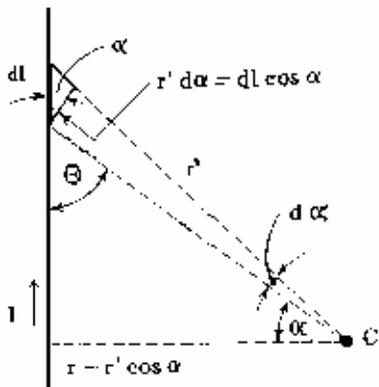
r : distancia entre el conductor y el punto y también radio de la circunferencia descripta por la línea de fuerza del campo magnético que pasa por el punto considerado.

De la expresión anterior se deduce que la unidad de intensidad del campo magnético es el ampere por metro (A/m). Luego la intensidad del campo magnético producido por una corriente que circula por un conductor es, a una distancia de un metro del conductor, de un ampere por metro. La dirección y sentido se determinan mediante la regla del tirabuzón, ya expuesta.

LA LEY DIFERENCIAL DE BIOT Y SAVART.

La expresión es la integral de la función diferencial

$$dH = \frac{I \cdot dl}{2\pi r^2}$$



siendo dHc la intensidad del campo producido por un elemento diferencial dl de conductor recorrido por una corriente I, situado a una distancia r' del punto C, formando un ángulo, graf. G 9. su deducción es:

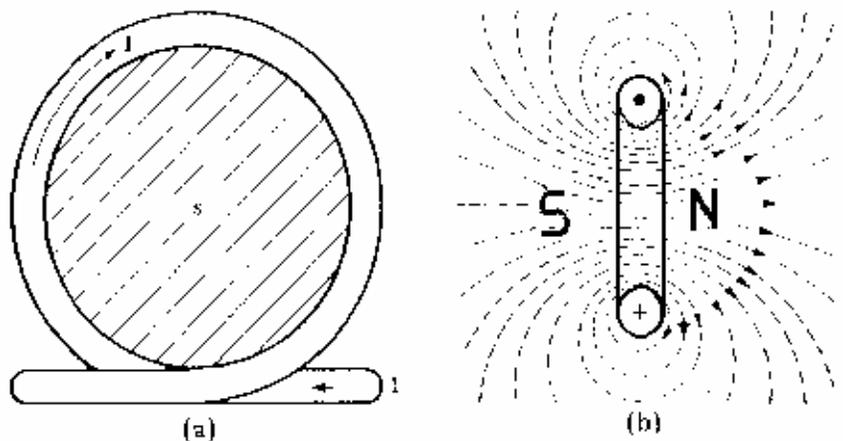
$$H_C = 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} dH = \frac{I}{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{dl}{r'^2} \text{sen } \theta = \frac{I}{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\cos \alpha \, d\alpha}{r} = \frac{I}{2\pi r}$$

Esta ley puede aplicarse a diversos casos para obtener la intensidad del campo magnético originado por las corrientes circulantes por diversos dispositivos técnicos.-

CAMPO MAGNÉTICO UNA ESPIRA SIMPLE.

Si un conductor de corriente se curva hasta formar un anillo circular forma el dispositivo conocido con el nombre de espira (Fig. G 10) y normalmente, todas las líneas de fuerza del campo magnético creado atraviesan la superficie s, comprendida por la espira.

Fig. G 10 Forma del campo magnético creado por un conductor que forma una espira y por el circula corriente



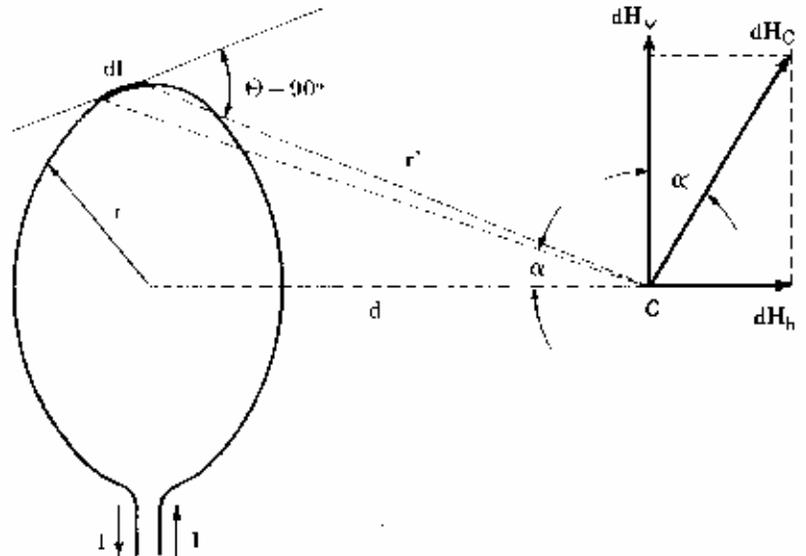
En la figura G 10 (a) la zona rayada indica la superficie abarcada por la espira y que es atravesada

por la totalidad del flujo.

La figura G 10 (b) muestra la forma del campo magnético creado por las dos corrientes que fluyen en sentidos contrarios. Para conocer el sentido del campo se aplica la regla del tirabuzón a ambos lados de la espira y puede verse que los campos magnéticos generados por ambas corrientes (la corriente es la misma, pero cuando circula por un lado de la espira lo hace con un sentido y cuando recorre el otro lado su sentido es el opuesto) se refuerzan dentro de la espira.

Aplicando la ley de Biot y Savart se puede determinar la intensidad del campo magnético existente dentro de la espira, o fuera de ella.

Fig. G 11 Aplicación de la ley de Biot y Savart a una espira cerrada.



Sea C el punto del que se desea averiguar la intensidad del campo ocasionado por la espira por la que circula la corriente I, según la figura G 11. Un elemento dl de la espira ocasiona en el punto C una intensidad de campo normal al conductor dH, que tendrá una componente paralela al plano de la espira y otra coincidente con el eje de la espira. Siendo la espira cerrada, las componentes d/v se anularán entre sí, dos a dos. Aplicando la función diferencial a la componente dH_h se tiene:

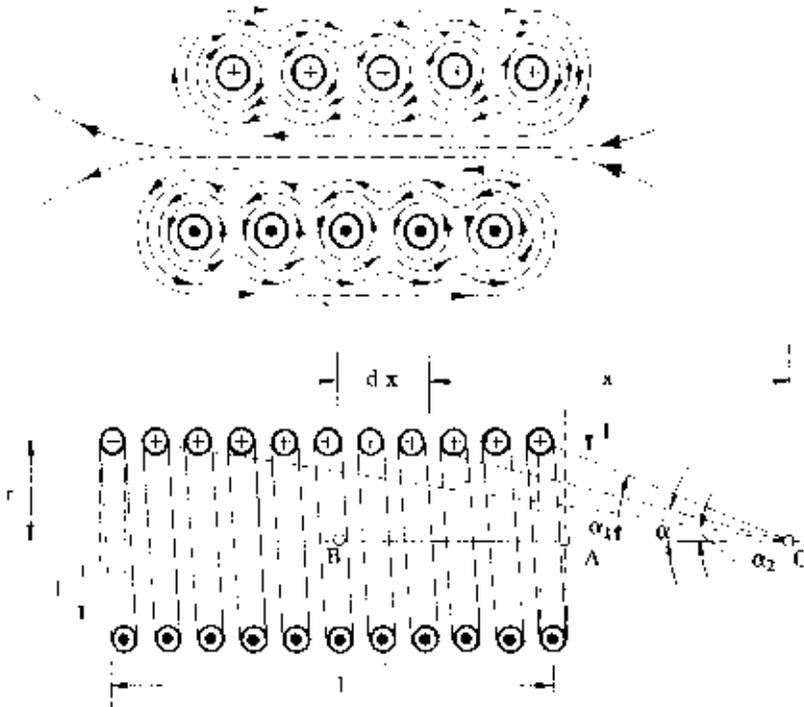
$$dH_h = \frac{I \cdot dl}{4\pi r'^2} \quad \text{y la componente horizontal es} \quad dH_h = dH_c \cdot \text{sen } \alpha = \frac{I \cdot \text{sen } \alpha}{4\pi r'^2} dl$$

$$H_h = \int_0^{2\pi r} dH_h = \frac{I \cdot \text{sen } \alpha}{4\pi r'^2} \int_0^{2\pi r} dl = \frac{I \cdot r}{4 r'^2} \text{sen } \alpha$$

pero $r' = r / \text{sen } \alpha$ y $r'^2 = r^2 / \text{sen}^2 \alpha$ sustituyendo

$$H_c = \frac{I}{2 \cdot r} \quad (\text{A - 1})$$

SOLENOIDE



Cuando un conductor se arrolla en forma de hélice, constituyendo una cantidad de espiras yuxtapuestas con paso muy corto, cuyo eje axial sea considerablemente mayor que su diámetro, se dice que constituye un solenoide. (Fig. G12). Si se supone el solenoide cortado en forma transversal, con sus espiras algo separadas para estudiar el recorrido de las líneas de fuerza y aplicando a cada espira la regla del tirabuzón, Se obtiene el esquema de la figura G12 (a).

gráfico G12

En el solenoide de la figura, el número de espiras es N y la intensidad que circula por ellas es I. Se desea calcular la intensidad del campo magnético en el punto C, situado sobre el eje de la bobina. Suponiendo que las espiras están bobinadas juntas, sin dejar espacio entre ellas, la cantidad de espiras por unidad de longitud es " n "

$$n = \frac{N}{l}$$

y la cantidad de espiras comprendidas en un espacio dx, ----->

$$ndx = \frac{N}{l} dx$$

Este elemento puede tratarse con la ecuación A-1 como si fuera una espira, pero teniendo en cuenta que sus efectos se multiplican tantas veces como lo expresa ndx. Sobre el punto C actuará un campo magnético horizontal

$$dH = \left(\frac{N}{l} dx\right) \frac{I}{2r} \text{sen}^3 \alpha$$

de la figura se deduce que $\text{tg} \alpha = \frac{r}{x}$ y $\text{cotg} \alpha = \frac{x}{r}$ luego $x = r \cdot \text{cotg} \alpha$ y $dx = - \frac{r \cdot d\alpha}{\text{sen}^2 \alpha}$

y reemplazando se tiene $dH = - \frac{NI}{2l} \text{sen} \alpha d\alpha$, integrando entre los límites α_1 y α_2 , resulta

finalmente
$$H = \frac{NI}{2l} (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1)$$

Con esta fórmula puede hallarse la intensidad del campo magnético en cualquier punto situado sobre el eje de la bobina. Para el punto A:

$$\alpha_1 = \frac{\pi}{2} \quad \cos \alpha_1 = 0, \quad \cos \alpha_2 = \frac{l}{\sqrt{l^2 + r^2}}$$

sustituyendo se tiene

$$H_a = \frac{NI}{2l \sqrt{1 + \frac{r^2}{l^2}}}$$

En el caso particular de una bobina con una longitud mucho mayor que el

radio $\frac{r}{l} \cong 0$ luego $H_a = \frac{NI}{2l}$

Para el punto B, ubicado en el centro de la bobina

$$\alpha_1 = \pi - \alpha_2 ; - \cos \alpha_1 = \cos \alpha_2 = \frac{l}{\sqrt{1 + 4 \frac{r^2}{l^2}}}$$

con lo que se llega a:

$$H = \frac{NI}{l \sqrt{1 + 4 \frac{r^2}{l^2}}}$$

Para este caso también se puede suponer

$$\frac{r}{l} \cong 0 \text{ y } H = \frac{NI}{l} \dots \dots \dots \gg B = \mu_0 \frac{NI}{l} \dots \dots \dots \gg B = 1,256 \frac{NI}{l} [\text{oersteds (oe)}]$$

Fuerza Magnetomotriz

Es la fuente del magnetismo; se designa, abreviada: **f.m.m.** Se mide en "Ampere - vuelta" o "ampere espira" (NI) sin que se tenga en cuenta la longitud de las mismas Para una bobina por la que circulan 2 A y tiene 200 espiras la f.m.m. será de $2 \times 200 = 400 \text{ A v.}$

En el Sistema Internacional (SI) el ampere - vuelta (Av.) es la unidad de f.m.m.

Dimensionalmente es lo mismo que el ampere, de modo que la f.m.m. puede medirse simplemente en ampere, pero expresa la propiedad magnética de una bobina recorrida por cierta corriente, propiedad que no suele estar asociada con el ampere en sí.

La f.m.m. está relacionada con el campo (o circuito) magnético, en la misma forma que la f.e.m. lo está con el circuito eléctrico. A esta f.m.m. se la considera también como la causa de la elevación del potencial magnético y actúa a través de las caras de una espira portadora de corriente, dirigida desde la cara polo Sur hacia la cara polo Norte, considerando que la cara polo Sur es aquella por la cual pasan las líneas de fuerza que provienen de la cara polo Norte y se dirigen hacia ésta misma.

Caída de potencial magnético.

Se ha considerado a la f.m.m. como una fuente ponderable de líneas magnéticas y por las propiedades de estas líneas de fuerza se sabe que esta f.m.m. proyecta sus efectos alrededor de los varios caminos cerrados que enlazan con espiras por las que circula la corriente. Este efecto se conoce como la corriente concatenada con las espiras de la bobina, produciendo la NI (Av.) o f.m.m. . Es por esta razón que a esta f.m.m. se la considera como una elevación del potencial magnético, análoga a la f.e.m.(o elevación de potencial eléctrico) en un circuito eléctrico. Es decir que NI (f.m.m.) puede considerarse como una batería o fuente de los recorridos o circuitos magnéticos enlazados con ella. Además se puede considerar que cualquier camino cerrado que enlace con las NI (Av.) que producen la f.m.m., consumen a esta fuerza de la misma manera que un circuito eléctrico consume la f.e.m. (elevación del potencial eléctrico) que le es aplicada. Por lo tanto, puede decirse que la f.m.m. consumida por la unidad de longitud del camino de las líneas de fuerza (circuito magnético) es la intensidad del campo magnético H. Luego $IN = HI$, que es lo mismo que expresan las igualdades estudiadas para los recorridos de la corriente, ya sea tratándose de un conductor rectilíneo, una espira simple o un solenoide. Así como se escribe :

$$\mathbf{f.e.m.} = \mathbf{R \cdot I} \quad (\mathbf{U} = \mathbf{R \cdot I}) \quad \text{así también se escribe } \mathbf{NI (f.m.m.)} = \mathbf{H \cdot l}$$

Permeabilidad del espacio vacío o constante magnética.

La permeabilidad es una constante específica, característica del comportamiento de una sustancia en presencia del campo magnético.

La permeabilidad del espacio vacío, o constante magnética, se indica con μ_r y representa la característica antes indicada, para el espacio vacío. Está relacionada con la permeabilidad absoluta por la igual $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$, donde μ_r es la permeabilidad relativa, distinta para cada sustancia y que es igual

a 1(uno) para el aire.

Entre la inducción magnética **B** y la intensidad del campo magnético **H** existe la siguiente relación donde

$$\frac{\mathbf{B}}{\mathbf{H}} = \mu \qquad \mu = \mu_0 \cdot \mu_r$$

Midiendo la inducción B en Wb/m² (Weber /metro) y la intensidad de campo H en Av/m, la permeabilidad viene a ser medida en H/m² (henry/m²) o también en Ohms. segundo /m (Q . s/m).

Los vectores de inducción magnética B y de intensidad de campo H, pueden expresarse como

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \text{ (T)} \qquad \mathbf{y} \qquad \mathbf{H} = \frac{\mathbf{B}}{\mu} \text{ (Av/m)}$$

El valor de μ_0 es $4\pi \times 10^{-7}$ ó $1,257 \times 10^{-6}$

El valor de μ_r , es adimensional, es solamente un número.

El valor de μ_r para la mayoría de los materiales, excepto los ferromagnéticos, es también 1 (uno). Los materiales ferromagnéticos como el hierro, el cobalto y el níquel tiene valores mucho más altos.

Es importante mencionar que teorías más avanzadas que la expresada en estas páginas demuestran que existe una relación entre la permeabilidad absoluta, la permitividad absoluta o constante dieléctrica y la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas en el espacio vacío. Esa relación es :

$$c^2 = \frac{1}{\epsilon_0 \mu_0}$$

donde c es la velocidad de propagación de la luz. Esta velocidad es una constante absoluta, en tanto que la permeabilidad absoluta ha sido determinada de acuerdo con la unidad primaria de intensidad de la corriente eléctrica. La relación anterior permite deducir el valor de la constante correspondiente a la permitividad.

Acción recíproca entre corrientes.

Conductor con corriente en un campo magnético. Si se coloca un conductor por el que circula corriente en un campo magnético, como consecuencia de la suma de los campos producido por el imán y por la corriente que circula por el conductor, se producirá una concentración de las líneas de fuerza de un lado del conductor, intensificando el campo en ese lado y un espaciamiento de ellas del otro lado, debilitando el campo en ese lado .

Esta acción del campo magnético empuja al conductor hacia el lado del campo debilitado, debido a que las líneas de fuerza tienden a acortarse.

La dirección de la fuerza varía según la dirección del campo magnético o el sentido de la corriente en el conductor. La dirección de la fuerza se puede establecer fácilmente mediante la observación del comportamiento de las líneas del campo, pero resulta muy cómodo utilizar

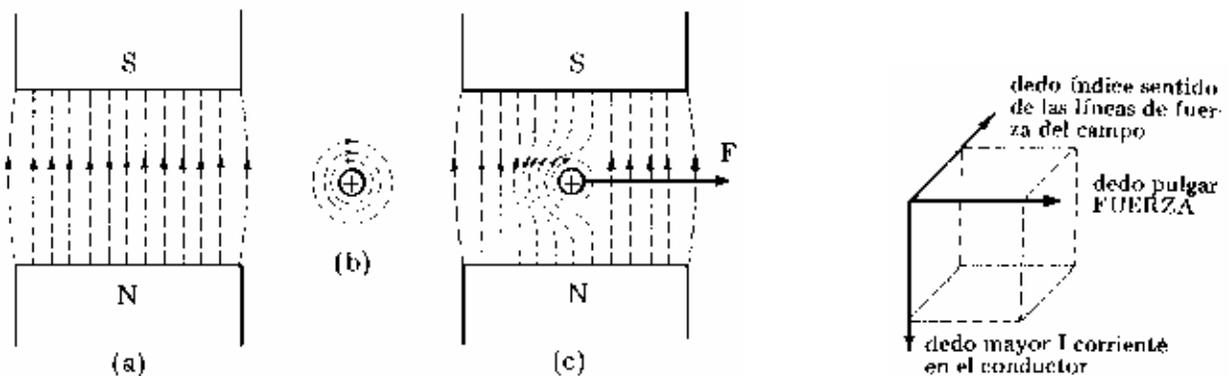


fig. G 13 Conductor con corriente en un campo magnético.

Regla de Fleming de la mano izquierda

para ello la llamada regla de Fleming de la mano izquierda (Fig. G13) que dice: "Extendiendo los tres primeros dedos de la mano izquierda 'e modo que formen ángulos rectos entre sí y que el dedo índice apunte en la dirección del campo magnético y el dedo mayor indique el sentido de la corriente en el conductor, el dedo pulgar indicará el sentido de la fuerza ejercida sobre el conductor".

La experiencia ha demostrado que el valor de la fuerza es proporcional a la inducción B del campo magnético, a la intensidad de la corriente I y a la longitud útil del conductor, entendiéndose por tal la porción del conductor comprendida dentro del campo magnético, capaz de cortar cierto número de líneas de fuerza. Para un conductor rectilíneo de longitud finita la fuerza F es :

$$F = B \cdot I \cdot l \cdot \text{Sen}\alpha$$

siendo α el ángulo que forma el conductor con la dirección del campo magnético. Si el ángulo formado es de 90° , entonces

$$F = B \cdot I \cdot l$$

- donde:
- F**: fuerza ejercida sobre el conductor en newton.
 - B**: inducción del campo magnético, en TESLA (Wb/m^2)
 - l**: longitud útil del conductor en metros.

I: intensidad de la corriente que circula por el conductor en Ampere.

La fuerza ejercida sobre un conductor que se encuentra en un campo magnético constituye el principio básico del funcionamiento de un motor eléctrico.

El Ampere - Definición Si en el caso tratado en el punto anterior, $I_1 = I_2 = 1 \text{ A}$ y $d = 1 \text{ m}$, la fuerza por metro de longitud del conductor es igual a 2×10^{-7} newton. Este valor constituye base de la definición del Ampere, a saber

"Un Ampere es la corriente que, al circular por dos conducto paralelos, rectos, de longitud infinita, de sección transversal insignificante, que están colocados en el vacío a una distancia de 1 metro entre ellos, producirá entre estos conductores una fuerza 2×10^{-7} newton por metro de longitud".

Permeabilidad el espacio vacío

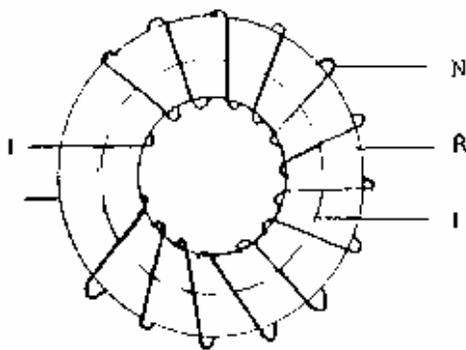
La justificación valor $4 \pi \times 10^{-7}$ para la constante magnética viene dada por la definición del Ampere. En efecto, se ha establece que la fuerza que actúa entre dos conductores paralelos, la definición del Ampere establece que entre los conductores ubicados a 1(un) metro de distancia y sí circula por ellos una intensidad de un Ampere, se ejerce una fuerza de 2×10^{-7} N. Despejando de la expresión anterior para esa fuerza, se obtiene

Circuitos magnéticos.

Ya se ha mencionado que las líneas de fuerza magnéticas forman lazos o bucles cerrados. En la figura G 10, y otras se ven los recorridos de las líneas de fuerza que transcurren por el aire. Esos recorridos constituyen los circuitos magnéticos que corresponden a los dispositivos que los producen. Una de las formas más simples de un circuito magnético está constituido por el mostrado en la figura G14, en el cual el anillo toroidal R proporciona el camino para el flujo magnético.

El núcleo R puede estar constituida por aire o por algún material no magnético, es decir un material que no facilite el pasaje de las líneas de fuerza. Esta condición depende de la permeabilidad del material que constituye el núcleo. Para el aire, madera, materiales plásticos, vidrio y otros, la permeabilidad es la del espacio vacío, como ya se estableció anteriormente. Pero puede suceder que el núcleo esté constituido por un material ferromagnético, que tiene la propiedad de facilitar el paso de las líneas de fuerza.

En este caso, el elemento que posibilita esa condición es la permeabilidad relativa del material, que para estos materiales es alta.



N = número de espiras.

R = núcleo o cuerpo por el que circula el flujo.

l = recorrido medio o longitud media del circuito magnético, medido en m.

I = corriente que circula por el número de espiras.

graf. G 14 anillo toroidal.-

La permeabilidad relativa de los materiales ferromagnéticos, se constituye el circuito magnético de una bobina con un trozo de algún material ferromagnético, se observa que en el interior de ella el campo se hace mucho más intenso que sí el núcleo fuera de aire u otra sustancia no magnética.

Los materiales ferromagnéticos poseen una permeabilidad mucho mayor que la de los no magnéticos y el aire. Esa es la llamada permeabilidad relativa, μ_r que ya se ha visto que para el aire y los no magnéticos, es 1(uno).

Esto significa que sí el núcleo no magnético de una bobina se sustituye, con hierro, por ejemplo, con una f.m.m. dada se obtendrá un flujo magnético mucho más considerable. La permeabilidad relativa es la relación entre la inducción producida en un material magnético y la producida en el vacío

El valor de la permeabilidad relativa de un material ferromagnético varía considerablemente para diferentes valores de la intensidad del campo magnético. La curva de magnetización demuestra que la relación no es una magnitud constante sino que cambia al variar B y H.

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

La permeabilidad magnética de las sustancias ferromagnéticas depende de la magnitud de la inducción magnética, composición química del material, su tratamiento térmico previo, el laboreo mecánico y la temperatura a que se encuentra el material. También tienen influencia la forma y las dimensiones exteriores.

Las curvas de magnetización se obtienen de manera experimental para cada clase de material separadamente. Pueden verse las distintas formas de las curvas y marcar la diferencia entre las curvas

Si se reduce la corriente circulante por las espiras de la bobina, la intensidad del campo y con esto la inducción, disminuirán hasta desaparecer cuando la corriente se haga igual a cero, cuando la intensidad de un campo magnético también será cero. Sin embargo, el núcleo de material ferromagnético conservará cierta inducción magnética. La inducción que queda en el cuerpo ferromagnético cuando la intensidad del campo magnético es nula, se llama inducción remanente o magnetismo remanente.

El hierro puro, el acero dulce, las aleaciones de hierro con silicio (chapa magnética), las aleaciones de hierro con níquel (permalloy, stalloy y otras) conservan cierto magnetismo remanente. Estos metales constituyen los llamados materiales magnéticos blandos, que sí bien se magnetizan con facilidad, también pierden el magnetismo fácilmente. Se emplean para fabricar núcleos de electroimanes, transformadores, inducidos para generadores, etc.

Los aceros duros, ya mencionados, como las aleaciones de wolfram, cromo, cobalto, y níquel-aluminio poseen la mayor capacidad para retener magnetismo. Estas aleaciones se utilizan para fabricar imanes permanentes.

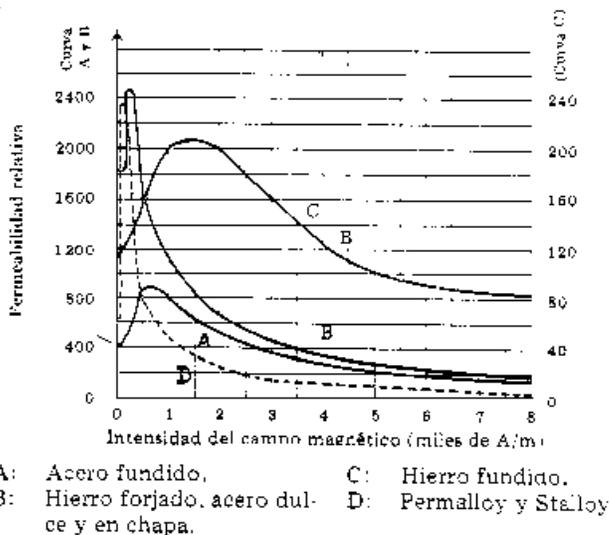


fig. G 15 a

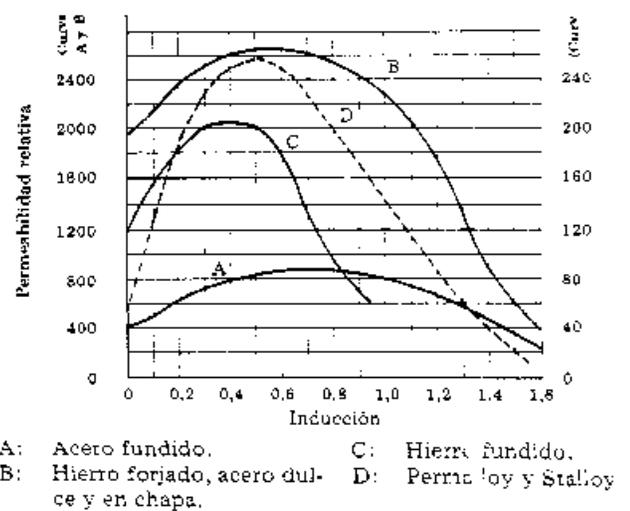


fig. G 15 b

Las curvas de las figuras G 15 a y G 15 b, demuestran las variaciones de la permeabilidad relativa en función de la intensidad del campo magnético y de la inducción magnética. En estas curvas se ve la amplia variación de esta magnitud.

Todas estas curvas a pesar de las grandes diferencias que existen entre ellas, concentran una característica común y es la permeabilidad magnética alcanza su mayor valor en las proximidades de las zonas en las que la inducción y la intensidad del campo magnético alcanzan su mayor valor en las curvas de la Fig. G 15 b.

Reluctancia

En un circuito magnético completo, la f.m.m. aplicada al circuito está relacionada con el flujo existente en ese circuito, a través de una constante llamada la "Reluctancia" del circuito magnético, que es comparable con la resistencia de los circuitos eléctricos. La reluctancia, como la resistencia depende de las dimensiones físicas del circuito magnético y de las propiedades del material con que está construido. La reluctancia se representa mediante el símbolo R.

Considérese el circuito magnético de la Fig. G 15, bobinado con N espiras, por las que circula la corriente I, Amperes:

flujo total será : $\Phi = B \cdot S$

f.m.m.:

$\mathbf{N I = H l}$ dividiendo estas dos expresiones se tiene :

$$\frac{\phi}{\mathbf{N I}} = \frac{\mathbf{B S}}{\mathbf{H l}} : \text{pero } \frac{\mathbf{B}}{\mathbf{H}} = \mu_0 \mu_r \text{ luego } \frac{\phi}{\mathbf{N I}} = \mu_0 \mu_r \frac{\mathbf{S}}{\mathbf{l}}$$

que puede escribirse $\frac{\phi}{\mathbf{N I}} = \frac{1}{\mu_0 \mu_r \mathbf{S}}$ y sera $\phi = \frac{\mathbf{N \cdot I}}{\mu_0 \mu_r \mathbf{S}}$

siendo $\frac{1}{\mu_0 \mu_r \mathbf{S}} = \mathfrak{R}$, se tiene $\phi = \frac{\mathbf{N I}}{\mathfrak{R}}$ luego la

RELUCTANCIA del circuito magnetico es : $\mathfrak{R} = \frac{\mathbf{N I}}{\phi} = \frac{1}{\mu_0 \mu_r \mathbf{S}}$

Esta expresión es de forma similar a $U/I = \rho l / s$ para el circuito eléctrico.

El denominador ($1 / \mu_0 \mu_r \mathbf{S}$) es similar a $\rho(\text{rho}).l/s$ para la resistencia de un conductor, excepto que la permeabilidad absoluta, $\mu_0 \mu_r$ para el material magnético, corresponde a la recíproca de la resistividad, o sea la conductividad de los materiales eléctricos. Para los materiales no magnéticos, la Reluctancia es

$$\mathfrak{R} = \frac{1}{\mu_0 \mathbf{S}}$$

La unidad de medida de la reluctancia es el A/ Wb.

Alternativamente: $\phi = \mathbf{N I \cdot P}$, donde $\mathbf{P} = 1 / \mathfrak{R} = \mu_0 \mu_r \mathbf{S / L}$

P: Permeancia o recíproca de la reluctancia y que puede compararse con la conductancia del circuito eléctrico.

Corrientes parásitas.

En cualquier espira formada por un material conductor, concatenado por un flujo variable, se produce una f.e.m.i. y una corriente que circula por la espira (Fig. G 22)

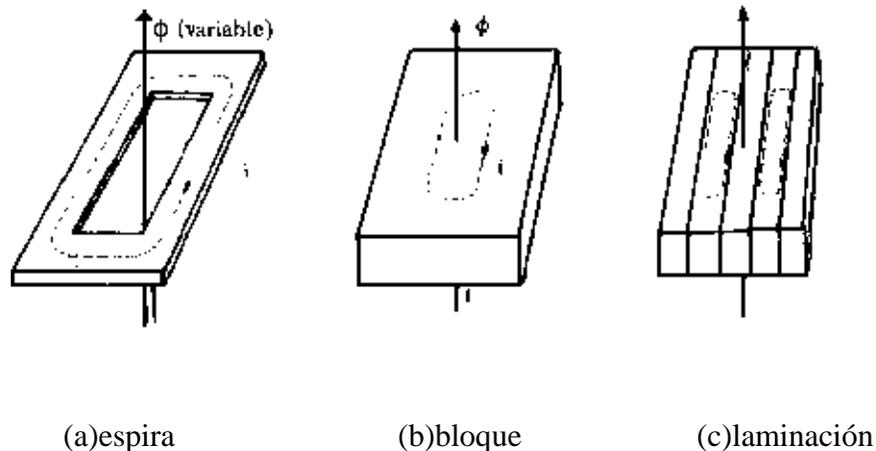


fig. G 22empleos de producción de corrientes parásitas.

La corriente así formada es una corriente parásita, llamada también vagabunda o de "Foucault", que provoca el calentamiento del núcleo de material magnético. Lo mismo ocurre, aún con mayor intensidad, sí la espira se sustituye con un bloque conductor. En ambos casos las corrientes parásitas dan lugar a una pérdida de energía sobre la resistencia eléctrica de las trayectorias que siguen.

De acuerdo con la ley de Lenz estas corrientes se oponen a la variación del flujo, condición que se aprovecha para utilizarlas en la construcción de frenos, especialmente para instrumentos de medición eléctrica.

Para disminuir el efecto de estas corrientes los núcleos se construyen con chapas delgadas aleadas con silicio, que aumentan considerablemente la resistencia eléctrica al paso de aquellas, reduciendo su intensidad y por lo tanto el efecto Joule que producen. El efecto de estas corrientes es muy importante en altas frecuencias, porque alteran radicalmente la distribución del flujo magnético.

Leyes de Kirchhoff para los circuitos magnéticos.

Estas leyes, estudiadas hasta ahora para los circuitos eléctricos, pueden ser aplicadas también a los circuitos magnéticos. **Primera Ley:** : El flujo magnético total que llega a una unión es igual al flujo magnético total que sale de ella.

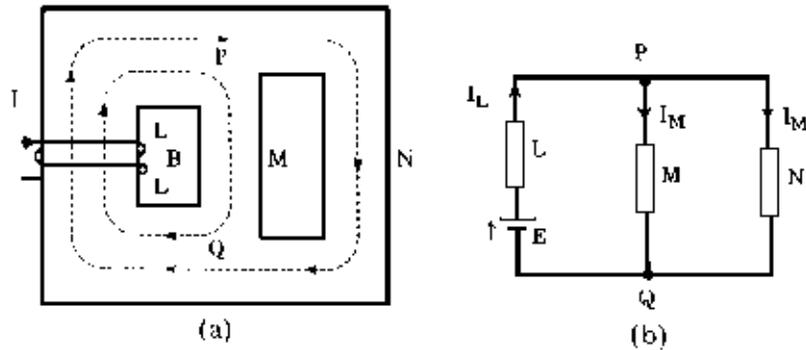


fig. G 15 (a) circuito magnético para ilustrar las leyes de Kirchhoff.
 (b) equivalente eléctrico del anterior.

Esta ley viene del hecho de que cada línea de fuerza forma un lazo o bucle cerrado. Por ejemplo, sí en el circuito de la figura G 15., se hace circular una corriente por la bobina C, el flujo magnético producido se divide en P; una parte del flujo pasará por la columna M y el resto lo hará por la N, para reunirse luego en Q. No existe discontinuidad cualquiera de las líneas de fuerza en P y Q; en consecuencia, el flujo total de L hacia P es exactamente el mismo que la suma de los flujos que salen de P hacia N y M, o sea

$$\begin{aligned}\varnothing_L &= \varnothing_M + \varnothing_N \\ \varnothing_L - \varnothing_M - \varnothing_N &= 0\end{aligned}$$

En general: $\Sigma \varnothing = 0$

Segunda Ley: En cualquier circuito magnético cerrado, la suma algebraica del producto entre la intensidad del campo magnético y la longitud de cada parte del circuito es igual a la fuerza magnetomotriz resultante.

Por ejemplo: sí H_L es la intensidad del campo magnético requerida para la columna L y l_L es la longitud del circuito desde Q, pasando por L hasta P, y sí H_M y l_M son las correspondientes valores para la columna M y H_N y l_N son los mismos para la columna N que se extienden desde P hasta Q, pasando por N, se tiene:

Fuerza magneto matriz total de la bobina B, es $I = \text{long. circ. mag.}$
 $H_L l_L + H_M l_M = H_L l_L + H_N l_N$; $H_M l_M - H_N l_N = 0$

En general: $\Sigma \text{f.m.m.} = \Sigma H \cdot l$

Es útil comparar el circuito magnético con el circuito eléctrico

Fenómeno de Inducción Electromagnética

El fenómeno de inducción electromagnética puede ser demostrado por los siguiente experimentos. Dentro de una bobina cilíndrica, cuyos extremos están conectados a un galvanómetro, se introduce a una cierta velocidad un imán permanente. La aguja del galvanómetro se desvía, revelando una corriente eléctrica en la bobina (fig. G22 a). Al sacar el imán de la bobina la aguja del galvanómetro se desplaza hacia el lado opuesto.

El galvanómetro muestra la corriente de la bobina, cuando esta se desplaza con respecto a otra bobina con corriente, que llamaremos primaria (fig. G22 b).

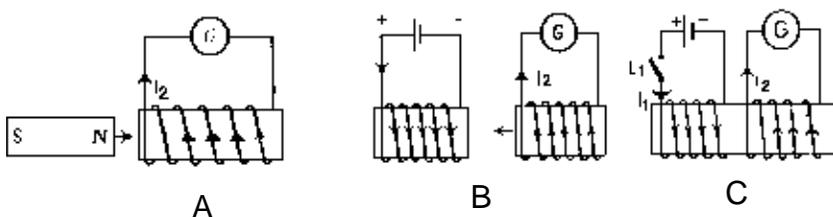


fig. G22 . Ensayos para observar el fenómeno de inducción electromagnética

En la fig. G22 c, c se muestran dos bobinas dispuestas sobre un núcleo. Una de ellas está conectada a la fuente de energía eléctrica a través de una llave, la segunda está cerrada a través del galvanómetro.

Las bobinas no están acopladas eléctricamente entre sí pero al cerrar la llave se observa la desviación de la aguja del galvanómetro hacia un lado, al interrumpir, hacia el otro lado.

A pesar de la diferencia externa de los experimentos el resultado permite suponer que el motivo directo de aparición de la corriente eléctrica en el circuito de la bobina secundaria en estas pruebas es el mismo.

En efecto, en todos los experimentos examinados varía el flujo total o concatenado de la bobina secundaria en los primeros dos casos gracias a la variación de su posición en el campo magnético, en el tercer caso debido al crecimiento de la corriente en la bobina primaria después de cerrar la llave y la disminución de la corriente después de la interrupción.

La aparición de la f.e.m inducida en la espira (contorno) para toda variación del flujo concatenado por la misma se llama fenómeno de inducción electromagnética, bajo la acción de la f.e.m. inducida en una espira cerrada aparece una corriente eléctrica inducida.

El surgimiento de la corriente inducida significa que en el circuito (espira) secundario se transmite una energía, que en presencia de una resistencia en el circuito se transforma en calor. En los primeros dos experimentos la energía eléctrica aparece gracias al trabajo mecánico al desplazar el imán permanente (fig. G22 a) o la bobina (fig. G22 b). En el tercer ensayo ambas bobinas son fijas, es decir, no hay trabajo mecánico. En la bobina secundaria la energía eléctrica aparece gracias a la energía de la fuente, conectada al circuito de la bobina primaria. En este caso la energía eléctrica se transmite de un circuito al otro a través del campo magnético.

La transformación de la energía de un tipo en otro a través de un campo magnético o la variación de la energía del campo cuantitativamente se determina por el valor absoluto de la variación del flujo concatenado (total). El fenómeno de inducción electromagnética, que acompaña estos procesos, está relacionado con la velocidad de variación del flujo concatenado o flujo total.

LEY DE LA INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

La ley de la inducción electromagnética establece la expresión cuantitativa para la f.e.m. inducida: la fuerza electromotriz inducida en circuito (espira) cerrado al variar el flujo magnético concatenado con el mismo, es igual a la velocidad de variación del flujo concatenado tomado con signo negativo:

$$e = - \frac{d\phi}{dt} \quad (t = \text{tiempo})$$

La ley de la inducción electromagnética fue dada de esta forma por Maxwell.

En una bobina de varias espiras, la f.e.m. total depende del número de espiras ω . Si todas las espiras de la bobina están concatenadas por igual flujo magnético, entonces la f.e.m será N veces mayor:

$$e = -N \frac{d\phi}{dt}$$

En el caso general las espiras de la bobina pueden estar concatedas por diferentes flujos, entonces su f.e.m. total se determina por suma algebraica de las f.e.m. de las espiras individuales:

$$e = e_1 + e_2 + \dots + e_n = \frac{d\phi_1 + d\phi_2 + d\phi_3 + \dots + d\phi_n}{dt}$$

$$e = - \frac{d\phi_{\text{total}}}{dt}$$

En el número de la ultima expresión se da la suma algebraica de la variaciones del flujo concatenado de las espiras individuales de la bobina, es decir la variación del flujo concatenado total. Por consiguiente la f.e.m. de la bobina se determina por la velocidad del cambio de su flujo concatenado.-

Corriente inducida. Ley de Faraday

Al acercar el polo Norte del imán, figura G 21c, el amperímetro marca pasaje de corriente llamada inducida por la espira. Suspendiendo el movimiento, la corriente desaparece, e invierte su sentido sí el Norte es alejado. Análoga experiencia puede efectuarse con el polo Sur. Si ambos, espira e imán, se mueven de manera tal que no se altere la posición relativa entre ellos, ninguna corriente aparece.

Faraday indicó que la corriente inducida se hace presente, cuando el plano L de la espira es atravesado por líneas de fuerza provenientes del polo del imán cuyo número es variable con el tiempo.



fig G21c

Supongamos que, para la posición indicada en figura G21c inciden en L 1000 líneas de fuerza. Al acercarse N, dicho número aumenta debido al estrechamiento de las líneas sea, por ejemplo, 1800 el nuevo número. La variación de flujo, que indicamos con $\Delta\phi$, es $= 1800-1000 = 800$, diferencia ésta que produce la corriente inducida. Si $\Delta\phi$ es cero, $i =$ cero.

La fuerza electromotriz inducida que corresponde a esa corriente, está dada por la expresión que signé llamada "Ley de Faraday":

$$e = -\frac{\Delta\phi}{\Delta t} \cdot 10^{-8} \text{ (volt)}$$

en la que

$\Delta\phi$ = variación de flujo, en Maxwell.

Δt = tiempo en que se verifica $\Delta\phi$, en segundos.

10^{-8} = factor numérico a efectos que e resulte en volt.

El signo negativo lo analizaremos luego, en oportunidad de estudiar la regla de Lenz. Si la variación Δt es infinitamente pequeña, la expresión anterior queda:

$$e = -\frac{d\phi}{dt} \cdot 10^{-8} \text{ (volt)} \quad \text{formula N° 23}$$

Esto nos permite enunciar: "la fuerza electromotriz inducida es la derivada, con signo cambiado, del flujo respecto del tiempo".

Otra forma de obtener la f.e.m. inducida la indica la fig. G 23a, cuando la espira gire alrededor de un eje e, el número de líneas de fuerza que atraviesan su plano, provenientes del polo Norte del imán, varía de un máximo a cero. Máximo cuando el plano de la espira es normal a las líneas de fuerza, y cero cuando paralelo. El flujo, entonces, va variando con una rapidez que depende de la velocidad angular de la espira.

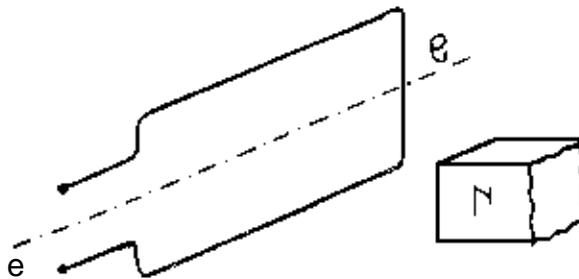


fig. G23 a

Expresión finita de la ley de Faraday.

La formula 23 es la ecuación diferencial de la **f.e.m. inducida**. En resolución práctica de problemas, es necesario eliminar las diferenciales. Para ello, sustituyamos en (fig. G23)

$$e = - \frac{d(\phi_{\text{máx}} \cdot \cos \alpha)}{dt} \cdot 10^{-8} (\text{volt})$$

y derivando conforme a las reglas del Análisis Matemático, llegamos a:

$$e = -\phi_{\text{máx}} (-\text{sen } \alpha) \frac{d\alpha}{dt} \cdot 10^{-8} (\text{volt}) \quad (\text{a})$$

el cociente $\frac{d\alpha}{dt} = \omega$, es la velocidad angular de la espira, (fig. G23 a)

De la última resulta:

$$d\alpha = \omega dt \quad ; \quad \text{integrándola} \quad : \quad \alpha = \omega t$$

Sustituyendo en (a) las dos últimas

$$e = \omega \phi_{\text{máx}} \text{Sen } (\omega t) \cdot 10^{-8} \text{ volt}$$

conocida como "expresión finita de la ley de Faraday".

Para un tiempo tal que $\text{Sen } (\omega t) = 1$; "e" será un máximo:

$$e = \omega \phi_{\text{máx}} \cdot 10^{-8} \text{ volt}$$

REGLA DE LENZ

La f.e.m. inducida, cuyo valor hemos calculado aplicando la ley de Faraday, produce una corriente inducida, cuyo sentido de circulación conoceremos aplicando la denominada "Regla de Lenz".

Su enunciado es el siguiente: "la corriente inducida crea un campo magnético que se opone a la causa que la genera".

El ejemplo de figura G18 nos permitirá interpretar el enunciado precedente:

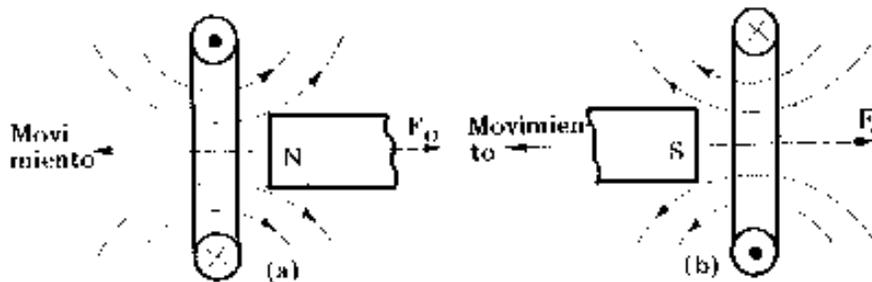


fig. G18

1°) la causa que origina la corriente inducida es "acercamiento de un polo Norte".

2°) la corriente inducida deberá crear un campo magnético tal, que la cara de la espira que enfrenta el Norte del imán sea también Norte, para así oponerse a su acercamiento, conforme lo exige la regla. Luego, una línea cualquiera del campo magnético, sale de la cara Norte.

3°) aplicamos la regla del tirabuzón, que haremos girar según el sentido de k, y llegaremos, así, a establecer el sentido de la corriente inducida, que es el indicado en la figura 18. Supongamos que alejamos el imán: la cara L será un Sur, puesto que debe oponerse a dicho alejamiento. Las líneas de fuerza tales como k, entrarán, pues, por L y el tirabuzón girará conforme a esta línea, o sea en sentido contrario al caso anteriormente considerado.

En consecuencia, también la corriente inducida tiene sentido opuesto al indicado en figura 18. Análogas consideraciones valen si se acerca o aleja un polo sur a la espira.

Conductor que corta un campo magnético.

Este es un caso, que constituye el principio básico para el funcionamiento del generador eléctrico.

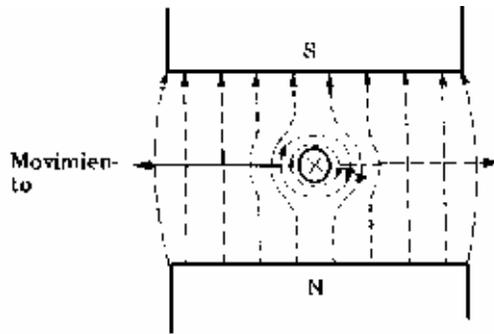


fig. G 20 Conductor que corta un campo magnético

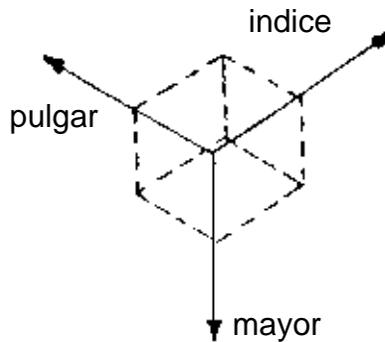
El conductor de la figura G 20 se mueve a través del campo entre dos polos diferentes de un imán. Está cortando un campo magnético, por lo que en él debe inducirse una f.e.m. de acuerdo con la ley de Faraday. El sentido de f.e.m.i. y de la corriente que esta da lugar, puede ser obtenido de la ley de Lenz. Para establecer una fuerza que empuje sobre el conductor, el campo producido por la corriente inducida debe deflectar hacia adelante a las líneas del campo magnético debido al imán, de manera que ellas se opongan al movimiento del conductor, de acuerdo con la cuarta propiedad de las líneas de fuerza (elasticidad). Aplicando la regla del tirabuzón, se observa que la corriente debe circular hacia el plano del dibujo, tratando de atravesarlo.

Invirtiendo el sentido de la corriente o del campo magnético se invierte el sentido de la corriente inducida, pero sí se invierten ambos el sentido de la corriente permanece inalterado

El sentido de la f.e.m.i. y por consiguiente el de la corriente inducida pueden determinarse fácilmente mediante una regla empírica, la regla de Fleming de la mano derecha (Fig. G 20 a) que dice:

""extendiendo los dedos, pulgar, índice y mayor de la mano derecha, de modo que formen ángulos

rectos entre s y apuntando el índice en el sentido del campo magnético y el pulgar en la



dirección del movimiento, el dedo mayor indicará el sentido de la f.e.m.i. y el de la corriente I."

Fig. G 20 a. Regla de la mano derecha

La energía eléctrica obtenida en el conductor no es otra cosa que la conversión de la energía mecánica producida por el trabajo realizado contra la fuerza que se opone al movimiento del conductor.

Magnitud de la f.e.m.i. o generada.

La figura G 21 representa las vistas en elevación y en planta de un conductor AA, ubicado en un entrehierro entre los polos N y S y colocado en ángulo recto con las líneas de fuerza del campo magnético generado por los polos magnéticos.

Supóngase que por el conductor AA circula una corriente I, con el sentido indicado. Aplicando la regla del tirabuzón se encuentra que el efecto del campo magnético creado por esta corriente es el de reforzar el campo a la derecha del conductor y debilitarlo a la izquierda, de manera que existe una fuerza

$$F = B \cdot I \cdot l$$

(N) que empuja al conductor hacia la izquierda. Por consiguiente, para mover el conductor hacia la derecha es necesario aplicar una fuerza de igual magnitud a la de aquella.

El trabajo entregado para mover el conductor AA a través de una distancia de hasta la posición BB es

$$W = B \cdot I \cdot l \cdot d \quad (J)$$

La potencia eléctrica generada por el movimiento del conductor AA es $P = I \cdot E$ (W)

y la energía eléctrica es $W = I \cdot E \cdot t$ (J)

De acuerdo con la Ley de conservación de la energía, la energía mecánica entregada para mover el conductor horizontalmente a través del entrehierro se convierte totalmente en energía eléctrica, luego

$$I \cdot E \cdot t = B \cdot l \cdot l \cdot d$$

por consiguiente

$$E = \frac{B \cdot l \cdot d}{t} = B \cdot l \cdot v \quad (\text{volt})$$

donde v es la velocidad con que el conductor se mueve en el campo magnético. Pero además B.l.d. es igual al flujo magnético total (Wb) en la superficie sombreada de la figura G21. Este es el flujo cortado por el conductor cuando se mueve desde A hasta B,

Entonces
$$E = \frac{\phi}{t} \left(\frac{\text{Wb}}{\text{s}} \right)$$

o sea que la f.e.m. generada en un conductor es igual a la velocidad (en Wb/s) a la cual el conductor corta o es cortado por el flujo magnético. Por lo tanto, el WEBER puede definirse como el flujo magnético que, cuando corta o es cortado por un conductor que se mueve con velocidad uniforme, genera en un segundo una f.e.m. de 1 volt,

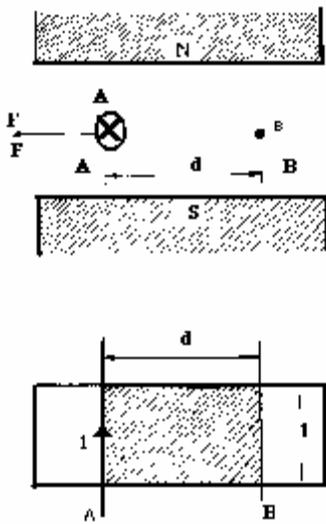


fig.G21

La f.e.m.i., según la anterior, constituye la f.e.m.i. media durante el tiempo considerado. Para cada instante, la f.e.m.i. instantánea está expresada por :

$$e = \frac{d\phi}{dt} \quad (\text{v})$$

Del enunciado de la ley de Lenz se infiere que una f.e.m. se induce en un conductor no solamente cuando éste se mueve con respecto a un campo magnético, sino que ello sucede también cuando el campo magnético se mueve con respecto al conductor mientras éste permanece estacionario.

En la relación $E = B \cdot l \cdot v$, v representa la velocidad relativa del conductor con respecto al campo. Para que resulte una f.e.m.i. es necesario que el movimiento del conductor se efectúe en forma transversal al campo, es decir, cortando las líneas de fuerza.

Cualquier movimiento paralelo a las líneas de fuerza no producirá variación alguna del flujo y por lo tanto no habrá f.e.m.i. Si el conductor se mueve formando un ángulo α con las líneas de fuerza, la velocidad del conductor con respecto al campo será

$v \cdot \text{Sen } \alpha$, por lo tanto

$$E = B \cdot l \cdot v \cdot \text{Sen } \alpha$$

Si la inducción magnética no es uniforme en todos los puntos a lo largo de la longitud del conductor, la expresión anterior será aplicada a una porción infinitesimalmente pequeña de la longitud del conductor, en la forma

$$dE = B \cdot v \cdot dl$$

y la f.e.m.i. total en el conductor estará dada por la fórmula

$$E = \int_0^l B \cdot v \cdot dl$$

Magnitud de la f.e.m.i. en una bobina.

Supóngase que el flujo magnético producido por un imán permanente que genera un flujo de ϕ (Wb) corte los conductores de una bobina de N espiras en t (s). Como las líneas del campo magnético cortan cada espira, la **f.e.m.i.** media en cada espira es ϕ/t (V). La corriente debida a esta **f.e.m.i.** de acuerdo con la ley de Lenz trata de impedir el crecimiento del flujo, estableciendo un flujo que se le opone, como muestra la figura G24. Si el imán que se ve en esta figura se mueve hacia la espira C de una bobina, el flujo que pasa de izquierda a derecha por ella aumenta, es decir varía. La f.e.m.i. en la bobina origina una corriente cuyo sentido está indicado por el punto y la cruz. El efecto que produce esta corriente es la de dar lugar a un campo magnético que deforma el campo magnético del imán, como demuestran las líneas punteadas, tendiendo a rechazar al imán. Por la tercera ley del movimiento, de Newton, aparece una fuerza igual y opuesta que tiende a oponerse al movimiento del imán. Debido al hecho de que la f.e.m.i. origina esa corriente que se opone al aumento del flujo que atraviesa la bobina, su sentido se considera negativo. Luego, la expresión anterior se transforma en

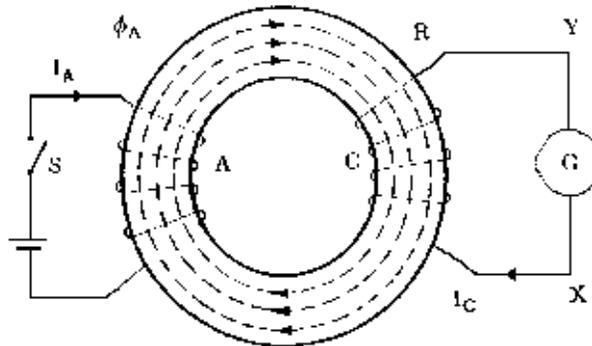
$$E = - \frac{\phi}{t}$$

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

y también en

Fig. G24. La corriente inducida por un flujo magnético

Las N espiras de la bobina están atravesadas por diferentes flujos (concatenadas por diferentes flujos) $\phi_1 ; \phi_2 ; \phi_3 ; \dots \dots \dots \phi_n$. Por lo tanto la f.e.m.i. total en la bobina esta dada por la suma de



las f.e.m.i. en cada espira .

$$e = - \left(\frac{d\phi_1}{dt} + \frac{d\phi_2}{dt} + \frac{d\phi_3}{dt} + \dots + \frac{d\phi_n}{dt} \right)$$

$$e = - \frac{d\phi_1 + d\phi_2 + d\phi_3 + \dots + d\phi_n}{dt}$$

La suma de los flujos concatenados con todas las espiras de la bobina se llama su "flujo concatenado" y se representa con la letra griega Ψ (psi). Se mide en weber-espiras o weber-vueltas (Wbv). Si todas las N espiras están concatenadas con el mismo flujo, será :

$$\psi = N \cdot \phi \text{ (Wbv)}$$

La introducción de esta nueva magnitud permite escribir la fórmula para la f.e.m.i. en una bobina o

$$e = - \frac{d\psi}{dt} \text{ (V)}$$

como se acostumbra más frecuentemente

o sea que la **f.e.m.i.** en un circuito cerrado es igual en magnitud a la velocidad de variación del flujo concatenado del circuito, pero de signo opuesto. Esta es la forma más generalizada de la ley de inducción electromagnética, llamada también ley de Faraday-Lenz

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

La f.e.m.i. media es

$$E = - \frac{N\phi}{t}$$

