

CAPITULO 4

Magnetostática

Historia del electromagnetismo

Los fenómenos magnéticos fueron conocidos por los antiguos griegos. Se dice que por primera vez se observaron en la ciudad de Magnesia del Meandro, ciudad antigua situada en el interior de la península turca de la que apenas quedan hoy algunos restos arqueológicos, de ahí el término magnetismo. Sabían que ciertas piedras atraían el hierro, y que los trocitos de hierro atraídos atraían a su vez a otros. Estas se denominaron imanes naturales.

El primer filósofo que estudió el fenómeno del magnetismo fue Tales de Mileto. Descubrió la propiedad de atracción de ciertos metales en un mineral denominado "magnetita" (óxido férrico), que era abundante en la región de Magnesia.

También descubrió que frotando el hierro con magnetita, o manteniéndola durante un cierto tiempo bajo su influencia, se imantaba, es decir, adquiría la virtud magnética. Tales atribuye alma, es decir, vida al imán, porque atrae al hierro, y la noción de atracción magnética era explicada por él de esta forma.

El conocimiento del magnetismo se mantuvo limitado a los imanes, hasta que en 1820, el físico y químico Danés Hans Christian Ørsted (1777 - 1851), descubre que la electricidad y el magnetismo están relacionados [1].

Según historiadores, Ørsted llevó a cabo en su lugar de residencia, experimentos demostrativos dedicados a amigos y estudiantes sobre electricidad y magnetismo. Con la ayuda de una pila voltaica hizo circular una corriente eléctrica a través de un alambre. Ørsted notó que cada vez que la corriente circulaba por el alambre, la aguja de una brújula que había colocado cerca se movía, sugiriendo así, que debía haber una relación entre la electricidad y el magnetismo.

A finales del siglo XIX y principios del siglo XX era muy común describir este descubrimiento como resultado de una casualidad. Sin embargo, para algunos historiadores, Ørsted ya había sugerido en 1812, que una corriente eléctrica tenía efectos sobre un material imantado [2]. Pero recién 8 años después, el 21 de Julio de 1820, Ørsted publica sus observaciones concluyendo que la simetría de las fuerzas que actuaban sobre la aguja de la brújula debía ser circular, es decir círculos concéntricos perpendiculares al alambre conductor. Este retraso de 8 años es atribuido al hecho de que repetidamente estaba realizando el experimento equivocado, con lo que nunca llegaba a una explicación satisfactoria del fenómeno observado, ya que hasta 1820, Ørsted estaba convencido de que las líneas de fuerza debían ser paralelas al alambre o que tenían dirección radial.



Hans Christian Ørsted (1777 - 1851)



André-Marie Ampère (1775 - 1836)

El 4 de Septiembre de 1820, el matemático y físico Francés André-Marie Ampère (1775 - 1836), se entera del descubrimiento de Ørsted de que una corriente eléctrica crea efectos magnéticos en el espacio que la rodea [3]. A pesar de que la mayoría de los científicos de la época mantenían firme la creencia de que electricidad y el magnetismo no estaban relacionados, Ampère acepta el descubrimiento de Ørsted y rápidamente llevó a cabo sus propios experimentos comenzando por repetir el experimento de Ørsted. Dos semanas después publica un trabajo más completo sobre este fenómeno y otros fenómenos afines y desarrolla la teoría matemática de la electrodinámica.

Galvanómetro

En los primeros experimentos en los que se involucraban corrientes eléctricas, cuando aún no existían dispositivos para medir dichas corrientes en circuitos, los experimentadores se daban pequeños shocks eléctricos a sí mismos, o las testeaban utilizando sus lenguas para detectar si la electricidad estaba presente o no. En 1820, el físico, químico y profesor de matemáticas alemán, Johann S. C. Schweigger (1779 - 1857) inventó un dispositivo que consistía de una brújula colocada en el interior de una bobina de alambre, al cual lo llamó galvanómetro en honor al médico, fisiólogo y físico italiano Luigi Galvani (1737 - 1798) conocido por sus experimentos en los que hacía mover patas de rana aplicando descargas eléctricas.

Los primeros galvanómetros, llamados galvanómetros tangenciales, estaban contruidos básicamente de una brújula colocada en el centro de una bobina circular como se muestra en la figura 1.

Su funcionamiento estaba basado en la utilización del campo magnético terrestre para conocer una corriente desconocida que se hacía circular por la bobina del galvanómetro. Pero antes de conectar la bobina a la fuente de corriente, el galvanómetro debía ser orientado de forma tal que el plano de la bobina quede paralelo a la componente horizontal del campo magnético terrestre B_H . Cuando la bobina era conectada, el campo magnético generado por la bobina desviaba la aguja de la brújula siendo posible medir dicha desviación sobre una escala circular.

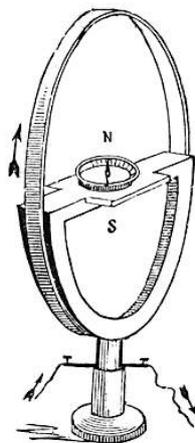


Figura 1: Galvanómetro tangencial.

Actividad

Conociendo el campo magnético generado por la bobina circular:

$$B = \frac{\mu_0 n I}{2r}$$

donde I es la corriente, n el número de espiras de la bobina y r es el radio de la bobina, deduzca una fórmula para obtener la corriente que circula por la bobina en función de los parámetros de la ecuación anterior y el ángulo rotado por la aguja de la brújula.

Pregunta

¿Cuándo se obtienen mediciones más precisas? ¿Cuando las corrientes son altas, bajas o cuando es tal que la aguja se desvía en ángulos cercanos a 45° ?

Fuerza magnética

Después de repetir el experimento de Ørsted, Ampère comenzó a experimentar con alambres paralelos por las que circulaban corrientes eléctricas, y encontró que existía una fuerza de atracción o repulsión dependiendo de si las corrientes circulaban en el mismo sentido o en sentidos opuestos.

No fue hasta 1881 cuando el físico británico Joseph John Thomson (1856 - 1940) hizo el primer intento de encontrar una expresión para la fuerza que experimenta un objeto cargado moviéndose dentro de un campo magnético externo, llegando sin embargo a una expresión incorrecta solo por un factor $1/2$. Años más tarde, el ingeniero, matemático y físico inglés Oliver Heaviside (1850 - 1925), quien inventó la notación vectorial moderna, fue capaz de corregir el error de Thomson y llegar a la forma correcta de la fuerza magnética dada por:

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

donde q es la carga del objeto, \mathbf{v} es la velocidad y \mathbf{B} es el campo magnético.

Cuando un alambre que lleva una corriente eléctrica es colocado en un campo magnético externo, cada una de las cargas que se mueven experimenta una fuerza magnética que en conjunto crean una fuerza macroscópica. La magnitud y dirección de dicha fuerza, depende de cuatro variables: la corriente eléctrica (I), la longitud del alambre (L), la intensidad del campo magnético (B) y el ángulo formado entre la dirección del campo y el alambre (θ). Así, el vector fuerza se escribe como:

$$\mathbf{F} = I(\mathbf{L} \times \mathbf{B})$$

Con el siguiente dispositivo se intenta mostrar como un alambre conductor por el cual circula una corriente, se mueve en presencia de un campo magnético externo debido a las fuerzas magnéticas que aparecen sobre dicho alambre.

Se trata de un alambre conductor con forma de columpio que cuelga de un soporte horizontal (Figura 2 (a)). Un imán permanente de neodimio con caras polares planas es colocado de tal forma que la parte horizontal del alambre quede entre las caras polares

del imán (Figura 2 (b)). Al conectar los extremos del alambre a una fuente de corriente, el alambre se apartará de su posición de equilibrio debido a las fuerzas magnéticas.

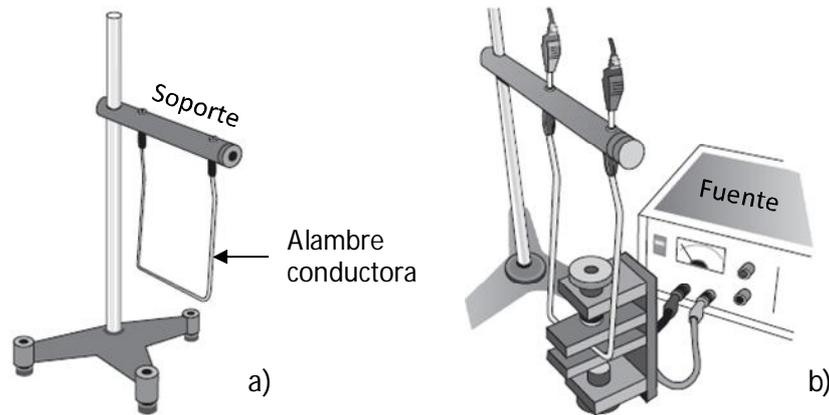


Figura 2: dispositivo para la demostración de la fuerza magnética.

Actividades

Observando el comportamiento del alambre y teniendo en cuenta las ecuaciones necesarias, deduzca cualitativamente la dirección del campo magnético generado por el imán.

Para obtener resultados cuantitativos se utilizará el dispositivo mostrado en la figura 3, llamado *balanza magnética*. Este consta de 6 espiras grabadas en pertinax de diferentes dimensiones, un soporte para las espiras, un imán permanente, una balanza y una fuente de corriente. Aquí es posible variar tres de las cuatro variables vistas en la ecuación anterior: I , L y B .

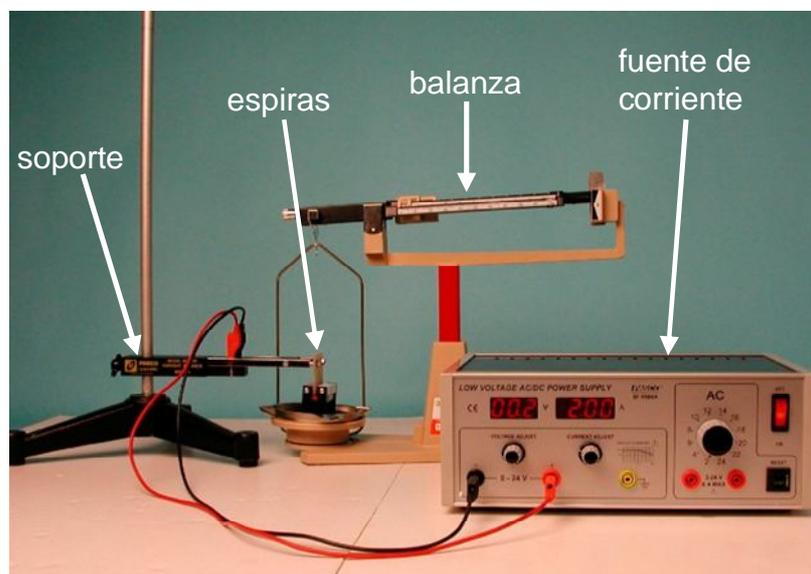


Figura 3: balanza magnética.

Actividades

Idear un procedimiento para calcular el campo magnético del imán en las proximidades de la espira.

Tubo de rayos filiformes – experimento de J. J. Thomson.

En 1897, J. J. Thomson (1856 - 1940) descubre el electrón (o corpúsculo, como originalmente lo llamó) en su conocido experimento del tubo de rayos filiformes. Con este experimento fue capaz de medir la relación carga-masa del electrón y así encontró que el átomo no era la partícula indivisible más pequeña, como se creía hasta ese momento.

El objetivo en esta experiencia no es medir la relación carga-masa, sino simplemente observar el efecto producido por las fuerzas magnéticas ejercidas sobre una corriente de electrones inmersa en un campo magnético, lo que hace que el haz de electrones se cierre sobre si mismo formando un círculo.

El dispositivo consiste de una válvula que contiene un cátodo en su interior. Dicha válvula contiene helio a baja presión. Cuando el cátodo comienza a emitir electrones, algunos colisionan con los átomos del helio, excitándolos y emitiendo luz visible, y de esta forma poder “ver” el haz de electrones. Rodeando la válvula, se encuentra un par de bobinas Hemholtz que son las responsables de generar un campo uniforme en la región donde se encuentra la válvula.



Figura: 3. Tubo de rayos filiformes

Actividad

Muestre analíticamente como depende el radio del círculo con el campo magnético generado por las bobinas.

Inducción magnética

En 1824, un fabricante francés de instrumentos de precisión llamado Henri P. Gambey, notó que si la aguja de una brújula la montaba sobre una base de cobre, las oscilaciones de la aguja disminuían sensiblemente en comparación con el caso de una aguja montada sobre una base de madera [4]. Ese mismo año, el matemático, físico, astrónomo y político francés, François Jean Dominique Arago (1786 - 1853), basado en las observaciones de Gambey, montó una aguja imantada sobre un disco de cobre al cual lo hacía girar sobre su eje. Cuando hacía girar el disco de cobre, observó como la aguja comenzaba a girar en el mismo sentido que el disco. Durante un tiempo muchos científicos estudiaron este fenómeno sin dar una explicación satisfactoria.

Mas tarde, en 1831 Faraday y Joseph Henry de Estados Unidos, descubren casi al mismo tiempo y en forma independiente, que en un circuito se inducía una corriente

eléctrica cuando otra corriente eléctrica adyacente se veía alterada o cuando un imán se acercaba o se alejaba del circuito.

Faraday fue el primero en publicar los resultados de sus experimentos, y en su honor se establece la conocida “*ley de la inducción de Faraday*” o “*ley de inducción electromagnética*”, la cual dice que la fuerza electromotriz (*f.e.m.*) inducida en un circuito es proporcional a la tasa de variación temporal del flujo magnético a través del circuito. En términos matemáticos, la ley de Faraday se escribe:

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt}$$

Actividad

Utilizando dos bobinas solenoidales, una conectada a una fuente de corriente y otra a un amperímetro, observe el fenómeno de inducción magnética y compruebe la ecuación anterior empíricamente. Este fenómeno también puede ser observado reemplazando la bobina conectada a la fuente, por un imán.

En 1855, el físico francés Jean Bernard Léon Foucault (1819 - 1868) publicó un trabajo sobre los efectos que se producían en un disco de cobre cuando se le hacía girar entre los polos de un imán: el disco se calentaba y ofrecía resistencia al giro. La explicación de esto es que cuando un flujo magnético a través de un trozo de material conductor cambia con el tiempo, se inducen corrientes en dicho conductor.

Estas corrientes se llaman *corrientes de Foucault* o *corrientes parasitas* (También se las suelen llamar en inglés, *Eddy currents*), y estas eran las responsables del fenómeno observado por Gambey y Arago.

Como se puede notar, el principio es siempre el mismo, pero ha recibido diferentes nombres dependiendo del tipo de experimento en el que es observado.

Actividades

Con el siguiente dispositivo es posible observar los efectos que producen las corrientes de Foucault sobre un cuerpo conductor que oscila en un campo magnético.

- 1) Colocar la paleta en el soporte como muestra la figura 4(a) y compruebe que ésta puede oscilar libremente. Notar que la paleta es de material no ferromagnético (aluminio).
- 2) Acercar lentamente el imán a la paleta como muestra la figura 4(b) (Si el imán se acerca a la paleta rápidamente, ésta comenzará a moverse).
- 3) Aparte la paleta de su posición de equilibrio y suéltela para que comience a oscilar.
- 4) Repita los procedimientos anteriores con las distintas paletas.

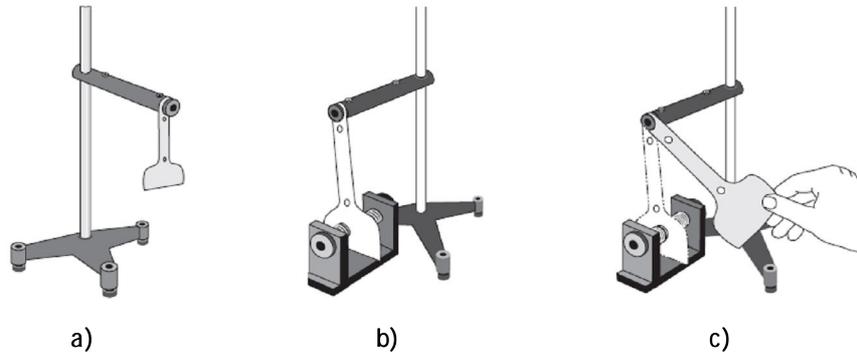


Figura 4: dispositivo para la observación de la inducción magnética.

Diamagnetismo y Paramagnetismo

En 1845, Faraday se encontraba realizando una serie de experimentos para comprobar si el campo magnético tenía alguna influencia sobre la luz. Para esto montó un par de imanes y colgó un vidrio de plomo (El vidrio de plomo es un tipo de vidrio que contiene óxido de plomo para aumentar su índice de refracción) en el seno del campo magnético generado por estos imanes. Así, haciendo pasar un rayo de luz polarizada por el vidrio, encontró que el estado de polarización de la luz se veía alterado por el campo magnético. Varias semanas después de este descubrimiento, notó como una barra de vidrio de plomo que colocó entre dos electroimanes rotó por sí sola quedando perpendicular a las líneas de campo, es decir, se comportaba de forma contraria a la que lo haría un material magnético ordinario [5]. Además del vidrio de plomo, se encontraron muchos otros materiales que mostraban el mismo comportamiento, en particular el bismuto.

A estos materiales los llamó *diamagnéticos*. Faraday, también llevó a cabo un estudio de los materiales *paramagnéticos*, nombre dado también por él.

En comparación con el ferromagnetismo, el diamagnetismo y el paramagnetismo son efectos débiles. Sin embargo, cuando un material diamagnético se coloca en un campo magnético intenso, es posible observar que el material es repelido por el campo magnético. Por otro lado, los materiales paramagnéticos inmersos en un campo magnético intenso serán notablemente atraídos por el campo magnético.

Para observar los efectos de diamagnetismo y paramagnetismo se utilizará el dispositivo mostrado en la figura 5, que consta de dos imanes de neodimio y dos barras cilíndricas, una de material diamagnético y otra de material paramagnético. Notar que ambos materiales (aluminio y vidrio) no son ferromagnéticos.

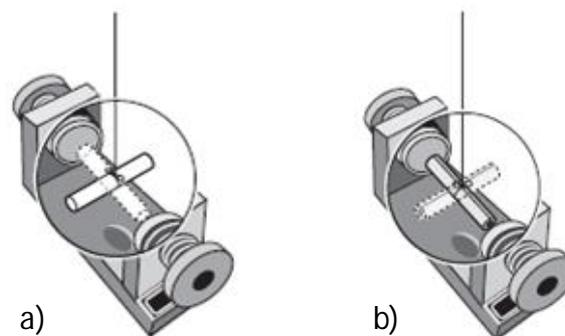


Figura 5: dispositivo para la observación del diamagnetismo y paramagnetismo.

Actividades

- 1) Suspender una de las barras al soporte de tal manera que quede entre el par de imanes como muestra la figura 5.
- 2) Colocarla en una posición paralela a las líneas de campo magnético del imán y soltarla sin que ésta quede oscilando. Observe lo que sucede después de varios segundos de haberla soltado.
- 3) Realice el mismo procedimiento colocando la barra perpendicular a las líneas de campo magnético.
- 4) Realice los procedimientos del 1) al 4) utilizando la otra barra.

Después de haber realizado las actividades, deduzca cual barra es de material diamagnético y cual de material paramagnético.

Motor de corriente continua.

Básicamente, los motores de corriente continua existen para convertir energía eléctrica en energía mecánica. Existen varios tipos de motores eléctricos y tienen la capacidad de generar un torque muy elevado, dependiendo del tamaño físico del mismo. Los motores de *corriente continua* son los más simples y fueron los primeros motores eléctricos que se han inventado.

Motor homopolar

Después de que los trabajos de Ørsted y Ampère hicieran intuir la existencia de fuerzas con simetría circular, la mayoría de los científicos aún se aferraban a la idea de que las fuerzas debían tener dirección radial. Faraday sin embargo, menos influenciado por la tradición estaba dispuesto a demostrarlo, y para eso, en la navidad de 1821, diseñó un ingenioso dispositivo (Figura 6) que fue mostrado en una de sus conferencias [6].

Básicamente, este dispositivo consistía de un alambre conductor, una batería y un baño de mercurio. En el lado derecho de la figura, el alambre colgaba libremente de un gancho de modo que su extremo inferior quedaba sumergido en el baño de mercurio. Una barra de imán estaba colocada verticalmente en el centro del baño de mercurio que se encontraba en contacto físico con la terminal negativa de la batería. La terminal positiva de la batería estaba conectada al gancho que sostenía el alambre. Luego, cuando se cerraba en circuito y comenzaba a circular una corriente eléctrica el alambre realizaba un movimiento de traslación alrededor del imán. En el lado izquierdo de la figura, lo que se movía era la barra de imán, mientras que el alambre permanecía quieto en el centro del baño de mercurio.

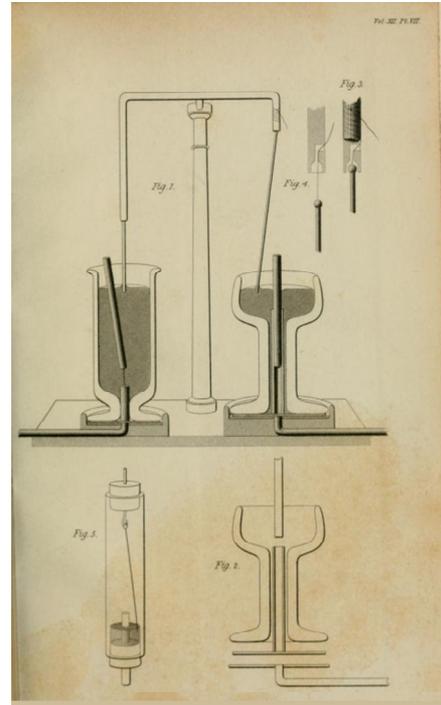


Figura 6: Diseño del primer motor eléctrico de Faraday (dibujo original de la revista *Quarterly Journal of Science*, Vol XII, 1821).

Mediante el uso de la electricidad para generar un movimiento mecánico, Faraday había dado el primer paso hacia la creación del mundo moderno industrializado, que depende en gran medida del uso del motor eléctrico.

Este tipo de motor se lo llama *motor homopolar* ya que no hay ningún cambio de polaridad, contrariamente a lo que sucede con los motores bipolares, como se verá luego.

Actividad

Teniendo en cuenta el mismo principio con el que el motor de Faraday funcionaba, construya un motor homopolar a partir de un trozo de alambre conductor, una pila alcalina y un imán de neodimio. Explique cuál es el principio que explica el funcionamiento de un motor homopolar.

Motor bipolar

Diez años después de que Faraday publicara su primer motor eléctrico, en 1831, Joseph Henry había mejorado el motor eléctrico de Faraday. Henry construyó un dispositivo (figura 7) simple cuya parte móvil era un electroimán (AB) el cual podía balancearse sobre un eje horizontal. Su polaridad se invertía de forma automática al tiempo que este se movía a través de un par de cables que sobresalían y hacían contacto alternadamente con dos celdas electroquímicas. Dos imanes permanentes colocados verticalmente (C y D) atraían y repelían alternadamente los extremos del electroimán.

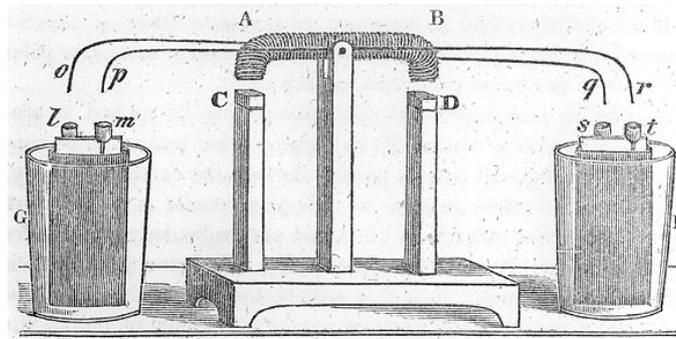


Figura 7: primer motor eléctrico de Joseph Henry.

Aún está en discusión quién fue el inventor del primer motor eléctrico con *conmutador* capaz de convertir energía eléctrica en energía mecánica suficiente para mover una maquinaria. A dos personas se les atribuye el invento, los científicos británicos William Sturgeon (1783 - 1850) y William Ritchie (1790-1837) [7,8]. Aunque estos motores eran dispositivos muy simples, fueron los primeros en proporcionar un movimiento rotatorio continuo y que contenía esencialmente todos los elementos de un motor moderno de corriente continua. En la figura 8 se muestran dos replicas de los motores de Sturgeon a) y Ritchie b).



Figura 8: motores con conmutador de W. Sturgeon a) y W. Ritchie b).

En la figura 9 se muestra un ejemplo simple de un motor bipolar o con conmutador como el que será utilizado en la experiencia demostrativa. Este consiste de un bobinado montado sobre un eje sobre el cual puede girar libremente. El bobinado esta conectado a una fuente de corriente mediante un conmutador de manera tal que después de cada media vuelta, la corriente que circula cambia de sentido y así, la fuerza magnética entre el imán y el bobinado tiene siempre el mismo sentido.

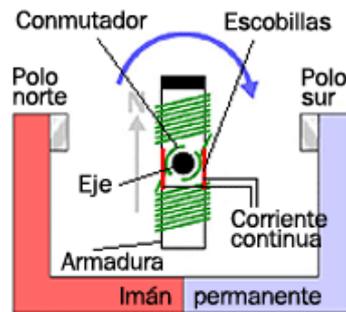


Figura 9: motor de corriente continua con conmutador.

Líneas de campo magnético.

Mientras Faraday estudiaba los patrones formados por limadura de hierro desparramada sobre un papel (figura 10), el cual colocaba sobre imanes arreglados en diferentes configuraciones, fue cuando comenzó a desarrollar el concepto de las líneas de fuerza alrededor de un imán.

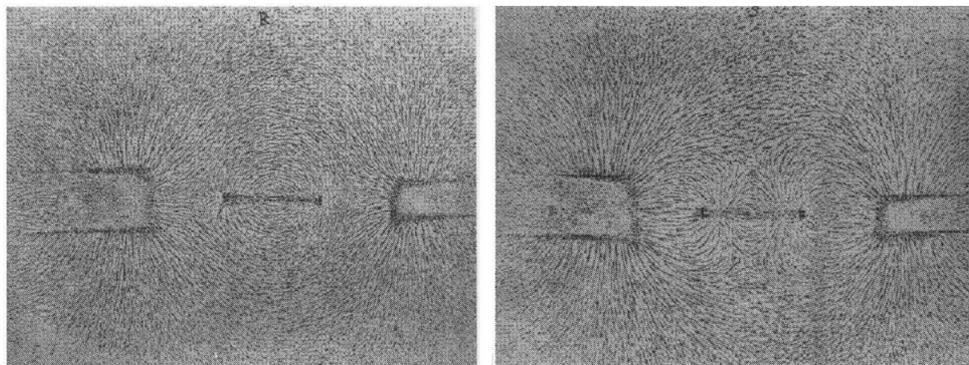


Figura 10: Un par de bocetos de Faraday de los patrones del campo magnético que observó con limaduras de hierro esparcidas sobre un papel colocado sobre varias combinaciones de imanes.

El siguiente dispositivo consta de un recipiente sellado conteniendo glicerina y limadura de hierro en su interior (figura 11). En el centro posee una cavidad cilíndrica por la cual se puede insertar un imán también cilíndrico. Al introducir el imán se podrá observar como la limadura de hierro ira acomodándose para formar patrones correspondientes a las líneas de campo magnético.

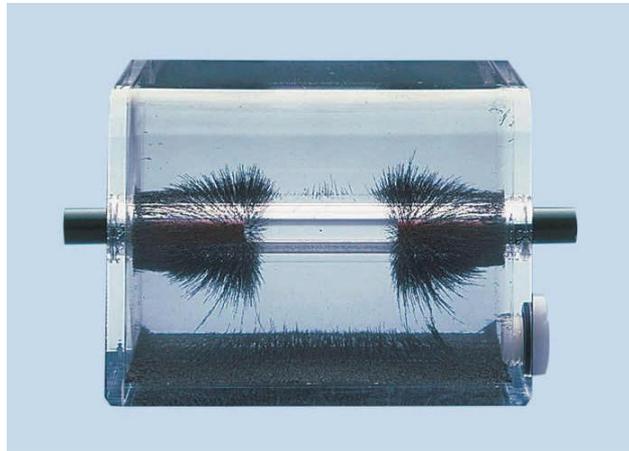


Figura 11. Dispositivo para observar líneas de campo magnético.

Magnetómetro – Gaussímetro/teslametro

Un magnetómetro (gaussímetro/teslametro) es un instrumento para medir la magnitud y dirección de un campo magnético. Los más comunes utilizan un sensor de *efecto Hall*, el cual es conectado a una interfase que, entre otras funciones, se encarga de amplificar la señal generada en el sensor Hall al ser expuesto a un campo magnético, traducirla al valor de dicho campo magnético y hacer posible la visualización en un display.

Los sensores de efecto Hall son pequeños encapsulados con tres o mas patas dependiendo del tipo de sensor (figura 12). En la siguiente experiencia se utilizara una sonda que será conectada a un data-logger. Dicha sonda contiene en su extremo dos sensores de efecto Hall, uno para medir la componente longitudinal del campo magnético y otro para la componente transversal. Este se encuentra alojado en un extremo de una sonda

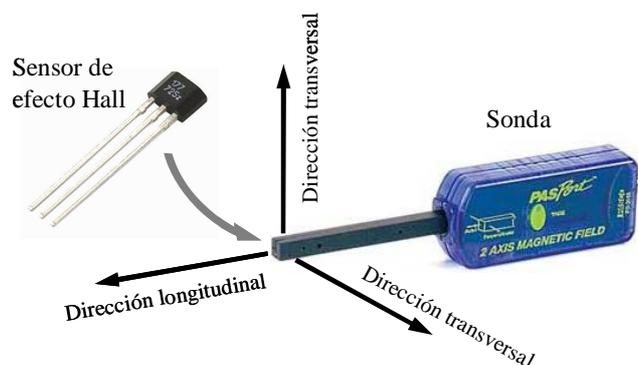


Figura 12: Sensor de efecto Hall y sonda de un magnetómetro Pasco.

Actividades

- 1) En esta experiencia se desea que el estudiante se familiarice con un magnetómetro y aprenda a utilizarlo, midiendo el campo magnético longitudinal y transversal de varios imanes.
- 2) Explicar el funcionamiento de un sensor de efecto Hall.

Bobinas Helmholtz.

En muchos experimentos, como por ejemplo el experimento de J. J. Thomson para encontrar la relación e/m (carga del electrón/masa), es necesario generar un campo magnético uniforme en una determinada región del espacio. Una forma de lograrlo es utilizando un par de bobinas Helmholtz, que consiste de dos bobinas circulares separadas por una distancia (Figura 13).



Figura 13: Par de bobinas Helmholtz.

La región de campo uniforme se encuentra en el centro geométrico del par de bobinas y la uniformidad depende de la separación entre las bobinas, con lo cual existe una separación óptima con la que se alcanza la máxima uniformidad del campo.

Por otro lado, hay casos en los que es necesario generar un *gradiente uniforme* de campo magnético dentro de una región deseada, donde el gradiente en la dirección z del campo está definido por:

$$G_z = \frac{dB_z}{dz}$$

La diferencia con el caso anterior, está en el sentido relativo en que deben circular las corrientes en cada una de las bobinas, además de la separación entre ellas.

Actividades

- 1) Utilizando una sonda Hall, mida el campo magnético longitudinal (B_z) a lo largo de un eje que pasa por el centro de una sola bobina para varias posiciones (ver figura 14).
- 2) Deduzca como deben circular las corrientes en cada bobina para lograr un campo magnético uniforme en el centro geométrico del par de bobinas.
- 3) Deduzca como deben circular las corrientes en cada bobina para lograr un gradiente de campo magnético en el centro geométrico del par de bobinas.
- 4) Utilizando la sonda Hall, mida el campo magnético longitudinal (B_z) a lo largo de un eje que pasa por el centro del par de bobinas para varias posiciones. Repita este

procedimiento para varias separaciones de las dos bobinas. Con esto, determine la separación óptima para obtener un campo uniforme y determinar la región de uniformidad.

5) Repita el paso 4) pero esta vez para obtener un gradiente uniforme.

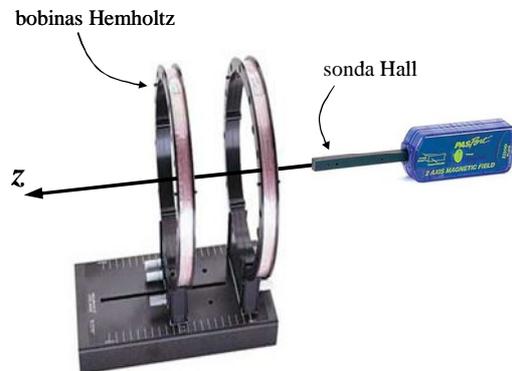


Figura 14. Disposición del par de bobinas Hemholtz y la sonda Hall para la medición del campo magnético.

Referencias

- [1] “*Experimenta circa effectum conflictus electrici in acum magneticam*”, Ørsted (1820).
http://www.ampere.cnrs.fr/ice/ice_page_detail.php?lang=en&type=role&bdd=ampere&table=ampere_text&bookId=63&typeofbookDes=Textessci&pageOrder=4&facsimile=off&search=no
- [2] “*Resistance to the discovery of electromagnetism: Ørsted and the symmetry of the magnetic field*” Martins Roberto de Andrade.
- [3] “*Hidden Attraction: The Mystery and History of Magnetism*”, Gerrit L. Verschuur, Oxford University Press (1993).
- [4] Serbian Journal of Electrical Engineering, Vol. 3, No. 2, 121-130 (2006).
- [5] “*A history of the theories of aether and electricity. From the age of Descartes to the close of the nineteenth century*”, E. T. Whittaker, Dublin University Press series (1910).
- [6] <http://www.archive.org/stream/quarterlyjournal12jour#page/282/mode/2up>
- [7] W. James King, "The Development of Electrical Technology in the 19th Century: 1. The Electrochemical Cell and the Electromagnet," *Contributions from the Museum of History and Technology*, Paper 28, United States National Museum Bulletin 228, (Washington: Smithsonian Institution, 1962), p. 258 and Fig. 41.
- [8] William Ritchie, "Experimental Researches in Electro-Magnetism and Magneto-Electricity," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, Vol. 123, 1833, pp. 313-321.