

ELECTROMAGNETISMO

Las primeras observaciones de fenómenos magnéticos son muy antiguas. Se cree que fueron realizadas por los griegos en una ciudad de Asia menor, denominada Magnesia. Encontraron que en tal región existían ciertas piedras que eran capaces de atraer trozos de hierro. En la actualidad se sabe que dichas "piedras" están constituidas por óxido de hierro (magnetita); y se denominan imanes naturales. El término magnetismo se usó entonces para designar el conjunto de las propiedades de estos cuerpos, en virtud del nombre de la ciudad donde fueron descubiertos.

Se observó que un trozo de hierro colocado cerca de un imán natural, adquiriría sus mismas propiedades. De esta manera fue posible obtener imanes "no naturales" (artificiales) de varias formas y tamaños, utilizando trozos o barras de hierro con formas y tamaños diversos.

El magnetismo es una propiedad de la carga en movimiento y está estrechamente relacionado con el fenómeno eléctrico. De acuerdo con la teoría clásica, los átomos individuales de una sustancia magnética son, en efecto imanes con los polos norte y sur. La polarización magnética de los átomos se basa principalmente en el espín de los electrones y se debe, sólo en parte, a sus movimientos orbitales alrededor del núcleo. Los átomos en un material magnético están agrupados en microscópicas regiones magnéticas conocidas como dominios. Se piensa que todos átomos dentro de un dominio están polarizados magnéticamente al largo de un eje cristalino. En un material no magnetizado, estos dominios se orientan en direcciones al azar y si un gran número de dominios se orientan en la misma dirección, el material mostrará fuertes propiedades magnéticas.

Todo imán tiene dos polos; el polo norte magnético (N) y el polo sur magnético (S). Entre estos polos se cumple la misma relación que entre las cargas eléctricas: polos del mismo nombre se repelen y polos de distinto nombre se atraen. Además, cada vez que un imán se divide, de los trozos resultan nuevos imanes, cada uno con un polo norte y un polo sur. Por lo tanto, un imán no puede tener un único polo.

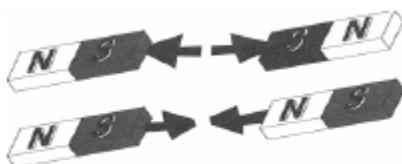


Fig. 1

En general cuando un cuerpo magnético se acerca a otro material tiende a producirse un reordenamiento de los momentos magnéticos de los átomos del material. Sin embargo, la respuesta depende del tipo de material. Un material ferromagnético que permanezca durante un cierto tiempo junto a un imán, adquiere propiedades magnéticas y se transforma en un imán y el material se dice magnetizado o imantado. El acero es un material que, después de ser imantado, mantiene las propiedades magnéticas durante largo tiempo. La tabla muestra una clasificación de materiales en relación a cómo se comportan en presencia de cuerpo magnético.

Tipo de material	Características	Comportamiento	Ejemplos
Ferromagnéticos	Son atraídos por un imán	Reordenamiento y alineación de los momentos magnéticos de los átomos	Hierro y sus aleaciones con Cobalto, Níquel y Aluminio
Paramagnéticos	Son atraídos débilmente por un imán	La alineación de los momentos magnéticos es mínima	Platino, Aluminio, Calcio Sodio y Tungsteno
Diamagnéticos	No son atraídos por un imán natural, e incluso pueden ser repelidos por él	Alineación de los momentos es nula o contraria a la dirección del momento del material magnético	Mercurio, Plata, Oro, Cobre, Plomo y Silicio

CAMPO MAGNÉTICO

Un imán genera en su entorno un campo magnético que es el espacio perturbado por la presencia del imán. El campo magnético se representa por líneas de campo magnético que van desde el polo norte hacia el polo sur, la magnitud del campo es máxima en los polos y disminuye a la alejarse de ellos y del imán. Es a través del campo magnético que el imán puede ejercer fuerzas sobre otros cuerpos.

En la figura 2 se muestra el campo magnético de un imán de barra. Observe que *las líneas de campo son continuas y cerradas*, de acuerdo al hecho que no existen las cargas magnéticas.

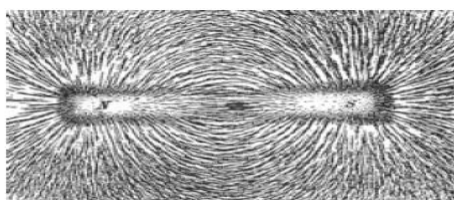


Fig. 2

Un poderoso campo magnético rodea a la Tierra, como si el planeta tuviera un enorme imán en su interior y cuyos polos magnéticos no coinciden con los polos geográficos de su eje (figura 3). Esto se produce porque las posiciones de los polos magnéticos no son constantes y muestran notables cambios de año en año. El magnetismo de la Tierra es el resultado del movimiento que se produce dentro de ella.

La teoría sugiere que el núcleo de hierro es líquido (*excepto en el mismo centro, donde la presión solidifica el núcleo*) y que las corrientes de convección, que se producen dentro del mismo, crean un gigantesco campo magnético.

La orientación del campo magnético se ha desplazado a través del tiempo con respecto a los continentes, pero se cree que el eje sobre el que gira la Tierra ha sido siempre el mismo. Mediante estudios realizados en rocas, y en las anomalías magnéticas de las cuencas de los océanos, se ha calculado que el campo magnético ha invertido su polaridad alrededor de 170 veces en los últimos 100 millones de años. Esto se ha podido realizar a partir de los *isótopos radiactivos* de las rocas.

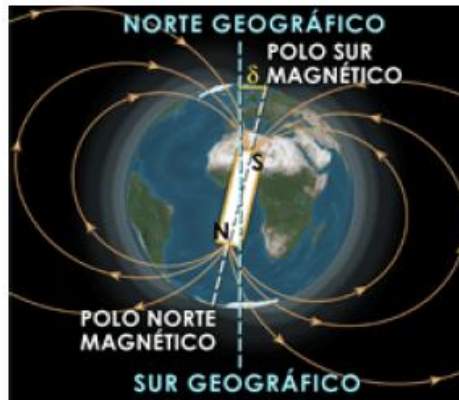


Fig. 3

El experimento de Oersted

En 1820, mientras trabajaba en su laboratorio, Oersted montó un circuito eléctrico, y colocó cerca una aguja magnética. Al no haber corriente en el circuito (circuito abierto), la aguja magnética se orientaba en la dirección Norte - Sur, como ya sabemos. El montaje que se presenta en la figura 4 es similar al que hizo Oersted. Observe que una de las ramas del circuito debe colocarse en forma paralela de la aguja, es decir, también se debe orientar en la dirección Norte-Sur.

Al establecer una corriente en el circuito, Oersted observó que la aguja magnética se desviaba, tendiendo a orientarse en dirección perpendicular al conductor. Al interrumpir el paso de la corriente, la aguja volvía a su posición inicial, en la dirección N-S. Estas observaciones realizadas por Oersted demostraron que una corriente eléctrica podía actuar como si fuese un imán, originando desviaciones en una aguja magnética. Así se observó por primera vez que existe una relación estrecha entre la electricidad y el magnetismo: *una corriente eléctrica es capaz de producir efectos magnéticos*.

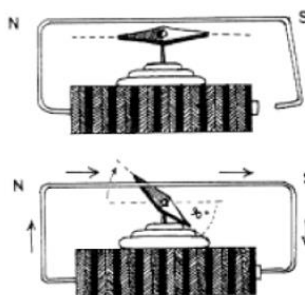


Fig. 4

Al darse cuenta de la importancia de su descubriendo, Oersted divulgó el resultado de sus obligaciones, que inmediatamente atrajeron la atención de importantes científicos de la época. Algunos de ellos comenzaron a trabajar en investigaciones relacionadas con el fenómeno, entre los cuales destaca el trabajo de Ampère. En poco tiempo, gracias a dichas investigaciones, se comprobó que todo fenómeno magnético era producido por corrientes eléctricas; es decir, se lograba, de manera definitiva, la unificación del magnetismo y la electricidad, originando la rama de la Física que actualmente conocemos como

El hecho básico del electromagnetismo

Como resultado de los estudios que acabamos de citar fue posible establecer el principio básico de todos los fenómenos magnéticos: *cuando cargas eléctricas están en movimiento, entre ellas surge una fuerza que se denomina fuerza magnética.*

Ya sabemos que cuando dos cargas eléctricas se encuentran en reposo, entre ellas existe una fuerza denominada electrostática, la cual estudiamos en la guía de electricidad I (ley de Coulomb). Cuando las dos cargas están moviéndose, además de la fuerza electrostática o eléctrica, surge entre ellas una nueva interacción, la *fuerza magnética*.

Todas las manifestaciones de fenómenos magnéticos se pueden explicar mediante esta fuerza existente entre cargas eléctricas en movimiento. De manera que la desviación en la aguja del experimento de Oersted, se debió a la existencia de dicha fuerza; también esta es la responsable de la orientación de la aguja magnética en la dirección N-S; la atracción y repulsión entre los polos de los imanes es incluso una consecuencia de esta fuerza magnética, etc. Como vimos en un comienzo, en la estructura atómica de un imán existen cargas en movimiento que originan las propiedades magnéticas que presenta.

El vector campo magnético

Supongamos que en el punto P que se muestra en la figura 5, existe un campo magnético B con la dirección y sentido indicados. Si una partícula electrizada con carga positiva, q , fuera lanzada de manera que pase por el punto P con velocidad v sabemos que el campo magnético ejercerá sobre tal carga una fuerza magnética F . Se observa que esta fuerza es perpendicular al plano determinado por los vectores v y B , como se muestra en la figura 5. Realizando mediciones cuidadosas, los científicos hallaron que la magnitud de la fuerza magnética F depende del valor de la carga q , de la magnitud de la velocidad v , y del ángulo θ formado por los vectores v y B , de lo cual se obtuvieron las relaciones siguientes

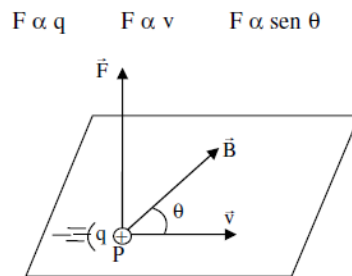


Fig. 5

Debe observarse que el valor de B es constante para un punto dado, pero que para diferentes puntos, en general, tendremos distintos valores de B . En otras palabras, la magnitud del campo magnético se encuentra bien determinada para un punto, pero puede presentar distintos valores en diferentes puntos del espacio (como vimos, lo mismo sucede con la intensidad de un campo eléctrico). La fuerza magnética está dada por:

$$\vec{F} = q \cdot (\vec{v} \times \vec{B})$$

De la expresión anterior se deduce que para una partícula electrizada positivamente con carga q , que se mueve con una velocidad v por un punto donde existe un Campo Magnético B , queda sujeta a la acción de una fuerza magnética F que tiene las características siguientes:

- **Módulo:** $|\vec{F}| = q \cdot v \cdot \sin\theta$, donde θ es el ángulo entre $\vec{v}$ y $\vec{B}$.
- **Dirección:** $\vec{F}$ es perpendicular a $\vec{v}$ y $\vec{B}$.
- **Sentido:** dado por la "regla de la palma de la mano derecha", que se ilustra en la figura 6.

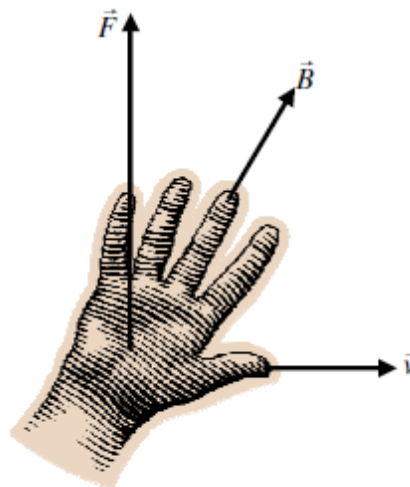


Fig. 6

Nota:

- Si la carga q fuese negativa, el sentido de la fuerza magnética será contraria a la que se obtiene para una carga positiva.
- Si la carga entra paralela a un campo magnético, la fuerza magnética es nula.
- La intensidad de la fuerza magnética es máxima, cuando entra perpendicular al campo magnético.
- La unidad de medida en el S.I del campo magnético, es el Tesla (T).

$$1\text{T} = 1 \frac{\text{N}}{\text{A} \cdot \text{m}}$$

Movimiento de una partícula cargada en un campo magnético

Considérese el caso de una partícula con carga positiva que se desplaza en un campo magnético uniforme (que está entrando perpendicular a la página, lo cual se simboliza con X), de tal manera que la dirección de la velocidad de la partícula es *perpendicular al campo*, como en la figura 7.

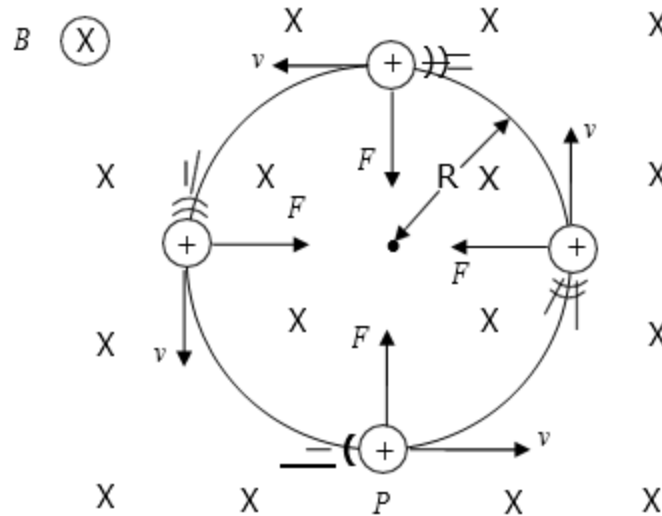


Fig. 7

Esto obliga a la partícula a alterar la dirección de su movimiento y a seguir una trayectoria curva. La aplicación de la regla de la mano izquierda en cualquier punto muestra que la fuerza magnética siempre está dirigida hacia el centro de la trayectoria circular; por tanto, la fuerza magnética causa la aceleración centrípeta, la cual modifica sólo la dirección de v , no su magnitud. Puesto que F produce la aceleración centrípeta, podemos igualar su magnitud la fuerza centrípeta:

$$|\vec{F}_m| = |\vec{F}_c| \Rightarrow q \cdot v \cdot B = m \cdot \frac{v^2}{R}$$

de donde obtenemos el radio de la trayectoria circular:

$$R = \frac{m \cdot v}{q \cdot B}$$

Campo magnético de un alambre recto y largo

Un sencillo experimento realizado por Hans Oersted en 1820 demuestra con claridad que un conductor que transporta corriente produce un campo magnético. En este experimento, se colocan varias agujas de brújula en un plano horizontal cerca de un largo alambre vertical, como en la siguiente figura.

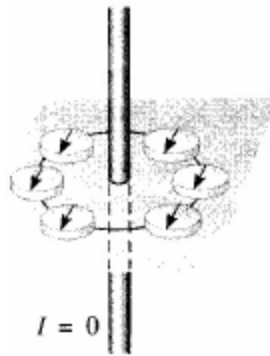


Fig. 8a

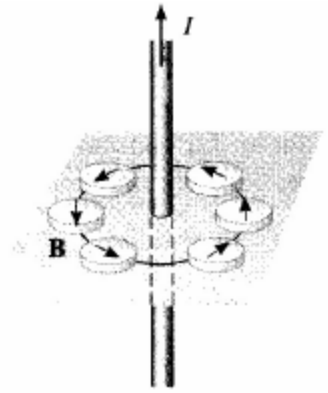


Fig. 8b

Cuando no hay corriente en el alambre, todas las agujas apuntan en la misma dirección (figura 8a). Sin embargo, cuando el alambre transporta una corriente constante e intensa, todas las agujas se desvían en direcciones tangentes al círculo (figura 8b). Estas observaciones muestran que la dirección de B es congruente con la conveniente regla siguiente: "si se sujeta el alambre con la mano derecha, con el pulgar en la dirección de la corriente, como en la figura 9, los dedos se curvan en la dirección de B "



Fig. 9

Cuando la corriente se invierte, también lo hacen las agujas de la figura 8b. Puesto que las agujas apuntan en la dirección de B , se deduce que las líneas de B forman círculos en torno al alambre. Por simetría, la magnitud de B es la misma en todos los puntos de una trayectoria circular centrada en el alambre y que yace en un plano perpendicular al mismo. Si se modifica la corriente y la distancia respecto al alambre, se encuentra que la intensidad de B es proporcional a la corriente e inversamente proporcional a la distancia respecto al alambre. Poco después del descubrimiento de Oersted, los científicos dedujeron una expresión de la intensidad del campo magnético debido a la corriente que pasa por un alambre recto y largo. La intensidad del campo magnético a una distancia (a) de un alambre que conduce la corriente I es

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi a}$$

Este resultado muestra que la magnitud del campo magnético es proporcional a la corriente y disminuye con la distancia respecto al alambre, como uno esperaría intuitivamente que fuese. La constante de proporcionalidad μ_0 , llamada permeabilidad del espacio libre, tiene por definición el valor siguiente:

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T m/A}$$

Fuerza magnética en un conductor que transporta corriente

La experiencia nos dice ahora que no debemos sorprendernos que un alambre que conduce corriente también experimente una fuerza cuando se le coloca en un campo magnético. Esto se deduce del hecho de que la corriente es un conjunto de muchas partículas con carga en movimiento; por tanto, la fuerza resultante sobre el alambre se debe a la suma de las fuerzas individuales que se ejercen sobre las partículas con carga. La fuerza sobre las partículas se transmite a la totalidad del alambre en virtud de las colisiones con los átomos que constituyen el alambre. Antes de continuar es conveniente cierta explicación respecto a la notación que se utiliza en la figura 10. Para indicar la dirección de $\vec{B}$ se aplica la convención siguiente:

Si $\vec{B}$ está dirigido hacia la página, como lo indica la figura 10, utilizamos una serie de cruces que representan las colas de las flechas de los vectores. Si $\vec{B}$ está dirigido hacia afuera de la página, utilizamos una serie de puntos que representan las puntas de las flechas de los vectores $\vec{B}$. Si $\vec{B}$ está sobre el plano de la página, empleamos una serie de líneas de campo con puntas de flecha.

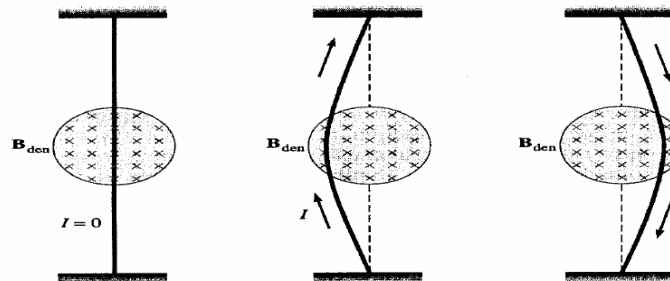


Fig. 10

Se puede demostrar la fuerza que se ejerce sobre un conductor que transporta corriente colgando un alambre entre los polos de un imán, como en la figura anterior. En la figura 10, el campo magnético está dirigido hacia la página y cubre la región comprendida dentro del círculo sombreado. El alambre se desvía hacia la derecha o hacia la izquierda cuando se hace pasar una corriente por él.

Cuantifiquemos esta exposición considerando un segmento recto de alambre de longitud L y área de sección transversal A , que conduce una corriente I en un campo magnético externo uniforme, $\vec{B}$. Suponemos que el campo magnético es perpendicular al alambre y está dirigido hacia la página (entrando). Todos los portadores de carga reciben una fuerza magnética que, en suma, hace que todo el conductor se desvíe y dicha fuerza tiene una magnitud que se expresa como $F_{\text{máx}}$:

$$|\vec{F}_{\text{máx}}| = |\vec{B}| \cdot I \cdot L$$

Ahora, cuando el campo no sea perpendicular al alambre y se forme un cierto ángulo (θ) entre sí, entonces será necesario incorporar la componente en la ecuación obteniéndose:

$$|\vec{F}| = |\vec{B}| \cdot I \cdot L \cdot \sin\theta$$

Donde θ es el ángulo entre $\vec{B}$ y la dirección de la corriente.

Fuerza magnética entre dos conductores paralelos

Como hemos visto, una fuerza magnética actúa sobre un conductor que transporta corriente cuando el conductor se coloca en un campo magnético externo. Puesto que una corriente en un conductor crea su propio campo magnético, es fácil entender que dos alambres portadores de corriente próximos entre sí ejercen fuerzas magnéticas uno sobre el otro. Considérense dos alambres largos, rectos y paralelos separados por la distancia d y que transportan las corrientes I_1 e I_2 en la misma dirección, como se muestra en la figura 11.

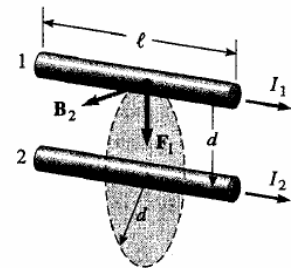


Fig. 11

Determinemos la fuerza magnética sobre un alambre, debida al campo magnético establecido por el otro alambre. El alambre 2, que conduce la corriente I_2 , establece el campo magnético B_2 en el alambre 1. La dirección de B_2 es perpendicular al alambre, como se muestra en la figura 11. Aplicando la ecuación del campo generado alrededor de un conductor, tenemos:

$$|\vec{B}_2| = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I_2}{d}$$

Uniendo esta expresión con la fuerza en un conductor rectilíneo, se obtiene para la intensidad de la fuerza magnética sobre el alambre 1 en presencia del campo B_2 debido a I_2 :

$$|\vec{F}_2| = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I_1 I_2 L}{d}$$

La dirección de F_1 es descendente, hacia el alambre 2, como lo indica la regla de la mano izquierda. Si se considera el campo establecido en el alambre 2 debido al alambre 1, se encuentra que la fuerza F_2 que se ejerce sobre el alambre 2 es igual y opuesta a F_1 . Esto es lo que uno esperaría con base en la tercera ley de Newton de acción-reacción.

Hemos demostrado que los conductores paralelos que transportan corriente en la misma dirección, se atraen uno al otro. El alumno deberá aplicar el enfoque indicado por la misma figura y las etapas que llevan a la ecuación anterior para demostrar que los conductores paralelos que transportan corriente en direcciones opuestas se *repelen* mutuamente.

Campo magnético de una espira de corriente

Si un alambre se curva para darle forma de una espira y luego se conecta a una fuente de corriente, se establece un campo magnético similar al de un imán de barra. La regla de la mano derecha seguirá siendo muy útil para conocer la dirección de campo. En este caso las líneas de flujo no serán de forma circular y la densidad de flujo magnético varía considerablemente de un punto a otro.

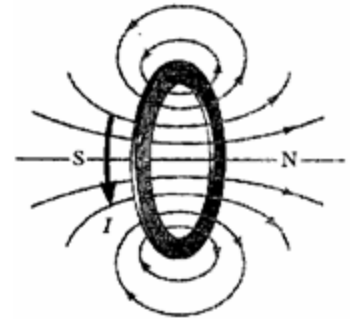
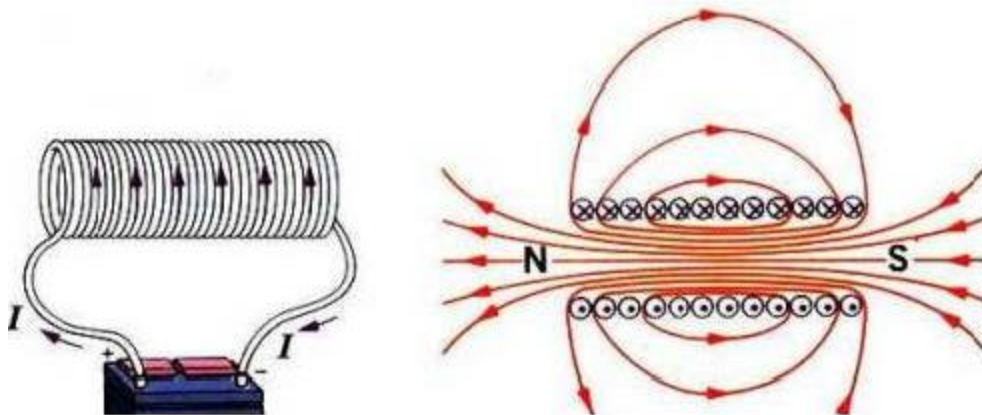


Fig. 12

La magnitud del campo en el centro de la espira circular de radio r que transporta una corriente I se calcula por:

$$|\vec{B}| = \mu_0 \frac{I}{2r}$$

La dirección de B (en el centro) es perpendicular al plano de la espira. Si el alambre forma parte de una bobina con N vueltas (solenoides), la intensidad del campo aumenta N veces. La figura 13 muestra las líneas de flujo en un solenoide.

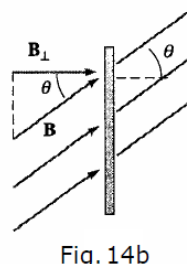
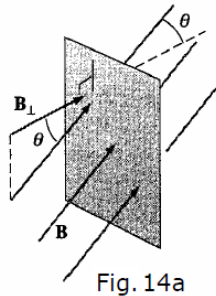


Flujo magnético

Consideremos una espira de alambre en presencia de un campo magnético uniforme, B . Si el área de la espira es A , el flujo magnético, ϕ , a través de la espira, se define como

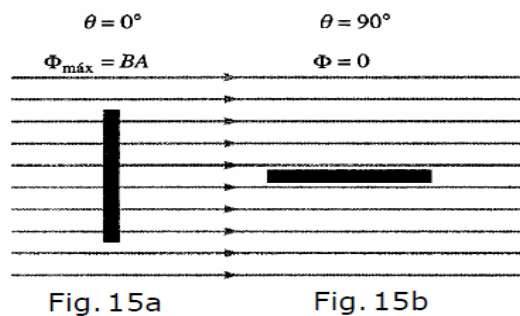
$$\phi = B_{\perp} \cdot A = |\vec{B}| \cdot A \cdot \cos \theta$$

Donde $B_{\perp}$ es la componente de B perpendicular al plano de la espira, como en la figura 14a, y θ es el ángulo entre B y la normal (perpendicular) al plano de la espira.



La figura 14b es una vista de costado de la espira y las líneas de campo magnético que penetran en él. Cuando el campo es perpendicular al plano de la espira, como en la figura 14a, $\theta = 0^\circ$ y ϕ tiene un valor máximo, $\phi = BA$.

Cuando el plano de la espira es paralelo a B , como en la figura 14b, implica que $\theta = 90^\circ$ y $\phi = 0$. La unidad de medida del flujo magnético es el Weber (Wb)



La importancia de la ecuación de flujo se destaca dibujando primero las líneas de campo magnético, como en la figura anterior. El número de líneas por unidad de área aumenta a medida que la intensidad del campo se incrementa. El valor del flujo magnético es proporcional al número de líneas que pasan a través de la espira. Así pues, vemos que el número de líneas que pasa a través de la espira es mayor cuando el plano de la misma es perpendicular al campo, como en la figura 15a, y es en esas condiciones que el flujo alcanza su valor máximo. Como muestra la figura 15b, no pasan líneas a través de la espira cuando su plano es paralelo al campo, en ese caso $\phi = 0$.

Ley de inducción de Faraday

La utilidad del concepto de flujo magnético se aprecia claramente por medio de otro experimento sencillo que demuestra la idea fundamental de la inducción magnética. Considérese una espira de alambre conectada a un galvanómetro, como en la figura 16.

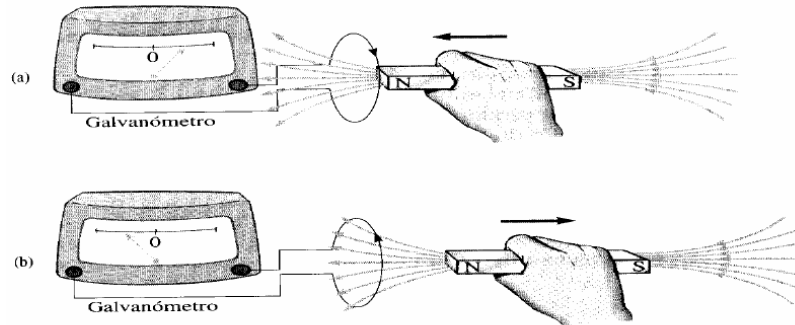


Fig. 16

Si un imán se aproxima a la espira, la aguja del galvanómetro se desvía en una dirección, como en la figura 16a. Si el imán se aleja de la espira, la aguja del galvanómetro se desvía en dirección opuesta, como en la figura 16b. Si el imán se mantiene inmóvil y la espira se aproxima al imán o se aleja de él, la aguja también se desvía. A partir de estas observaciones, se deduce que se establece una corriente en el circuito en tanto existe un movimiento relativo entre el imán y la espira. Estos resultados son extraordinarios, en vista del hecho de que el circuito no contiene batería alguna. A esta clase de corriente se le llama corriente inducida porque la produce una fem inducida. Con este experimento, se puede hablar en general que, se induce una fem en una corriente cuando el flujo magnético a través del circuito cambia con el tiempo. De hecho, podemos hacer un resumen general de esta clase de experimentos en los que intervienen corrientes y fem inducidas:

"La fem instantánea inducida en un circuito es igual a la razón de cambio del flujo magnético a través del circuito".

Si un circuito contiene N espiras enrolladas apretadamente y el flujo a través de cada espira cambia en la cantidad $\Delta\phi$ durante el intervalo Δt , la fem media inducida en el circuito durante el intervalo de tiempo, es

$$\xi_{\text{IND}} = -N \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

Éste es un enunciado de la ley de inducción magnética de Faraday. El signo negativo, tiene explicación mediante la ley de Lenz.

Ley de Lenz

Para determinar el sentido de la corriente inducida, además de la regla de la mano derecha, se utiliza la *ley de Lenz*. Esta ley se enuncia de la forma siguiente:

“La dirección de la corriente o fuerza electromotriz inducida en un circuito cerrado es tal que por sus efectos electromagnéticos se opone a la variación del flujo que la produce”

Por ejemplo, supongamos una espira metálica inerte a la que se acerca un imán por su polo norte en la figura 17, al ir acercando el imán, el flujo que atraviesa la espira aumentará. Según la ley de Lenz, el sentido de la corriente inducida es tal que el campo magnético creado por dicha corriente se opone al aumento del flujo producido por el acercamiento de imán. Si el imán se aleja, la disminución de su flujo se verá contrarrestada por el campo magnético de la corriente inducida que tendrá su mismo sentido.

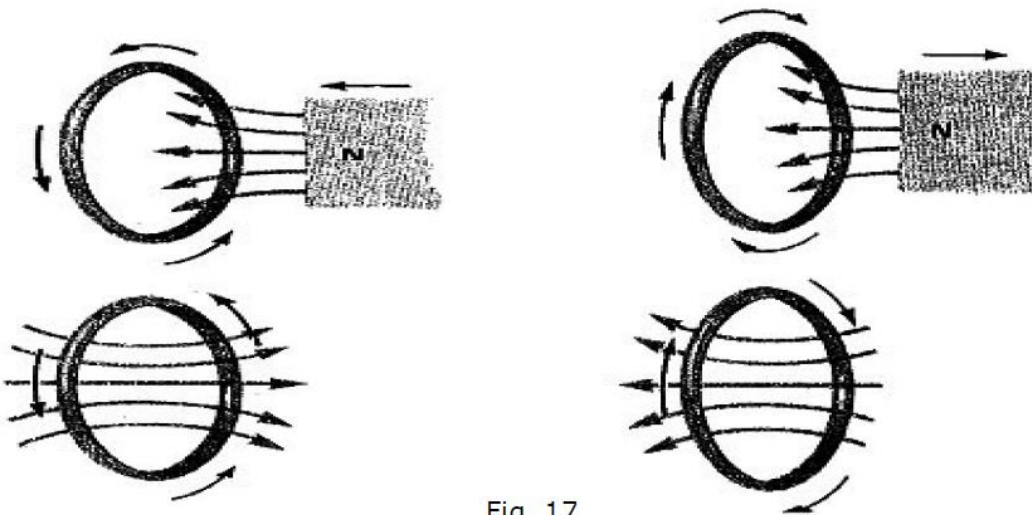


Fig. 17