

LEYES DEL ELECTROMAGNETISMO

-AMPÉRE

- Ley de Ampère
 - Aplicada a una corriente rectilínea
 - Aplicada a un solenoide
 - Aplicada a un toroide

-FARADAY Y LENZ

- Ley de Faraday y Lenz
- Aportación de Faraday
- Aportación de Lenz
- Corrientes inducidas y f.e.m
- F.e.m. generada por un campo variable
- F.e.m. generada por una superficie variable
- F.e.m. generada por un ángulo variable

-MAXWELL

- Corriente de desplazamiento de Maxwell
- Ecuaciones de Maxwell

-BIOT Y SAVART

- Ley Biot y Savart
- Campo creado por un elemento de i
- Campo creado por una corriente
- Campo creado por una espira

-GAUSS

- Ley de Gauss para el campo magnético

-LORENTZ

- Ley de Lorentz
- Fuerza sobre una carga en movimiento
- Fuerza sobre corrientes eléctricas
- Fuerzas sobre corrientes rectilíneas
- Fuerzas sobre corrientes paralelas
- Fuerza sobre una espira rectangular

AMPÉRE



Figura 1

André-Marie Ampère (Figura 1). nació en Lyon, Francia el 20 de enero de 1775. Fue considerado como uno de los descubridores del electromagnetismo. Es conocido por sus importantes aportes al estudio de la corriente eléctrica y el magnetismo, que contribuyeron, junto con los trabajos del danés Hans Christian Oersted, al desarrollo del electromagnetismo. Sus teorías e interpretaciones sobre la relación entre electricidad y magnetismo se publicaron en 1822, en su Colección de observaciones sobre electrodinámica y en 1826, en su Teoría de los fenómenos electrodinámicos.

Ampère descubrió las leyes que hacen posible el desvío de una aguja magnética por una corriente eléctrica, lo que hizo posible el funcionamiento de los actuales aparatos de medida. Descubrió las acciones mutuas entre corrientes eléctricas, al demostrar que dos conductores paralelos por los que circula una corriente en el mismo sentido, se atraen, mientras que si los sentidos de la corriente son opuestos, se repelen. La unidad de intensidad de corriente eléctrica, el amperio, recibe este nombre en su honor. Ampère falleció en Marsella y fue enterrado en el cementerio de Montmartre, París.

Ley de Ampère

La ley de Ampère tiene una analogía con el teorema de Gauss aplicado al campo eléctrico. De la misma forma que el teorema de Gauss es útil para el cálculo del campo eléctrico creado por determinadas distribuciones de carga, la ley de Ampère también es útil para el cálculo de campos magnéticos creados por determinadas distribuciones de corriente.

La ley de Ampère dice:

"La circulación de un campo magnético a lo largo de una línea cerrada es igual al producto de μ_0 por la intensidad neta que atraviesa el área limitada por la trayectoria".

Que podemos expresar tal y como se muestra en la Ecuación 1.

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \cdot i \quad (1)$$

Tenemos que tener en cuenta que esto se cumple siempre y cuando las corrientes sean continuas, es decir, que no comiencen o terminen en algún punto finito.

Apliquemos la ley de Ampère a algunas distribuciones de corriente para poder comprender mejor su utilidad.

Aplicada a una corriente rectilínea

Para calcular el valor del campo B en un punto P a una distancia r de un conductor Figura 2 seguiremos los siguientes pasos.

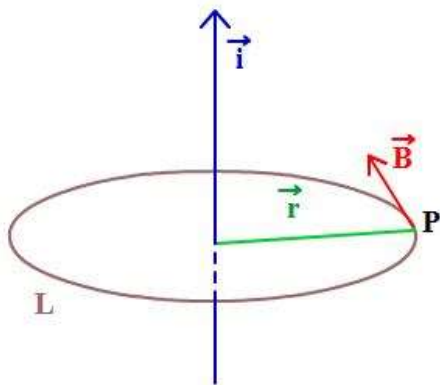


Figura 2

Primero escogeremos una línea cerrada que pase por P, dicha línea ha de ser tal que el cálculo de la circulación sea sencillo. En este caso se ha escogido una circunferencia de radio r con centro en el conductor, por lo cual todos los puntos del contorno están a la misma distancia que el punto P del conductor, y el valor de B toma el mismo valor en dicho contorno coincidiendo su dirección con el de dl.

Una vez escogida la línea calculamos la circulación del campo a lo largo de la línea escogida (Ecuación 2).

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \oint \vec{B} \cdot d\vec{l} \cdot \cos(0) = \vec{B} \cdot \oint d\vec{l} = \vec{B} \cdot 2 \cdot \Pi \cdot r \quad (2)$$

Si ahora aplicamos la ley de Ampère (Ecuación 1). e igualamos tenemos:

$$\vec{B} \cdot 2 \cdot \Pi \cdot r = \mu_0 \cdot i \Rightarrow \vec{B} = \frac{\mu_0 \cdot i}{2 \cdot \Pi \cdot r} \quad (3)$$

Si se escogiese una circunferencia de radio r y una línea cerrada cualquiera, el resultado sería el mismo pero los cálculos se complicarían innecesariamente.

Aplicada a un solenoide

En un solenoide también se puede calcular el valor de B en un punto interior aplicando la ley de Ampère.

Para ello se siguen los mismos pasos que en el caso anterior.

Primero tomamos una línea cerrada donde la circulación sea fácil de calcular, en este caso utilizaremos la mostrada en la Figura 3.

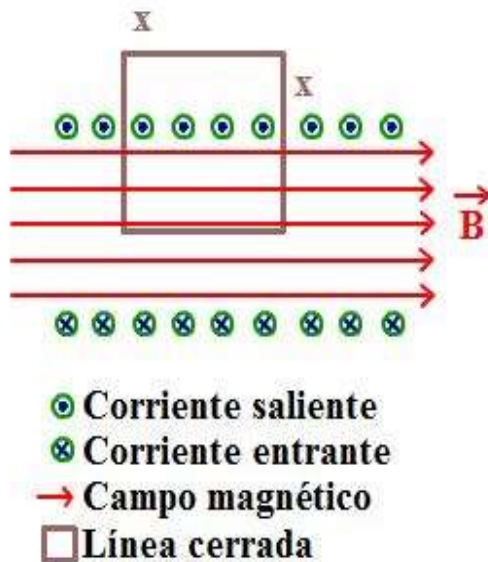


Figura 3

La circulación a lo largo del cuadrado de lado x se obtiene sumando las circulaciones de todos sus lados. Pero si estudiamos los lados por separado nos encontramos con que sólo en el lado inferior la circulación no es nula. En el lado superior el campo B es cero y en los laterales el campo es perpendicular a los lados y por tanto también tienen circulación nula (Figura 4).

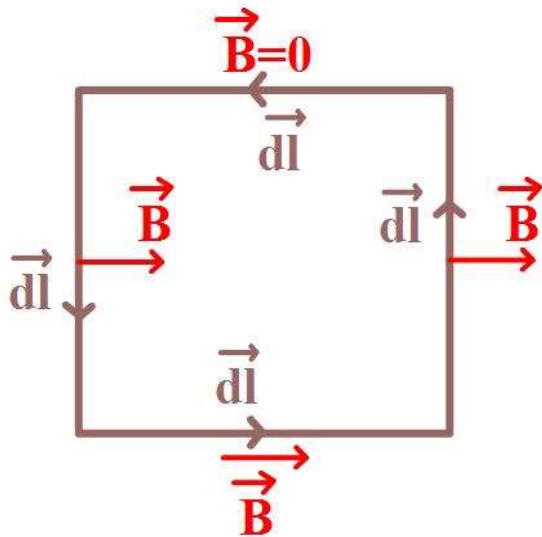


Figura 4

Por tanto nos queda como circulación total la Ecuación 4

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = B \cdot x \quad (4)$$

Si N es el número de espiras del solenoide y l su longitud, $\frac{N \cdot x}{l}$ será el número de espiras que atraviesan la superficie limitada por el cuadrado de lado

x , y, por tanto, $\frac{i \cdot N \cdot x}{l}$ la corriente total que fluye por la superficie enmarcada por la línea inferior del cuadrado.

Si ahora aplicamos la ley de Ampère y sustituimos el valor de i :

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \cdot i \Rightarrow \vec{B} = \oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \cdot \frac{i \cdot N \cdot x}{l} \quad (5)$$

Iguando los resultados de la Ecuación 4 y Ecuación 5 obtenemos:

$$B \cdot x = \mu_0 \cdot \frac{i \cdot N \cdot x}{l} \Rightarrow B = \mu_0 \cdot \frac{i \cdot N}{l} \Rightarrow B = \mu_0 \cdot i \cdot n \quad (6)$$

Donde se puede comprobar que B no depende ni de la longitud del solenoide ni del diámetro, sino únicamente de la corriente que pasa por las espiras y lo juntas que estén estas, es decir el numero de espiras por unidad de longitud (n).

Aplicada a un toroide

Elegimos como camino cerrado una circunferencia de radio r , cuyo centro está en el eje del toroide, y situada en su plano meridiano. De esta forma el campo magnético B es tangente a la circunferencia de radio r y tiene el mismo módulo en todos los puntos de dicha circunferencia.

Aplicaremos la ley de Ampère y calcularemos la intensidad para los siguientes valores de r :

- Fuera del núcleo con $r < r_i$
- En el interior del núcleo $r_i < r < r_e$
- Fuera del núcleo con $r > r_e$

Fuera del núcleo con $r < r_i$

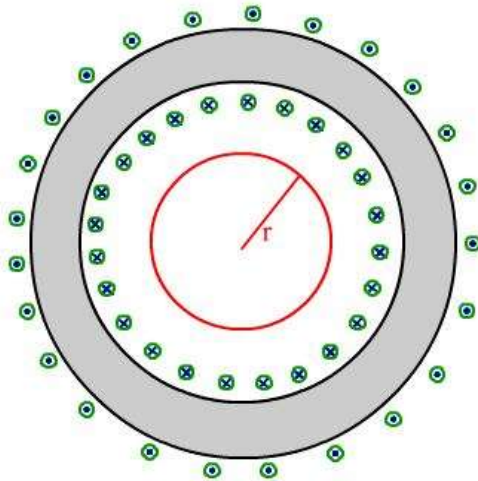


Figura 5

Como se puede observar en este caso la intensidad que atraviesa la circunferencia de radio r es cero por lo tanto aplicando Ampere:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \oint B \cdot dl \cdot \cos(\varphi) = B \cdot 2\pi r = \mu_0 \cdot N \cdot i$$

$$B \cdot 2\pi r = \mu_0 \cdot N \cdot 0 = 0$$

$$B \cdot 2\pi r = 0 \Rightarrow B = 0 \quad (7)$$

En el interior del núcleo $r_i < r < r_e$

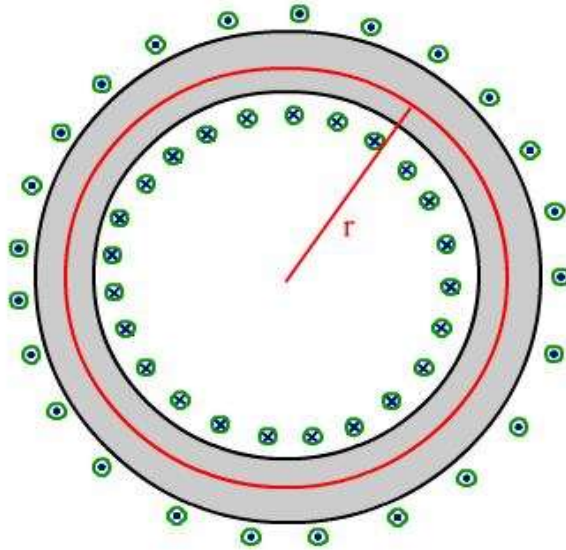


Figura 6

Cada espira del toroide atraviesa una vez el camino cerrado (la circunferencia de color rojo de la figura siguiente) la intensidad será $N \cdot I$, siendo N el número de espiras e I la intensidad que circula por cada espira, con lo cual:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \oint B \cdot dl \cdot \cos(\varphi) = B \cdot 2\pi r = \mu \cdot N \cdot i$$

$$B \cdot 2\pi r = \mu \cdot N \cdot i$$

$$B = \frac{\mu \cdot N \cdot i}{2\pi r} \quad (8)$$

Fuera del núcleo: $r > r_e$

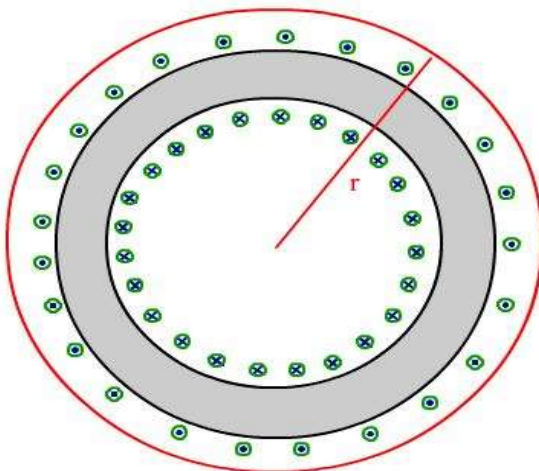


Figura 7

Cada espira del toroide atraviesa dos veces el camino cerrado (circunferencia roja de la figura) transportando intensidades de sentidos opuestos.

La intensidad neta es $N \cdot I - N \cdot I = 0$, y $B = 0$ en todos los puntos del camino cerrado.

Por lo tanto:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \oint B \cdot dl \cdot \cos(\varphi) = B \cdot 2\pi r = \mu_0 \cdot N \cdot i$$

$$B \cdot 2\pi r = \mu_0 \cdot N \cdot 0$$

$$B = 0 \quad (9)$$

De los cálculos anteriores se deduce que el campo magnético generado por un toroide queda confinado en el interior del mismo.

BIOT Y SAVART

Jean-Baptiste Biot



Figura 8

Jean-Baptiste Biot (Figura 8) fue un físico, astrónomo y matemático francés. Nació el 21 de abril de 1774, en París y falleció el 3 de febrero de 1862 en la misma ciudad.

Jean-Baptiste Biot fue la primera persona en descubrir las propiedades ópticas únicas de la mica, y del mineral basado en la mica denominado biotita (el nombre del mineral se puso en su honor). A comienzos del siglo XIX estudió la polarización de la luz cuando pasa a través de soluciones químicas.

Gracias a su colaboración con el físico Félix Savart (1791-1841) elaboró la Ley de Biot-Savart que describe cómo se genera un campo magnético mediante una corriente eléctrica estacionaria.

En 1804 elaboró un globo y ascendió con Joseph Gay-Lussac a una altura de cinco kilómetros en lo que sería las primeras investigaciones sobre la atmósfera terrestre.. En honor a sus descubrimientos, Biott es una de las personas que posee el honor de tener su nombre en un cráter de la Luna.

Félix Savart

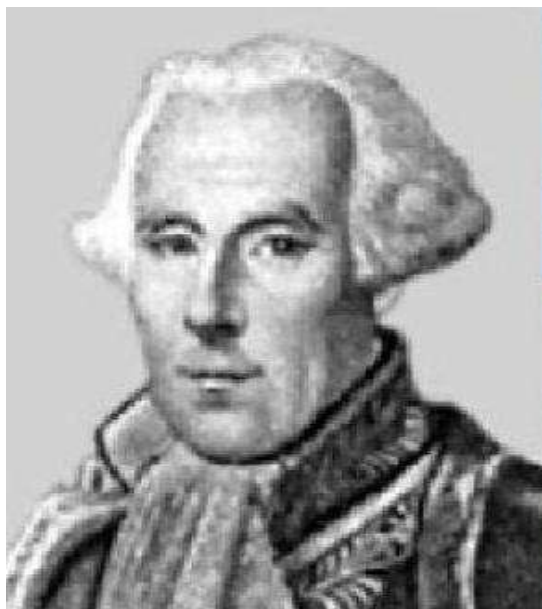


Figura 9

Félix Savart (Figura 5.28) fue un físico, médico y profesor francés. Nació el 30 de junio de 1791 en Mézières (Francia) y falleció el 16 de marzo de 1841 en París. Entre 1808 y 1810 estudió en un hospital en Metz. Luego trabajó como cirujano en un regimiento de Napoleón. En 1814 fue dado de baja y se dirigió a Estrasburgo a terminar sus estudios de medicina. Viajó a París en 1819, con la idea de conseguir publicar su traducción (del latín al francés) del texto *De medicina* , de Celso (siglo I). Realizó investigaciones sobre acústica y mecánica de fluidos e ideó un instrumento (rueda dentada de Savart) para medir la frecuencia de una vibración acústica. En París conoció a Jean Baptiste Biot (1774-1862), con quien discutió acerca de la acústica de los instrumentos musicales, y a quien presentó su violín trapezoidal. Colaboró con el físico francés Jean Baptiste Biot en el análisis de los campos magnéticos producidos por corrientes rectilíneas. En 1820 ambos enunciaron la ley que lleva sus nombres, la ley de Biot- Savart.

Ley Biot y Savart

La ley de Biot-Savart permite calcular el campo magnético B creado por un circuito de forma cualquiera recorrido por una corriente de intensidad i . Dicha ley se enuncia como sigue:

“el módulo del campo magnético, B , producido por una corriente rectilínea e indefinida, es directamente proporcional a la intensidad de la corriente e inversamente proporcional a la distancia.”

$$B = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \oint \frac{\vec{u}_t \times \vec{u}_r}{r^2} dl \quad (10)$$

Matemáticamente puede escribirse como la *Ecuación 10* donde B es el campo magnético a calcular en el punto dado, $\vec{u}_t$ es el vector unitario tangente al circuito y que indica la dirección de la corriente en el elemento dl. $\vec{u}_r$ es el vector unitario que señala la posición del punto respecto del elemento de corriente y μ_0 la permeabilidad del vacío.

Cálculo del campo producido por un elemento de corriente

Mediante la ley de Biot y Savart es posible calcular la aportación al campo B de un elemento de corriente en un punto P (Figura 10). para ello se utilizara la

Ecuación 11, donde θ es el ángulo entre $d\vec{l}$ y $\vec{r}$, y μ_0 es la permeabilidad del vacío.

La dirección de $d\vec{B}$ viene determinada por el producto vectorial de $d\vec{l} \times \vec{r}$.

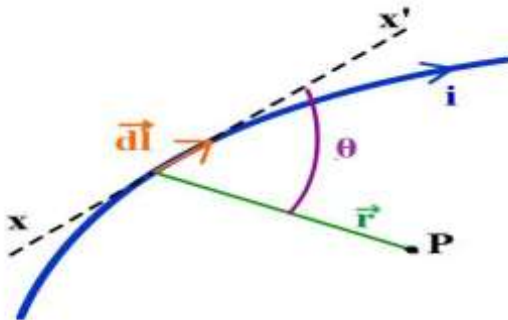


Figura 10

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \frac{dl \cdot \text{sen}(\theta)}{r^2} \quad (11)$$

La expresión vectorial en este caso viene dada por la ecuación siguiente:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3} \quad (12)$$

Cálculo del campo producido por una corriente rectilínea

La ley de Biot y Savart e puede emplear para calcular el campo creado en un punto por una corriente rectilínea indefinida (Figura 11). Para ello habrá que considerar el conductor descompuesto en tramos muy pequeños, es decir, en elementos $d\vec{l}$ para luego poder integrarlos.

Partiendo de la Ecuación 12 e integrando obtenemos la Ecuación 13.

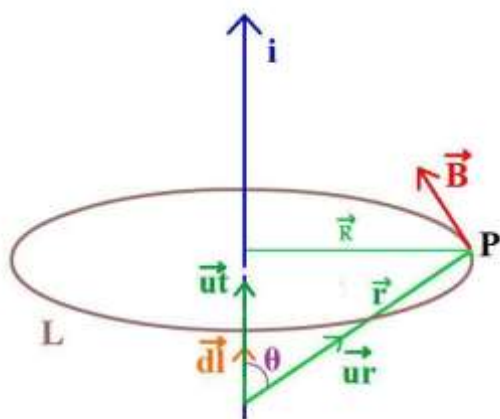


Figura 11

$$B = \frac{\mu_0 i}{4\Pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\text{sen}(\theta)}{r^2} dx = \frac{\mu_0 i}{4\Pi R} \int_0^\Pi \text{sen}(\theta) \cdot d\theta = \frac{\mu_0 i}{2\Pi R} \quad (13)$$

El campo magnético B producido por el hilo rectilíneo en el punto P tiene una dirección que es perpendicular al plano formado por la corriente rectilínea y el punto P , y sentido el que resulta de la aplicación de la regla del sacacorchos al producto vectorial $d\vec{l} \times \vec{r}$.

Cálculo del campo producido por una espira

El campo magnético en el centro de una espira circular por la que circula una corriente i se puede calcular también a partir de la Ley de Biot y Savart. Para ello se procede como en los casos anteriores. Primero se descompone la espira en tramos pequeños o en elementos de corriente $d\vec{l}$. El campo $d\vec{B}$ viene determinado por la Ecuación 5.39. En nuestro caso $\theta = 90^\circ$ y el radio de la espira $r=R$ (Figura 11) con lo cual nos queda la Ecuación 14.

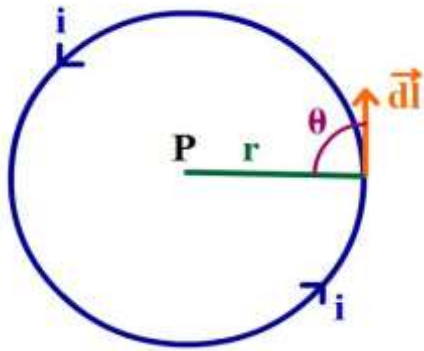


Figura 11

$$dB = \frac{\mu_0 i}{4\pi R^2} dl \quad (14)$$

Integrando la Ecuación 14. Tenemos:

$$B = \frac{\mu_0 i}{4\pi R^2} \int_0^{2\pi R} dl = \frac{\mu_0 i}{4\pi R^2} \cdot 2\pi R = \frac{\mu_0 i}{2R} \quad (15)$$

La dirección del campo en el centro de la espira es perpendicular al plano de la espira y su sentido viene dado por la regla del sacacorchos o regla de la mano derecha.

FARADAY Y LENZ

Michael Faraday



Figura 12

Michael Faraday (Figura 12) nació el 22 de septiembre de 1791 en Newington Surrey al sur de Londres. Su niñez se caracterizó por la pobreza y una educación formal, a los trece años comenzó a trabajar como ayudante, para el encuadernador y bibliotecario Mr. G.Reibau, y al año siguiente ya fue

ascendido a aprendiz del oficio. Se puede decir que fue en este momento cuando empezó el verdadero proceso de educación de Faraday, ya que siendo autodidacta, por su esfuerzo, paso a ser uno de los más grandes experimentadores del siglo XIX.

Pronto, fascinado por la electricidad, fabricó una pila voltaica con la que desarrolló diversos experimentos electroquímicos, aprovecha las lecciones del célebre químico Sir Humphry Davy (descubridor del sodio, potasio, el bario, el calcio y otros elementos), ocupando una plaza de ayudante en el laboratorio de este destacado investigador paso de simple ayudante del maestro A sucesor en el Instituto Real. La celebridad de Faraday aumentó extraordinariamente en la década de 1820, al conocerse su gran pericia como químico analítico (aisló el benceno por vez primera) y físico experimental.

Durante sus experimentos destinados a demostrar que la electricidad era atribuida a partículas eléctricas en movimiento, y no un fluido que se desplaza entre cuerpos (tal como defendían los científicos de la época) descubrió lo que se dio en llamar electrolisis.

En 1820, el danés Hans Christian había determinado la primera conexión empírica entre la electricidad y el magnetismo, y Faraday consiguió esbozar las leyes generales que regían el comportamiento electromagnético de la materia. Atribuyéndolo a partículas eléctricas en movimiento y no a un fluido continuo, e inventó la noción al campo energético como un espacio surcado de líneas de fuerza invisibles que provocan los movimientos por diferencias de energía.

Si Oersted y también André Marie Ampère, habían obtenido magnetismo por electricidad, ¿por qué no se podría invertir el procedimiento y producir electricidad por magnetismo? Un imán es susceptible de engendrar magnetismo por influencia en un trozo cercano de acero, efecto que se explica en la doctrina de Ampère por ser el magnetismo un conjunto de corrientes moleculares. Si corrientes microscópicas, se pregunta Faraday, producen magnetismo en el hierro, es decir, otras corrientes microscópicas, ¿por qué una corriente normal, macroscópica, no provocará corrientes similares en un conductor vecino? La convicción de Faraday de que la naturaleza daría una respuesta afirmativa a su pregunta, fue coronada por el éxito en 1831, al descubrir la inducción. En esa época, el científico danés Hans Christian Oersted descubrió los campos magnéticos generados por corrientes eléctricas. Basándose en estos experimentos, Faraday logró desarrollar el primer motor eléctrico conocido. En 1831 colaboró con Charles Wheatstone e investigó sobre fenómenos de inducción electromagnética. Observó que un imán en movimiento a través de una bobina induce en ella una corriente eléctrica, lo cual le permitió describir matemáticamente la ley que rige la producción de electricidad por un imán.

De una obra de Isaac Watts titulada *The Improvement of the Mind* –La mejora de la mente–, leída a sus catorce años, Michael Faraday adquirió estos seis constantes principios de su disciplina científica:

- Llevar siempre consigo un pequeño bloc con el fin de tomar notas en cualquier momento.
- Mantener abundante correspondencia.
- Tener colaboradores con el fin de intercambiar ideas.
- Evitar las controversias.
- Verificar todo lo que le decían.
- No generalizar precipitadamente, hablar y escribir de la forma más precisa posible.

Heinrich Friedrich Emil Lenz



Heinrich Friedrich Emil Lenz (Figura 13) (12 de febrero de 1804 – 10 de febrero de 1865), fue un físico alemán del Báltico conocido por formular la Ley de Lenz en 1833, cuyo enunciado es el siguiente:

El sentido de las corrientes o fuerza electromotriz inducida es tal que se opone siempre a la causa que la produce, o sea, a la variación del flujo.

También realizó investigaciones significativas sobre la conductividad de los cuerpos en relación con su temperatura, descubriendo en 1843 la relación entre ambas, lo que luego fue ampliado y desarrollado por James Prescott Joule, por lo que pasaría a llamarse “Ley de Joule”.

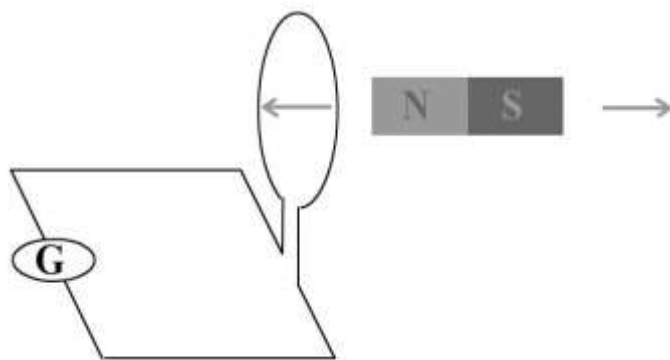
Nacido en lo que hoy en día es Estonia, y tras completar su educación secundaria en 1820, Lenz estudió química y física en la Universidad de Tartu, su ciudad natal. Viajó con Otto von Kotzebue en su tercera expedición alrededor del mundo desde 1823 a 1826. Durante el viaje Lenz estudió las condiciones climáticas y las propiedades físicas del agua del mar.

Después del viaje, Lenz comenzó a trabajar en la Universidad de San Petersburgo, donde posteriormente sirvió como Decano de Matemática y Física desde 1840 a 1863. Comenzó a estudiar el electromagnetismo en 1831. Gracias a la ya nombrada Ley de Lenz, se completó la Ley de Faraday por lo que es habitual llamarla también Ley de Faraday-Lenz para hacer honor a sus esfuerzos en el problema.

LEY DE FARADAY Y LENZ

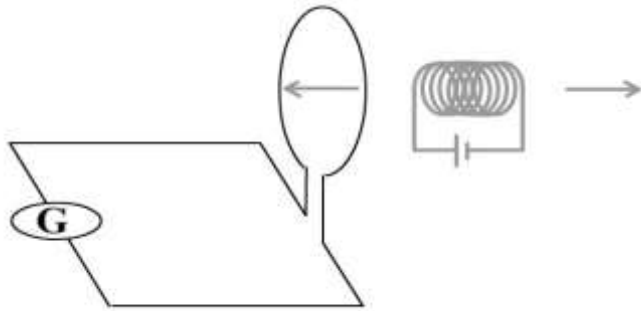
Aportación de Faraday

Durante años Faraday buscó la forma de producir corriente a partir de un campo magnético. En 1831 empezó a ver como su trabajo daba los primeros frutos. Faraday dispuso una espira conectada a un galvanómetro, como es de esperar en estas condiciones, dado que no existe generadores conectados, dicho galvanómetro no marca circulación de corriente por la espira. Pero observó que si introduce un imán en el centro de la espira, mientras este se está acercando, el galvanómetro se desvía marcando la existencia de corriente en la espira; cuando el imán se mantiene quieto en el interior de la espira el galvanómetro vuelve a indicar la ausencia de corrientes; finalmente, al extraer el imán, mientras este se aleja de la espira, el galvanómetro vuelve a desviarse pero esta vez en sentido opuesto. Si además volvemos a repetir el experimento invirtiendo la orientación del imán, se observa el mismo efecto pero las desviaciones del galvanómetro son de sentido contrario a las anteriores (Figura 14).



Lo más sorprendente de este experimento fue que se generase corriente sin necesidad de una batería. Esta corriente se denomina corriente inducida y se dice que es producida por una fuerza electromotriz inducida.

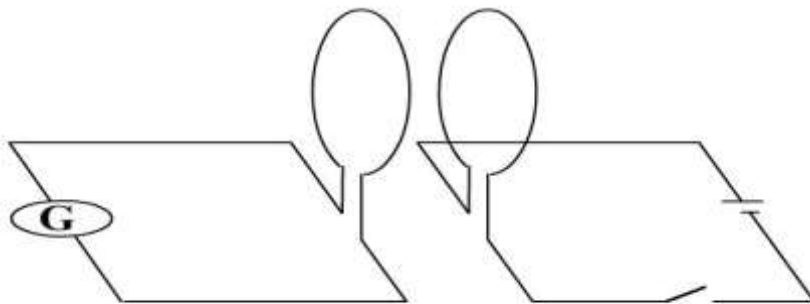
Faraday continuó indagando, en otra de sus experiencias sustituyó el imán anterior por un solenoide conectado a una batería, tal y como se muestra en la Figura 15.



Los efectos sobre la espira son los mismos. Si se acerca y aleja el solenoide, el galvanómetro se desvía a uno y otro lado, si se mantiene fijo no se inducen corrientes. Si cambiamos la polaridad de la batería, ocurre lo mismo pero las desviaciones del galvanómetro son contrarias a las anteriores.

La explicación es sencilla, al hacer circular una corriente por el solenoide este crea un campo magnético en su entorno cuyo sentido depende del sentido de la corriente. Es decir el solenoide se comporta como un imán como el de la Figura 14.

Faraday también colocó dos espiras iguales una frente a la otra. La primera la conectó a un galvanómetro y la segunda a una batería y un interruptor (Figura 16).



En esta experiencia Faraday observó que si el interruptor está abierto no se producen desviaciones en el galvanómetro (como es de esperar ya que no existe fuente de campo magnético alguna), si el interruptor está cerrado tampoco se producen desviaciones. Cuando se cierra el interruptor el galvanómetro se desvía momentáneamente, lo mismo ocurre cuando se abre pero esta vez en sentido contrario. En palabras de Faraday:

“Al hacer contacto se notaba un efecto súbito y ligero en el galvanómetro, y había un pequeño efecto semejante cuando cesaba el contacto con la batería. Sin embargo al estar circulando la corriente voltaica a través de una de las hélices, no se percibía ningún efecto galvanométrico ni de tipo inductivo en la otra hélice, aunque ya se había probado que la potencia activa de la batería era muy grande...”

Faraday indagando en el origen de estas corrientes inducidas, se dio cuenta de que todos estos experimentos tenían un factor común, en todas ellas existe una variación de flujo.

En las dos primeras experiencias la variación de flujo se debe a que al alejarse y acercarse, tanto la bobina como el imán, hacen que el campo magnético cerca de la espira disminuya cuando se alejan o crezca cuando se acercan (esto se debe a que el campo generado por el imán y el solenoide es inversamente proporcional a la distancia del mismo). En el tercer caso, la variación del campo se debe a que varía la intensidad, dado que esta no puede pasar de un valor finito a cero y viceversa, instantáneamente, durante el tiempo que esto le lleva el flujo varía según la intensidad (esto se debe a que el campo es proporcional a la intensidad).

En La ley de inducción de Faraday se afirma que:

“La fuerza electromotriz inducida es igual a la variación de flujo magnético por unidad de tiempo”

Matemáticamente esta ley se expresa así:

$$\varepsilon = \frac{d\phi}{dt} \Rightarrow i = \frac{1}{R} \frac{d\phi}{dt} \quad (16)$$

Donde R es la resistencia del circuito, en este caso, la resistencia será la obtenida en el circuito formado por el galvanómetro y la espira.

Esta ecuación permite explicar las experiencias anteriores. En las dos primeras (Figura 14 y Figura 15), el movimiento del imán o el solenoide hace que en el interior de la espira el flujo varíe, mientras que si permanecen inmóviles, existe flujo, pero este es constante. En la tercera experiencia, Figura 16 cuando el interruptor está cerrado por la segunda espira circula una corriente que genera un campo, este campo atraviesa la superficie de la primera espira dando lugar a un flujo constante, el cual no genera corrientes inducidas. El abrir o cerrar el interruptor hace que la corriente en la segunda espira varíe bruscamente, lo cual hace que el campo magnético también varíe y por tanto también el flujo, apareciendo así la corriente inducida en la primera espira.

Hay que recalcar pues, que lo que origina las corrientes inducidas no es la existencia de flujo, sino que este flujo varíe en el tiempo.

Aportación de Lenz

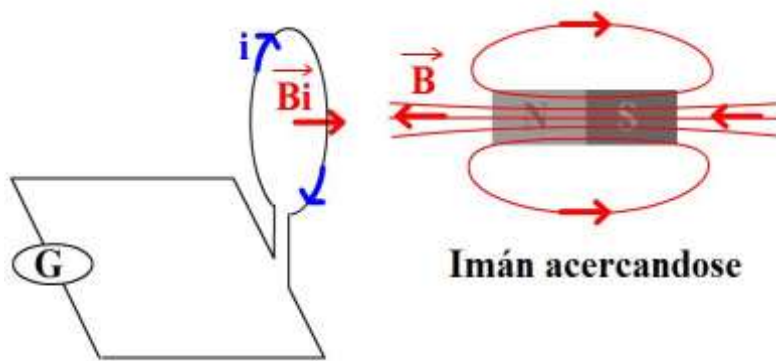
Faraday explica por qué se producen las corrientes inducidas, pero no determina la dirección de estas. Es aquí donde entra la aportación de Heinrich Friedrich Lenz. Lenz siguió indagando en las corrientes inducidas descubiertas por Faraday y enunció la ley que lleva su nombre:

“ El sentido de la corriente inducida es tal que se opone siempre a la causa que la ha producido”.

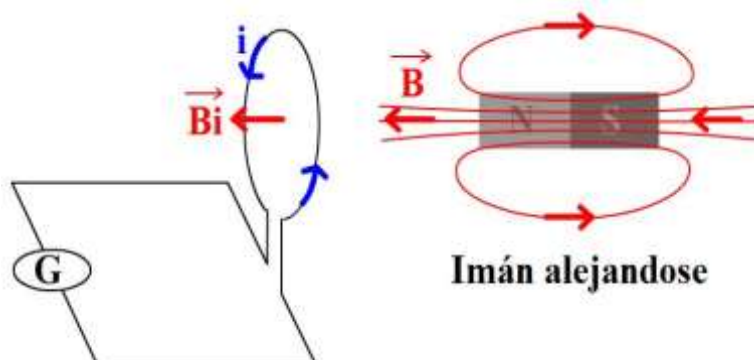
Matemáticamente, la aportación de Lenz se expresa añadiendo un signo menos a la ley de Faraday (Ecuación 17).

$$\varepsilon = - \frac{d\phi}{dt} \Rightarrow i = - \frac{1}{R} \frac{d\phi}{dt} \quad (17)$$

Teniendo en cuenta la Ley de Lenz, es fácil deducir el sentido de la corriente en las experiencias de Faraday. En la primera experiencia de Faraday, Figura 14, al acercar el polo norte del imán, las líneas de campo que atraviesan la superficie de la espira aumentan y con ello el flujo. Por tanto en la espira se inducirán unas corrientes i , tales que contrarresten el aumento de flujo, esto es, dichas corrientes generaran un campo B_i contrario al provocado por el imán para contrarrestar su aumento (Figura 17).

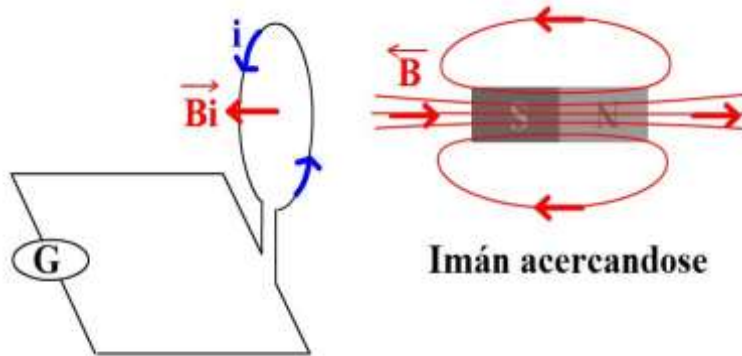


Si por el contrario el imán se aleja, las líneas de campo disminuyen y con ello el flujo, por tanto se inducirá en la espira una corriente tal que, el campo magnético que genera contrarrestará la disminución del flujo (Figura 18).

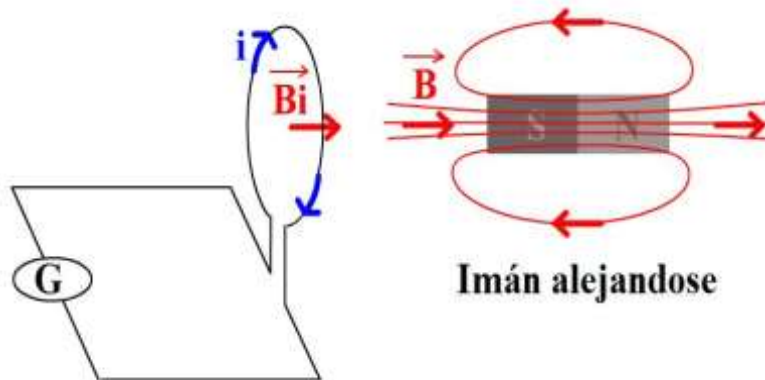


En el supuesto de que el imán se mantenga inmóvil, el flujo en el interior de la espira se mantendrá constante, lo que se traduce en un valor nulo de la Ecuación 17.

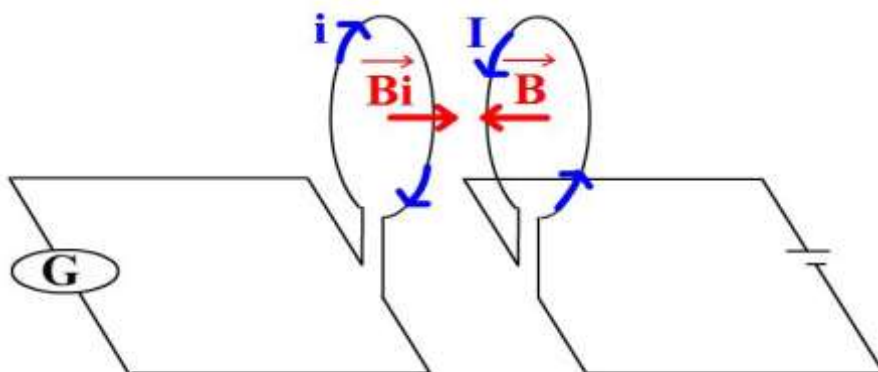
Si invertimos el imán, haciendo que el polo sur se acerque y aleje, el proceso de deducción del sentido de las corrientes inducidas es el mismo. Si el imán se acerca (Figura 19) en la espira se inducirán corrientes que generen un campo B_i que contrarreste el aumento de campo, y por tanto flujo, generado por el imán.



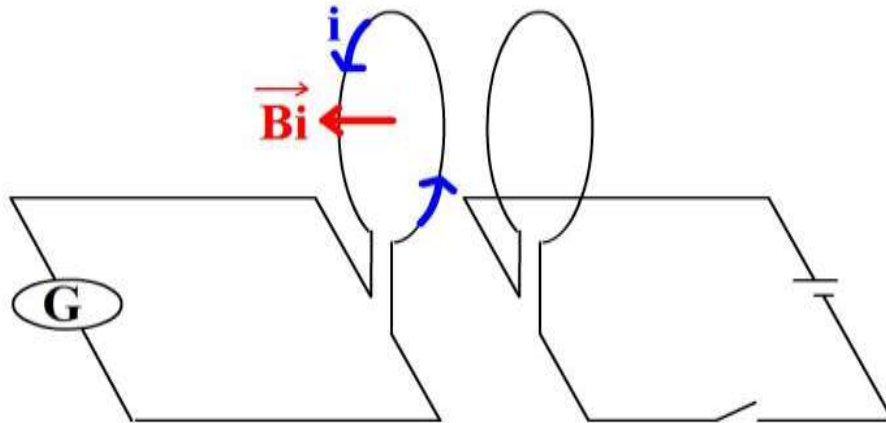
Si el imán se aleja (Figura 20), el flujo disminuye, por tanto en la espira se volverán a generar corrientes que contrarresten esta disminución.



En la tercera experiencia de Faraday (Figura 16), al cerrar el interruptor se produce un aumento de flujo en la primera espira, por tanto se induce una corriente en esta que contrarresta dicho aumento (Figura 21).



Al abrir el interruptor, deja de circular corriente por la segunda espira, por tanto, el flujo en la primera disminuirá, para contrarrestarlo se inducirá en esta una corriente que genere un campo tal que trate de contrarrestar esta disminución (Figura 22).



El sentido de la corriente inducida también se puede obtener a partir del principio de conservación de energía. Suponiendo que la causa que origina dicha corriente, es el movimiento del imán, el sentido de la corriente inducida será tal que tienda a evitar dicho movimiento. De esta forma, si acercamos el polo norte del imán a la espira, esta se comportará como un polo norte tratando de repelerlo. De igual forma, si alejamos el imán, la espira se comportará como un polo sur tratando de atraer el imán. Si invertimos el imán el comportamiento de la espira será el contrario al anterior.

Corrientes inducidas y f.e.m

Hasta ahora la ley de Faraday nos ha mostrado el origen y el sentido de las corrientes inducidas, ahora falta saber el módulo de dichas corrientes. La Ecuación 17 no nos facilita dicho cálculo, pero si nos da una idea de cómo hacerlo, creando un flujo variable.

Teniendo en cuenta la Ecuación 18, tenemos varias opciones de hacer variar el flujo. La primera es hacer variar la inducción magnética B , la segunda variando la superficie, y una tercera variando el ángulo que forma el vector inducción con la normal a la superficie. Dado que hemos visto los tres casos en el apartado de Flujo variable, nos centraremos en buscar el módulo de las corrientes inducidas en los tres casos.

$$\phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{S} = B \cdot S \cdot \cos(\varphi) \quad (18)$$

Fuerza electromotriz generada por un campo variable variable

Supongamos una espira inmóvil en el interior de un campo variable. Puesto que $\vec{B}$ es variable, el flujo que atraviesa la espira también lo es. Por tanto,

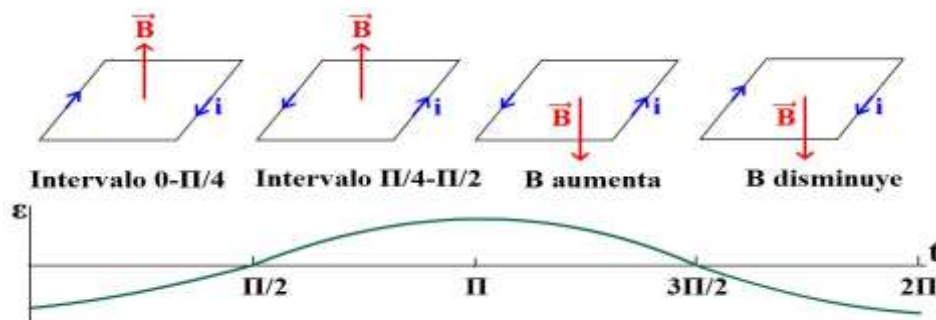
según la ley de Faraday se inducirá en la espira una fuerza electromotriz inducida cuyo valor viene dado por la Ecuación 19 .

$$\mathcal{E} = -\frac{d\phi}{dt} = -S \cdot \frac{dB(t)}{dt} \quad (19)$$

Normalmente, B suele tomar valores del tipo $B(t) = B_0 \sin(\omega t)$, donde $\omega = 2\pi f$, y B_0 es la intensidad máxima instantánea de B . Sustituyendo estos valores en la ecuación anterior:

$$\mathcal{E} = -S \cdot \frac{dB(t)}{dt} = -S \cdot B_0 \cdot \omega \cdot \cos(\omega t) \quad (20)$$

La fuerza electromotriz $\mathcal{E}$ varía tal y como se muestra en la Figura 23.



Fuerza electromotriz generada por una superficie variable

Si en lugar de variar la inducción, disponemos de un montaje como el de la Figura 24, también podemos inducir una fuerza electromotriz en el circuito.

Supongamos una varilla conductora AB que se desliza a lo largo de dos conductores que están unidos a una resistencia. El circuito actuaría como una espira de superficie variable, por tanto el flujo también variará. La ley de Faraday determina que:

$$\mathcal{E} = -\frac{d\phi}{dt} = -B \cdot l \cdot \frac{dx}{dt} = -B \cdot l \cdot v$$

$$|\mathcal{E}| = B \cdot l \cdot v \quad (21)$$

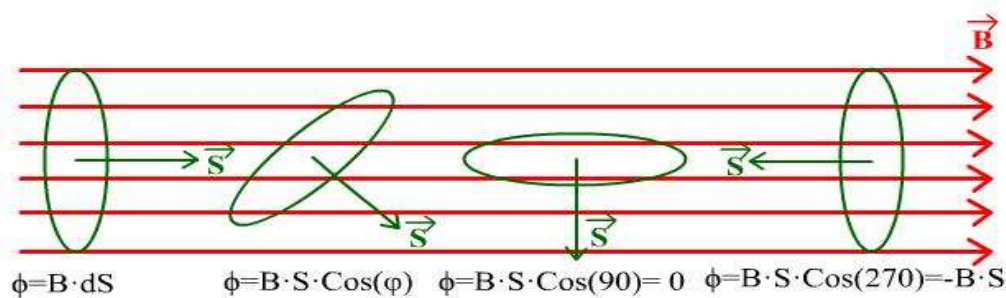
Donde v es la velocidad de la varilla AB.

El sentido de la corriente, según la ley de Faraday Lenz, es tal que se opone a la variación de flujo. Por tanto, si la varilla, tal como se muestra en la Figura 24,

se mueve a la derecha, el área que encierra la espira (circuito) aumenta, con lo cual también lo hará el flujo. Esto implica que la corriente inducida girará en el sentido de las agujas del reloj para crear así un campo entrante en el folio que contrarreste el aplicado. Por el contrario, si la varilla se desplaza a la izquierda el flujo disminuirá, con lo cual la corriente inducida girará en sentido anti horario para contrarrestar esta variación.

Fuerza electromotriz generada por un ángulo variable

Si en lugar de variar la inducción o la superficie de la espira, hacemos girar a esta en el interior de un campo, hacemos que el ángulo que forma la normal a la superficie con el campo varíe Figura 25. Por tanto según la Ecuación 22 el flujo también será variable.

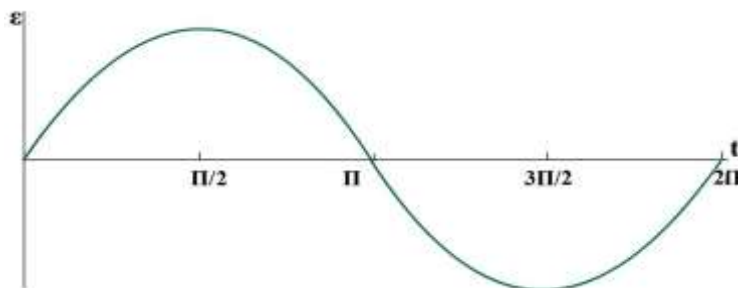


$$\phi = B \cdot S \cdot \cos(\varphi) \quad (22)$$

Este método es el utilizado para obtener fuerzas electromotrices sinusoidales. Si el ángulo toma el valor de $\varphi = \omega t$ y aplicamos la ley de Faraday y Lenz nos queda:

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt} = B \cdot S \cdot \omega \cdot \sin(\omega t) \quad (23)$$

Si representamos los valores de ε , obtenemos una grafica de tipo sinusoidal (Figura 26).



GAUSS



Johann Carl Friedrich Gauss (Figura 27) . (30 de abril de 1777, Brunswick – 23 de febrero de 1855 , Göttingen), fue matemático, astrónomo y físico alemán que contribuyó significativamente en muchos campos, incluida la teoría de números, el análisis matemático, la geometría diferencial, la geodesia, el magnetismo y la óptica. Con tres años se permitió corregir los cálculos que realizaba su padre cuando éste laboraba la nómina de sus empleados.. Con anterioridad ya había aprendido a leer. Destacaba también su capacidad para el cálculo mental. A los 10 años, cuando fue admitido en la clase de aritmética, sorprendió a todos por la rapidez y procedimiento seguido en la resolución de problemas.

Las contribuciones de Gauss a las matemáticas van desde la más pura teoría de números hasta los problemas prácticos de astronomía, magnetismo y topografía. Realizó grandes aportaciones en todas las ramas de las matemáticas en las que trabajó. Llegó a publicar alrededor de 155 títulos, sin embargo se caracterizó por no presentar los trabajos que no creyera haber pulido hasta la perfección.

En electromagnetismo, destaca que a partir de 1831 comenzó a trabajar con el físico Wilhelm Weber en la investigación teórica y experimental del magnetismo. Ambos inventaron un magnetómetro y organizaron en Europa una red de observaciones para medir las variaciones del campo magnético terrestre. Gauss pudo demostrar el origen del campo estaba en el interior de la tierra. Gauss y Weber trabajaron también con las posibilidades del telégrafo, el suyo, fue probablemente el primero que funcionó de manera práctica, adelantándose en 7 años a la patente de Morse. Además también destacan sus estudios en electricidad y en magnetismo donde enunció la ley que describimos a continuación.

Ley de Gauss para el campo magnético

Gauss estudio el campo eléctrico relacionando el flujo eléctrico con las superficies cerradas. Tras sus estudios llegó a la conclusión de que el flujo eléctrico a través de una superficie cerrada era igual a:

$$\phi = \oint \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (24)$$

Donde ϵ_0 es la permeabilidad eléctrica del vacío.

Gauss estudió de forma análoga los campos magnéticos. Durante sus estudios descubrió que el flujo magnético a través de cualquier superficie cerrada eran siempre nulos (Ecuación 25).

$$\phi = \oint \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \Rightarrow \nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (25)$$

Este descubrimiento se traduce en la inexistencia de monopolos magnéticos y, por tanto, que las líneas de campo magnético sean siempre cerradas.

LORENT



Hendrik Antoon Lorentz (Figura 5.48) nació en Arnhem, Países Bajos, 18 de julio de 1853 y murió en Haarlem, 4 de febrero de 1928. Fue físico y matemático neerlandés galardonado con el Premio Nobel de Física del año 1902, junto con su pupilo Pieter Zeeman, por su investigación conjunta sobre la influencia del magnetismo en la radiación, originando la radiación electromagnética.

Estudió en la Universidad de Leiden, de donde fue profesor de física matemática entre 1878 y 1883, y director de investigación en el Instituto Teyler, de Haarlem, de 1885 a 1888. Gracias a su cargo en la universidad en 1890 nombró a Pieter Zeeman asistente personal, induciéndolo a investigar el efecto de los campos magnéticos sobre las fuentes de luz, descubriendo lo que hoy en día se conoce con el nombre de efecto Zeeman.

Se le deben importantes aportaciones en los campos de la termodinámica, la radiación, el magnetismo, la electricidad y la refracción de la luz. Formuló conjuntamente con George Francis FitzGerald una teoría sobre el cambio de forma de un cuerpo como resultado de su movimiento; este efecto, conocido como “contracción de Lorentz-FitzGerald”, cuya representación matemática es conocida con el nombre de transformación de Lorentz, fue una más de las numerosas contribuciones realizadas por Lorentz al desarrollo de la teoría de la relatividad.

En su honor, la Real Academia Holandesa de Artes y Ciencias creó en 1925 la Medalla Lorentz que premia las investigaciones teóricas de físicos. También en su honor se bautizó el cráter Lorentz de la Luna.

Ley de Lorentz

Lorentz estudió las fuerzas ejercidas por un campo magnético y eléctrico sobre cargas en movimiento y corrientes eléctricas.

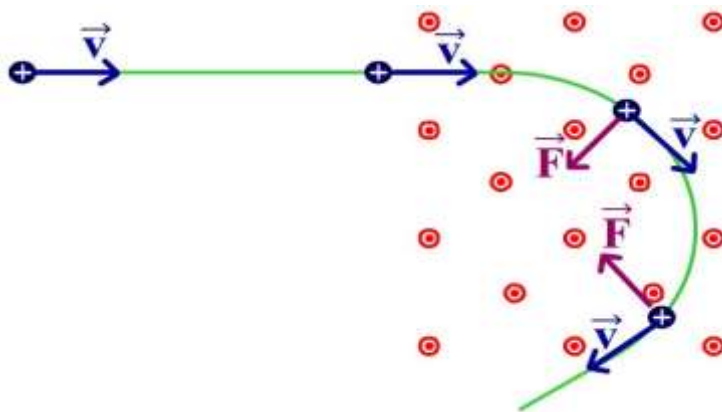
$$\vec{F} = q \cdot \vec{E} + q \cdot (\vec{v} \times \vec{B}) \quad (26)$$

La ley completa de Lorentz se establece por la *Ecuación 26*, pero este trabajo se centrará en los efectos del campo magnético descartando la presencia de campos eléctricos, por tanto la Ecuación 26 se reducirá a la Ecuación 27.

$$\vec{F} = q \cdot (\vec{v} \times \vec{B}) \quad (27)$$

Fuerzas sobre una carga en movimiento

Lorentz lanzó cargas eléctricas básicas, protones y electrones, al interior de un campo magnético. Durante estos experimentos pudo observar que, una vez la carga alcanzaba la zona influenciada por el campo, esta variaba su dirección, describiendo círculos (Figura 29). Además observó que si la carga estaba en reposo, dentro del campo, no se apreciaba ninguna fuerza; sin embargo, si la carga q se movía dentro del campo se observa cómo su trayectoria se curvaba.

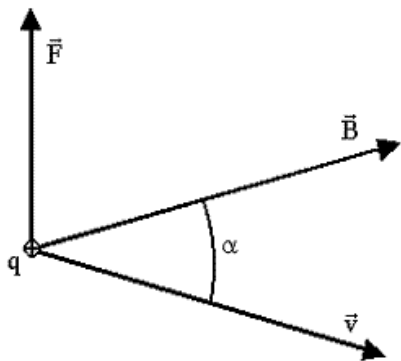


Lorentz, al ver lo que ocurría con la carga cuando se movía en el campo, dedujo que tenía que ejercerse una fuerza sobre esta que hiciese variar su dirección. Esta fuerza se conoce como Fuerza de Lorentz.

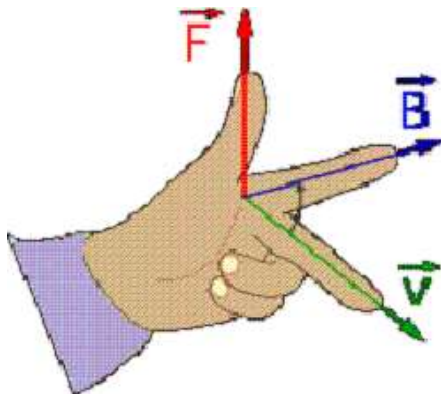
De sus estudios experimentales, Lorentz deduce que:

- $\vec{F}$ es tanto mayor cuanto mayor es la magnitud de la carga q y su sentido depende del signo de la carga y la dirección del campo.
- $\vec{F}$ es tanto mayor cuanto mayor es la velocidad $\vec{v}$ de la carga q .
- $\vec{F}$ se hace máxima cuando la carga se mueve en una dirección perpendicular a las líneas de fuerza y resulta nula cuando se mueve paralelamente a ella.

La dirección de la fuerza magnética en un punto resulta perpendicular al plano definido por las líneas de fuerza a nivel de ese punto y por la dirección del movimiento de la carga q , o lo que es lo mismo $\vec{F}$ es perpendicular al plano formado por los vectores $\vec{B}$ y $\vec{v}$ (Figura 30).



Una forma fácil de calcular la dirección de la fuerza, y los vectores $\vec{v}$ y $\vec{B}$, es mediante la regla de la mano izquierda, siendo la dirección de dichos vectores la indicada en la Figura 31, si la carga es positiva, y con la fuerza contraria a la indicada por el pulgar, si la carga es negativa.



Las conclusiones experimentales de Lorentz quedan resumidas en la expresión:

$$\vec{F} = q \cdot (\vec{v} \times \vec{B}) \Rightarrow F = B \cdot q \cdot v \cdot \sin(\alpha) \quad (28)$$

Se puede apreciar que la fuerza magnética es una fuerza radial, y por lo tanto cumple con la definición de fuerza centrípeta (Ecuación 29).

$$F_c = \frac{m \cdot v^2}{r} \quad (29)$$

Por tanto podemos calcular el valor del radio de curvatura de trayectoria de la partícula cargada. Igualando las ecuaciones Ecuación 28 y Ecuación 29, y siendo v perpendicular a B , lo que implica que $\sin(\alpha)=1$ tenemos:

$$q \cdot v \cdot B = \frac{m \cdot v^2}{r} \Rightarrow r = \frac{m \cdot v}{q \cdot B} \quad (30)$$

Donde r , es el radio de giro, m la masa de la partícula de carga q , v la velocidad de la partícula y B el campo magnético.

Si además tenemos en cuenta que la rapidez angular es $\omega = \frac{v}{r}$ podemos calcular la frecuencia de rotación también conocida como frecuencia de ciclotrón (Ecuación 31).

$$\omega = \frac{q \cdot B}{m} \quad (31)$$

Fuerzas sobre corrientes eléctricas

Hemos visto, que una carga eléctrica moviéndose en el interior de un campo experimenta una fuerza. Puesto que una corriente eléctrica no es más que un conjunto de cargas de idéntico signo moviéndose por un conductor, es de suponer que estas cargas, experimentarían fuerzas de Lorentz si sometemos el conductor a un campo magnético.

Fuerza sobre una corriente rectilínea

Si situamos un conductor en el seno de un campo magnético y hacemos

circular una corriente $i = \frac{dq}{dt}$, es decir, una carga dq atraviesa su sección recta

en un tiempo dado por dt (en el transcurso de este tiempo la carga recorre una distancia de $d\vec{l} = v \cdot dt$), el campo ejercerá una fuerza sobre la carga dq que viene dada por la Ecuación 5.50, por tanto tenemos:

$$dF = dq \cdot B \cdot v \cdot \sin(\alpha) \quad (32)$$

Teniendo en cuenta que $i = \frac{dq}{dt}$ y $d\vec{l} = v \cdot dt$:

$$dF = i \cdot dt \cdot v \cdot B \cdot \sin(\alpha) \Rightarrow dF = i \cdot d\vec{l} \cdot B \cdot \sin(\alpha) \quad (33)$$

De forma vectorial:

$$d\vec{F} = i \cdot (d\vec{l} \times \vec{B}) \quad (34)$$

Hemos calculado la fuerza $d\vec{F}$ que se ejerce sobre un $d\vec{l}$ o elemento de corriente. Para calcular la fuerza que el campo ejerce sobre todo el conductor, tendremos que integrar la Ecuación 5.55 en toda su longitud (Ecuación 5.57).

$$F = \int dF = \int_0^L i \cdot d\vec{l} \cdot B \cdot \sin(\alpha) = i \cdot B \cdot \sin(\alpha) \cdot \int_0^L d\vec{l} \Rightarrow$$

$$F = i \cdot B \cdot L \cdot \sin(\alpha) \quad (35)$$

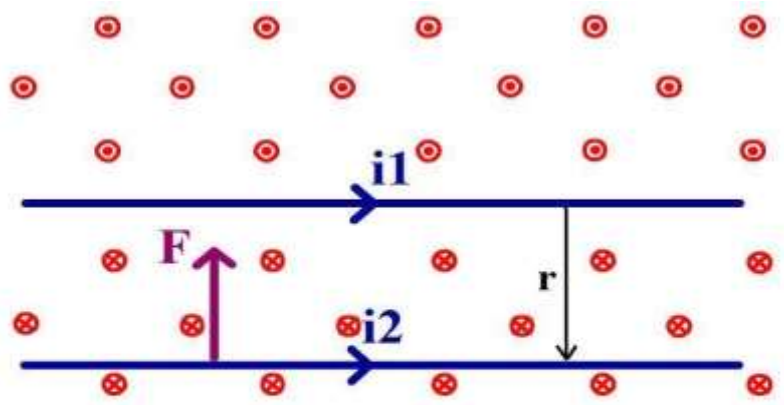
Que de forma vectorial se transforma en:

$$d\vec{F} = i \cdot (\vec{L} \times \vec{B}) \quad (36)$$

Fuerza entre corrientes rectilíneas paralelas

Supongamos dos conductores paralelos por los que circulan sendas corrientes

Sabemos que un conductor por el que circula una corriente genera un campo magnético a su alrededor. Si acercamos un segundo conductor a las inmediaciones de este, y hacemos circular una corriente por él, se ejercerá una fuerza sobre el mismo. La dirección de dicha fuerza viene dada por la regla de la mano izquierda (Figura 31), donde sustituimos v por la intensidad i . Por tanto, en la Figura 32, la fuerza que el conductor 1 ejerce sobre el 2 apunta hacia el conductor 1.



• Campo saliente creado por i_1

• Campo entrante creado por i_2

El módulo de la fuerza, que F en la Figura 32 viene determinada por la Ley de Lorentz, según la cual:

$$F = i_2 \cdot L \cdot B_{(37)}$$

Si tenemos en cuenta que el campo provocado por el conductor 1, a una distancia r , a la cual se encuentra el segundo conductor es:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot i_1}{2 \cdot \Pi \cdot r} \quad (38)$$

Tenemos:

$$F = i_2 \cdot L \cdot B = \frac{\mu_0 \cdot L \cdot i_1 \cdot i_2}{2 \cdot \Pi \cdot r} \quad (39)$$

Del mismo modo si calculamos la fuerza ejercida por el segundo conductor sobre el primero tenemos:

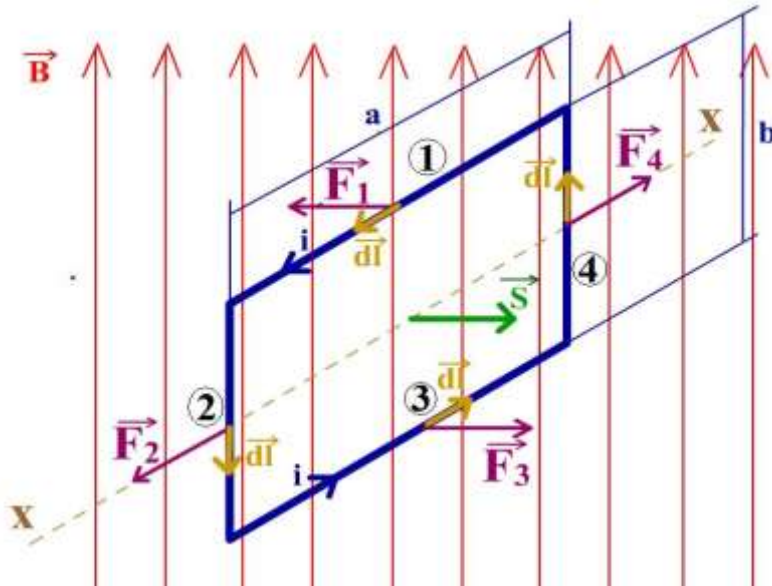
$$F = i_1 \cdot L \cdot B = \frac{\mu_0 \cdot L \cdot i_2 \cdot i_1}{2 \cdot \Pi \cdot r} \quad (40)$$

Que es exactamente el mismo módulo que la fuerza anterior misma dirección y apunta hacia el primer conductor. Por tanto los conductores se atraen entre sí.

Si invertimos una de las corrientes en la Figura 32, el módulo de las fuerzas será el mismo pero se invierte el sentido, por lo tanto los conductores se repelen.

Fuerza sobre una espira rectangular

Imaginemos una espira rectangular de lados a y b inmersa en un campo magnético que pueda girar sobre el eje $x-x$, como la espira de la Figura 33.

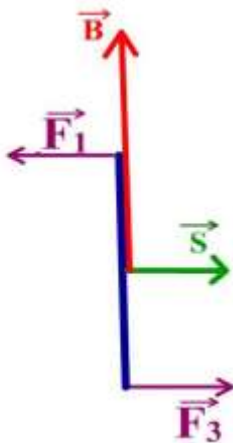


Si por esta espira hacemos circular una corriente, surgirán en ella fuerzas de Lorentz. Las direcciones de estas fuerzas son las indicadas en la Figura 33. El módulo de las fuerzas 2 y 4 viene dado por:

$$F_2 = F_4 = i \cdot b \cdot B \cdot \text{sen}(\alpha) \quad (41)$$

Donde α es el ángulo que forma el campo B con $d\vec{l}$. Además la recta de acción es la misma y su sentido contrario, por tanto se anulan mutuamente.

Las fuerzas 1 y 3 actúan como un par de fuerzas (Figura 34), el momento de estas fuerzas recibe el nombre de Momento magnético (Ecuación 42).



$$M = F \cdot d = F \cdot b \cdot \text{sen}(\theta) = i \cdot a \cdot b \cdot B \cdot \text{sen}(\theta) = i \cdot S \cdot B \cdot \text{sen}(\theta) \quad (42)$$

De forma vectorial se tiene:

$$\vec{M} = i \cdot (\vec{S} \times \vec{B}) \quad (43)$$

Este momento es la base del funcionamiento de los galvanómetros y motores como se verá en el apartado de dispositivos.

MAXWELL



James Clerk Maxwell (Figura 35) (Edimburgo, Escocia, 13 de junio de 1831 – Cambridge, Inglaterra, 5 de noviembre de 1879). Físico escocés conocido principalmente por haber desarrollado la teoría electromagnética clásica, sintetizando todas las anteriores observaciones, experimentos y leyes sobre electricidad, magnetismo y aun sobre óptica, en una teoría consistente. Las ecuaciones de Maxwell demostraron que la electricidad, el magnetismo y hasta la luz, son manifestaciones del mismo fenómeno: el campo electromagnético. Desde ese momento, todas las otras leyes y ecuaciones clásicas de estas disciplinas se convirtieron en casos simplificados de las ecuaciones de Maxwell. Su trabajo sobre electromagnetismo ha sido llamado la "*segunda gran unificación en física*", después de la primera llevada a cabo por Newton.

Maxwell, que desde un principio mostró una gran facilidad para las disciplinas científicas, inició sus estudios universitarios a la edad de 13 años, con 15 años redactó un importante trabajo de mecánica. A los 25 fue nombrado catedrático en Aberdeen, después en Londres y, en 1871, de un instituto especialmente construido para él en Cambridge. Además de su actividad profesional, Maxwell se dedicó a la realización de estudios de carácter privado en sus posesiones de Escocia. Es el creador de la electrodinámica moderna y el fundador de la teoría cinética de los gases.

Algo más tarde, Maxwell publicó dos artículos clásicos dentro del estudio del electromagnetismo. Las relaciones de igualdad entre las distintas derivadas

parciales de las funciones correspondientes a los campos eléctricos y magnéticos, denominadas ecuaciones de Maxwell, están presentes de ordinario en cualquier libro de texto de la especialidad. Sus aportes a la teoría electromagnética lo sitúan entre los grandes científicos de la historia. Sin embargo, Maxwell no escribió sus fórmulas en notación diferencial, sino que planteó todo en un sistema de ecuaciones en cuaterniones. Su planteamiento fue esencialmente algebraico, como fue el caso de Ruder Boškovic con su teoría de los "puncta". Originalmente fueron veinte ecuaciones, que el mismo Maxwell redujo a trece. Luego Heaviside y Hertz produjeron las fórmulas que actualmente maneja la ciencia. Aunque las fórmulas que lograron Heaviside y Hertz son un modelo de compacidad y síntesis, se considera que el tratamiento en cuaterniones es más intuitivo y permite deducir, "ver" y anticipar más que con las "menos digeribles" fórmulas diferenciales. Los cuaterniones se prestan muy bien para describir vectores que giran en el espacio. Es probable que Nikola Tesla y Marconi conocieran y manejaran las expresiones originales de Maxwell.

En el prefacio de su obra *Treatise on Electricity and Magnetism* (1873) declaró que su principal tarea consistía en justificar matemáticamente conceptos físicos descritos hasta ese momento de forma únicamente cualitativa, como las leyes de la inducción electromagnética y de los campos de fuerza, enunciadas por Michael Faraday. Con este objeto, Maxwell introdujo el concepto de onda electromagnética, que permite una descripción matemática adecuada de la interacción entre electricidad y magnetismo mediante sus célebres ecuaciones que describen y cuantifican los campos de fuerzas. Su teoría sugirió la posibilidad de generar ondas electromagnéticas en el laboratorio, hecho que corroboró Heinrich Hertz en 1887, ocho años después de la muerte de Maxwell, y que posteriormente supuso el inicio de la era de la comunicación rápida a distancia.

Corriente de desplazamiento de Maxwell

Se ha visto en la ley de Ampere que:

“La circulación de un campo magnético a lo largo de una línea cerrada es igual al producto de μ_0 por la intensidad neta que atraviesa el área limitada por la trayectoria”.

Que podemos expresar tal y como se muestra en la Ecuación 44

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \cdot i \quad . \quad (44)$$

También habíamos dicho que esto se cumplía siempre y cuando las corrientes fuesen continuas.

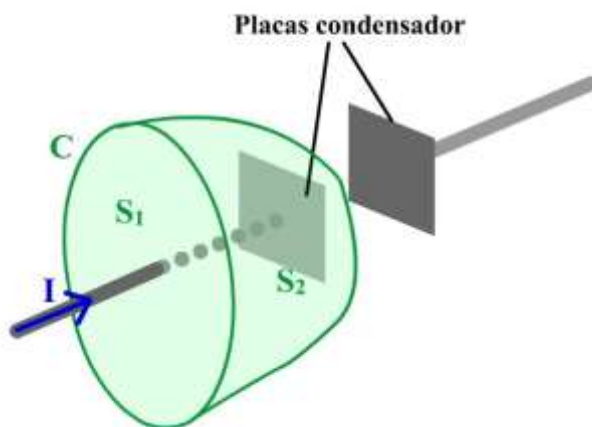
Maxwell demostró que esta ley se podía generalizar sin excepciones, incluyendo las corrientes discontinuas. Para ello introdujo lo que llamó corrientes de desplazamiento de Maxwell (Ecuación 45).

$$I_d = \varepsilon_0 \cdot \frac{d\phi_E}{dt} \quad (45)$$

Donde ϕ_c es el flujo que atraviesa la superficie de contorno C. Entonces de forma generalizada, la ley de Ampere queda:

$$\oint_C \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 \cdot (I + I_d) = \mu_0 \cdot I + \mu_0 \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{d\phi_E}{dt} \quad (46)$$

Un ejemplo son los condensadores (Figura 36). En ella la superficie S1 está atravesada por una corriente I pero la superficie S2, que tiene el mismo contorno, no está atravesada por ninguna corriente. Por tanto no se cumple la frase “la corriente que atraviesa un área cualquiera que encierra un contorno C”, de la ley de Ampère.



Si ahora aplicamos la corriente de desplazamiento de Maxwell a la Figura 36 y

consideramos la corriente generalizada como $I_g = I + I_d$, de acuerdo con lo que hemos visto, debe cruzar la misma corriente generalizada cualquier superficie delimitada por la curva C. Por tanto, la corriente generalizada tiene que atravesar tanto la superficie S1 como la S2 ya que ambas tienen el mismo contorno C. Si en el volumen formado por las superficies S1 y S2 entra una corriente neta I, deberá existir una corriente de desplazamiento I_d que salga de dicho volumen.

Ecuaciones de Maxwell

Una vez generalizada la ley de Ampère, Maxwell dedujo que las leyes experimentales de la electricidad y del magnetismo (Coulomb, Gauss, Biot y

Savart, Ampère y Faraday), podían reducirse matemáticamente en lo que se dio en conocer como Ecuaciones de Maxwell.

Las ecuaciones de Maxwell relacionan los campos eléctrico $\vec{E}$ y $\vec{B}$ con sus fuentes. En principio pueden resolverse cualquier problema, tanto eléctrico como magnético, mediante dichas ecuaciones.

Las cuatro ecuaciones fundamentales de Maxwell son las siguientes:

$$a) \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{q}{\epsilon_0}$$

$$b) \oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

$$c) \oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

$$d) \oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \cdot I + \mu_0 \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{d\phi_E}{dt} = \mu_0 \cdot I + \mu_0 \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{d}{dt} \int_S \vec{E} \cdot d\vec{S}$$

$$e) \vec{F} = q \cdot \vec{E} + q \cdot (\vec{v} \times \vec{B}) \quad (47)$$

La Ecuación 47 a) no es más que la ley de Gauss, esta ley describe como las líneas de campo eléctrico divergen en las cargas positivas y convergen en las negativas. Tiene como base la ley de Coulomb.

La Ecuación 47 b) es la ley de Gauss para el magnetismo, esta ley establece la no existencia de monopolos magnéticos, estableciendo que las líneas de campo son cerradas, es decir, no tienen ni principio ni fin.

La Ecuación 47 c) no es más que la ley de Faraday, que describe como las líneas de campo eléctrico rodean cualquier superficie a través de la cual existe un flujo magnético variable y relaciona el campo $\vec{E}$ con la variación de campo $\vec{B}$.

La Ecuación 47 d) Esta ley describe como rodean las líneas de campo magnético a una superficie a través de la cual está pasando una corriente o existe un flujo eléctrico variable.

La Ecuación 7 e) Fuerza de Lorentz, que muestra las fuerzas que un campo magnético y/o puede ejercer sobre corrientes o cargas en movimiento.

La electroquímica es una parte de la química que se dedica a estudiar las reacciones asociadas con la corriente eléctrica que circula en un circuito.

Las dos formas de representar las reacciones electroquímicas son:



Cuando la corriente eléctrica suministra electrones a la sustancia A, y



Cuando la corriente eléctrica sustrae electrones a la sustancia B.

En estas reacciones, A y B representan sustancias químicas, n es un número entero que se asocia al equivalente de carga que reacciona con las sustancias A y B; e^- representa a los electrones que se insertan en la sustancia A o se retiran de la sustancia B, y los superíndices n^- y n^+ representan los números de carga eléctrica adquiridos por las sustancias A y B (el positivo representa una deficiencia y el negativo un exceso).

Cuando B tiene una carga positiva, B^{n+} , se llama catión, y cuando A tiene una negativa, A^{n-} , se llama anión. No hay que olvidar que la escritura de reacciones químicas, y por lo tanto de las electroquímicas, es una representación de las sustancias que se ponen en contacto con la carga eléctrica para reaccionar y producir una nueva sustancia.

Algunos dispositivos que funcionan cuando se llevan a cabo reacciones electroquímicas son las pilas o baterías utilizadas en el automóvil, relojes, teléfonos celulares, computadoras, entre otros. O cuando se hace una electrólisis y se deposita un metal sobre una superficie a partir de su forma iónica (metales disueltos).

La electroquímica es una disciplina muy versátil que puede ayudar a resolver innumerables problemas que van desde dispositivos que funcionan como fuentes alternas de energía (celdas de combustible) hasta unidades de proceso en las plantas de extracción y refinación de metales (celdas de electrólisis), pasando por procesos de corrosión. Otra aplicación importante de la electroquímica se da en el análisis químico, donde se hace uso de sensores electroquímicos cuyas mediciones se adquieren como diferencias de voltaje (potenciómetros) o corrientes eléctricas (amperímetros). De los sensores potenciométricos se puede mencionar el electrodo de pH y los de ion selectivo y en cuanto a los sensores amperiométricos se destacan los electrodos inertes de carbón vítreo, platino y oro, que sólo sirven de soporte para reacciones de oxidación o de reducción.

En la figura 2 se representa la variedad de aplicaciones que tiene la electroquímica en el mundo tecnológico y científico. La electroquímica está considerada una disciplina versátil y es flexible a las necesidades de cualquier persona que requiera conocer cómo y bajo qué condiciones se transfiere la carga eléctrica a una sustancia para formar nuevos compuestos o tan sólo medir su concentración.

Reseña histórica

En la historia de la electroquímica no se puede dejar de hacer referencia a los primeros científicos que utilizaron la electricidad para sus experimentos. El más antiguo de ellos fue William Gilbert (1544-1603), quien descubrió el magnetismo por el paso de una corriente eléctrica, seguido de Otto von Guericke (1602-1686), quien construyó el primer generador de electricidad en su natal Alemania. A mediados del siglo xvi, el francés Charles François de Cisternay du Fay (1698-1739) estableció que la electricidad podía tener dos signos: el positivo y el negativo, e incluso la explicó como dos tipos de fluido, el fluido positivo y el fluido negativo. No pasó mucho tiempo para que Benjamin Franklin (1706-1806) contradijera esta teoría y la rebatiera insistiendo en que la electricidad era sólo de un tipo de fluido. Posteriormente, aparecieron las disertaciones de Charles-Augustin de Coulomb (1736-1806), quien dictó la ley de la atracción y repulsión electrostática en 1781, y en su honor se denominó la unidad de carga como el coulomb, representado por una letra C en el Sistema Internacional (si) de unidades.



El primer hecho histórico relacionado con la electroquímica y que trascendió en el estudio de la interacción de la electricidad con las reacciones químicas se atribuye al anatomista y médico italiano Luigi Galvani (1737-1798), quien propuso la existencia de “la electricidad animal”. Galvani publicó su ensayo titulado *De Viribus Electricitatis in Motum Musculari Commentarius*, donde propuso que el tejido animal tenía una fuerza vital desconocida que activaba los nervios y músculos cuando se tocaban con un metal. Esto lo demostró innumerables ocasiones utilizando las ancas de una rana muerta e incluso ranas vivas. En sus experimentos se pudo constatar que la contracción de los músculos se manifestaba por el paso de una corriente eléctrica. Independientemente de la veracidad de la fuerza vital desconocida, la contribución de Galvani fue determinante en el avance de las neurociencias. Por otra parte, el nombre de Galvani se asoció con el término “galvanizado”, que significa la formación de un recubrimiento protector sobre un metal por el paso de una corriente, creando una protección contra el fenómeno de corrosión de los materiales metálicos.

A inicios del siglo xix, se llevan a cabo los trabajos de Alessandro Giuseppe Antonio Anastasio Volta (1745-1827), profesor de filosofía natural en la Universidad de Pavia, Italia, que sirvieron de piedra angular para una serie de definiciones en física y electroquímica. Su fama creció cuando contradujo la hipótesis de Galvani y confirmó que no existe un tipo de electricidad animal, sino que la electricidad que hacía contraer los músculos de la rana se debía a la composición de los materiales de los cables que se utilizaban a los extremos de las ancas. Es decir, uno de los alambres era Cu y el otro era Zn y, en realidad, la electricidad fluía debido a la diferencia de potencial eléctrico de los dos metales. De hecho el dispositivo utilizado por Volta se conoce como la “pila voltaica”, cuyos electrodos son precisamente discos de Cu y Zn sumergidos en una solución que contiene iones que transportan la carga eléctrica en solución. En honor a Volta, se asignó la unidad de potencial eléctrico al Volt, V, en el si de unidades. La pila voltaica sirvió también para introducir la idea de la conducción iónica que es un mecanismo de conducción de la electricidad que presentan las sales disueltas en agua, también llamadas electrolitos. Aunque fue casi un siglo después que Arrhenius explicó la disociación de las sales en soluciones acuosas.

Al repetir el experimento de Volta, William Nicholson (1753-1815) quiso determinar las cargas en cada lado de la pila voltaica y por accidente dejó caer agua encima de las conexiones, percatándose de que se formaban burbujas de gas. Para comprobar sus sospechas, John Willen Ritter (1776-1810) sumergió las terminales de la pila en agua y observó el desprendimiento de burbujas de oxígeno e hidrógeno. Curiosamente la electricidad generada entre el Cu y Zn se aprovechó para descomponer el agua en sus elementos. A este proceso de descomposición del agua por el paso de una corriente eléctrica se le conoce con el nombre de “electrólisis”. En esta misma época también aparecieron los trabajos de Henry Cavendish (1731-1810), quien hizo experimentos de electrólisis cuantitativos para determinar la composición del agua (véase figura 3 para identificar la proporción dos de hidrógeno por uno de oxígeno).

A partir de esa época se desencadenaron innumerables investigaciones alrededor de la electroquímica. Por citar algunos ejemplos de interés tecnológico, está la técnica de *electroplatinado*, que consiste en recubrir una superficie con una capa de metal puro. Este procedimiento se hace partiendo de una sal del metal a depositar disuelta (de preferencia en agua) que asegure la presencia de *cationes metálicos*. Una vez disuelta la sal se hace pasar una corriente eléctrica entre dos electrodos sumergidos en la solución iónica. La formación de la capa de metal depositado se hace al incorporar los cationes sobre el cátodo y se le denomina “reacción de reducción”. Es por esto que las piezas que se van a recubrir de metal deben funcionar como cátodos en una celda de electroplatinado.

El mismo principio de la celda de electroplatinado se utiliza para la refinación de metales. De esta técnica existen dos variantes, la primera se hace a partir de soluciones acuosas que contienen al metal que se desea refinar en forma catiónica (similar al electroplatinado). La segunda se hace a partir de lingotes impuros que se conectan como ánodos. Al quedar sumergidos los ánodos en una solución electrolítica, se lleva a cabo una disolución o reacción de oxidación y en el contraelectrodo (el cátodo) se realiza el electrodeposición del metal puro.

Cabe destacar que a mediados del siglo XIX el interés se dirigió hacia mejorar las pilas o baterías utilizando diferentes materiales como electrodos y diversas soluciones electrolíticas.

Se ha constatado que el principio de funcionamiento de una pila o batería y de una celda de electrólisis es diferente a pesar de que ambos tienen ánodo, cátodo y solución electrolítica. En cuanto a las celdas de electrólisis se sabe que consumen electricidad, mientras que las pilas o baterías la generan. Para entender esta diferencia es conveniente recurrir a la escala de potenciales estándar de oxidación-reducción y distinguir las reacciones que se desencadenan tanto en el ánodo como en el cátodo.

Si la reacción del cátodo (reducción) tiene un potencial estándar de oxidación-reducción mayor al del ánodo (oxidación) en condiciones estándar (25°C, 1 atm y concentración 1 M de todas las sustancias que participan en la reacción electroquímica) entonces la celda corresponde a un generador de electricidad y puede ser una celda de combustible, una pila o una batería. Si la reacción que se espera que ocurra en el cátodo tiene un potencial menor que el de la reacción que debe ocurrir en el ánodo, entonces la celda es de electrólisis.

Por breve que sea una reseña histórica de la electroquímica, ésta no puede dejar de mencionar al físico inglés Michael Faraday (1791-1867), quien sistematizó los experimentos de electrólisis. Faraday encontró un número que se repetía constantemente al buscar la equivalencia de la carga que pasaba por un circuito con la cantidad de material depositado en un cátodo. Este número se conoce como “constante de Faraday” y es aproximadamente 96500 C/equivalente molar de e^- en la reacción. Por otra parte, en honor a Faraday se creó la unidad conocida como faradio, F, y que se utiliza para medir la capacitancia eléctrica de un material.

En la era moderna, los siguientes científicos se han dado a conocer por sus contribuciones al avance de la electroquímica, algunos de ellos se han hecho acreedores al Premio Nobel de química: Walter Herman Nernst (1864-1941), Julius Tafel (1862-1918), Jaroslav Heirovsky (1890-1967), Veniamin Grigorevich Levick (1917-1987), Ulrich Evans (1889-1980), Marcel Pourbaix (1904-1998), Edward Brough Randles (1912-1998), John Albert Valentine Buttler (1889-1977), Max Volmer (1885-1965), Heinz Gerischer (1919-1994), Brian Evans Conway (1927-2005), John O'Mara Bockris (1923-), Revaz Dogonadze (1931-1985) y Rudolph Marcus (1923-).

En México la electroquímica se ha impulsado en diferentes grupos académicos y de investigación, entre los que destacan las áreas de electroquímica de la Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa y Azcapotzalco, el laboratorio de electroquímica en la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México y el área de electroquímica de la Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas del Instituto Politécnico Nacional. Por otra parte, existe una asociación civil denominada Sociedad Mexicana de Electroquímica, que agrupa a más de 250 personas dedicadas al estudio de procesos y sistemas de análisis basados en reacciones electroquímicas. Este grupo se reúne anualmente en diferentes puntos de México con la firme intención de difundir y compartir las experiencias adquiridas. Además de estas reuniones, varios investigadores mexicanos viajan alrededor del mundo para presentar sus trabajos y discutir los avances logrados.

Actualidad de la electroquímica

Como se ha mencionado, la disciplina de la electroquímica es muy versátil y lo mismo se puede aplicar en un método de análisis, en dispositivos de generación y almacenamiento de energía, que en el diseño y la evaluación de un proceso que prevenga o contrarreste la contaminación del agua y del suelo.

Estrategias para el almacenamiento de energía a gran escala

Las crisis energéticas y de contaminación ambiental de los últimos años han obligado a buscar estrategias sustentables para la producción y consumo de energía. Entre estas estrategias destacan: la utilización de vehículos híbridos (hev); la construcción de plantas de generación, a partir de fuentes renovables (energía eólica, celdas fotovoltaicas); así como mejorar la eficiencia de operación de los sistemas de generación de energía eléctrica tradicionales (plantas termoeléctricas, hidroeléctricas, etcétera).

Para que los sistemas sean eficientes posibles, estos dispositivos de almacenamiento deben tener ciertas características. En las aplicaciones para vehículos híbridos (hev), deben generar una alta cantidad de energía en tiempo muy corto; además, requieren ser muy ligeros. En el caso de las aplicaciones estáticas, estos sistemas no deben tener variabilidad en las respuestas en las horas pico, además de que deben ser flexibles y sencillos, desde el punto de vista operacional y presentar bajos costos de operación. En ambas aplicaciones se requiere que estos sistemas tengan una duración o tiempo de vida bastante grande, ya que eso representa un bajo costo por mantenimiento.

En la actualidad existen múltiples sistemas de almacenamiento; entre los más importantes se encuentran los de tipo mecánico, eléctrico, químico y electroquímico. Con el propósito de tener la apropiada perspectiva de los sistemas de almacenamiento de energía, la tabla 1 muestra una comparación de los sistemas electroquímicos con los sistemas de almacenamiento utilizados comúnmente.

Como se muestra en la tabla 1, de todos estos sistemas, los del tipo eléctrico (supercapacitores) y electroquímico, son las más eficientes, fáciles de operar y los de menor costo. Esto se debe a que estos sistemas no se encuentran limitados por los ciclos termodinámicos, que limitan a los sistemas de almacenamiento del tipo mecánico. Debido a la complejidad de fabricación de los sistemas eléctricos, los sistemas electroquímicos han sido los que más éxito han tenido en el campo del almacenamiento de energía. Entre los sistemas electroquímicos más importantes, se encuentran las baterías de estado sólido, las celdas de combustible y las celdas de flujo tipo redox.

La tabla 2 muestra una comparación de los sistemas electroquímicos mencionados anteriormente. En ella se observa que existen diferencias entre los tipos de baterías comparados, en lo que se refiere a las condiciones de operación, tanto de las especies reactantes, como de los electrolitos.

Una alternativa tecnológica para el desarrollo de procesos amigables con el ambiente o bien para la eliminación de contaminantes

La explotación y el procesamiento de minerales a nivel mundial y en particular en México, se enfrentan a múltiples problemas para llevar a cabo de manera rentable su operación. Entre los problemas que se presentan se pueden citar:

- a) la aparición de minerales muy complejos, en donde los métodos de separación y procesamiento utilizados hasta ahora no son eficientes;
- b) muchos de los procesos de la actividad minera presentan un alto impacto ambiental, entre los que se pueden citar: los procesos pirometalúrgicos, la lixiviación con cianuros y el drenaje de roca ácido de las presas de jales (residuos mineros no explotables). La regulación ambiental, cada vez más estricta, está obligando a buscar metodologías alternativas para suplir procesos que se han trabajado durante mucho tiempo, o bien a llevar a cabo procesos más eficientes, disminuyendo su impacto ambiental.

Es necesario buscar alternativas de aplicación económicamente más interesantes, a la plata, el zinc y el plomo, que son los metales que se producen en mayor cantidad en México. Para enfrentar el reto tecnológico que representa afrontar los problemas y las necesidades citados, es necesario realizar un trabajo multidisciplinario con el fin de establecer nuevos procesos u optimizar los existentes.

En la UAM-Iztapalapa de la ciudad de México se han desarrollado diferentes estrategias para enfrentar estos problemas. Éstas se han diseñado con un énfasis en el contexto mexicano en el que se presentan los problemas a resolver, con el fin de motivar la colaboración multidisciplinaria. Entre las más novedosas, se pueden mencionar las creadas por el grupo de la UAM-Iztapalapa para evaluar la reactividad de minerales complejos como la calcopirita; las fases refractarias a la cianuración en concentrados minerales de plata; la influencia del par galvánico en la disolución selectiva en concentrados conteniendo diferentes minerales sulfurosos; o bien, evaluar la posibilidad de producción de drenaje de roca ácido de los residuos mineros. La experiencia adquirida en este campo ha permitido proponer un proceso menos contaminante que el de cianuro, que permite generar de manera continua el agente lixivante, disolver selectivamente el oro y la plata de concentrados minerales mexicanos que contienen oro y plata y recuperar el doré (oro y plata metálicos); este proceso podría reemplazar a la cianuración y actualmente se encuentra en el proceso de transferencia tecnológica para la industria minera Peñoles.

La eliminación de metales pesados contenidos en efluentes de los enjuagues de las industrias metal-mecánica es tradicionalmente llevada a cabo por métodos fisicoquímicos, donde los diferentes metales son precipitados en forma de hidróxidos, generando una gran cantidad de lodos que posteriormente tienen que ser confinados. La calidad de las aguas tratadas suele encontrarse fuera de las normas establecidas por la legislación ambiental.

Por otra parte, la degradación de moléculas orgánicas contenidas en los efluentes de diferentes industrias como la textil, petrolera o alimenticia, representa un reto tecnológico, por lo complejo de las moléculas a degradar o bien por la cantidad de especies químicas contenidas en dichos efluentes. Diferentes métodos fisicoquímicos y biotecnológicos han sido aplicados para resolver este reto; desafortunadamente, en la mayoría de los casos los tratamientos propuestos no son eficientes, generan una gran cantidad de lodos

o bien requieren de una gran cantidad de operaciones unitarias que encarecen el tratamiento.

En las últimas dos décadas las tecnologías electroquímicas han demostrado ser una alternativa sostenible para el procesamiento, particularmente en los efluentes conteniendo iones metálicos, permitiendo remociones de metales desde 10 000 hasta 0.01 mg L⁻¹. Mientras que el desarrollo de materiales electrocatalizadores para la oxidación electroquímica avanzada ha permitido considerar a los reactores electroquímicos como una opción viable para la mineralización completa (oxidación hasta CO₂) de moléculas tan complejas como organohalogenuros, compuestos azo o bien poliaromáticos.

Actualmente se están desarrollando en el mundo y en México diferentes estrategias experimentales para la aplicación de una tecnología electroquímica, que emplea diferentes tipo de reactores, en el tratamiento de diversos efluentes. Se utiliza un reactor electroquímico de cilindro rotatorio para la limpieza de las aguas generadas en los enjuagues de cobre y níquel producidos por una empresa de recubrimientos metálicos de plásticos. Esta tecnología logra la remoción eficiente de los iones Cu(II) y Ni(II), recuperados como polvos metálicos puros de las aguas de enjuague y permite que esta agua tratada sea reutilizada, disminuyendo los costos de tratamiento y el consumo de agua potable. Para el caso del tratamiento de efluentes que contienen moléculas orgánicas se utiliza un reactor electroquímico tipo filtro prensa FM01, con ánodos de Boro Dopado con Diamante (bdd). Esta tecnología logra la mineralización completa (oxidación hasta CO₂) de los componentes contenidos en efluentes de la industria textil (azul índigo, 536 ppm de demanda química de oxígeno, cod); mientras en efluentes de la industria petroquímica se logra 90% de mineralización de *p*-cresol (208 ppm cod iniciales) y 84% de *o*-cresol, así como 90% de la industria de fermentación (vinazas 75000 ppm DQO inicial). En la ingeniería de detalle se describen las condiciones de operación de cada reactor para lograr eficiencias de corriente cercanas a 100%; de esta manera es como se presenta una comparación con métodos biotecnológicos y fisicoquímicos.

Ante la apremiante necesidad de cuidar los recursos hídricos y asegurar la calidad de los suelos, la electroquímica ofrece también alternativas en tecnologías bien probadas como la electroincineración de materiales orgánicos, la electroseparación de metales pesados del agua y del suelo, la electrodiálisis para desalinizar agua, la electrocinética para eliminar hidrocarburos pesados del suelo, la electrocoagulación y electroflotación para tratamiento de agua y la generación de energía con celdas que funcionan con hidrógeno y aire, entre otras. Por otra parte, el diseño de procesos electroquímicos contribuye a consumir menos reactivos en líneas de proceso y a evitar el riesgo de inhalación de sustancias tóxicas. En sí la electroquímica es una oportunidad de explotar la composición eléctrica de la materia en beneficio de toda la sociedad.