

UNIVERSIDAD DEL MAGDALENA

ESTUDIO DE LA FÍSICA ELECTROMAGNÉTICA

Edivar Fernández Hoyos

edivarf@gmail.com

MICHAEL FARADAY: (Newington, 22 de septiembre de 1791 - Londres, 25 de agosto de 1867). Fue físico y químico británico que estudió el electromagnetismo y la electroquímica. Fue discípulo del químico Humphry Davy, y ha sido conocido principalmente por su descubrimiento de la inducción electromagnética, que ha permitido la construcción de generadores y motores eléctricos, y de las leyes de la electrólisis, por lo que es considerado como el verdadero fundador del electromagnetismo y de la electroquímica.

En 1831 trazó el campo magnético alrededor de un conductor por el que circula una corriente eléctrica (ya descubierto por Oersted), y ese mismo año descubrió la inducción electromagnética, demostró la inducción de una corriente eléctrica por otra, e introdujo el concepto de líneas de fuerza, para representar los campos magnéticos. Durante este mismo periodo, investigó sobre la electrólisis y descubrió las dos leyes fundamentales que llevan su nombre:

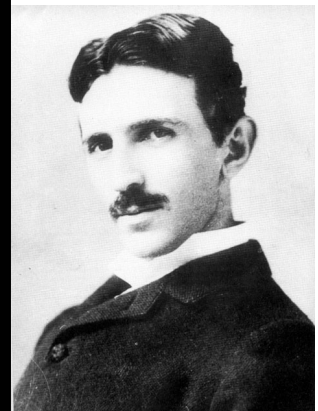
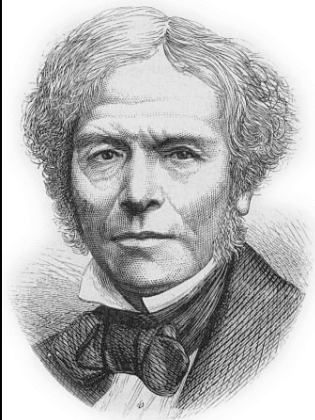
- ▲ La masa de sustancia liberada en una electrólisis es directamente proporcional a la cantidad de electricidad que ha pasado a través del electrolito $m = c I t$.
- ▲ Las masas de distintas sustancias liberadas por la misma cantidad de electricidad son directamente proporcionales a sus pesos equivalentes.

NIKOLA TESLA: Nació en el pueblo de Smiljan en la Frontera Militar (*Vojna Krajina*) austrohúngara, se educó en Graz y posteriormente en Praga, donde estudió ingeniería eléctrica. En 1881 viajó a Budapest para trabajar en una compañía de telégrafos estadounidense. Al año siguiente se trasladó a París para trabajar en una de las compañías de Thomas Alva Edison, donde realizó su mayor aporte: **La teoría de la corriente alterna**, lo cual le permitió idear el primer motor eléctrico de inducción en 1882.

En 1884 se trasladó a Nueva York, creando su propia compañía en 1886 tras romper con Edison después de tener muchas diferencias ante la eficiencia entre la corriente continua (CC) y la corriente alterna (CA) de Tesla. Tenía un laboratorio en la calle Houston en Nueva York. En 1887 logra construir el motor de inducción de corriente alterna. Posteriormente sin medios económicos para realizar todas sus investigaciones e inventos, conoció a Westinghouse, un científico y empresario adinerado que logró, mediante un acuerdo económico, comprarle las patentes de sus inventos y lo contrató para trabajar con él en sus laboratorios Westinghouse Electric, donde concibió el sistema polifásico para trasladar la electricidad a largas distancias. Empeñado Tesla en mostrar la superioridad de la CA sobre la CC de Edison se desarrolló lo que se conoce como **"guerra de las corrientes"**. En 1893 se hizo en Chicago una exhibición pública de la corriente alterna, demostrando su superioridad sobre la corriente continua de Edison.

*"Ahora ya no le
rogamos a la
naturaleza;
ahora le ordenamos,
pues hemos
descubierto algunos de
sus secretos
y descubriremos más
cada día.
Le ordenamos en el
nombre de unas leyes
a las que no puede
oponerse porque son
suyas; no le pedimos
inconscientes que
cambie tales leyes,
somos los primeros en
someternos a ellas.
Sólo podemos dominar
la naturaleza
sometiéndonos a ella"*

Jules Henri Poincaré



I. ELECTRICIDAD

La electricidad (del griego *elektron*, cuyo significado es ámbar) es un fenómeno físico cuyo origen son las cargas eléctricas y cuya energía se manifiesta en fenómenos mecánicos, térmicos, luminosos y químicos, entre otros. Se puede observar de forma natural en fenómenos atmosféricos, por ejemplo los rayos, que son descargas eléctricas producidas por la transferencia de energía entre la ionosfera y la superficie terrestre (proceso complejo del que los rayos solo forman una parte). Otros mecanismos eléctricos naturales los podemos encontrar en procesos biológicos, como el funcionamiento del sistema nervioso. Es la base del funcionamiento de muchas máquinas, desde pequeños electrodomésticos hasta sistemas de gran potencia como los trenes de alta velocidad, y asimismo de todos los dispositivos electrónicos. Además es esencial para la producción de sustancias químicas como el aluminio y el cloro.

También se denomina electricidad a la rama de la física que estudia las leyes que rigen el fenómeno y a la rama de la tecnología que la usa en aplicaciones prácticas. Desde que, en 1831, Faraday descubriera la forma de producir corrientes eléctricas por inducción —fenómeno que permite transformar energía mecánica en energía eléctrica— se ha convertido en una de las formas de energía más importantes para el desarrollo tecnológico debido a su facilidad de generación y distribución y a su gran número de aplicaciones.

La electricidad es originada por las cargas eléctricas, en reposo o en movimiento, y las interacciones entre ellas. Cuando varias cargas eléctricas están en reposo relativo se ejercen entre ellas fuerzas electrostáticas. Cuando las cargas eléctricas están en movimiento relativo se ejercen también fuerzas magnéticas. Se conocen dos tipos de cargas eléctricas: positivas y negativas. Los átomos que conforman la materia contienen partículas subatómicas positivas (protones), negativas (electrones) y neutras (neutrones). También hay partículas elementales cargadas que en condiciones normales no son estables, por lo que se manifiestan sólo en determinados procesos como los rayos cósmicos y las desintegraciones radiactivas.

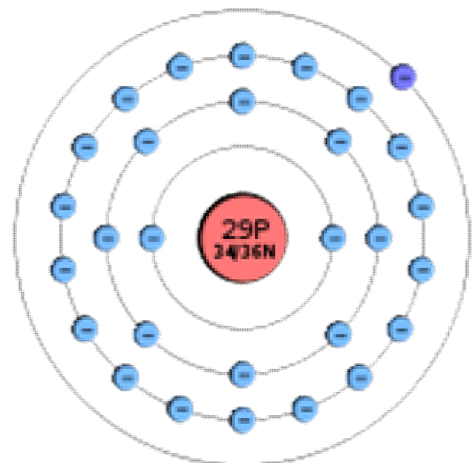
La electricidad y el magnetismo son dos aspectos diferentes de un mismo fenómeno físico, denominado electromagnetismo, descrito matemáticamente por las ecuaciones de Maxwell. El movimiento de una carga eléctrica produce un campo magnético, la variación de un campo magnético produce un campo eléctrico y el movimiento acelerado de cargas eléctricas genera ondas electromagnéticas (como en las descargas de rayos que pueden escucharse en los receptores de radio AM).

Debido a las crecientes aplicaciones de la electricidad como vector energético, como base de las telecomunicaciones y para el procesamiento de información, uno de los principales desafíos contemporáneos es generarla de modo más eficiente y con el mínimo impacto ambiental.

1. HISTORIA

Sus propiedades conductoras se deben a la facilidad de circulación que tiene su electrón más exterior (4s). La historia de la electricidad como rama de la física comenzó con observaciones aisladas y simples especulaciones o intuiciones médicas, como el uso de peces eléctricos en enfermedades como la gota y el dolor de cabeza, u objetos arqueológicos de interpretación discutible (la batería de Bagdad). Tales de Mileto fue el primero en observar los fenómenos eléctricos cuando, al frotar una barra de ámbar con un paño, notó que la barra podía atraer objetos livianos.

Mientras la electricidad era todavía considerada poco más que un espectáculo de salón, las primeras aproximaciones científicas al fenómeno fueron hechas en los siglos XVII y XVIII



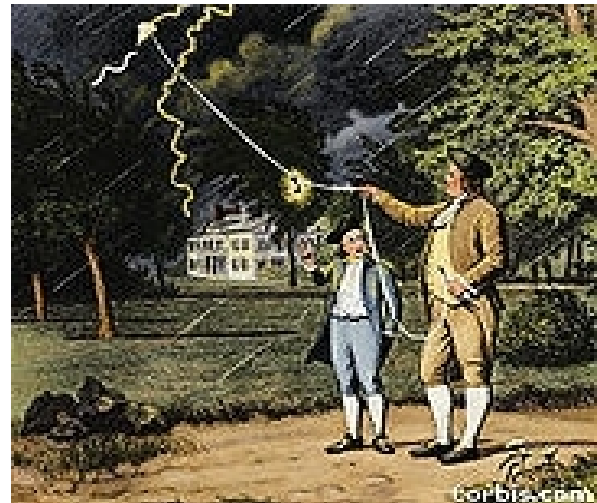
por investigadores sistemáticos como Gilbert, von Guericke, Henry Cavendish, Du Fay, van Musschenbroek y Watson. Estas observaciones empiezan a dar sus frutos con Galvani, Volta, Coulomb y Franklin, y, ya a comienzos del siglo XIX, con Ampère, Faraday y Ohm. No obstante, el desarrollo de una teoría que unificara la electricidad con el magnetismo como dos manifestaciones de un mismo fenómeno no se alcanzó hasta la formulación de las ecuaciones de Maxwell (1861-1865).

Los desarrollos tecnológicos que produjeron la primera revolución industrial no hicieron uso de la electricidad. Su primera aplicación práctica generalizada fue el telégrafo eléctrico de Samuel Morse (1833), que revolucionó las telecomunicaciones. La generación masiva de electricidad comenzó cuando, a fines del siglo XIX, se extendió la iluminación eléctrica de las calles y las casas. La creciente sucesión de aplicaciones que esta disponibilidad produjo hizo de la electricidad una de las principales fuerzas motrices de la segunda revolución industrial. Más que de grandes teóricos, como Lord Kelvin, fue éste el momento de grandes inventores como Gramme, Westinghouse, von Siemens y Alexander Graham Bell. Entre ellos destacaron Nikola Tesla y Thomas Alva Edison, cuya revolucionaria manera de entender la relación entre investigación y mercado capitalista convirtió la innovación tecnológica en una actividad industrial. Tesla, un inventor serbio-americano, descubrió el principio del campo magnético rotatorio en 1882, que es la base de la maquinaria de corriente alterna. También inventó el sistema de motores y generadores de corriente alterna polifásica que da energía a la sociedad moderna.

El alumbrado artificial modificó la duración y distribución horaria de las actividades individuales y sociales, de los procesos industriales, del transporte y de las telecomunicaciones. Lenin definió el socialismo como la suma de la electrificación y el poder de los soviets. La sociedad de consumo que se creó en los países capitalistas dependió (y depende) en gran medida del uso doméstico de la electricidad.

El desarrollo de la mecánica cuántica durante la primera mitad del siglo XX sentó las bases para la comprensión del comportamiento de los electrones en los diferentes materiales. Estos saberes, combinados con las tecnologías desarrolladas para las transmisiones de radio, permitieron el desarrollo de la electrónica, que alcanzaría su auge con la invención del transistor. El perfeccionamiento, la miniaturización, el aumento de velocidad y la disminución de costo de las computadoras durante la segunda mitad del siglo XX fue posible gracias al buen conocimiento de las propiedades eléctricas de los materiales semiconductores. Esto fue esencial para la conformación de la sociedad de la información de la tercera revolución industrial, comparable en importancia con la generalización del uso de los automóviles.

Los problemas de almacenamiento de electricidad, su transporte a largas distancias y la autonomía de los aparatos móviles alimentados por electricidad todavía no han sido resueltos de forma eficiente. Asimismo, la multiplicación de todo tipo de aplicaciones prácticas de la electricidad ha sido —junto con la proliferación de los motores alimentados con destilados del petróleo— uno de los factores de la crisis energética de comienzos del siglo XXI. Esto ha planteado la necesidad de nuevas fuentes de energía, especialmente las renovables.



2. ELECTROSTÁTICA Y ELECTRODINÁMICA

La electrostática es la rama de la física que estudia los fenómenos resultantes de la distribución de cargas eléctricas en reposo, esto es, del campo electrostático. Los fenómenos electrostáticos son conocidos desde la antigüedad. Los griegos del siglo V a. C. ya sabían que al frotar ciertos objetos estos adquirían la propiedad de atraer cuerpos livianos. En 1785 el físico francés Charles Coulomb publicó un tratado donde

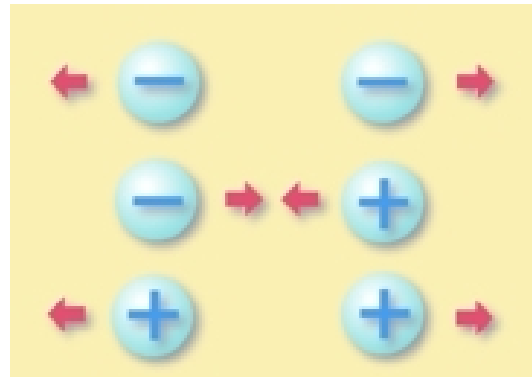
cuantificaba las fuerzas de atracción y repulsión de cargas eléctricas estáticas y describía, por primera vez, cómo medirlas usando una balanza de torsión. Esta ley se conoce en su honor con el nombre de ley de Coulomb.

Durante el siglo XIX se generalizaron las ideas de Coulomb, se introdujo el concepto de campo eléctrico y potencial eléctrico, y se formuló la ecuación de Laplace, que determina el potencial eléctrico en el caso electrostático. Se produjeron también avances significativos en la electrodinámica, que estudia los fenómenos eléctricos producidos por cargas en movimiento. En estos fenómenos aparecen asimismo campos magnéticos, que pueden ser ignorados en el caso de circuitos con corriente eléctrica estacionaria, pero deben ser tomados en cuenta en el caso de circuitos de corriente alterna.

Finalmente, en 1864 el físico escocés James Clerk Maxwell unificó las leyes de la electricidad y del magnetismo en un sistema de cuatro ecuaciones en derivadas parciales conocidas como ecuaciones de Maxwell. Con ellas se desarrolló el estudio de los fenómenos eléctricos y magnéticos, mostrando que ambos tipos son manifestaciones del único fenómeno del electromagnetismo, que incluía también a las ondas electromagnéticas.

3. CARGA ELÉCTRICA

La carga eléctrica es una propiedad que poseen algunas partículas subatómicas y que se manifiesta mediante las fuerzas observadas entre ellas. La materia cargada eléctricamente es influida por los campos electromagnéticos siendo, a su vez, generadora de ellos. La interacción entre carga y campo eléctrico es la fuente de una de las cuatro interacciones fundamentales, la interacción electromagnética. La partícula que transporta la información de estas interacciones es el fotón. Estas fuerzas son de alcance infinito y no se manifiestan de forma



inmediata, sino que tardan un tiempo $t = \frac{d}{c}$, donde c es la velocidad de la luz en el medio en el que se transmite y d la distancia entre las cargas.

Las dos partículas elementales cargadas que existen en la materia y que se encuentran de forma natural en la Tierra son el electrón y el protón, aunque pueden encontrarse otras partículas cargadas procedentes del exterior (como los muones o los piones). Todos los hadrones (como el protón y el neutrón) además, están constituidos por partículas cargadas más pequeñas llamadas quarks, sin embargo estas no pueden encontrarse libres en la naturaleza.

Cuando un átomo gana o pierde un electrón, queda cargado eléctricamente. A estos átomos cargados se les denomina iones.

Los trabajos de investigación realizados en la segunda mitad del siglo XIX por el premio Nobel de Física Joseph John Thomson, que le llevaron en 1897 a descubrir el electrón, y de Robert Millikan a medir su carga, determinaron la naturaleza discreta de la carga eléctrica.

En el Sistema Internacional de Unidades la unidad de carga eléctrica se denomina culombio (símbolo C) y se define como la cantidad de carga que pasa por una sección en 1 segundo cuando la corriente eléctrica es de 1 amperio. Se corresponde con la carga de $6,24 \times 10^{18}$ electrones aproximadamente. La carga más pequeña que se encuentra en la naturaleza es la carga del electrón (que es igual en magnitud a la del protón y de signo opuesto): $e = 1,602 \times 10^{-19}$ C (1 eV en unidades naturales).

4. FUERZA ENTRE CARGAS

Coulomb fue el primero en determinar, en 1785, el valor de las fuerzas ejercidas entre cargas eléctricas. Usando una balanza de torsión determinó que la magnitud de la fuerza con que se atraen o repelen dos

cargas eléctricas puntuales en reposo es directamente proporcional al producto de las magnitudes de cada carga e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa.

$F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2}$, donde q_1 y q_2 son las cargas, r es la distancia que las separa y la constante de proporcionalidad k depende del sistema de unidades.

Una propiedad fundamental de estas fuerzas es el principio de superposición que establece que, cuando hay varias cargas q_j , la fuerza resultante sobre una cualquiera de ellas es la suma vectorial de las fuerzas ejercidas por todas las demás. La fuerza \vec{F}_i ejercida sobre la carga puntual q_i en reposo está dada en el SI por:

$\vec{F}_i = 9 \cdot 10^9 \cdot q_i \cdot \sum_{j \neq i} q_j \cdot \frac{\vec{r}_{ij}}{r_{ij}^3}$, donde $\vec{r}_{ij} = \vec{r}_i - \vec{r}_j$ denota el vector que une la carga q_j con la carga q_i .

Cuando las cargas están en movimiento aparecen también fuerzas magnéticas. La forma más sencilla de describir el fenómeno es con el uso de campos eléctrico (\vec{E}) y magnético (\vec{B}), de los que a su vez se pueden derivar las fuerzas a partir de la fórmula de Lorentz: $\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$

En el caso general de cargas distribuidas de manera arbitraria, no es posible escribir expresiones explícitas de las fuerzas. Hay que resolver las ecuaciones de Maxwell, calcular los campos y derivar las fuerzas a partir de las expresiones de la energía electromagnética.

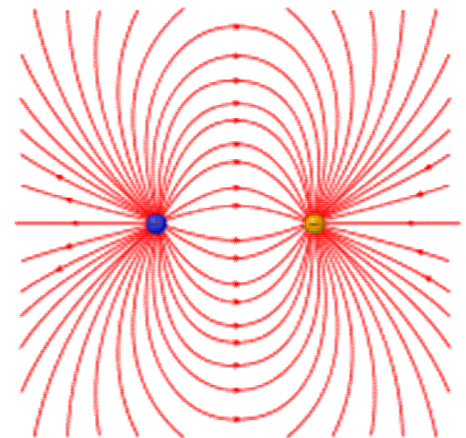
5. CAMPOS ELÉCTRICO Y MAGNÉTICO

Los campos eléctrico (\vec{E}) y magnético (\vec{B}), son campos vectoriales caracterizables en cada punto del espacio y cada instante del tiempo por un módulo, una dirección y un sentido. Una propiedad fundamental de estos campos es el principio de superposición, según el cual el campo resultante puede ser calculado como la suma vectorial de los campos creados por cada una de las cargas eléctricas.

Se obtiene una descripción sencilla de estos campos dando las líneas de fuerza o de campo, que son curvas tangentes a la dirección de los vectores de campo. En el caso del campo eléctrico, esta línea corresponde a la trayectoria que seguiría una carga sin masa que se encuentre libre en el seno del campo y que se deja mover muy lentamente.

Normalmente la materia es neutra, es decir, su carga eléctrica neta es nula. Sin embargo, en su interior tiene cargas positivas y negativas y se localizan corrientes eléctricas en los átomos y moléculas, lo cual da lugar a campos eléctricos y magnéticos. En el caso de dos cargas opuestas se generan campos dipolares, como el representado en la figura de la derecha, donde las cargas de igual magnitud y signos opuestos están muy cercanas entre sí. Estos campos dipolares son la base para describir casos tan fundamentales como los enlaces iónicos en las moléculas, las características como disolvente del agua, o el funcionamiento de las antenas entre otros.

Los campos eléctricos y magnéticos se calculan resolviendo las ecuaciones de Maxwell, siendo magnitudes inseparables en general.

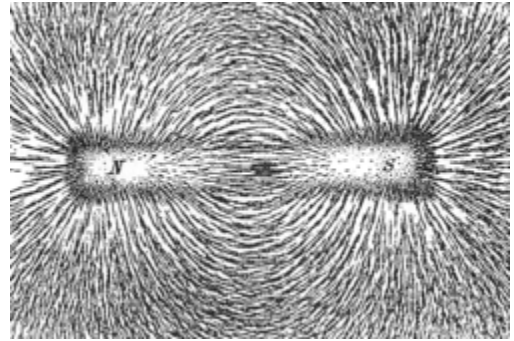


II. MAGNETISMO

En física, el **magnetismo** es un fenómeno por el que los materiales ejercen fuerzas de atracción o repulsión sobre otros materiales. Hay algunos materiales conocidos que han presentado propiedades magnéticas detectables fácilmente como el níquel, hierro, cobalto y sus aleaciones que comúnmente se llaman imanes. Sin embargo todos los materiales son influenciados, de mayor o menor forma, por la presencia de un campo magnético.

También el magnetismo tiene otras manifestaciones en física, particularmente como uno de los dos componentes de la onda electromagnética, como, por ejemplo, la luz.

Cada electrón es por su naturaleza, un pequeño imán. Ordinariamente, innumerables electrones de un material están orientados aleatoriamente en diferentes direcciones, pero en un imán casi todos los electrones tienden a orientarse en la misma dirección, creando una fuerza magnética grande o pequeña dependiendo del número de electrones que estén orientados.



Además del campo magnético intrínseco del electrón, algunas veces hay que contar también con el campo magnético debido al movimiento orbital del electrón alrededor del núcleo. Este efecto es análogo al campo generado por una corriente eléctrica que circula por una bobina. De nuevo, en general, el movimiento de los electrones no da lugar a un campo magnético en el material, pero en ciertas condiciones, los movimientos pueden alinearse y producir un campo magnético total medible.

El comportamiento magnético de un material depende de la estructura del material y, particularmente, de la configuración electrónica.

1. HISTORIA

Los fenómenos magnéticos fueron conocidos por los antiguos griegos. Se dice que por primera vez se observaron en la ciudad de "Magnesia" en Asia Menor, de ahí el término magnetismo. Sabían que ciertas piedras atraían el hierro y que los trocitos de hierro atraídos, atraían a su vez a otros. Estas se denominaron imanes naturales.

El primer filósofo que estudió el fenómeno del magnetismo fue Tales de Mileto, filósofo griego que vivió entre 625 a. C. y 545 a. C. En China, la primera referencia a este fenómeno se encuentra en un manuscrito del siglo IV a. C. titulado *Libro del amo del valle del diablo*: «La magnetita atrae al hierro hacia sí o es atraída por éste». La primera mención sobre la atracción de una aguja aparece en un trabajo realizado entre los años 20 y 100 de nuestra era: «La magnetita atrae a la aguja».

El científico Shen Kua (1031-1095) escribió sobre la brújula de aguja magnética y mejoró la precisión en la navegación empleando el concepto astronómico del norte absoluto. Hacia el siglo XII los chinos ya habían desarrollado la técnica lo suficiente como para utilizar la brújula para mejorar la navegación. Alexander Neckham fue el primer europeo en conseguir desarrollar esta técnica, en 1187.

El conocimiento del magnetismo se mantuvo limitado a los imanes, hasta que en 1820, Hans Christian Ørsted, profesor de la Universidad de Copenhague, descubrió que un hilo conductor sobre el que circulaba una corriente ejercía una perturbación magnética a su alrededor, que llegaba a poder mover una aguja magnética situada en ese entorno. Muchos otros experimentos siguieron, con André-Marie Ampère, Carl Friedrich Gauss, Michael Faraday y otros que encontraron vínculos entre el magnetismo y la electricidad. James Clerk Maxwell sintetizó y explicó estas observaciones en sus ecuaciones de Maxwell. Unificó el magnetismo y la electricidad en un solo campo, el electromagnetismo. En 1905, Einstein usó estas leyes para comprobar su teoría de la relatividad especial, en el proceso mostró que la electricidad y el magnetismo estaban fundamentalmente vinculadas.

El electromagnetismo continuó desarrollándose en el siglo XX, siendo incorporado en las teorías más fundamentales, como la teoría de campo de gauge, electrodinámica cuántica, teoría electrodébil y, finalmente, en el modelo estándar.

2. LA FÍSICA DEL MAGNETISMO

Como consecuencia de la teoría de la relatividad especial de Einstein, la electricidad y el magnetismo estaban comprendidos como vinculantes. Tanto el magnetismo sin la electricidad como la electricidad sin magnetismo serían incoherentes con la nueva teoría por los efectos como la contracción de la longitud, la dilatación del tiempo y la dependencia de la velocidad en el campo magnético. Sin embargo, cuando ambas fueron tomadas en cuenta, la reciente teoría del electromagnetismo fue totalmente coherente con la relatividad. En particular, un fenómeno que parece como eléctrico para un observador puede parecer magnético para otro, o más generalmente las contribuciones generales de la electricidad y el magnetismo son dependientes del marco de referencia.

Entonces, la "mezcla" de la relatividad especial entre electricidad y magnetismo en una sola dio un fenómeno inseparable llamado electromagnetismo (análogo a lo que la misma teoría "mezcló" al tiempo con el espacio en el espacio-tiempo).

3. CAMPOS Y FUERZAS MAGNÉTICAS

El fenómeno del magnetismo es ejercido por un campo magnético, p.e. una corriente eléctrica o un dipolo magnético crea un campo magnético, éste al girar imparte una fuerza magnética a otras partículas que están en el campo.

Para una aproximación excelente (pero ignorando algunos efectos cuánticos, véase electrodinámica cuántica) las ecuaciones de Maxwell (que simplifican la ley de Biot-Savart en el caso de corriente constante) describen el origen y el comportamiento de los campos que gobiernan esas fuerzas. Por lo tanto el magnetismo se observa siempre que partículas cargadas eléctricamente están en movimiento. Por ejemplo, del movimiento de electrones en una corriente eléctrica o en casos del movimiento orbital de los electrones alrededor del núcleo atómico. Estas también aparecen de un dipolo magnético intrínseco que aparece de los efectos cuánticos, p.e. del spin de la mecánica cuántica.

La misma situación que crea campos magnéticos (carga en movimiento en una corriente o en un átomo y dipolos magnéticos intrínsecos) son también situaciones en que el campo magnético causa sus efectos, creando una fuerza. Cuando una partícula cargada se mueve a través de un campo magnético B , se ejerce una fuerza F dado por el producto cruz: $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$, donde q es la carga eléctrica de la partícula, \vec{v} es el vector velocidad de la partícula y \vec{B} es el campo magnético. Debido a que esto es un producto cruz, la fuerza es perpendicular al movimiento de la partícula y al campo magnético.

La fuerza magnética no realiza trabajo mecánico en la partícula, esto cambiaría la dirección del movimiento de ésta, pero esto no causa su aumento o disminución de la velocidad. La magnitud de la fuerza es: $F = qvB \sin \theta$ donde θ es el ángulo entre los vectores \vec{v} y \vec{B} .

Una herramienta para determinar la dirección del vector velocidad de una carga en movimiento, es siguiendo la ley de la mano derecha (véase Regla de la mano derecha).

El físico alemán Heinrich Lenz formuló lo que ahora se denomina la ley de Lenz, ésta da una dirección de la fuerza electromotriz (fem) y la corriente resultante de una inducción electromagnética.

4. DIPOLOS MAGNÉTICOS

Se puede ver una muy común fuente de campo magnético en la naturaleza, un dipolo. Éste tiene un "polo sur" y un "polo norte", sus nombres se deben a que antes se usaban los magnetos como brújulas, que interactuaban con el campo magnético terrestre, para indicar el norte y el sur del globo.

Un campo magnético contiene energía y sistemas físicos que se estabilizan con configuraciones de menor energía. Por lo tanto, cuando se encuentra en un campo magnético, un **dipolo magnético** tiende a

alinearse solo con una polaridad diferente a la del campo, lo que cancela al campo lo máximo posible y disminuye la energía recolectada en el campo al mínimo. Por ejemplo, dos barras magnéticas idénticas pueden estar una a lado de otra normalmente alineadas de norte a sur, resultando en un campo magnético más pequeño y resiste cualquier intento de reorientar todos sus puntos en una misma dirección. La energía requerida para reorientarlos en esa configuración es entonces recolectada en el campo magnético resultante, que es el doble de la magnitud del campo de un magneto individual. (Esto es porque un magneto usado como brújula interactúa con el campo magnético terrestre para indicar Norte y Sur).

Una alternativa formulada, equivalente, que es fácil de aplicar pero ofrece una menor visión, es que un dipolo magnético en un campo magnético experimenta un torque y una fuerza que puede ser expresada en términos de un campo y de la magnitud del dipolo (p.e. sería el momento magnético dipolar). Para ver estas ecuaciones véase dipolo magnético.

5. DIPOLOS MAGNÉTICOS ATÓMICOS

La causa física del magnetismo en los cuerpos, distinto a la corriente eléctrica, es por los dipolos atómicos magnéticos. Dipolos magnéticos o momentos magnéticos, en escala atómica resultan de dos tipos diferentes del movimiento de electrones. El primero es el movimiento orbital del electrón sobre su núcleo atómico; este movimiento puede ser considerado como una corriente de bucles, resultando en el momento dipolar magnético del orbital. La segunda, más fuerte, fuente de momento electrónico magnético es debido a las propiedades cuánticas llamadas momento de spin del dipolo magnético (aunque la teoría mecánica cuántica actual dice que los electrones no giran físicamente, ni orbitan el núcleo).

El momento magnético general de un átomo es la suma neta de todos los momentos magnéticos de los electrones individuales. Por la tendencia de los dipolos magnéticos a oponerse entre ellos se reduce la energía neta, en un átomo los momentos magnéticos opuestos de algunos pares de electrones se cancelan entre ellos, ambos en un movimiento orbital y en momentos magnéticos de espín. Así, en el caso de un átomo con orbitales electrónicos o suborbitales electrónicos completamente llenos, el momento magnético normalmente se cancela completamente entre ellos y solo los átomos con orbitales electrónicos semillenos tienen un momento magnético, su fuerza depende del número de electrones impares.

La diferencia en la configuración de los electrones en varios elementos determina la naturaleza y magnitud de los momentos atómicos magnéticos, lo que a su vez determina la diferencia entre las propiedades magnéticas de varios materiales. Existen muchas formas de comportamiento magnético o tipos de magnetismo: el ferromagnetismo, el diamagnetismo y el paramagnetismo; esto se debe precisamente a las propiedades magnéticas de los materiales, por eso se ha estipulado una clasificación respectiva de estos, según su comportamiento ante un campo magnético inducido, como sigue:

6. CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES MAGNÉTICOS

TIPO DE MATERIAL	CARACTERÍSTICAS
NO MAGNÉTICO	No afecta el paso de las líneas de Campo magnético. Ejemplo: el Vacío.
DIAMAGNÉTICO	Material débilmente magnético. Si se sitúa una barra magnética cerca de él, esta lo repele. Ejemplo: Bismuto (Bi), Plata (Ag), Plomo (Pb), Agua.
PARAMAGNÉTICO	Presenta un magnetismo significativo. Atraído por la barra magnética. Ejemplo: Aire, Aluminio (Al), Paladio (Pd), Magneto Molecular.

FERROMAGNÉTICO	Magnético por excelencia o fuertemente magnético. Atraído por la barra magnética. Paramagnético por encima de la temperatura de Curie (La temperatura de Curie del hierro metálico es aproximadamente unos 770 °C). Ejemplo: Hierro (Fe), Cobalto (Co), Níquel (Ni), Acero suave.
ANTIFERROMAGNÉTICO	No magnético aun bajo acción de un campo magnético inducido. Ejemplo: Óxido de Manganeso (MnO ₂).
FERRIMAGNÉTICO	Menor grado magnético que los materiales ferromagnéticos. Ejemplo: Ferrita de Hierro.
SUPERPARAMAGNÉTICO	Materiales ferromagnéticos suspendidos en una matriz dieléctrica. Ejemplo: Materiales utilizados en cintas de audio y video.
FERRITAS	Ferromagnético de baja conductividad eléctrica. Ejemplo: Utilizado como núcleo inductores para aplicaciones de corriente alterna.

7. MONOPOLOS MAGNÉTICOS

Puesto que un imán de barra obtiene su ferromagnetismo de los electrones magnéticos microscópicos distribuidos uniformemente a través del imán, cuando un imán es partido a la mitad cada una de las piezas resultantes es un imán más pequeño. Aunque se dice que un imán tiene un polo norte y un polo sur, estos dos polos no pueden separarse el uno del otro. Un monopolito -si tal cosa existe- sería una nueva clase fundamentalmente diferente de objeto magnético. Actuaría como un polo norte aislado, no atado a un polo sur, o viceversa. Los monopolitos llevarían "carga magnética" análoga a la carga eléctrica. A pesar de búsquedas sistemáticas a partir de 1931 (como la de 2006), nunca han sido observadas, y muy bien podrían no existir.(ref). Milton menciona algunos eventos no concluyentes (p.60) y aún concluye que "no ha sobrevivido en absoluto ninguna evidencia de monopolitos magnéticos".

8. TIPOS DE MATERIALES MAGNÉTICOS

Existen diversos tipos de comportamiento de los materiales magnéticos: el ferromagnetismo, el diamagnetismo y el paramagnetismo.

En los materiales diamagnéticos, la disposición de los electrones de cada átomo es tal que se produce una anulación global de los efectos magnéticos. Sin embargo, si el material se introduce en un campo inducido, la sustancia adquiere una imantación débil y en el sentido opuesto al campo inductor.

Si se sitúa una barra de material diamagnético en el interior de un campo magnético uniforme e intenso, esta se dispone transversalmente respecto de aquel.

Los materiales paramagnéticos no presentan la anulación global de efectos magnéticos, por lo que cada átomo que los constituye actúa como un pequeño imán. Sin embargo, la orientación de dichos imanes es, en general arbitraria, y el efecto global se anula.

Así mismo, si el material paramagnético se somete a la acción de un campo magnético inductor, el campo magnético inducido en dicha sustancia se orienta en el sentido del campo magnético inductor.

Esto hace que una barra de material paramagnético suspendida libremente en el seno de un campo inductor, se alinee con este.

El magnetismo inducido, aunque débil, es suficiente intenso como para imponer al efecto magnético. Para comparar los tres tipos de magnetismo se emplea la razón entre el campo magnético inducido y el inductor.

III. LA INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

La inducción electromagnética constituye una pieza destacada en el sistema de Relaciones mutuas entre electricidad y magnetismo que se conoce con el nombre de electromagnetismo.

1. ANTECEDENTES HISTÓRICOS

El descubrimiento por Faraday y Henry de este fenómeno introdujo una cierta simetría en el mundo del electromagnetismo. Maxwell consiguió reunir en una sola teoría los conocimientos básicos sobre la electricidad y el magnetismo. Su teoría electromagnética predijo, antes de ser observadas experimentalmente, la existencia de ondas electromagnéticas. Hertz comprobó su existencia e inició para la humanidad la era de las telecomunicaciones.

En el año 1819 Hans Christian Oersted, profesor de física de la Universidad de Copenhague, descubrió que al acercar una brújula a un conductor por el que circulaba corriente eléctrica la aguja de ésta se movía disponiéndose perpendicularmente a la dirección del conductor.

Este descubrimiento de que una corriente eléctrica produce un campo magnético estimuló la imaginación de los físicos de la época y multiplicó el número de experimentos en busca de relaciones nuevas entre la electricidad y el magnetismo. También era conocido a través de los estudios de Ampère que algunos materiales como la magnetita, imanes y brújulas, debían sus propiedades magnéticas a la existencia de unas corrientes microscópicas.

En ese ambiente científico pronto surgiría la idea inversa de producir corrientes eléctricas mediante campos magnéticos.

Algunos físicos famosos y otros menos conocidos estuvieron cerca de demostrar experimentalmente que también la naturaleza apostaba por tan atractiva idea, de hecho Joseph Henry, físico norteamericano descubrió un año antes que Faraday la inducción electromagnética pero hizo público su descubrimiento unos meses más tarde que Faraday y por eso se le atribuye el descubrimiento a este último.

A las corrientes eléctricas producidas mediante campos magnéticos Faraday las llamó corrientes inducidas. Desde entonces al fenómeno consistente en generar campos eléctricos a partir de campos magnéticos variables se denomina inducción electromagnética.

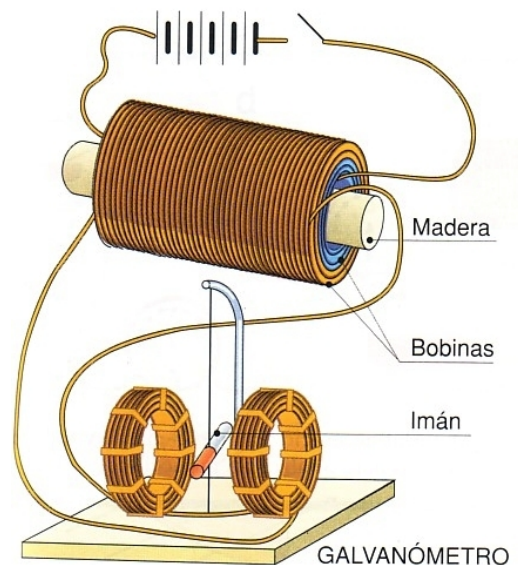
2. APLICACIONES

La inducción electromagnética es la producción de corrientes eléctricas por campos magnéticos variables con el tiempo.

Se han desarrollado un sin número de aplicaciones prácticas de este fenómeno físico. El transformador que se emplea para conectar una computadora a la red, la dinamo de una bicicleta o el alternador de una gran central hidroeléctrica son sólo algunos ejemplos que muestran la deuda que la sociedad actual tiene contraída con ese modesto encuadernador convertido, más tarde, en físico experimental que fue Michael Faraday.

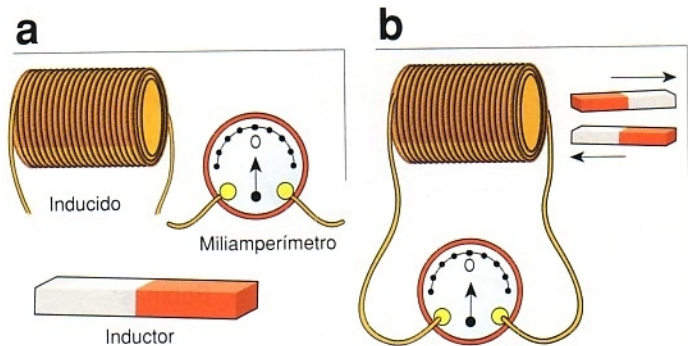
3. LAS EXPERIENCIAS DE FARADAY

Las experiencias que llevaron a Faraday al descubrimiento de la inducción electromagnética pueden ser agrupadas en dos categorías: experiencias con corrientes y experiencias con imanes.



Primera experiencia de Faraday: En primer lugar preparó dos solenoides, uno arrollado sobre el otro, pero aislados eléctricamente entre sí. Uno de ellos lo conectó a una pila y el otro a un galvanómetro y observó cómo cuando accionaba el interruptor del primer circuito la aguja del galvanómetro del segundo circuito se desplazaba, volviendo a cero tras unos instantes. Sólo al abrir y al cerrar el interruptor el galvanómetro detectaba el paso de una corriente que desaparecía con el tiempo. Además, la aguja se desplazaba en sentidos opuestos en uno y otro caso.

Segunda experiencia de Faraday: En el segundo grupo de experiencias Faraday utilizó un imán recto y una bobina conectada a un galvanómetro. Al introducir bruscamente el imán en la bobina observó una desviación en la aguja, desviación que desaparecía si el imán permanecía inmóvil en el interior de la bobina. Cuando el imán era retirado la aguja del galvanómetro se desplazaba de nuevo, pero esta vez en sentido contrario. Cuando repetía todo el proceso completo la aguja oscilaba de uno a otro lado y su desplazamiento era tanto mayor cuanto más rápido era el movimiento del imán entrando y saliendo en el interior de la bobina. Lo mismo sucedía cuando mantenía quieto el imán y movía la bobina sobre él.

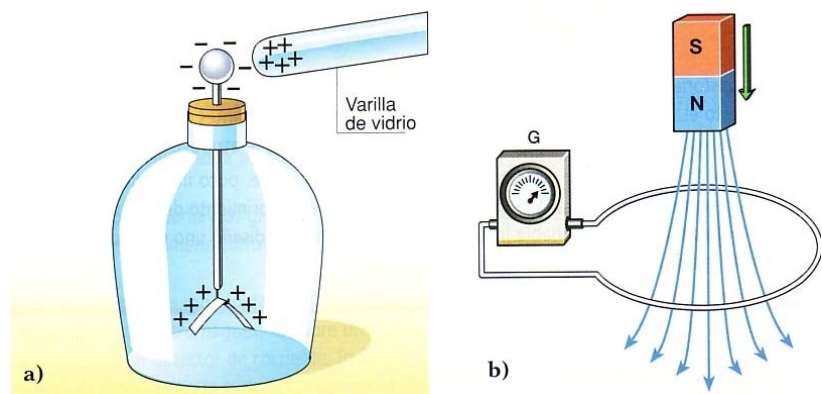


La representación del campo magnético en forma de líneas de fuerza permitió a Faraday encontrar una explicación intuitiva para este tipo de fenómenos: Para que se produjera una corriente inducida en la bobina era necesario que las líneas de fuerza producidas por el imán fueran cortadas por el hilo conductor de la bobina como consecuencia del movimiento de uno u otro cuerpo.

En el primer grupo de experiencias, las líneas de fuerza, al aparecer y desaparecer junto con la corriente debida a la pila, producían el mismo tipo de efectos.

(Figura a) Las experiencias llevadas a cabo con electroscopios evidenciaban la existencia de fuerzas de atracción y repulsión entre cargas de distinto o igual signo respectivamente. Basta con aproximar una varilla de vidrio previamente frotada para que se pusieran de manifiesto los fundamentos de la electrostática.

(Figura b) Al disponer un conductor y acercar y alejar un imán aparecía corriente eléctrica que era detectada al moverse la aguja de un galvanómetro. Si simplemente se sitúa un imán próximo al conductor pero no hay movimiento relativo entre ellos (ya sea por parte del conductor o del imán) no se crea ningún tipo de corriente.

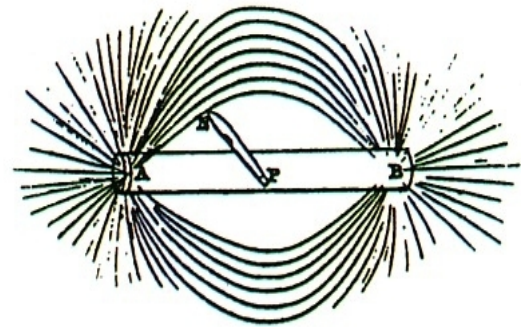


Las experiencias anteriores a las de Faraday, al no tener en cuenta los aspectos dinámicos, o de cambio con el tiempo, de esta clase de fenómenos, no pudieron detectar este tipo de corrientes que aparecen en un circuito eléctrico sin que exista dentro del propio circuito ninguna pila que las genere.

IV. FLUJO MAGNÉTICO

La representación de la influencia magnética de un imán o de una corriente eléctrica en el espacio que les rodea mediante líneas de fuerza fue ideada por Faraday y aplicada en la interpretación de la mayor parte de sus experimentos sobre electromagnetismo.

Mediante este tipo de imágenes Faraday compensaba su escasa preparación matemática, apoyándose así su enorme habilidad gráfica y su no inferior intuición científica. La noción de flujo magnético recoge esa tradición iniciada por Faraday de representar los campos

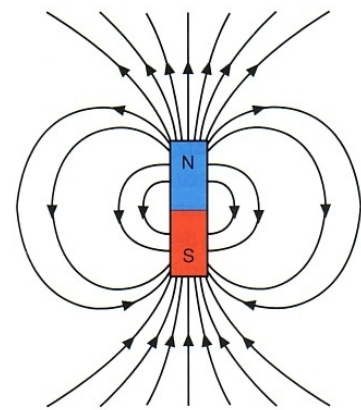


mediante líneas de fuerza, pero añade, además, un significado matemático.

Cuando se observa, con la ayuda de limaduras de hierro, el campo magnético creado por un imán recto, se aprecia que, en los polos, las líneas de fuerza están más próximas y que se separan al alejarse de ellos.

Dado que la intensidad del campo magnético B disminuye con la distancia a los polos, parece razonable relacionar ambos hechos y establecer por convenio una proporcionalidad directa entre la intensidad del campo B y la cantidad de líneas de fuerza que atraviesan una superficie de referencia unidad.

El número de líneas de fuerza del campo B que atraviesa una



superficie unidad depende de cómo esté orientada tal superficie con respecto a la dirección de aquéllas. Así, para un conjunto de líneas de fuerza dado, el número de puntos de intersección o de corte con la superficie unidad será máximo para una orientación perpendicular y nulo para una orientación paralela.

El número de líneas de fuerza del campo B que atraviesa perpendicularmente una superficie constituye entonces una forma de expresar el valor de la intensidad de dicho campo.

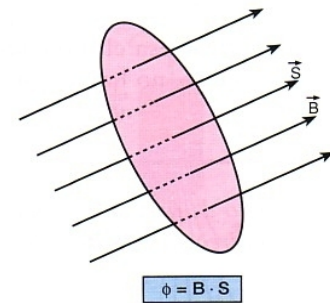
Se define el flujo del campo magnético B a través de una superficie, y se representa por la letra griega Φ , como el número total de líneas de fuerza que atraviesan tal superficie.

La idea de flujo se corresponde entonces con la de «cantidad» de campo magnético que atraviesa una superficie determinada. En el Sistema Internacional se expresa en weber (Wb).

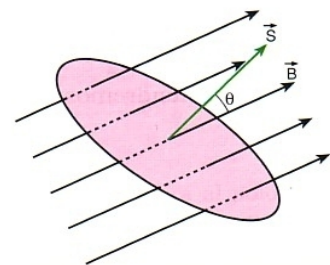
En términos matemáticos, para un campo magnético constante y una superficie plana de área S , el flujo magnético se expresa en la forma:

$\Phi = B \cdot S \cdot \cos \theta$, siendo θ el ángulo que forman las líneas de fuerza (el vector B) con la perpendicular a la superficie.

Dicha ecuación recoge, mediante el $\cos \theta$, el hecho de que el flujo varíe con la orientación de la superficie respecto del campo B y también que su valor dependa del área S de la superficie atravesada. Para $\theta = 0^\circ$ (intersección perpendicular) el flujo es máximo e igual a $B \cdot S$; para $\theta = 90^\circ$ (intersección paralela) el flujo es nulo.



$$\Phi = B \cdot S$$



$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos \theta$$

V. FUERZA ELECTROMOTRIZ INDUCIDA

LA LEY DE FARADAY-HENRY: Independientemente de Faraday, Joseph Henry, en los Estados Unidos, había observado que un campo magnético variable produce en un circuito próximo una corriente eléctrica. Los resultados concordantes de las experiencias de ambos físicos pueden resumirse en un enunciado que se conoce como ley de Faraday-Henry: La fuerza electromotriz inducida en un circuito es proporcional a la rapidez con la que varía el flujo magnético que lo atraviesa.

O en forma matemática: $\varepsilon = - \Delta\Phi / \Delta t$

Siendo ε la fuerza electromotriz inducida y $\Delta\Phi$ la variación de flujo magnético que se produce en el intervalo de tiempo Δt .

De acuerdo con esta ecuación, la magnitud de f. e. m.

inducida coincide con lo que varía el flujo magnético por unidad de tiempo. La presencia de la fuerza electromotriz ε en la ley de Faraday-Henry en lugar de la intensidad de corriente resalta una característica de la inducción, su capacidad para sustituir a un generador, es decir, para producir los mismos efectos que éste en un circuito eléctrico.

Por su parte, el signo negativo recoge el hecho, observado experimentalmente por Faraday y Henry, de que aumentos ($\Delta\Phi > 0$) y disminuciones ($\Delta\Phi < 0$) de flujo magnético producen corrientes inducidas de sentidos opuestos.

Si no hay variación con el tiempo del flujo magnético que atraviesa un circuito, el fenómeno de la inducción electromagnética no se presenta. Tal circunstancia explica los fracasos de aquellos físicos contemporáneos de Faraday que pretendieron conseguir corrientes inducidas en situaciones estáticas, o de reposo, del circuito respecto del imán o viceversa.

Cuando la ley de Faraday-Henry se aplica a una bobina formada por N espiras iguales toma la forma

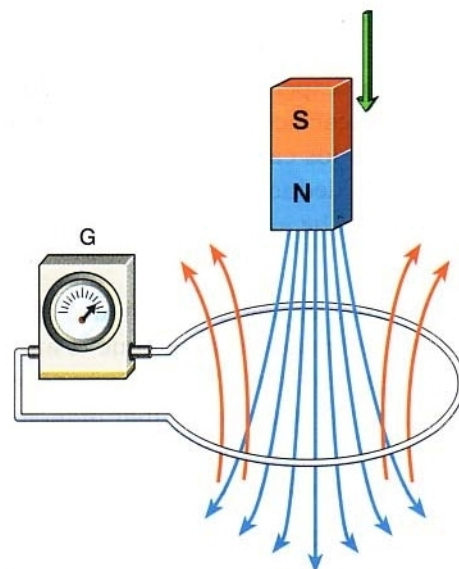
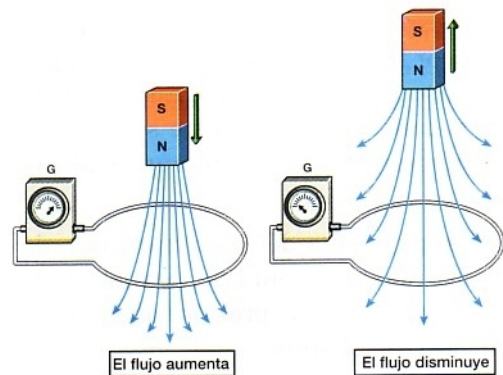
$$\varepsilon = -N \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

1. EL SENTIDO DE LAS CORRIENTES INDUCIDAS

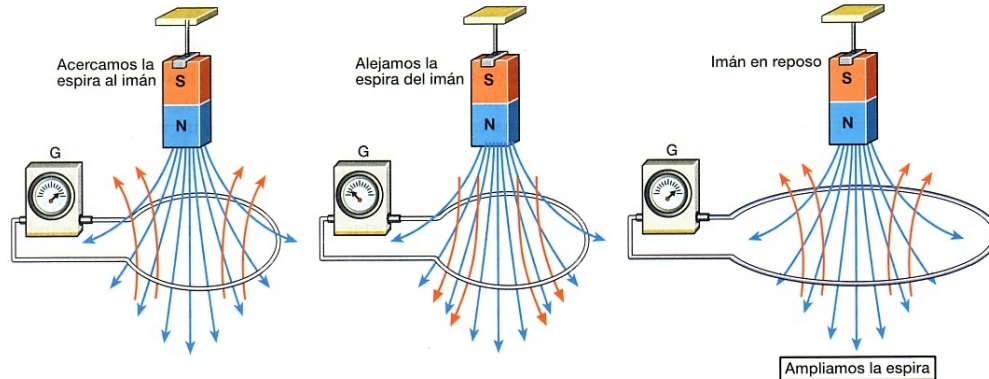
Aunque la ley de Faraday-Henry, a través de su signo negativo, establece una diferencia entre las corrientes inducidas por un aumento del flujo magnético y las que resultan de una disminución de dicha magnitud, no explica este fenómeno.

Lenz (1804-1865), un físico alemán que investigó el electromagnetismo en Rusia al mismo tiempo que Faraday y Henry, propuso la siguiente explicación del sentido de circulación de las corrientes inducidas que se conoce como ley de Lenz: Las corrientes que se inducen en un circuito se producen en un sentido tal que con sus efectos magnéticos tienden a oponerse a la causa que las originó.

Así, cuando el polo norte de un imán se aproxima a una espira, la corriente inducida circulará en un sentido tal que la cara enfrentada al polo norte del imán sea también Norte, con lo que ejercerá una acción magnética repulsiva sobre el imán, la cual es preciso vencer para que se siga manteniendo el fenómeno de la inducción.



Inversamente, si el polo norte del imán se aleja de la espira, la corriente inducida ha de ser tal que genere un polo Sur que se oponga a la separación de ambos. Sólo manteniendo el movimiento relativo entre espira e imán persistirán las corrientes inducidas, de modo que si se detiene el proceso de acercamiento o de separación cesarían aquéllas y, por tanto, la fuerza magnética entre el imán y la espira desaparecería.



La ley de Lenz, que explica el sentido de las corrientes inducidas, puede ser a su vez explicada por un principio más general, el principio de la conservación de la energía.

La producción de una corriente eléctrica requiere un consumo de energía y la acción de una fuerza desplazando su punto de aplicación supone la realización de un trabajo.

En los fenómenos de inducción electromagnética es el trabajo realizado en contra de las fuerzas magnéticas que aparecen entre espira e imán el que suministra la energía necesaria para mantener la corriente inducida. Si no hay desplazamiento, el trabajo es nulo, no se transfiere energía al sistema y las corrientes inducidas no pueden aparecer. Análogamente, si éstas no se opusieran a la acción magnética del imán, no habría trabajo exterior, ni por tanto cesión de energía al sistema.

2. CÁLCULO DE LA F.E.M. INDUCIDA

Cuando se produce un movimiento entre imanes y conductores aparece una f.e.m. que podemos calcular estudiando la variación del flujo en un tiempo determinado.

Para determinar la f. e. m. deberemos calcular tanto el flujo inicial como el final aplicando la relación:

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos\theta$$

A continuación hallaremos la fuerza electromotriz inducida aplicando: $\varepsilon = \Phi_o - \Phi f / t$

Si en lugar de una espira de superficie S tenemos una bobina o devanado o solenoide no olvides que deberemos multiplicar por el número de espiras pues el campo magnético generado será tanto más intenso cuanto mayor sea el número de espiras.

Observa que se creará f.e.m. cuando varíe el flujo, es decir, cuando varíe el campo, o la superficie o la posición de la superficie (el ángulo que forma el vector superficie con el campo).

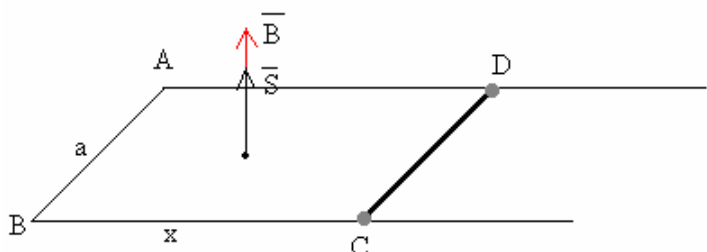
Estudiaremos a continuación estos tres casos:

Caso 1: Varía el campo magnético

Ejemplo: Una espira circular de 2cm de radio está situada perpendicularmente en un campo magnético que varía de 0,5 a 0,1 T en 3 segundos. Calcula el valor de la f.e.m. inducida.

Caso 2: Varía la superficie

Supongamos que el campo magnético B es constante y es perpendicular al plano donde se mueve una varilla. El flujo del



campo magnético a través del circuito de forma rectangular ABCD señalado en la figura es $\Phi = \mathbf{B} \cdot \mathbf{S} = Bax$

Donde $a \cdot x$ es el área del rectángulo ABCD.

Al moverse la varilla CD la dimensión x del rectángulo aumenta o disminuye, haciendo variar el flujo con el tiempo.

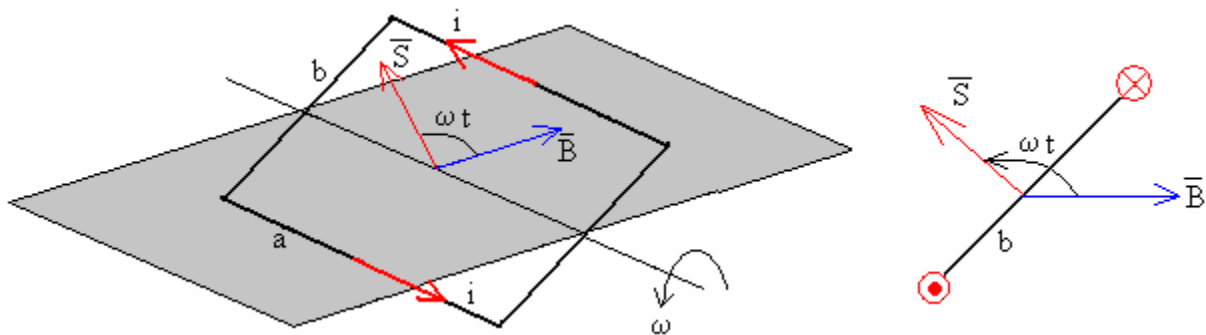
Ejemplo: Una varilla de 40 cm. de longitud se mueve a una velocidad de 10 cm/seg en el seno de un campo magnético de 0,5 T. Perpendicular al plano en que se produce el desplazamiento. Determina la fuerza electromotriz inducida:

Nota: Puedes considerar cualquier intervalo de tiempo y la solución no variará.

Por ejemplo: Para $t = 0 \text{ } \mathcal{E} = 0$ (la varilla aún no se ha movido)

Para $t = 1 \text{ } \mathcal{E} = 0,4 \cdot 0,1$ (rectángulo de 10 x 40 cm)

Caso 3: Cuando cambia el ángulo



Supongamos que la espira gira con velocidad angular constante ω . Al cabo de un cierto tiempo t el ángulo que forma el campo magnético y la perpendicular al plano de la espira es ωt .

El flujo del campo magnético B a través de una espira de área S es: $\Phi = \mathbf{B} \cdot \mathbf{S} = B \cdot S \cdot \cos(\omega t)$

La f. e. m en la espira es: $\mathcal{E} = \mathbf{B} \cdot \mathbf{S} \cdot \omega \cdot \text{sen}(\omega t)$

La fuerza electromotriz va cambiando continuamente será máxima cuando $\text{sen}(\omega t) = 1$ y será mínima cuando valga cero.

EN EJERCICIOS TEN PRESENTE: La velocidad angular ω suele darse en revoluciones o vueltas por minuto (r. p. m.) pero debemos pasar siempre a radianes por segundo. Para ello recuerda que una vuelta son 2π radianes y que un minuto tiene 60 segundos, por ejemplo:

$\omega = 120 \text{ r.p.m} = 120 \cdot 2\pi / 60 = 4\pi \text{ rad/seg}$

Si vamos a trabajar con la velocidad angular en radianes por segundo el ángulo vendrá también en radianes, para lo cual no olvides en este tipo de ejercicio poner la calculadora en modo radianes a la hora de calcular $\text{sen}(\omega t)$.

VI. PRODUCCIÓN DE CORRIENTE ALTERNA

La corriente alterna se caracteriza porque su sentido cambia alternativamente con el tiempo. Ello es debido a que el generador que la produce invierte periódicamente sus dos polos eléctricos, convirtiendo el positivo en negativo y viceversa, muchas veces por segundo.

La ley de Faraday-Henry establece que se induce una fuerza electromotriz (f. e .m.) \mathcal{E} en un circuito eléctrico siempre que varíe el flujo magnético Φ que lo atraviesa. Pero de acuerdo con la definición de flujo magnético, éste puede variar porque varíe el área S limitada por el conductor, porque varíe la intensidad del campo magnético B o porque varíe la orientación entre ambos dada por el ángulo θ .

En las primeras experiencias de Faraday las corrientes inducidas se conseguían variando el campo magnético B ; no obstante, es posible provocar el fenómeno de la inducción sin desplazar el imán ni modificar la corriente que pasa por la bobina, haciendo girar ésta en torno a un eje dentro del campo magnético debido a un imán. En tal caso el flujo magnético varía porque varía el ángulo.

1. GENERADOR DE CORRIENTE ALTERNA

Utilizando el tipo de razonamiento de Faraday, podría decirse que la bobina al rotar corta las líneas de fuerza del campo magnético del imán y ello da lugar a la corriente inducida.

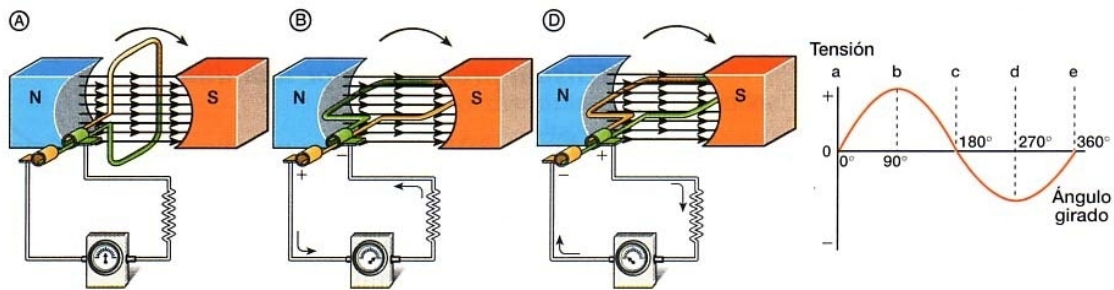
En una bobina de una sola espira la f. e. m. media que se induce durante un cuarto de vuelta al girar la bobina desde la posición paralela ($\theta = 90^\circ$) a la posición perpendicular ($\theta = 0^\circ$) puede calcularse a partir de la ley de Faraday - Henry en la forma:

$$\bar{\varepsilon} = - \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = - \frac{B \cdot S}{t}$$

Como el flujo inicial es cero ($\cos 90^\circ = 0$) y el final es $B \cdot S$ ($\cos 0^\circ = 1$), la variación $\Delta\Phi$ o diferencia entre ambos es igual al producto $B \cdot S$.

Considerando el instante inicial igual a cero, resulta $\Delta t = t - 0 = t$, siendo t el tiempo correspondiente al instante final después de un cuarto de vuelta. De este modo se obtiene el resultado anterior.

2. SENTIDO DE LA CORRIENTE ALTERNA



Si se hace rotar la espira uniformemente, ese movimiento de rotación periódico da lugar a una variación también periódica del flujo magnético o, en otros términos, la cantidad de líneas de fuerza que es cortada por la espira en cada segundo toma valores iguales a intervalos iguales de tiempo.

La f. e. m. inducida en la espira varía entonces periódicamente con la orientación y con el tiempo, pasando de ser positiva a ser negativa, y viceversa, de una forma alternativa.

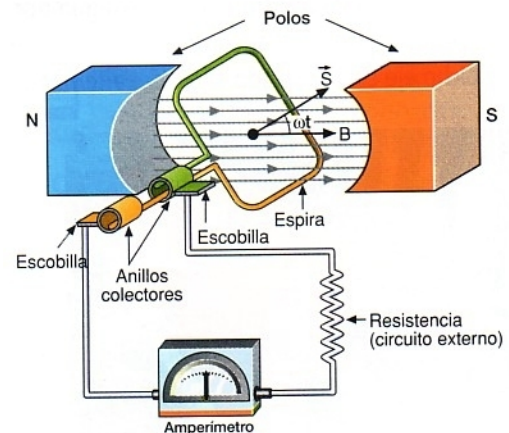
Se ha generado una f. e. m. alterna cuya representación gráfica, en función del tiempo, tiene la forma de una línea sinusoidal.

3. EL ALTERNADOR

Es el nombre que recibe el generador de corriente alterna. Se basa en la producción de una fuerza electromotriz alterna mediante el fenómeno de inducción electromagnética.

FUNCIONAMIENTO: El imán que genera el campo magnético se denomina inductor y la bobina en la que se induce la fuerza electromotriz recibe el nombre de inducido. Los dos extremos de hilo conductor del inducido se conectan a unos anillos colectores que giran junto con la bobina. Las escobillas, que suelen ser de grafito, están en contacto permanente, mediante fricción, con los anillos colectores y transmiten la tensión eléctrica producida a los bornes del generador en donde puede conectarse a un circuito exterior.

Por lo general, la bobina del inducido se monta sobre un núcleo de hierro. La elevada permeabilidad magnética de este material hace que el campo magnético que atraviesa la bobina aumente; ello significa que las líneas de fuerza se



aproximan entre sí aumentando el flujo magnético y, consiguientemente, el valor máximo de la f. e. m. inducida. Un efecto semejante se consigue aumentando el número de espiras del inducido.

TIPOS DE ALTERNADOR: En los grandes alternadores, el inducido está fijo y es el inductor el que se mueve, de modo que en este caso no son necesarios los anillos colectores ni las escobillas. Aunque la inducción electromagnética depende del movimiento relativo entre el campo magnético y el conductor, con este procedimiento se consigue salvar algunos inconvenientes relacionados con el paso de corrientes elevadas por el colector y las escobillas.

Por lo general, en los alternadores comerciales el campo magnético es producido por un electroimán y no por un imán natural; en tales casos el inductor se denomina también excitador, pues es una corriente eléctrica la que excita la producción del campo magnético externo.

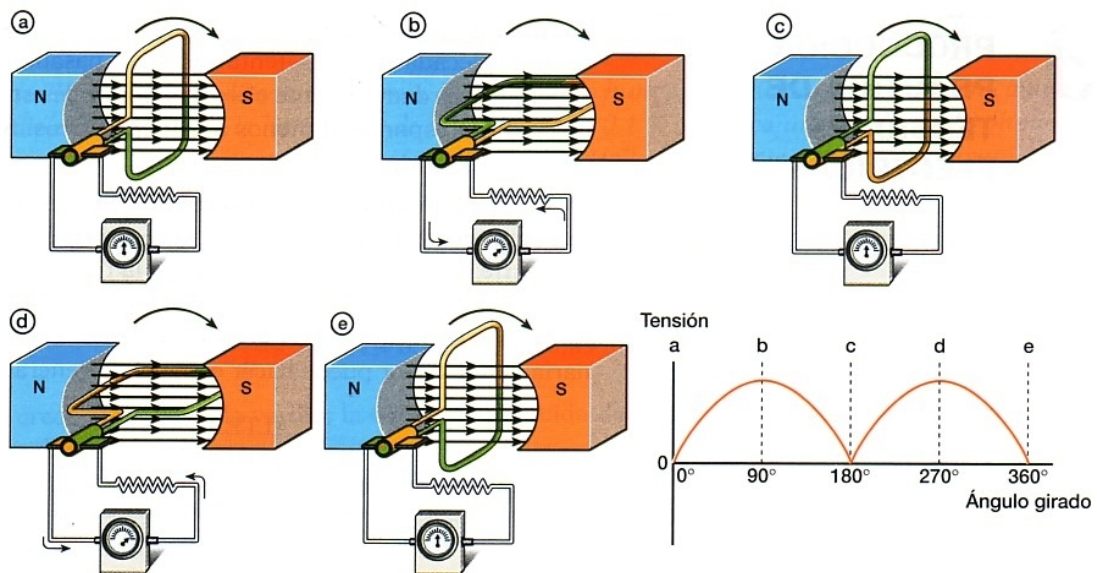
APLICACIONES: Los alternadores son los elementos esenciales en las centrales eléctricas. En ellos se genera una muy alta tensión eléctrica que se transporta a través de una red de tendidos eléctricos y es transformada en estaciones intermedias para llegar finalmente hasta los enchufes domésticos con un valor eficaz de 220 V. La frecuencia de oscilación de esta tensión alterna es en Europa de 50 Hz, lo que equivale a 50 ciclos por segundo.

4. LA DINAMO

Puede ser considerada como una modificación del alternador que permite generar corrientes continuas.

FUNCIONAMIENTO: Para lograr que la corriente que circula por la bobina tenga un único sentido, se han de invertir las conexiones justo en el instante en el que la f.e.m. cambia de signo. Ello se consigue sustituyendo los anillos colectores por un cilindro metálico compuesto de dos mitades aisladas entre sí o delgas y conectadas cada una a un extremo de hilo conductor de la bobina. Esa pieza se denomina conmutador porque cambia o conmuta en cada media vuelta la polaridad del generador, de tal forma que la tensión que llega a los bornes a través de las escobillas tiene siempre el mismo signo y al conectarlo al circuito exterior produce una corriente continua.

TIPO DE CORRIENTE PRODUCIDA:



En las dinamos sencillas la tensión producida, aunque tiene siempre el mismo signo, no mantiene un mismo valor, sino que varía de una forma ondulada o pulsante. Sin embargo, es posible conseguir una f. e. m. prácticamente constante introduciendo un número suficiente de bobinas, dividiendo otras tantas veces el anillo colector y añadiendo los correspondientes pares de escobillas.

Por este procedimiento la ondulación de la tensión, que es pronunciada en una dinamo sencilla, se reduce a un ligero rizado despreciable.

APLICACIONES: Las bicicletas utilizan la dinamo para producir luz a partir del movimiento. Tratándose por lo general de una dinamo sencilla, puede observarse cómo a baja velocidad la intensidad luminosa aumenta y disminuye alternativamente a un ritmo que depende de la velocidad. Cuando ésta es suficiente, la rapidez de la oscilación unida a la inercia del sistema hace que la intensidad luminosa de la lámpara se mantenga prácticamente constante. Este efecto es semejante al que se consigue al aumentar el número de bobinas, de delgas y de escobillas.

La dinamo es una máquina reversible que puede actuar como motor si se le aplica a través de las escobillas una corriente continua de intensidad conveniente. En el primer caso, funcionando como dinamo, la máquina transforma energía mecánica en energía eléctrica; en el segundo transforma energía eléctrica en movimiento.

VII. FUNDAMENTO DEL TRANSFORMADOR

1. INDUCCIÓN MUTUA

En sus primeras experiencias sobre el fenómeno de la inducción electromagnética Faraday no empleó imanes, sino dos bobinas arrolladas una sobre la otra y aisladas eléctricamente. Cuando variaba la intensidad de corriente que circulaba por una de ellas, se generaba una corriente inducida en la otra. Este es, en esencia, el fenómeno de la inducción mutua, en el cual el campo magnético es producido no por un imán, sino por una corriente eléctrica.

La variación de la intensidad de corriente en una bobina da lugar a un campo magnético variable. Este campo magnético origina un flujo magnético también variable que atraviesa la otra bobina e induce en ella, de acuerdo con la ley de Faraday-Henry, una fuerza electromotriz. Cualquiera de las bobinas del par puede ser el elemento inductor y cualquiera el elemento inducido, de ahí el calificativo de mutua que recibe este fenómeno de inducción.

2. AUTOINDUCCIÓN

El fenómeno de la autoinducción, como su nombre indica, consiste en una inducción de la propia corriente sobre sí misma.

Una bobina aislada por la que circula una corriente variable puede considerarse atravesada por un flujo también variable debido a su propio campo magnético, lo que dará lugar a una fuerza electromotriz autoinducida. En tal caso a la corriente inicial se le añadirá un término adicional correspondiente a la inducción magnética de la bobina sobre sí misma.

COEFICIENTE DE AUTOINDUCCIÓN: El coeficiente de autoinducción (L) de una bobina depende de cómo está constituida la misma:

- ▲ del material empleado en su elaboración (μ)
- ▲ del número de espiras o vueltas (N)
- ▲ de la longitud (l)
- ▲ de la superficie de la bobina (S)

Se determina a través de la siguiente relación: $L = \mu \cdot N^2 \cdot S / l$

Todas las bobinas en circuitos de corriente alterna presentan el fenómeno de la autoinducción, ya que soportan un flujo magnético variable; pero dicho fenómeno, aunque de forma transitoria, está presente también en los circuitos de corriente continua. En los instantes en los que se cierra o se abre el interruptor, la intensidad de corriente varía desde cero hasta un valor constante o viceversa.

Esta variación de intensidad da lugar a un fenómeno de autoinducción de duración breve, que es responsable de la chispa que se observa en el interruptor al abrir el circuito; dicha chispa es la manifestación de esa corriente adicional autoinducida.

3. TRANSFORMADORES: ELEVADORES Y REDUCTORES DE TENSIÓN

La fabricación de un transformador se consigue situando en un núcleo de hierro dos bobinas o arrollamientos, el primario y el secundario, tales que efectúen la elevación o la reducción de tensión.

Los fenómenos de la autoinducción y de la inducción mutua constituyen el fundamento del transformador eléctrico, un aparato que permite elevar o reducir tensiones alternas.

FUNCIONAMIENTO: Un transformador consta, en esencia, de dos bobinas arrolladas a un mismo núcleo de hierro.

La bobina o arrollamiento donde se aplica la f. e. m. alterna exterior recibe el nombre de primario y la bobina en donde aquélla aparece ya transformada se denomina secundario.

Cuando al primario se le aplica una fuerza electromotriz alterna, el flujo magnético variable que produce atraviesa tanto al primario como al secundario.

Si N_1 es el número de espiras del primario y N_2 el del secundario, de acuerdo con la ley de Faraday-Henry, resultará para el primario la fuerza electromotriz autoinducida:

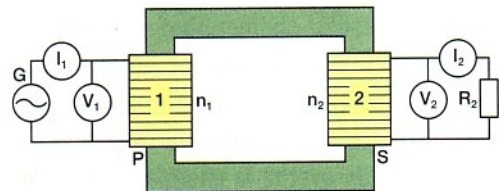
$$\varepsilon_1 = -N_1 \cdot \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

y para el secundario la fuerza electromotriz inducida por el primario:

$$\varepsilon_2 = -N_2 \cdot \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

La presencia del núcleo de hierro evita la dispersión del flujo magnético, por lo que puede aceptarse que es igual en ambos casos. Combinando las anteriores ecuaciones resulta:

$$\frac{\varepsilon_1}{N_1} = \frac{\varepsilon_2}{N_2}$$



Esta expresión puede escribirse para un transformador ideal, es decir, considerando que no hay resistencia interna y por tanto $\varepsilon = V$ en la forma:

$$\frac{V_1}{N_1} = \frac{V_2}{N_2}$$

Sin embargo, en la práctica, como consecuencia de las resistencias de los circuitos correspondientes, la tensión V_1 aplicada al primario es algo mayor que la f. e. m. inducida ε_1 y la tensión V_2 que resulta en el secundario es algo menor que la f. e. m. (ε_2) inducida en él.

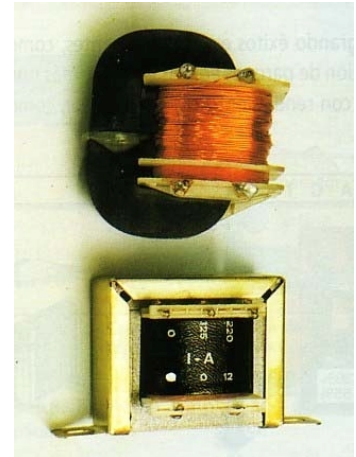
Despejando de la expresión anterior podemos llegar también a la relación: **$V_1 / V_2 = N_1 / N_2$**

Esta expresión indica que estando el circuito secundario abierto la relación entre la tensión aplicada en el primario y la tensión transformada disponible en los bornes del secundario, coincide con el cociente de sus respectivos números de espiras.

RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN: Este cociente N_1/N_2 recibe el nombre de relación de transformación. Según sea la transformación deseada, así habrá de ser la relación entre el número de espiras de los dos arrollamientos.

En los elevadores ($V_1 < V_2$) el número de espiras del primario ha de ser menor que el del secundario y la relación de transformación resulta, por tanto, menor que la unidad.

En los reductores ($V_1 > V_2$) sucede lo contrario.



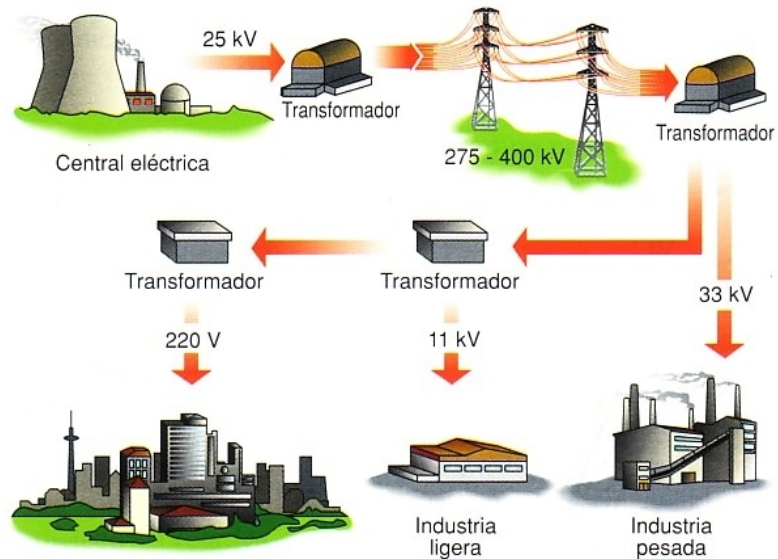
En los transformadores comerciales el rendimiento es muy elevado, lo que significa que se pierde poca energía en el proceso de transformación. En tal supuesto la potencia eléctrica en el primario puede considerarse aproximadamente igual que en el secundario, es decir: $V_1 \cdot I_1 = V_2 \cdot I_2$

Esta propiedad de la transformación eléctrica explica el hecho de que la energía eléctrica se transporte en líneas de alta tensión y baja intensidad de corriente.

APLICACIONES:

En las estaciones transformadoras situadas cerca de los núcleos de consumo, es posible convertirla, de acuerdo con la anterior expresión, en otra de menor tensión y mayor intensidad con poca pérdida de potencia.

El transporte a baja intensidad reduce considerablemente las pérdidas en forma de calor (efecto Joule) a lo largo del trayecto que separa las centrales eléctricas de las ciudades.



VIII. EXPERIMENTA

1. ELECTRICIDAD Y MAGNETISMO, LA UNIÓN QUE PERMITE LA LEVITACIÓN

Dirigido a: Bachillerato

Materiales: Electroimán, Autotransformador de corriente alterna, Núcleo ferromagnético, Anillos metálicos de cobre, Aluminio de distintos grosores y Cables para las conexiones.

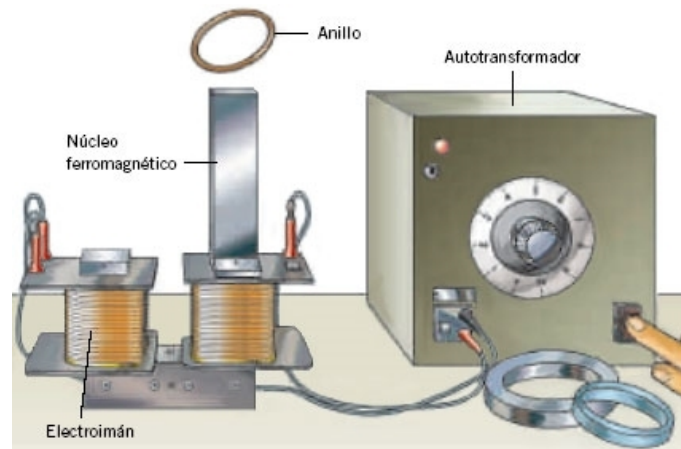
Fundamento científico: Durante el siglo XIX, los experimentos de Oersted y Faraday, junto con la teoría de Maxwell, demostraron que la electricidad y el magnetismo se encuentran relacionados. La ley de Faraday es un ejemplo de esta relación, y nos indica que la variación de flujo magnético en el tiempo crea una fuerza electromotriz (fem) que se opone a la causa que lo provoca.

Desarrollo: Sobre una pieza polar del electroimán se coloca el núcleo ferromagnético, y rodeando al núcleo, el anillo. El núcleo simplemente se usa para aumentar la variación de flujo que aparece en el anillo, aumentando así la espectacularidad del experimento.

Al conectar el electroimán de forma rápida, aparece una variación de flujo magnético en el anillo (antes de encender el electroimán, el campo magnético en el anillo era cero), y por la ley de Faraday se induce una fuerza electromotriz que crea una corriente eléctrica en el anillo.

Esta corriente inducida creará a su vez un campo magnético que contrarreste la variación de flujo magnético creada en el anillo al haber encendido el electroimán

Por tanto, el anillo salta debido a la repulsión existente entre los polos magnéticos del electroimán y los creados por la corriente inducida en el anillo.



Si el campo en el electroimán se aumenta lentamente, se consigue que el anillo ascienda de forma progresiva, al ir siendo la fuerza repulsiva cada vez mayor (levitación magnética) Podemos comprobar que realmente circula corriente en el anillo tocándolo con la mano después de haber hecho que levite. El anillo está caliente debido a la disipación de calor que produce el paso de una corriente eléctrica en un conductor eléctrico por efecto Joule.

2. EL MOTOR ELÉCTRICO MÁS SENCILLO DEL MUNDO

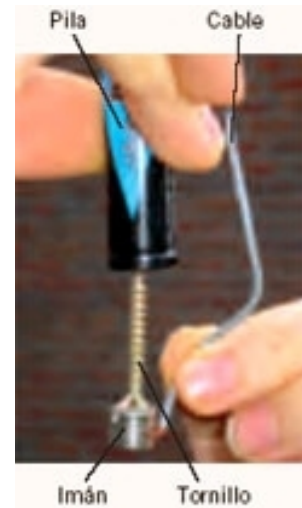
Dirigido a: Público en general

Materiales: Imán, Pila AAA, Tornillo, Trozo de cable eléctrico (≈ 20 cm).

Fundamento científico: La gran corriente eléctrica que fluye en el circuito (pila \rightarrow tornillo \rightarrow imán \rightarrow cable) atraviesa el campo magnético creado por el imán. El imán sufre una fuerza tangencial constante que lo hace girar (fuerza de Lorentz).

Desarrollo: Colgamos un imán cilíndrico y un tornillo junto a uno de los polos de una pila. Unimos el otro polo y el imán con un cable: ¡el imán empieza a girar a gran velocidad!

¿Qué hizo el visitante?: Se le entregaban los cuatro elementos necesarios para la construcción del motor y se le planteaba el reto siguiente: Trata de unir las piezas de tal forma que el imán empiece a girar. ¡Muy pocos lo lograron! Se les ayudaba mostrándoles la foto de la derecha. A los participantes interesados se les formulaban preguntas como: ¿qué pasa si unes el cable al imán por la parte inferior del imán?, o ¿qué pasa si cuelgas el tornillo con el imán del otro polo de la pila?



3. FRASCOBOMBILLA

Dirigido a: Público en general

Materiales: Frasco de vidrio transparente con su tapa, Dos tornillos de 5 cm de longitud, Cuatro tuercas, Cinta aislante, Palito de chupa-chups o algo similar, Cable para conexiones, Pila de 4,5 V o más, o fuente de alimentación, Filamentos de diversos metales o aleaciones: hierro, cobre, nicrom, constantan... y, si se quiere, un interruptor.

Fundamento científico: Que la bombilla ha sido uno de los más grandes inventos comparable a la mismísima rueda prehistórica es difícil de discutir. El placer de construirla uno mismo y ver que funciona se nota en el rostro de todo el que pone manos a la obra.

Desarrollo: Se taladran dos agujeros en la tapa del frasco a una distancia aproximada de 3 cm uno de otro y se introducen los tornillos previamente recubiertos de cinta aislante por la zona en contacto con la tapa. En la punta de cada tornillo se enrosca un pareja de tuercas. Un hilo de unos 10 cm se enrolla en torno al palito de caramelo y cada extremo se une a uno de los tornillos asegurándolo con las tuercas. Se establecen las conexiones a la pila o a la fuente de alimentación..., y se disfruta del espectáculo.

¿Qué hizo el visitante?: El visitante enrollaba hasta cuatro hilos de diferentes materiales con el palito y montaba cada uno sobre los tornillos: total, cuatro posibles bombillas, unas funcionaban y otras, no. Hicimos un montaje de tres espejos sobre una madera y todo ello en una habitación en penumbra para realzar el efecto. Les sorprendió que el hierro se funde rápidamente o que el cobre no ilumina y que el nicrom y el constantan funcionan bien.



4. JAULA ELECTROMAGNÉTICA

Dirigido a: Bachillerato y público en general

Materiales: Aparato de radio, Teléfono móvil, Rejilla metálica, Alicates o tijeras para cortar la malla y Papel de aluminio.

Fundamento científico: Las ondas de radio son ondas electromagnéticas que se reflejan en las superficies conductoras (¡así es como funcionan los espejos metálicos con la luz visible!). Las de las emisoras de FM tienen longitudes del orden de unos pocos metros, y las de AM, de unos pocos cientos de metros.

Desarrollo: Las ondas electromagnéticas son capaces de penetrar muy ligeramente en las superficies conductoras, siempre más cuanto mayor es su longitud de onda. Esa es probablemente una de las razones por las que las rejillas



frontales de los microondas siempre están separadas unos centímetros del exterior de la puerta. También podemos investigar cualitativamente este fenómeno con nuestra «jaula de Faraday», que es como se llaman estos dispositivos que sirven para aislar una región de la radiación electromagnética.

Nuestra malla, con huecos del orden de 1 cm, es prácticamente continua para las ondas electromagnéticas, que «solo son capaces de ver» discontinuidades del orden de su longitud de onda o menores. Por eso los hornos de microondas (con longitudes de onda del orden de los 10 cm) necesitan una rejilla metálica mucho más tupida. No es mala idea investigar lo que pasa con los teléfonos móviles GSM, que utilizan microondas de unos 30 cm y están dotados de antenas sensibles y amplificadores de la señal.

Un aparato de radio en funcionamiento deja de sonar al introducirlo en una jaula de malla metálica. Para que suceda lo mismo con un teléfono móvil necesitaríamos una malla mucho más tupida o, mejor aún, envolverlo en papel de aluminio.

5. PILA CON Mg y Cu

Dirigido a: Bachillerato y público en general

Materiales: Electrodo de cobre y cinta de magnesio (Han de ser puros y estar muy limpios), Arena de río, arcilla, Dos vasos de precipitados, Cables de conexión, Pinzas cocodrilo y Reloj despertador.

Zumo de piña o manzana sin gas.

Procedimiento: Se limpian bien los electrodos; el electrodo de magnesio se sumerge unos instantes en vinagre y el de cobre un minuto en la disolución de HCl. Se introducen los electrodos en la disolución de piña sin que se toquen entre ellos y se conecta el electrodo de cobre a la entrada positiva del despertador y el electrodo de magnesio a la entrada negativa. Se puede repetir el montaje en serie. Se observa el funcionamiento del reloj, que puede durar algunas horas. Se mide el potencial y la intensidad logrados con un polímetro.

