Electromagnetismo: Magnetismo

1. Introducción

La interacción magnética es otro tipo de interacción que se observa en la naturaleza. Hace más de 2000 años el hombre observó que existían ciertos minerales que tenían la propiedad de atraer pequeños trozos de hierro. Esta propiedad física no estaba relacionada con la interacción gravitatoria y, aparentemente, tampoco con la interacción eléctrica. Se le dio el nombre de *magnetismo*. Un cuerpo magnetizado se conoce como un imán. De hecho, la misma Tierra es un imán inmenso. Un objeto magnetizado es una fuente de campo magnético $\vec{\mathbf{B}}$. Las agujas imantadas se orientan en la dirección del campo magnético producido por el objeto magnético, tal y como se puede observar en la siguiente figura:

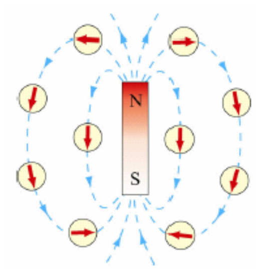


Figura 1. Campo magnético producido por un objeto magnético (imán).

Un objeto imantado consiste en dos polos, los cuales son designados como Norte (N) y Sur (S). Los campos magnéticos son más fuertes en los *polos magnéticos*. Las líneas de campo magnético dejan el polo Norte y se adentran en el polo Sur. Experimentalmente se observa que cuando se colocan dos imanes uno cerca de otro, los polos se repelen si son del mismo signo y se atraen si son de diferente signo tal y como se indica en la siguiente figura:

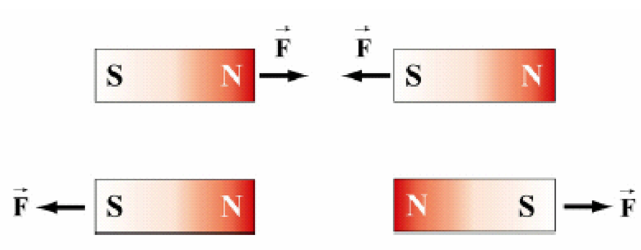


Figura 2. Atracción y repulsión de imanes en función de los polos que se enfrentan.

Es importante destacar que mientras que las cargas eléctricas pueden estar aisladas, es decir se pueden aislar cargas positivas y negativas, los dos polos magnéticos siempre aparecen por pares. Cuando se rompe un imán, se obtienen dos nuevos imanes, cada uno con un polo norte y sur. Los llamados "monopolos magnéticos" no se han podido aislar aunque son objeto de estudio todavía. Sin embargo, la noción de monopolo magnético no es necesaria para describir el magnetismo.

Figura 3. La existencia de monopolos magnéticos aislados no ha podido demostrarse.

Fue en el siglo XIX cuando se estableció la relación entre la interacción eléctrica y la magnética. Hans Christian Oersted demostró en el invierno de 1819-1820 que una corriente eléctrica influye sobre la orientación de una brújula. Este experimento desencadenó una serie de estudios liderados por Ampère y Faraday, entre otros, que sirvieron de base para la teoría moderna del magnetismo, en la que se establece que **la fuente fundamental del campo magnético es una corriente eléctrica**. Así pues, las cargas en movimiento producen campos magnéticos que, a su vez, ejercen una fuerza sobre las cargas en movimiento.

Finalmente, hacia 1860 James Clerk Maxwell desarrolló una teoría completa de la electricidad y el magnetismo, demostrando que las interacciones magnética y eléctrica están íntimamente ligadas y no son más que aspectos diferentes de una propiedad de la materia: las cargas eléctricas. Estas interacciones se consideran conjuntamente bajo la denominación de *interacción electromagnética*. En 1888, esta teoría fue espectacularmente corroborada por medio de la demostración de Hertz de la existencia de las ondas electromagnéticas.

2. Fuerza magnética sobre una carga en movimiento

Para definir el campo magnético en un punto, consideraremos en primer lugar el caso sencillo de una partícula de carga q que se mueve con una velocidad $\vec{\mathbf{v}}$ en el seno de un campo magnético $\vec{\mathbf{B}}$ y analizaremos la fuerza que ésta experimenta. Experimentalmente se observa que:

1. La magnitud de la fuerza magnética $\vec{\mathbf{F}}_B$ ejercida sobre la partícula es proporcional a q, al módulo de $\vec{\mathbf{v}}$ y al módulo de $\vec{\mathbf{B}}$.
2. La fuerza magnética $\vec{\mathbf{F}}_B$ se anula cuando $\vec{\mathbf{v}}$ y $\vec{\mathbf{B}}$ son paralelos. Sin embargo, cuando $\vec{\mathbf{v}}$ forma un ángulo θ con $\vec{\mathbf{B}}$, la dirección de $\vec{\mathbf{F}}_B$ es perpendicular al plano formado por $\vec{\mathbf{v}}$ y $\vec{\mathbf{B}}$, y la magnitud de $\vec{\mathbf{F}}_B$ es proporcional a sin θ.
3. Cuando el signo de la carga de la partícula pasa de positiva a negativa (o viceversa), la dirección de la fuerza magnética también cambia de signo.

De las observaciones anteriores se concluye que la fuerza que experimenta la carga en movimiento viene dada por la siguiente ecuación:

$$\vec{\mathbf{F}}_B = q\vec{\mathbf{v}} \times \vec{\mathbf{B}} \;\rightarrow |\mathbf{F}_B| = q \cdot |\vec{\mathbf{v}}| \cdot |\vec{\mathbf{B}}| \cdot \sin\theta$$

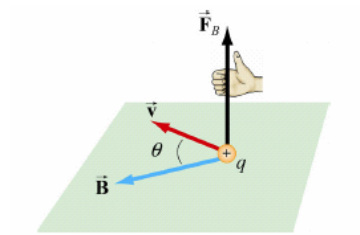


Figura 4. Regla de la mano derecha para establecer la dirección de la fuerza magnética ejercida sobre una carga en movimiento.

La unidad del sistema internacional para el campo magnético es el **tesla** (T)

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

3. Corriente eléctrica

El flujo de cargas eléctricas constituye lo que se conoce como **corriente eléctrica**. Aunque es habitual asociar las corrientes eléctricas a hilos conductores, tanto el haz de electrones de un monitor de vídeo como un haz de iones en un acelerador de partículas constituyen corrientes eléctricas. Supongamos una colección de cargas que se mueven perpendicularmente a una superficie de área *A*, tal y como se indica en la siguiente figura:

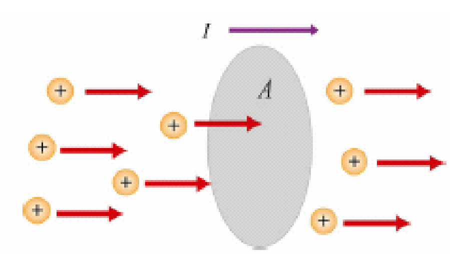


Figura 5. Cargas moviéndose a través de una sección transversal.

La corriente eléctrica se define como el ritmo al cual fluyen las cargas eléctricas a través de cualquier área transversal. Si una carga igual a ΔQ atraviesa una superficie en un intervalo Δt, entonces la intensidad media viene dada por el cociente del incremento de carga entre el incremento del tiempo:

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

La unidad del sistema internacional (SI) de la intensidad de corriente es el amperio (A), con 1 A = 1 coulomb/segundo. El rango de corrientes va de los mega-amperios (rayos) hasta los nanoamperios (corrientes nerviosas). En el límite cuando el incremento de tiempo tiende a cero, la intensidad instantánea de corriente *I* se define como:

$$I = \frac{dQ}{dt}$$

Es necesario asociar al flujo una dirección y el convenio que se adopta es que **la dirección de la corriente corresponde a la dirección en la cual fluyen las cargas positivas**. Sin embargo, es necesario destacar que las cargas que fluyen dentro de los cables están negativamente cargadas y se mueven en la dirección opuesta a la corriente. Las corrientes eléctricas fluyen en los conductores: sólidos (metales, semiconductores), líquidos (electrolitos) y gases (ionizados), sin embargo el flujo se ve impedido en los materiales aislantes.

4. Fuerza magnética en un alambre portador de corriente

Si consideramos un hilo situado en el seno de un campo magnético por el que circula una corriente, la fuerza que se ejerce sobre el conductor es la suma de las fuerzas que actúan sobre cada una de las partículas que constituyen la corriente.

En la siguiente figura se ilustra el efecto que tiene la presencia de un campo magnético sobre un alambre recto y largo. La fuerza magnética sobre un alambre cercano a un imán se pone en evidencia si se observa una desviación cuando se establece una corriente en él. El campo magnético se representa con puntos (·) en la Figura 6 indicando que apunta hacia fuera del papel:

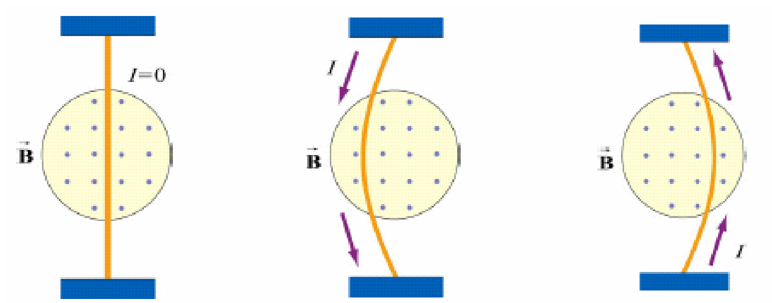


Figura 6. Desviación de un cable portador de corriente por una fuerza magnética.

La fuerza magnética sobre un alambre recto portador de corriente puede deducirse a partir de la fuerza que se ejerce sobre cada carga puntual y su magnitud es:

$$\vec{F} = I \cdot (\vec{l} x \vec{B})$$

5. Movimiento de una carga puntual en el seno de un campo magnético

Puesto que la fuerza magnética que actúa sobre una partícula cargada en movimiento $\vec{\mathbf{F}}_B$ es siempre perpendicular a la velocidad $\vec{\mathbf{v}}$ de la misma, esta fuerza no realiza trabajo sobre la partícula y, por tanto, su energía cinética no se ve alterada. En cambio, la fuerza magnética sí que varía la dirección de la velocidad (aunque no modifica su módulo). La afirmación anterior, se deriva de las siguientes expresiones:

$$dW = \vec{\mathrm{F}}_B \cdot d\vec{\ell} = q(\vec{\mathbf{v}} \times \vec{\mathbf{B}}) \cdot \vec{\mathbf{v}} dt = q(\vec{\mathbf{v}} \times \vec{\mathbf{v}}) \cdot \vec{\mathbf{B}} dt = 0$$

a) Movimiento de una partícula con velocidad perpendicular a un campo magnético uniforme

Puesto que la fuerza magnética es perpendicular a la velocidad de la partícula cargada, ésta actúa como una fuerza centrípeta que da lugar a un movimiento circular. Teniendo en cuenta la segunda ley de Newton se obtiene[1]:

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a}_c \rightarrow \left|\vec{F}\right| = m \cdot \left|\vec{a}_c\right|$$

$$\left|\vec{F}_m\right| = q \cdot v \cdot B = \frac{mv^2}{r}$$

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

donde r es el radio de la circunferencia (órbita circular) descrita por la partícula.

Figura 7. Portador de carga que se desplaza en un plano perpendicular a un campo magnético uniforme

b) Movimiento de una partícula con velocidad arbitraria en un campo magnético uniforme

Si una partícula se mueve en un campo magnético uniforme con una velocidad que tiene tanto componente paralela ($v_{\parallel}$) como perpendicular ($v_{\perp}$) al campo magnético $\vec{\mathbf{B}}$, el movimiento de la componente perpendicular es el descrito en el apartado anterior, mientras que el movimiento debido a la componente paralela no varía como consecuencia de la presencia del campo. Por tanto, la trayectoria resultante es helicoidal.

c) Fuerza de Lorentz y selector de velocidades

Cuando se tiene tanto un campo eléctrico como un campo magnético, la fuerza total que actúa sobre una partícula cargada en movimiento se conoce como *fuerza de Lorentz*:

$$\vec{\mathbf{F}} = q\left(\vec{\mathbf{E}} + \vec{\mathbf{v}} \times \vec{\mathbf{B}}\right)$$

Es posible que la fuerza debida al campo eléctrico se equilibre con la fuerza debida al campo magnético. Para que se equilibren estas fuerzas es necesario que los vectores campo tengan un módulo y dirección adecuados. Hemos estudiado que la dirección de la fuerza eléctrica que actúa sobre una partícula positiva es la misma que la del campo. Asimismo, sabemos que la dirección de la fuerza magnética es perpendicular tanto al campo magnético como a la velocidad de la partícula cargada. Es por tanto necesario

[1] Si no estáis familiarizados con el concepto de componentes intrínsecas de la aceleración es aconsejable que reviséis un libro de texto de Física para entender la aceleración centrípeta. La noción fundamental que hay tras las componentes intrínsecas de la aceleración es la siguiente: cuando una partícula se mueve a lo largo de una trayectoria curva, se considera que en cada pequeño intervalo de tiempo la partícula se mueve siguiendo un arco de circunferencia distinto. El vector aceleración instantánea tiene una componente $a_c = v^2/r$ dirigida hacia el centro de curvatura del arco (indicando cómo varía la dirección del vector velocidad) y una componente $a_t = dv/dt$ tangencial a la curva (indicando cómo varía el módulo de la velocidad).

seleccionar un campo eléctrico y un campo magnético perpendiculares entre sí para que las fuerzas que actúan sobre la partícula se puedan compensar. Éste fue el principio usado por J.J. Thomson para medir la relación carga/masa (*q*/*m*) de los electrones. Este esquema lo podemos apreciar en el siguiente diagrama:

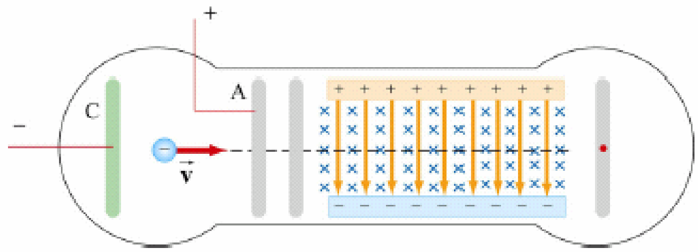


Figura 8. Aparato de Thomson

Para que las dos fuerzas se equilibren, $\vec{\mathbf{F}} = q\left(\vec{\mathbf{E}} + \vec{\mathbf{v}} \times \vec{\mathbf{B}}\right) = 0$, es necesario que sus módulos verifiquen la siguiente relación:

$$\left|q\vec{\mathbf{E}}\right| = \left|q\left(\vec{\mathbf{v}} \times \vec{\mathbf{B}}\right)\right| \to q\mathrm{E} = q\mathrm{vBsin}\theta \to \mathrm{E} = \mathrm{vBsin}\theta$$

Debéis tener en cuenta que para que se produzca el equilibrio de fuerzas, es también necesario la fuerza magnética y la fuerza eléctrica sean antiparalelas (es decir, ¡la igualdad de los módulos es condición necesaria pero no suficiente para garantizar el equilibrio de fuerzas!) Cuando se produce el equilibrio de fuerzas, la partícula cargada atraviesa el espacio en el cual tenemos los campos eléctrico y magnético sin desviarse de su trayectoria original. Un dispositivo de campos de esta forma se denomina **selector de velocidades**. En particular, si asumimos que la partícula entra con una velocidad perpendicular a los dos campos, como por ejemplo se ve en la Figura 8, $\sin\theta = 1$. Por tanto, el módulo de la velocidad debe verificar, en este caso, la siguiente condición:

$$\mathrm{v} = \frac{\mathrm{E}}{\mathrm{B}}$$

para no desviarse de la trayectoria que llevaba originalmente.

6. Ley de Biot-Savart

Las corrientes que aparecen debido al movimiento de las cargas son la fuente de los campos magnéticos. Cuando las cargas se mueven en el seno de un cable y producen una corriente *I*, el campo magnético en cualquier punto *P* debido a la corriente puede ser calculado sumando las contribuciones, $d\vec{\mathbf{B}}$, de diferentes segmentos del cable $d\vec{\mathbf{s}}$.

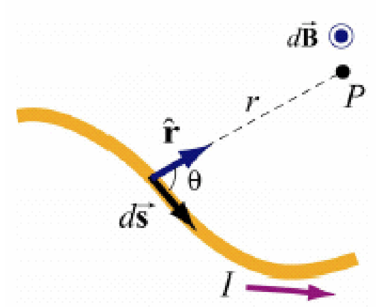


Figura 9. Campo magnético $d\vec{\mathbf{B}}$ en el punto *P* debido al elemento de corriente $I \cdot d\vec{\mathbf{s}}$

En la Figura 9, *r* denota la distancia desde la fuente de corriente al punto *P*. La ley de Biot-Savart da una expresión para la contribución al campo magnético, $d\vec{\mathbf{B}}$, de la fuente de corriente $I \cdot d\vec{\mathbf{s}}$

$$d\vec{\mathbf{B}} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{Id\vec{\mathbf{s}}\times\hat{\mathbf{r}}}{r^2}$$

donde μ_0 es una constante llamada ***permeabilidad del espacio libre*** y toma un valor $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}\,\mathrm{T\cdot m/A}$

Como podéis ver, esta expresión es muy parecida a la ley de Coulomb del campo eléctrico debido a un elemento de carga d*q*:

$$d\vec{\mathbf{E}} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{dq}{r^2}\hat{\mathbf{r}}$$

Para calcular el campo magnético total es necesario integrar a toda la distribución de corriente. Al igual que el campo eléctrico, el campo magnético verifica el principio de superposición.

$$\vec{\mathbf{B}} = \frac{\mu_0}{4\pi}\int\frac{Id\vec{\mathbf{s}}\times\hat{\mathbf{r}}}{r^2}$$

Como podréis apreciar, el cálculo del campo magnético debido a una distribución arbitraria de corriente puede ser sumamente complejo si procedemos a calcularlo directamente a partir de la ecuación de Biot-Savart. Sin embargo, a partir de esta ley, es posible tener una idea cualitativa de cómo será el campo magnético. Esto es particularmente cierto si nos interesa conocer, por ejemplo, cual será la dirección y sentido del campo magnético de algunas distribuciones de corriente que tengan una geometría sencilla. Es para ello necesario interpretar cuál es la contribución de cada elemento de corriente a partir del producto vectorial que aparece en su definición.

7. Ley de Ampere

Las cargas en movimiento o corrientes son la fuente del magnetismo. Esto puede ser demostrado poniendo una brújula cerca de un alambre. La aguja se orienta según la dirección tangencial del camino circular.

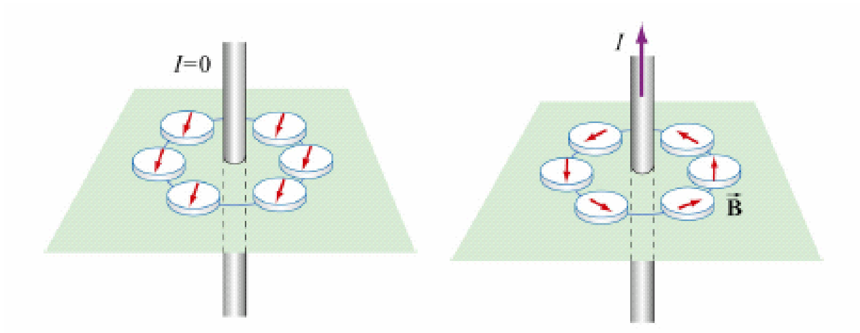


Figura 10. Se observa como por acción de la corriente las agujas se desvían (b), mientras que si no hay paso de corriente, la aguja de la brújula se orienta según el campo magnético terrestre (a).

Vamos a dividir el camino circular de radio r en un número grande de pequeños vectores de ínfima longitud:

$$\Delta\vec{\mathbf{s}} = \Delta s\hat{\mathbf{u}}_{\varphi}$$

que apuntan a lo largo de la dirección tangencial y tienen magnitud Δs. Se puede demostrar a partir de la ley de Biot-Savart, y se observa experimentalmente, que el campo magnético debido a un hilo conductor rectilíneo muy largo por el cual circula una corriente *I*, las líneas de campo son tangenciales a trayectorias circulares. Es posible en ese caso, evaluar de forma sencilla la circulación el campo magnético a lo largo de una trayectoria circular:

En el límite $\Delta\vec{\mathbf{s}} \to \vec{0}$, se obtiene la siguiente expresión:

$$\oint \vec{\mathbf{B}} \cdot d\vec{\mathbf{s}} = \mu_0 I$$

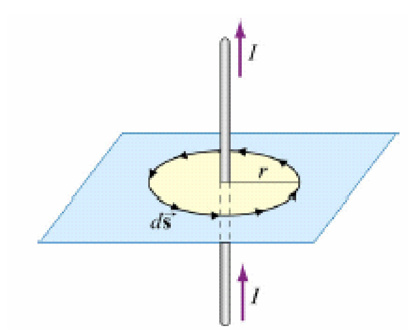


Figura 11. Bucle de Ampere

Esta ley, se puede generalizar a cualquier distribución de corriente, en cuyo caso, es la corriente que aparece en el término de la derecha es la corriente neta que atraviesa la superficie definida por la trayectoria cerrada y que denotaremos por I_{enc}. Esta ley se conoce como ley de Ampere y su expresión es la siguiente:

$$\oint \vec{\mathbf{B}} \cdot d\vec{\mathbf{s}} = \mu_0 I_{enc}$$

Cabe destacar que la ley de Ampere en magnetismo juega un papel análogo a la ley de Gauss en electrostática. Para aplicarlas, el sistema debe poseer también cierta simetría, como pasaba con la ley de Gauss. En el caso de un alambre rectilíneo infinito por el cual circula una corriente, el sistema posee simetría cilíndrica y la ley de Ampere puede ser aplicada. Sin embargo, cuando la longitud del alambre es finita, se debe aplicar la ley de Biot-Savart. La ley de Ampère relaciona el campo magnético con las fuentes del mismo, es decir, las corrientes.

En el caso del alambre rectilíneo infinito por el cual circula una corriente, la ley de Ampère permite obtener de forma sencilla el valor del campo magnético:

$$\oint \vec{\mathbf{B}} \cdot d\vec{\mathbf{s}} = \oint B \cdot ds = B \oint ds = B \cdot 2\pi r = \mu_0 I \rightarrow B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

ya que, como se ha indicado anteriormente, $\vec{\mathbf{B}} \parallel d\vec{\mathbf{s}}$ para cualquier trayectoria circular de radio r centrada en el hilo y el módulo del campo es constante sobre esta trayectoria. La dirección del campo magnético puede deducirse a partir del producto vectorial que aparece en la ley de Biot-Savart. Una regla sencilla de recordar en este caso es que las líneas de campo señalan en la dirección de la que se cierran los dedos de la palma de la mano cuando con el pulgar se señala la dirección de la corriente eléctrica.

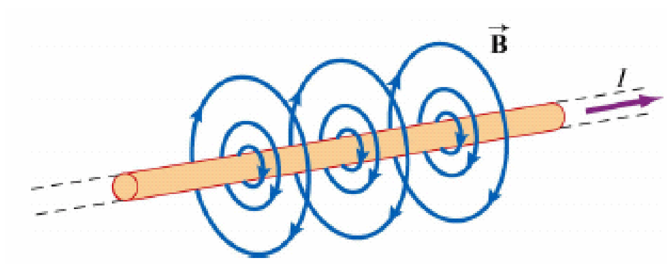


Figura 12. Líneas de campo magnético debidas a un cable infinito llevando una corriente *I*.

8. Ley de inducción de Faraday

Los campos eléctricos y magnéticos considerados hasta ahora son producidos por cargas estacionarias y en movimiento, respectivamente. De este modo, si tenemos un campo eléctrico en un conductor obtenemos una corriente que generará a su vez un campo magnético. La pregunta que se plantea ahora es si un campo eléctrico puede ser generado por un campo magnético. En 1831, Michael Faraday descubrió que, si el campo magnético variaba en el tiempo, se creaba un campo eléctrico. El fenómeno recibió el nombre de **inducción electromagnética**. La siguiente ilustración muestran los experimentos de Faraday.

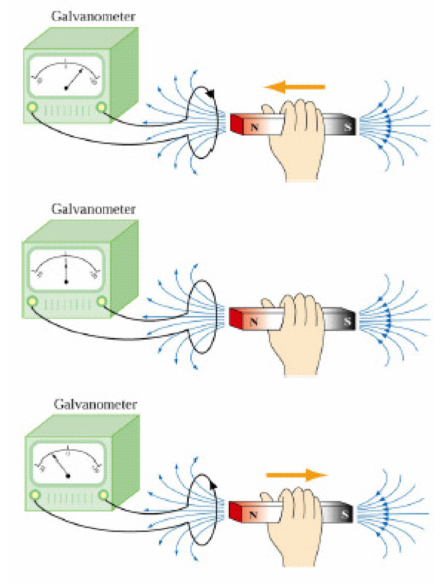


Figura 13. Inducción magnética

Faraday mostró que no se registraba corriente en el galvanómetro cuando la barra magnética no se movía respecto a la espira. Sin embargo, se inducía una corriente en la espira cuando existía un movimiento relativo entre la barra magnética y la espira. En particular, la aguja del galvanómetro se mueve en una determinada dirección cuando la sustancia magnética se aproxima al bucle, y en la opuesta cuando se aleja.

Los experimentos de Faraday demostraron que se induce una corriente eléctrica en la espira alterando el campo magnético en las proximidades de la espira. De esta manera la espira se comporta como si estuviese conectada a una fem. Experimentalmente se encuentra que la fem inducida depende de la variación del flujo de campo magnético a través de la espira. Esta afirmación es más general que la anterior ya que el flujo magnético puede variarse de distintas formas y no sólo variando el campo magnético.

a) Flujo magnético

Consideramos un campo magnético atravesando una superficie *S*, tal y como se muestra en la siguiente ilustración.

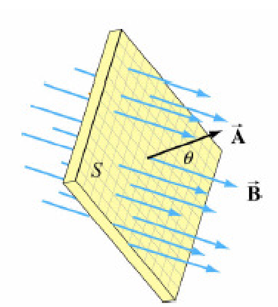


Figura 14. Flujo magnético a través de una superficie

El vector área se define como:

$$\vec{\mathbf{A}} = A\,\hat{\mathbf{n}}$$

donde A es el área de la superficie y está multiplicada por el vector unitario normal a esa superficie. El flujo magnético a través de la superficie viene dado por:

$$\Phi_B = \vec{\mathbf{B}}\cdot\vec{\mathbf{A}} = B\cdot A\cdot\cos\theta$$

donde el flujo magnético Φ_B, se define como el producto escalar entre el campo magnético $\vec{\mathbf{B}}$ y el vector área, que puede ser descompuesto en el producto de un escalar A por un vector perpendicular $\hat{\mathbf{n}}$ al área que representa. En general, el flujo se calcula como una integral

$$\Phi_B = \iint_S \vec{\mathbf{B}}\cdot d\vec{\mathbf{A}}$$

La unidad del sistema internacional del flujo magnético es el weber (Wb): 1 Wb = 1 $T\cdot m^2$.

La Ley de inducción de Faraday puede ser expresada como sigue:

"La fem inducida ε en una espira es proporcional a la variación negativa de flujo magnético"

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

Si sustituimos la expresión del campo magnético en la expresión del flujo magnético obtenemos:

$$\varepsilon = -\frac{d}{dt}(BA\cos\theta) = -\left(\frac{dB}{dt}\right)A\cos\theta - B\left(\frac{dA}{dt}\right)\cos\theta + BA\sin\theta\left(\frac{d\theta}{dt}\right)$$

Lo que significa que la fem inducida puede variar básicamente por tres motivos

(1) Varía el campo magnético con el tiempo

Figura 15. Se induce una fem variando el valor del campo magnético, es decir si el campo magnético va disminuyendo se induce una corriente que trata de compensar la disminución de flujo magnético.

(2) El área varía con el tiempo.

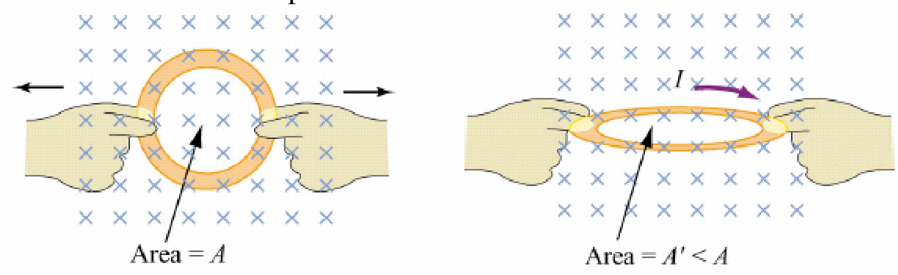


Figura 16. Se induce una fem al cambiar el área de la espira, ya que también se varía el flujo magnético, en este caso como el área ha disminuido, se induce una corriente que trata de compensar la disminución de flujo magnético.

(3) Variando el ángulo entre el campo magnético y el vector área con el tiempo.

Figura 17. Se induce una fem como consecuencia de la variación del ángulo entre el campo magnético y el vector área.

9. Ley de Lenz

La dirección y el sentido de circulación de la corriente inducida vienen determinados por la ley de Lenz.

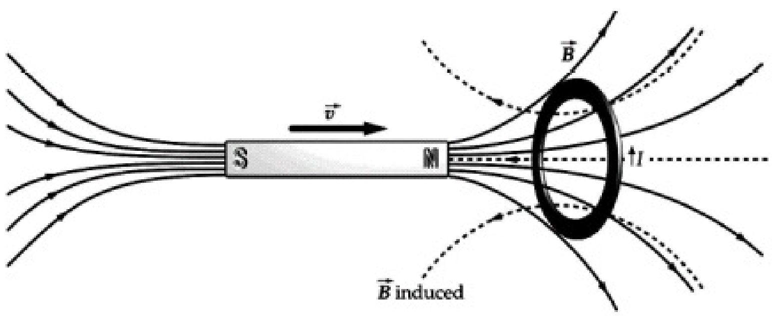
Formulación 1: "La fem y la corriente inducidas poseen una dirección y sentido tal que tienden a oponerse a la variación que las produce."

Formulación 2: "Cuando se produce una variación de flujo magnético que atraviesa una superficie, el campo magnético debido a la corriente inducida genera un flujo magnético sobre la misma superficie que se opone a dicha variación."

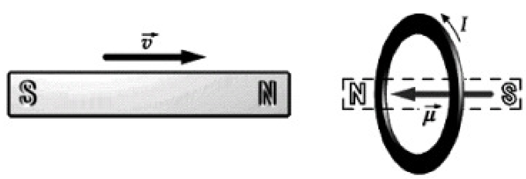
Veamos un ejemplo de cómo se aplica la ley de Lenz. Consideramos la situación en que una barra magnética (i.e. un imán) se mueve hacia una espira conductora con su polo norte tal y como se observa en la Figura 18. El movimiento del imán induce una fem y una corriente en la espira. La ley de Lenz establece que esta fem y la corriente tienen una dirección tal que se opone al movimiento del imán. Como podemos observar, el número de líneas que cruzan la superficie definida por el perímetro de la espira aumenta al aproximar el imán a la espira, aumentando así el flujo magnético a través de la misma.

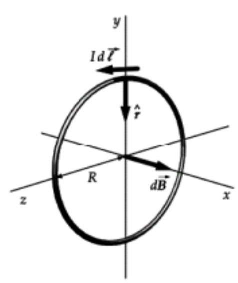
Una espira por la cual circula una corriente se comporta como un imán y puede caracterizarse mediante una magnitud que llamamos momento magnético. Este curso no estudiaremos el momento magnético pero, para razonar el sentido de circulación que debe tener la corriente según la formulación 1 de la ley de Lenz, intuitivamente podemos entender que la espira se comporta como un imán con la polaridad indicada en la figura. De este modo, aparece una fuerza magnética tal que repele la barra imantada que se estaba acercando. Esto es consecuencia de que, como sabemos, los polos iguales se repelen. La polaridad del imán que asociamos a la espira podemos deducirla a partir de la dirección del campo magnético, en la región interior a la misma, generado por una espira por la cual circula una corriente *I*. Tal dirección viene dada por la ley de Biot-Savart (ver Figura 18(c), aplicando la regla de la mano derecha, y coincide con la dirección indicada para el campo creado por el imán de la Figura 18(b). Recordad que, tal y como se indica en la Figura 18(a), la líneas de campo en los imanes salen por el polo Norte y entran por el polo Sur.

Si consideramos la formulación 2, podemos razonar en términos de la variación del flujo magnético. Nos preguntamos por tanto, ¿cómo deben ser la fem y corriente inducidas para generar un campo magnético que compense la variación de flujo inducida por el movimiento del imán? En este caso, como el número de líneas de campo que cruzan la superficie de la espira (hacia la derecha) aumenta al acercar el imán, se debe generar un campo en sentido contrario de modo que crucen líneas de campo en sentido contrario (hacia la izquierda) a modo de compensación (ver las líneas de campo discontinuas en la Figura 18(a)).



(a)





(b) (c)

Figura 18. (a) Una barra magnética se mueve hacia una espira de modo que aumenta el número de líneas de campo magnético que cruzan la superficie definida por la espira y, por tanto, aumenta el flujo magnético. (b) Podemos asociar un momeno magnético a la espira, intuitivamente se entiende como si la espira se comportase como un imán con la polaridad indicada en la figura, de modo que disminuye el flujo magnético o, visto de otro modo, se repele la barra imantada que se estaba acercando. (c) Determinación de la dirección del campo magnético creado por una espira por la cual circula corriente *I* (Figuras adaptadas de P. A. Tipler and G. Mosca «Physics for Scientists and Engineers»).

La dirección de la corriente inducida viene determinada por la Ley de Lenz:

"La corriente inducida produce campos magnéticos que tienden a oponerse al cambio en el flujo magnético que induce estas corrientes".

10. Ecuaciones de Maxwell

Alrededor de 1860, el físico escocés James Clerk Maxwell sintentizó las leyes conocidas hasta ese momento que explicaban los fenómenos eléctricos y magnéticos de una forma matemáticamente concisa que dio lugar a las **ecuaciones de Maxwell**. Las ecuaciones de Maxwell desempeñan en el electromagnetismo clásico un papel similar al de las leyes de Newton en la mecánica clásica.

Las ecuaciones de Maxwell:

- **relacionan** los campos eléctricos y magnéticos con las fuentes que los crean (las cargas eléctricas, las corrientes y los campos eléctricos y magnéticos variables en el tiempo)
- **explican** los resultados experimentales encontrados en el electromagnetismo clásico, y
- **predicen** la existencia de ondas electromagnéticas: campos eléctricos y magnéticos que viajan en el espacio.

Ecuaciones de Maxwell

$$\oint\!\!\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{\text{int}}}{\varepsilon_0} \qquad (1)$$

$$\oint\!\!\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \qquad (2)$$

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{\ell} = -\frac{d}{dt} \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \qquad (3)$$

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \mu_0 \cdot I + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{d}{dt} \iint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} \qquad (4)$$

(1) **Ley de Gauss**. Relaciona el campo eléctrico con las cargas que crean este campo. Explica que las líneas de campo se originan (fuentes) en cargas positivas y acaban (sumideros) en cargas negativas.
(2) **Ley de Gauss del magnetismo**. Explica que las líneas de campo magnético son cerradas y que no existen sumideros ni manantiales de líneas de campo magnético.
(3) **Ley de Faraday**. Relaciona el campo eléctrico con el flujo de campo magnético variable que crea dicho campo. Predice que un flujo magnético variable en el tiempo produce un campo eléctrico.
(4) **Ley de Ampère-Maxwell**. Relaciona el campo magnético con la corriente eléctrica o un campo eléctrico variable en el tiempo.

11. Ondas electromagnéticas y espectro electromagnético

Maxwell demostró que las anteriores ecuaciones pueden combinarse de modo que dan lugar a una ecuación de onda que deben satisfacer los campos eléctricos y magnéticos. Fue Heinrich Hertz quien en 1887 demostró experimentalmente la existencia de estas ondas. Las telecomunicaciones tal y como las conocemos hoy en día se basan en la existencia de las ondas electromagnéticas. Entre las ondas electromagnéticas se incluyen la luz, las ondas de radio y televisión, los rayos X y las microondas. Los distintos tipos de onda se diferencian en su longitud de onda y frecuencia. En la Figura 19 encontraréis cómo se divide el espectro electromagnético en distintas regiones que reciben nombres usados de forma coloquial. Por ejemplo, el ojo humano es sensible a la radiación electromagnética con λ **comprendida entre 400 nm y 700 nm aproximadamente, región que se denomina luz visible**.

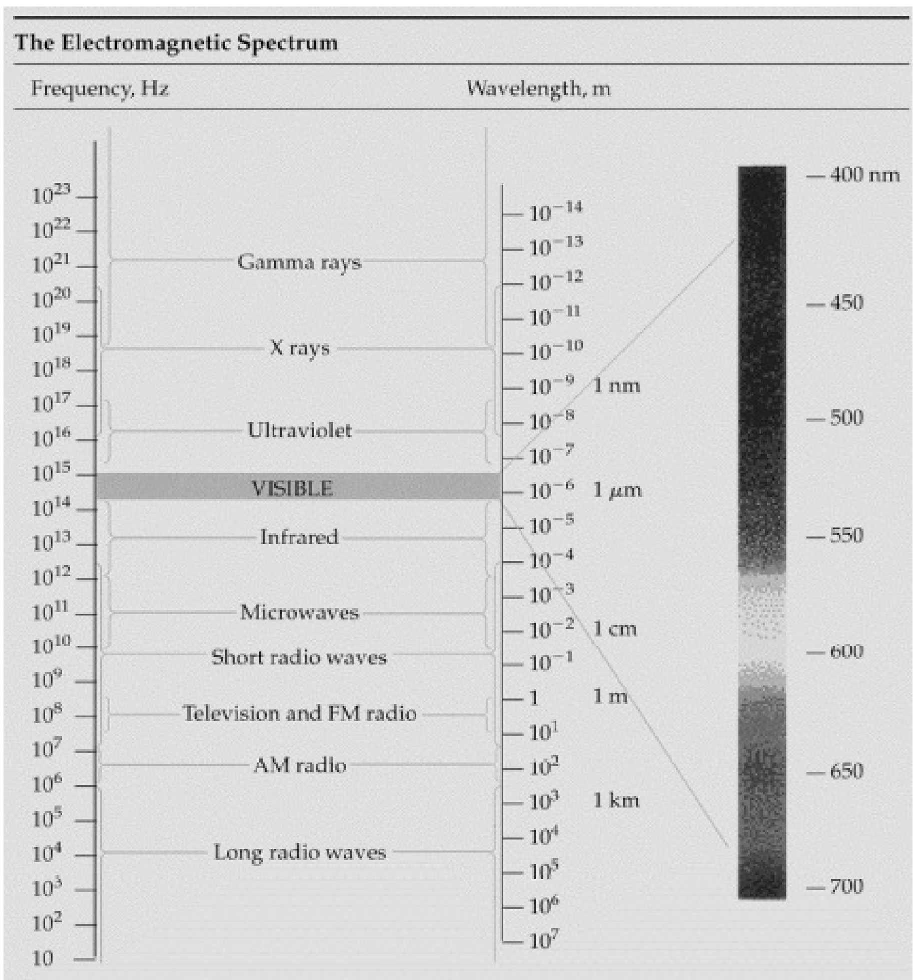


Figura 19. Espectro electromagnético.