

CAPITULO 1

Electrostática

Efecto triboeléctrico

El *efecto triboeléctrico* es un fenómeno en el cual la mayoría de los materiales tienen la tendencia de entregar electrones y quedar cargados positivamente (+) o atraerlos y quedar cargados negativamente (-) cuando son golpeados o frotados con otro material [1]. Aunque dependiendo de la combinación de materiales, un mismo material puede quedar cargado positiva o negativamente. La polaridad y magnitud de dicha carga difieren según el material.

El efecto triboeléctrico es estudiado por primera vez por el griego Tales de Mileto (624 AC – 546 AC), a quien se lo considera como el primer filósofo de la historia de la filosofía occidental. Tales observó que al frotar un trozo de ámbar (resina vegetal fósil) con piel o con lana se obtenían pequeñas cantidades de cargas eléctricas que atraían pequeños objetos. Más tarde, gracias a trabajos realizados por el físico y médico inglés William Gilbert (1544 - 1603) surge el término *electricidad* para referirse a este fenómeno, que proviene de la palabra griega *élektron* que significa precisamente ámbar.



Tales de Mileto



William Gilbert

En la siguiente tabla se enumeran algunos materiales que tienen la tendencia de entregar electrones, quedando cargados positivamente y otros que tienen la tendencia de absorber electrones, quedando cargados negativamente. En la columna de la izquierda, los primeros entregan electrones con más facilidad que los del abajo. En la columna de la derecha los elementos del final absorben electrones con más facilidad que los primeros.

Materiales que entregan electrones (Ganan carga positiva)	Materiales que absorben electrones (Ganan carga negativa)
Piel de conejo (+)	Acero (0)
Vidrio	Madera
Cabello	Ámbar
Nylon	Cobre

Acrílico	Bronce
Lana	Oro
Aluminio	Poliéster
Papel	PVC
Algodón (0)	Teflón (-)

Existen diversos aparatos capaces de detectar la carga eléctrica de los cuerpos. Aquí se trabajará con dos de ellos, el electroscopio y el electrómetro.

Electroscopio

El electroscopio es un instrumento para detectar la presencia y magnitud de carga eléctrica de un cuerpo. El primer electroscopio fue inventado precisamente por William Gilbert y consistía de una aguja de metal, la cual podía girar libremente con un eje en su centro (tal como lo hace una aguja de una brújula).

Los actuales electroscopios consisten de un soporte vertical de metal conductor sobre el cual se apoya una hoja de metal conductor (en nuestro caso, la hoja es reemplazada con un “sorbete” de metal) la cual puede pivotear sobre un eje horizontal colocado en el centro (Figura 1 (a) y (b)).

Al frotar una de las varillas sobre el paño, ésta se cargará eléctricamente debido al efecto triboeléctrico, con una cantidad de carga cuyo signo dependerá del material de la varilla y del paño. Si se acerca la varilla (cargada eléctricamente) a la parte superior del electroscopio se podrá observar como el sorbete de metal gira alrededor del pivote de manera tal que los extremos se alejan del soporte (figura 1 (a) y (b)).

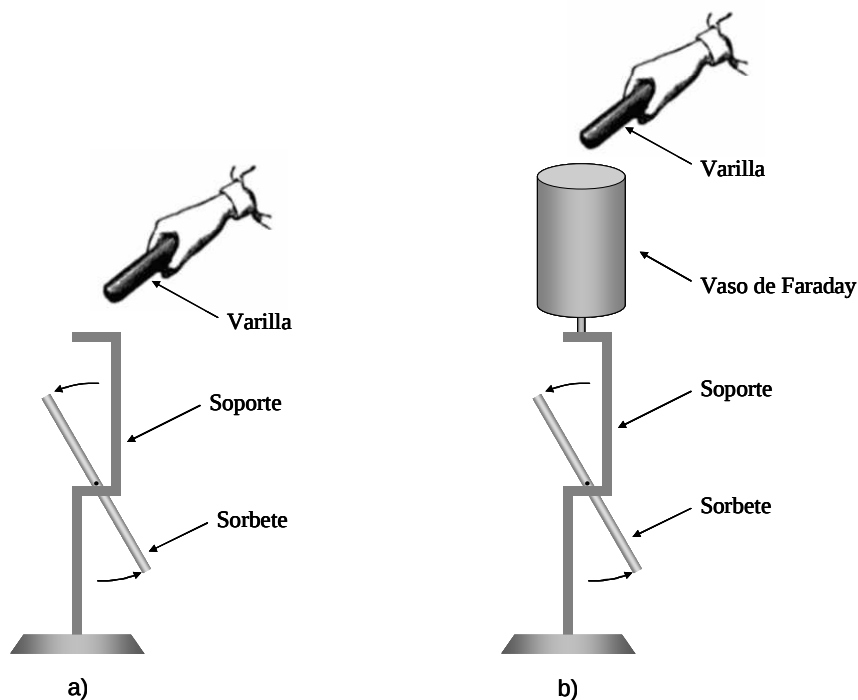


Figura 1: Electroscopio (a) sin vaso de Faraday, y (b) con vaso de Faraday.

Actividades propuestas:

- 1) Tome cada una de las varillas y frótela con el paño. Observe lo que sucede con el electroscopio al acercar la varilla a la parte superior de éste.
- 2) Observe a simple vista, el ángulo rotado por el sorbete para los casos con y sin vaso de Faraday.
- 3) Observe la inclinación del sorbete cuando la varilla es frotada una sola vez y cuando es frotada varias veces.
- 4) Frote ambas varillas, júntelas e introdúzcalas dentro del vaso de Faraday.
- 5) Ponga a prueba una jaula de Faraday en este aparato.

Preguntas:

- 1) Explique porque el sorbete rota cuando la varilla cargada se acerca al aparato.
- 2) ¿Es posible identificar el signo de la carga con este instrumento? ¿Cómo?
- 3) ¿En qué caso la inclinación del sorbete es mayor, con o sin el vaso de Faraday?
- 4) Sugiera una forma tal que el electroscopio quede cargado después de que la varilla es alejada del electroscopio. En este caso el sorbete quedaría inclinado, aún cuando la varilla es alejada del electroscopio.

Advertencias:

- 1) Tratar con delicadeza el sorbete para evitar que se quiebre.

Electrómetro

El electrómetro es un instrumento para medir indirectamente la carga inducida en un cuerpo (Figura 2). Este consiste de un vaso de Faraday conectado a un condensador de un valor conocido. El condensador, a su vez, esta conectado a un amplificador de tensión que permite medir indirectamente pequeñas cantidades de carga eléctrica. Finalmente, un voltímetro se conecta a la salida del amplificador para medir la tensión amplificada.

Al introducir la varilla cargada eléctricamente dentro del vaso, se induce una carga de signo opuesto dentro del mismo. Esto induce una carga dentro del condensador que luego será detectado por el voltímetro. Aquí, se podrá observar como el voltímetro indica una diferencia de potencial eléctrico a los bornes del condensador.

Actividades propuestas:

Antes de realizar cualquier experimento, descargar las varillas y el vaso de Faraday.

- 1) Golpear ambas varillas entre si varias veces y luego mantenerlas separadas.
- 2) Introducir cada varilla por separado dentro del vaso de Faraday y observar el voltímetro.
- 3) Introducir ambas varillas cargadas al mismo tiempo y observar lo que sucede.
- 4) Frotar cada una de las varillas con la gamuza, papel y polietileno, y luego observe la polaridad de la carga inducida para cada combinación.
- 5) Ponga a prueba una jaula de Faraday en este aparato.

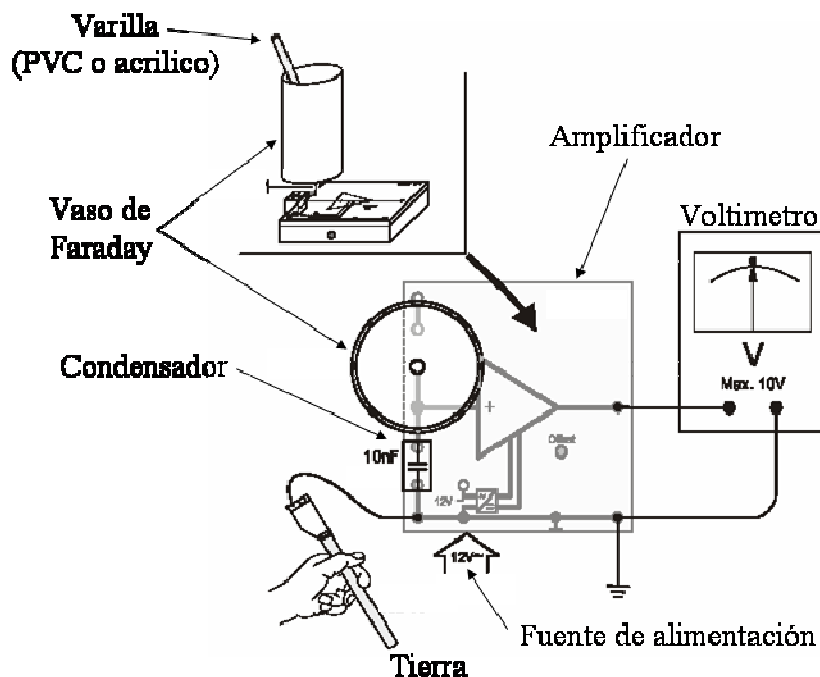


Figura 2: Esquema del electrómetro.

Preguntas:

- 1) ¿Es posible identificar el signo de la carga con este instrumento? ¿Cómo?
- 2) ¿Como se puede determinar la carga inducida en el vaso?
- 3) ¿Que cambia si se reemplaza el condensador por el otro de valor diferente?
- 4) ¿Cual es la utilidad de la barra de metal llamada tierra?

Advertencias:

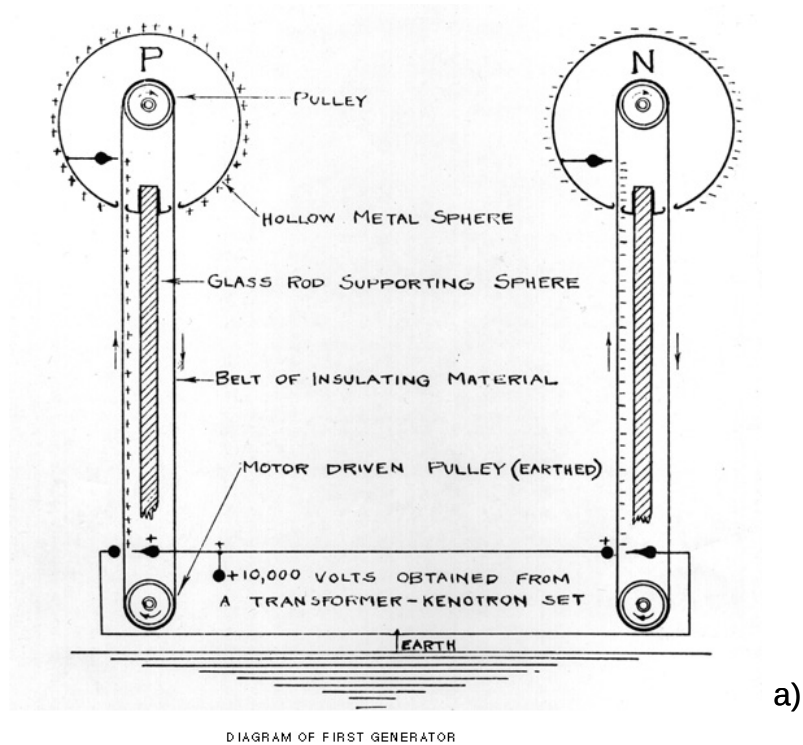
- 1) Alimentar el amplificador solo con la fuente destinada a éste.
- 2) Tratar con cuidado el vaso de Faraday una vez instalado para no dañar el adaptador que lo sostiene.

Generador de Van de Graaff

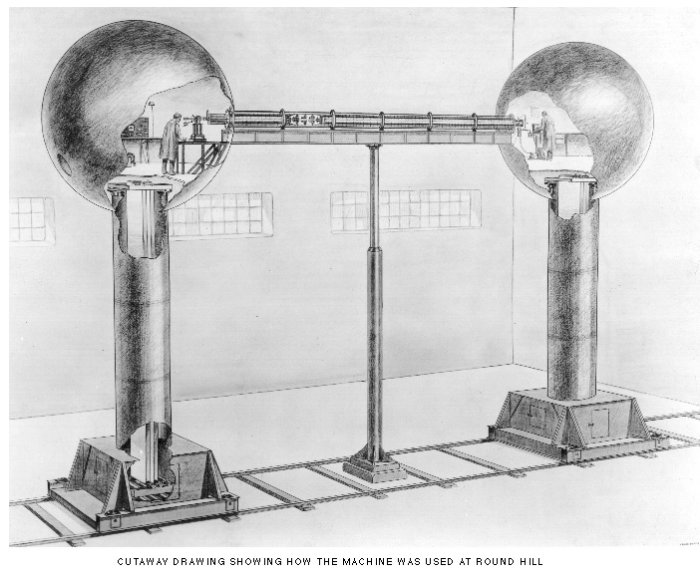
Un generador de Van de Graaff es un generador electrostático que posee una banda móvil para acumular grandes cantidades de cargas eléctricas en una esfera hueca de metal ubicada en la parte superior del aparato. La diferencia de potencial generada en un generador de Van de Graaff puede llegar a cientos de miles de voltios. Este puede ser pensado como una fuente de corriente constante conectada en paralelo a un condensador y a una resistencia eléctrica muy alta.

El primer generador fue desarrollado en 1929 por el Físico estadounidense Robert J. Van de Graaff (1901–1967) en el MIT, para realizar experimentos en física nuclear en los que se aceleraban partículas cargadas que se hacían chocar contra blancos fijos a gran velocidad. En la figura 3 (a) se muestra un diagrama del primer diseño del generador y en la figura 3 (b) una ilustración del generador usado para acelerar las

partículas. Los resultados de las colisiones daban información acerca de las características de los núcleos del material que constituían el blanco.



a)



b)

Figura 3: Diagrama del primer diseño de un generador (a) y una ilustración de cómo se lo utilizó para acelerar partículas cargadas.

El generador de Van de Graaff mas grande del mundo, construido por el propio R. Van de Graaff en la década de 1930, se encuentra en exhibición permanente en el museo de Ciencia de Boston (figura 4). Este consta de dos esferas conjuntas de aluminio de 4,5

m sostenidas por columnas de 6,7 m de altura, y puede alcanzar los 2 millones de voltios. En 1931, Van de Graaff solicitó la primer patente, que cuatro años después le fue concedida [2].



Figura 4: Generador de Van de Graaff en el museo de ciencia de Boston.

Un generador de Van de Graaff típico (figura 5) Consta de:

- 1 - Una esfera metálica hueca en la parte superior.
- 2 - Dos rodillos de diferentes materiales: el superior de metal conductor, y el inferior de material aislante.
- 3 - Dos “peines” metálicos (superior e inferior) para ionizar el aire. El inferior está conectado a tierra y el superior al interior de la esfera.
- 4 - Una cinta transportadora hecha de material aislante (comúnmente de látex).
- 5 - Un motor eléctrico para rotar el cilindro inferior.

Cuando el motor comienza a girar, el continuo proceso de contacto y separación entre el rodillo (inferior) de acrílico y la cinta, genera una cierta cantidad de carga en el rodillo debido al efecto triboeléctrico, y la misma carga pero de signo opuesto sobre la superficie interior de la cinta (figura 6). Luego de varias vueltas, el rodillo mantiene una densidad de carga bastante más alta que la de la cinta. De este modo, entre las puntas del peine inferior (conectado a tierra) y la superficie del rodillo se produce un campo eléctrico intenso provocando la ionización de las moléculas del aire cercano a las puntas

del peine, creando así, un puente conductor por el que circulan las cargas desde las puntas del peine hacia la superficie exterior de la cinta, la cual se encarga de transportar dichas cargas hacia la parte superior del generador donde se encuentra el otro peine.

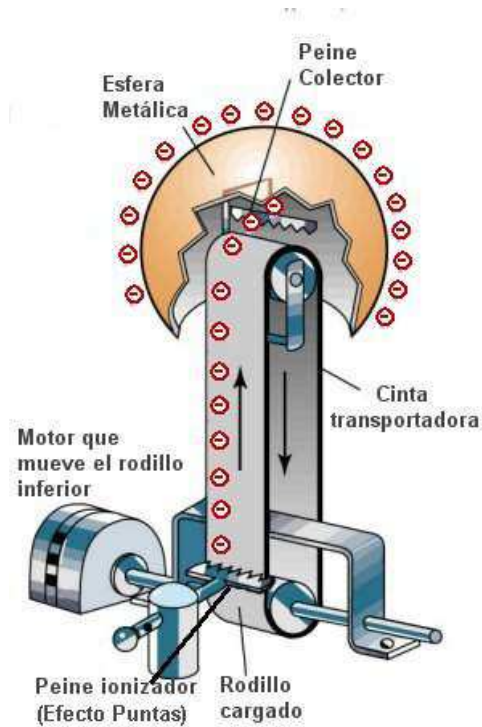


Figura 5: El generador de Van de Graaff

La densidad de carga en la parte exterior de la cinta resultara mayor (pero del mismo signo) a la densidad de carga en el interior, pero estas no se redistribuyen ya que la cinta es no conductora.

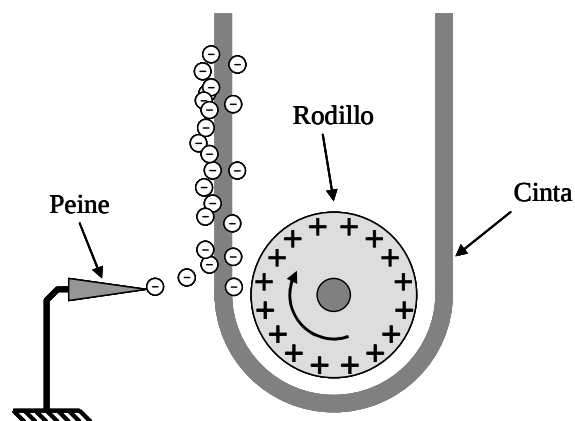


Figura 6: parte inferior del generador

Cuando la cinta entra en contacto con el rodillo superior, le transfiere algo de carga a este último, y así junto con las cargas sobre la superficie externa de la cinta, generan

un campo eléctrico suficientemente alto para ionizar nuevamente el aire cercano a las puntas del peine superior. De esta manera se produce una transferencia de carga desde el peine (conectado a la esfera metálica) hacia la cinta, quedando la esfera cargada y la cinta con carga neutra (Figura 7).

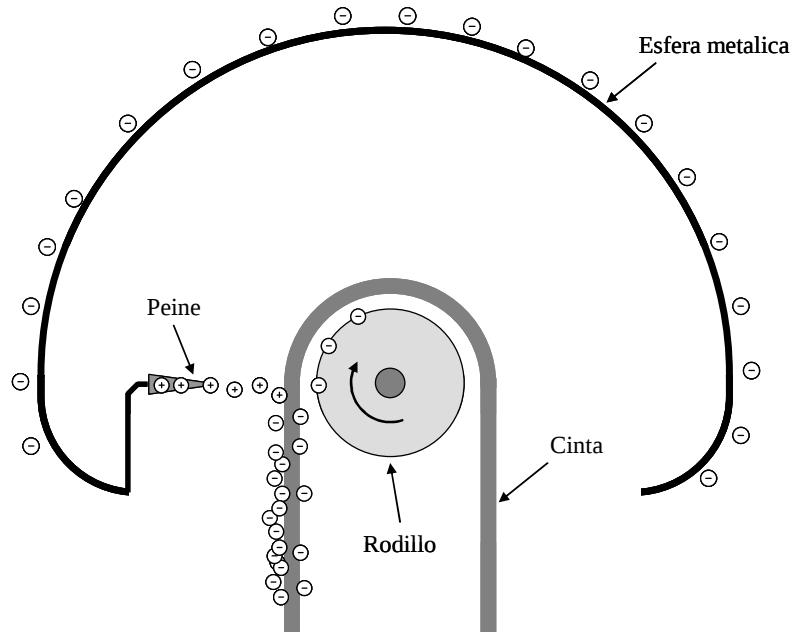


Figura 7: parte superior del generador

Mientras la esfera va acumulando carga, la diferencia de potencial entre ésta y tierra va aumentando, pudiendo llegar a unos pocos millones de voltios.

Actividades propuestas

- 1) Conectar una punta al generador y colocarla cerca de una llama de una vela y observar lo que sucede con la llama.
- 2) Hacer lo mismo pero esta vez acercando la punta a un chorro fino de agua.
- 3) Conectar el molinete electrostático al generador.

Preguntas

- 1) Un generador de Van de Graaff, ¿funcionaria en el vacío?
- 2) ¿Siempre serán negativas las cargas inducidas en la esfera de un generador de Van de Graaff?
- 3) Explique lo observado en las actividades propuestas.
- 4) Un efecto muy conocido es el del cabello erizado de una persona cuando toca la esfera de generador en funcionamiento. Explique porque sucede esto.

Motor electrostático

Los motores electrostáticos [3] están basados en las fuerzas de atracción entre cargas eléctricas de distinto signo y las de repulsión entre cargas del mismo signo. A lo largo de los últimos tres siglos se han diseñado varios tipos de motores electrostáticos [4-8], sin embargo están muy limitados en la potencia que pueden entregar. En la actualidad se usan en sistemas micro-electromecánicos (MEMS) en donde se trabaja con tecnología electromecánica a una escala micrométrica. A estas dimensiones, las pequeñas partes de estos motores electrostáticos (figura 8) son mucho más fáciles de construir que las partes de un motor eléctrico convencional con bobinas [9].

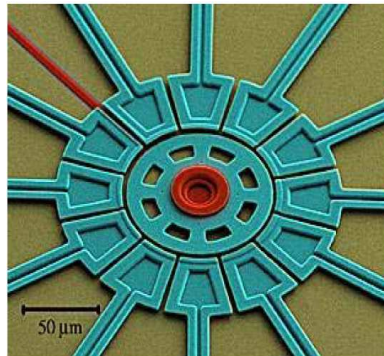


Figura 8: Micrografía electrónica de barrido (SEM) de un micromotor electrostático hecho de silicón policristalina usando técnicas de micromaquinado superficial.

Los primeros motores electrostáticos fueron desarrollados por Benjamín Franklin (1706 - 1790) y Andrew Gordon (1712 – 1751) independientemente [10]. El motor electrostático de Franklin (figura 9), consistía esencialmente en una rueda con varillas colocadas en forma radial, que gira en el plano horizontal sobre cojinetes con un bajo coeficiente de rozamiento. Las varillas eran de un material dieléctrico (vidrio), y en su extremo más alejado del centro de la rueda sostenía un dedal de bronce.

Las botellas de Leyden mostradas en la figura 9 servían como fuentes de cargas para hacer funcionar el motor. Estas botellas eran la versión primitiva de un condensador moderno de alta tensión.

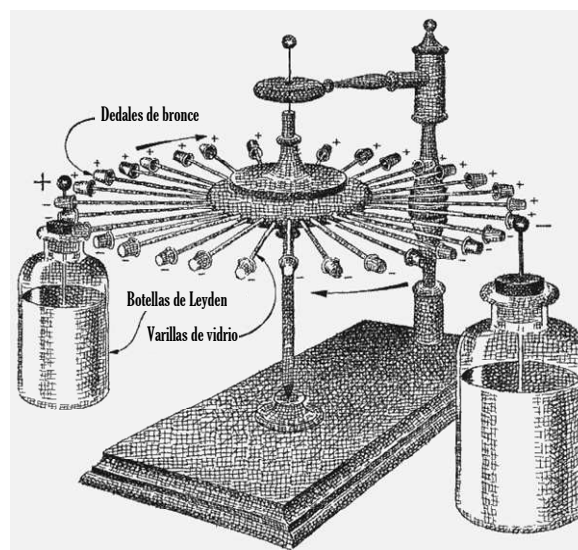


Figura 9: Motor electrostático de Franklin

Otro diseño de un motor electrostático, es el que se muestra en la figura 10 [11]. Este consiste de un cilindro de material no conductor que puede girar libremente al cual se han adherido tres laminas de material conductor aisladas entre si. El cilindro se coloca entre dos placas paralelas conductoras conectadas a un generador de Van de Graaff o de una fuente de alto voltaje para generar carga opuestas en las placas metálicas. A cada una de las placas se le conecta un cable cuyo extremo suelto se coloca muy cerca del cilindro pero sin entrar en contacto. Al encender el generador de Van de Graaff o la fuente de alto voltaje el cilindro comienza a girar.

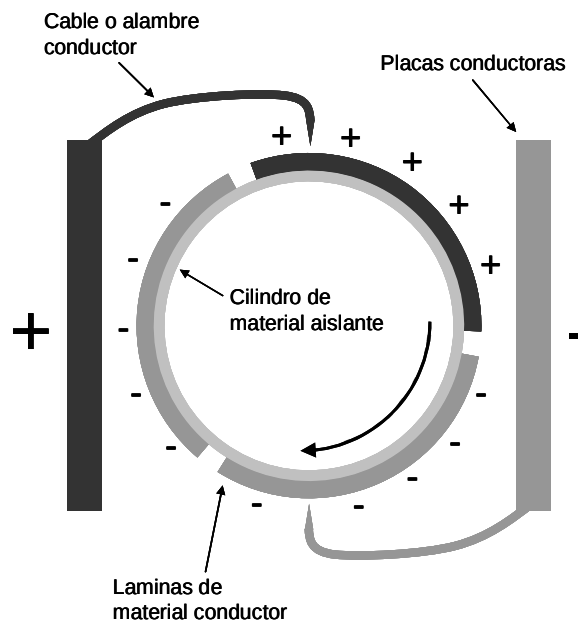


Figura 10: Motor electrostático visto desde arriba.

El siguiente es el motor electrostático mas simple que se haya inventado [11], y fue ideado por el físico alemán Johann Christian Poggendorff (1796 - 1877). En este diseño, se usa un disco de material dieléctrico, el cual puede girar en el plano horizontal sobre cojinetes con un bajo coeficiente de rozamiento. Debajo del disco se encuentran dos puntas metálicas que se colocan cerca de la superficie del disco (sin tocarlo). Ambas puntas son conectadas a una fuente de alto voltaje o de un generador de Van de Graaff.

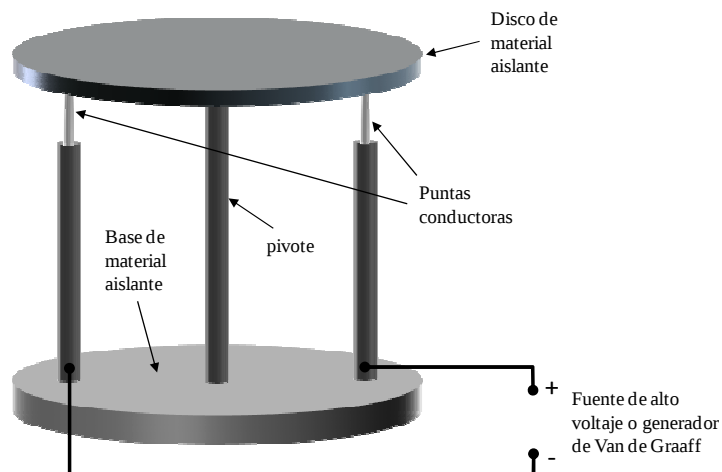


Figura 11: Motor electrostático de Poggendorff.

Preguntas

- 1) Deduzca el funcionamiento de estos tres motores electrostáticos.
- 2) ¿Funcionarían estos motores en el vacío?

Representación del campo eléctrico

Un campo eléctrico estático puede ser representado geoméricamente con líneas tales que en cada punto el campo vectorial sea tangente a dichas líneas, a estas líneas se las conoce como "líneas de campo" o "líneas de fuerza" (Figura 12). El concepto de líneas de campo fue introducido por Michael Faraday. Matemáticamente las líneas de campo son las curvas integrales del campo vectorial. Las líneas de campo se utilizan para crear una representación gráfica del campo, y pueden ser tantas como sea necesario visualizar.

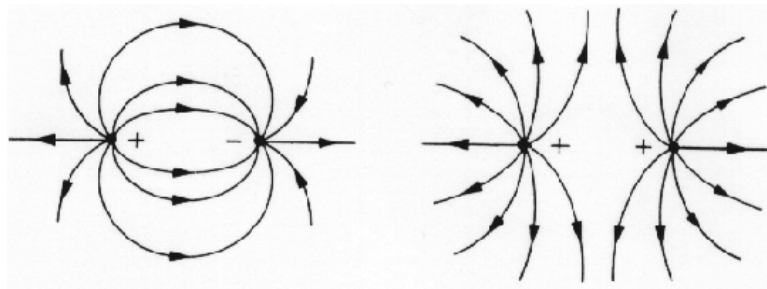


Figura12: Líneas de campo eléctrico de dos cargas de signo opuesto (izquierda) y de dos cargas del mismo signo (derecha).

Actividades Propuestas

1. Visualice las líneas de campo eléctrico para distintas configuraciones de electrodos.

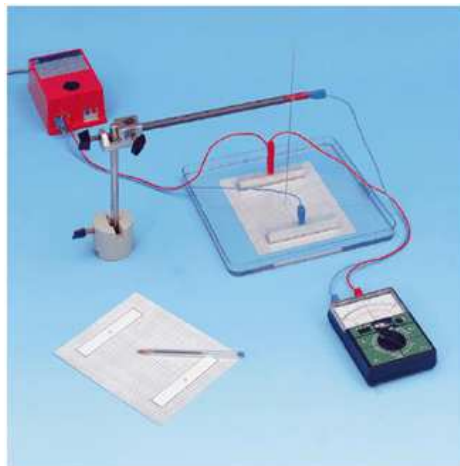


Figura13: Dispositivo para la visualización de las líneas de campo eléctrico

2. Determine superficies equipotenciales para distintas configuraciones de electrodos. Para ello utilice un papel resistivo en contacto con dos electrodos y utilice un voltímetro.

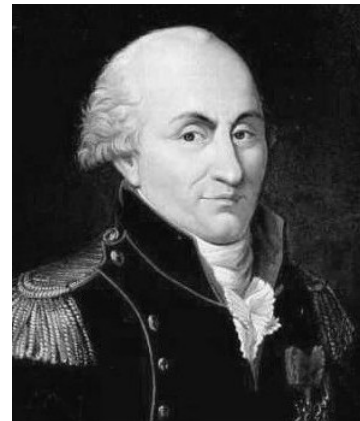
Preguntas

1. De las mediciones realizadas, analice el comportamiento de las líneas de campo respecto de la superficie de los electrodos y de su forma geométrica; y respecto de las líneas equipotenciales.
2. Proponga, si es posible, una configuración para obtener un campo eléctrico cero en una región.

Balanza de Coulomb

La balanza de Coulomb es un tipo de balanza de torsión muy sensible que puede ser utilizada para investigar la fuerza que aparece entre dos cargas eléctricas.

Charles Augustin de Coulomb (1736-1806) fue un ingeniero militar francés que trabajó para Napoleón y realizó importantes contribuciones en el campo de la elasticidad y la resistencia de materiales. En Física es conocido por la ley de Coulomb, aunque en el campo de la electrostática estudió las propiedades eléctricas de los conductores y demostró que si un conductor en equilibrio electrostático está cargado, su carga se distribuye a lo largo de su superficie. En el año 1777 diseñó una balanza de torsión de gran sensibilidad formada por una varilla ligera que está suspendida de un largo y delgado hilo con dos esferas equilibradas a cada extremo (Figura 14).



Charles Coulomb

Con ayuda de esta balanza estableció de forma cuantitativa la ley del inverso del cuadrado de la distancia para la interacción entre cargas eléctricas puntuales, conocida como ley de Coulomb [12, 13].

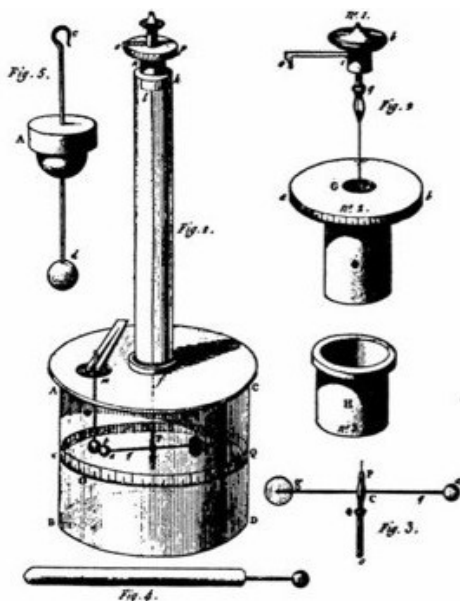


Figura 14: Balanza original de Coulomb



Figura 15: Balanza de Coulomb Pasco

En la Figura 14 se muestra un modelo de la balanza que utilizó Coulomb, en la Figura 14 se muestra la balanza que se utilizará en esta práctica y en las Figuras 16(a) y (b) un esquema de la misma.

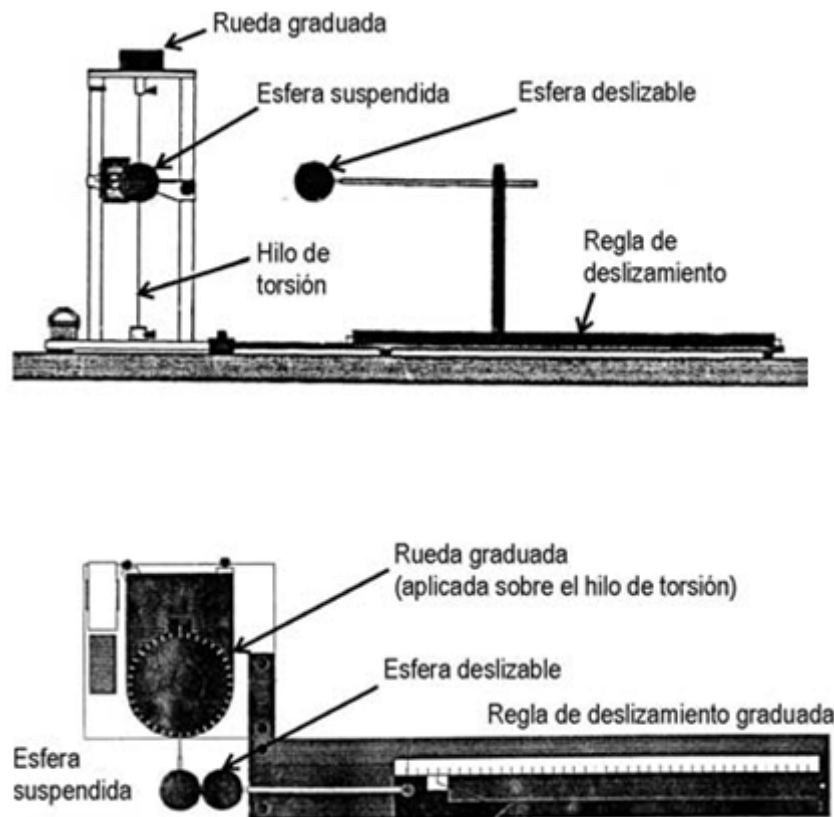


Figura 16: Esquema de la Balanza de Coulomb Pasco

Actividad propuesta

Utilice la balanza para estudiar la validez de la Ley de Coulomb.

Preguntas

1. Describa una propuesta para estudiar la dependencia de la fuerza eléctrica con la carga.
2. Describa una propuesta para estudiar la dependencia de la fuerza eléctrica con la distancia.
3. Analice la validez de suponer a las esferas como cargas puntuales.

Advertencias

Si hace uso de una fuente de alto voltaje para cargar las esferas, utilice la punta de cargado. En este caso, sostenga a la misma por el extremo más alejado de la punta metálica. Apague la fuente inmediatamente después de cargar las esferas. Tenga cuidado al utilizar la balanza para no romper la fibra de torsión.

Balanza electrostática

La balanza electrostática es una balanza diferencial fabricada a base de materiales no magnetizables que permite la medición de fuerza entre cuerpos cargados. En la Figura 17 se muestra un esquema de la balanza a utilizar para el caso de la medición de la fuerza entre una esfera (a) y un plato metálico puesto a tierra (b). La balanza consta de un pie de altura regulable (c) y de ajuste de horizontalidad (d).

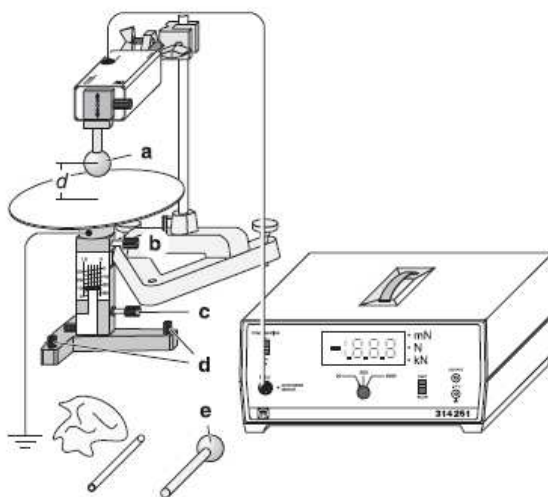


Figura 17: Esquema de la balanza electrostática.

Actividades propuestas

1. Mida la fuerza entre una esfera cargada y un plato metálico puesto a tierra.

Preguntas

1. Para el caso de la fuerza entre una esfera cargada y el plato metálico, analice la equivalencia entre la situación planteada y la de suponer una carga de signo opuesto (a la carga en la esfera) ubicada en el punto imagen del centro de la esfera.
- 2.

Balanza de Kirchhoff

Gustav Robert Kirchhoff (Königsberg, 12 de marzo de 1824 - Berlín, 17 de octubre de 1887) fue un físico prusiano cuyas principales contribuciones científicas estuvieron en el campo de los circuitos eléctricos, la teoría de placas, la óptica, la espectroscopia y la emisión de radiación de cuerpo negro.

La balanza de Kirchhoff permite medir la fuerza entre las placas metálicas de un capacitor cuando este está conectado a una fuente de tensión.

En la Figura 17 se muestra un ejemplo del dispositivo a utilizar, donde a y b forman la placa superior del capacitor, y c la inferior. La placa inferior está montada sobre un pie de altura regulable (e y d) y de ajuste de horizontalidad (f).



Gustav Kirchhoff

Actividad Propuesta

1. Mida la fuerza entre las placas del capacitor en función de la separación de las mismas y en función del voltaje aplicado.

Preguntas

1. Realice un análisis teórico de la relación entre la fuerza entre las placas de un capacitor y la separación entre las mismas; y del voltaje aplicado.
2. De las mediciones realizadas, ¿Es posible determinar el valor de la permitividad del vacío?
- 3.

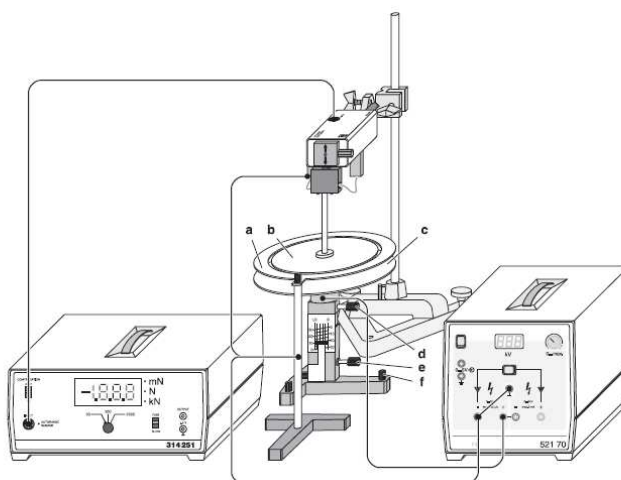


Figura 18: Conexiones para la balanza de Kirchhoff

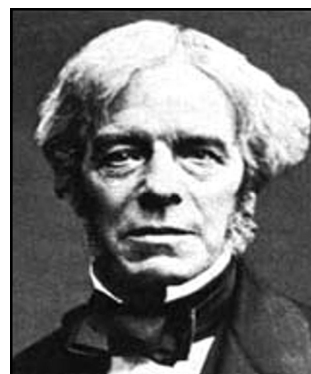
Advertencias

Evite tocar las placas metálicas y que estas se toquen cuando hay un voltaje aplicado a las mismas.

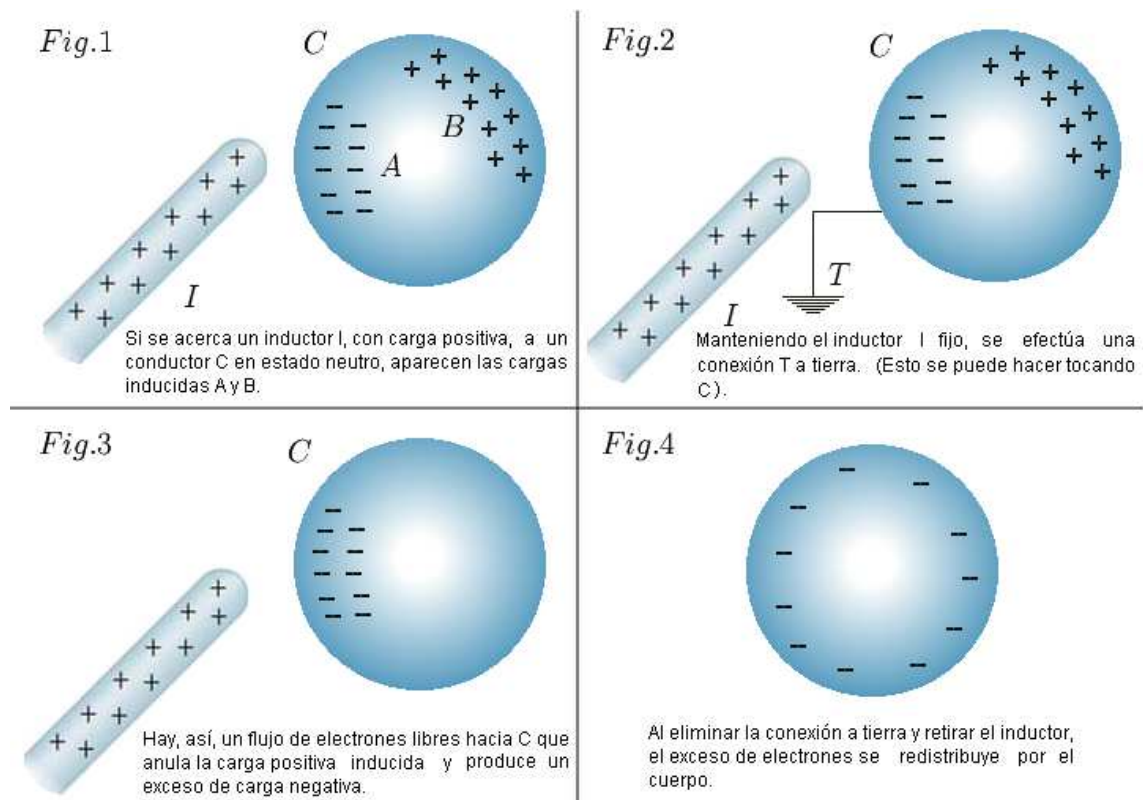
Jaula de Faraday. Blindaje electrostático

Michael Faraday (1791 - 1867) fue un científico inglés que estudió el electromagnetismo y la electroquímica. Es conocido principalmente por sus aportes a la comprensión del fenómeno de inducción electromagnética, y su formulación de las leyes de la electrólisis.

El funcionamiento de la jaula de Faraday se basa principalmente en el fenómeno de inducción eléctrica o electrostática asociado a las propiedades de un conductor en equilibrio electrostático [14] (figuras 1 – 4 de esta sección). Cuando una superficie construida con material conductor se coloca en presencia de un campo eléctrico externo, los electrones libres se desplazan en el conductor produciendo un exceso de carga negativa en un sector y positiva en el lado contrario. En las figuras el campo eléctrico externo es originado por un cuerpo cargado que llamamos inductor.



Michael Faraday



Si la esfera sobre la cual se induce redistribución de cargas se conecta a tierra mediante un conductor (figura 2), se producirá un flujo de electrones libres hacia la esfera quedando esta con exceso de carga negativa (figuras 3 y 4).

Un experimento conocido de Faraday fue el del “cacharro de hielo” (figura 18). Para estudiar la redistribución de cargas en un objeto conductor, Faraday utilizó un recipiente metálico que en sus tiempos se usaba para hacer hielo. Al introducir la esfera k cargada positivamente dentro del recipiente conductor P (sin tocar las paredes del mismo), inducción electrostática mediante, la superficie interior quedará cargada con exceso de carga negativa, mientras que la superficie exterior lo hará con carga positiva. Si la esfera estuviera cargada en forma negativa, la superficie exterior quedaría con carga negativa (figura 19).

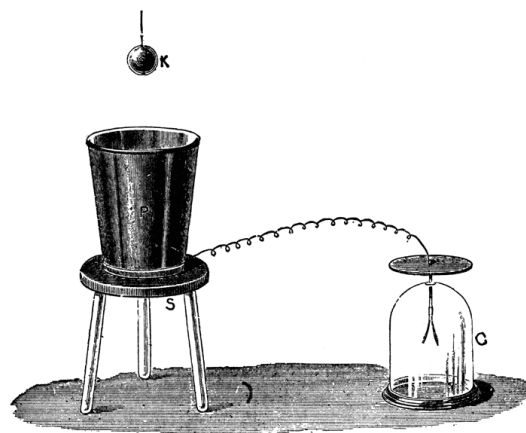


Figura 19: experimento del cacharro de hielo de Faraday (o “ice pail”). La esfera cargada k es introducida en el recipiente conductor P sin tocar las paredes. La redistribución de cargas inducidas es detectada en el electroscopio C .

Dicho exceso de carga puede ser detectado, por ejemplo, mediante un electroscopio. Al tocar con la mano la superficie externa, sucede un proceso análogo al descrito con la esfera: se establece un flujo de carga negativa hacia el cacharro (caso esfera positiva). Al retirar la mano y la esfera cargada, el cacharro quedara con exceso de carga negativa. Dicho proceso se denomina *carga por inducción*. Por el contrario, si se toca el cacharro con la esfera cargada, se establece un flujo de cargas entre la esfera y el recipiente. Al retirar la esfera, el recipiente quedará con exceso de carga positiva. En este caso, nos referimos a *carga por contacto*.

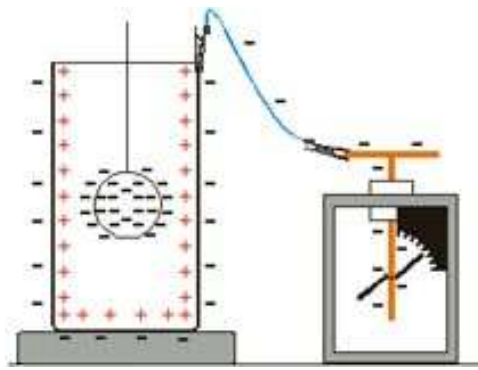


Figura 20: redistribución de cargas en el cacharro de Faraday debido al fenómeno de inducción electrostático.

Otro efecto se logra al acercar la esfera cargada al cacharro de costado (figura 21). En este caso, las cargas se distribuyen en la superficie exterior del recipiente de manera que el campo eléctrico resultante en el interior se anula. A este ultimo efecto se lo denomina “blindaje electrostático” (*electrostatic shielding o screening*). Si en vez de un cacharro hablamos de un recipiente cerrado, entonces nos referimos a una “jaula” de Faraday. Al igual que en el caso anterior, en presencia de campo eléctrico las cargas se distribuyen en el exterior del conductor de manera que la superficie interior permanece sin cargas superficiales.

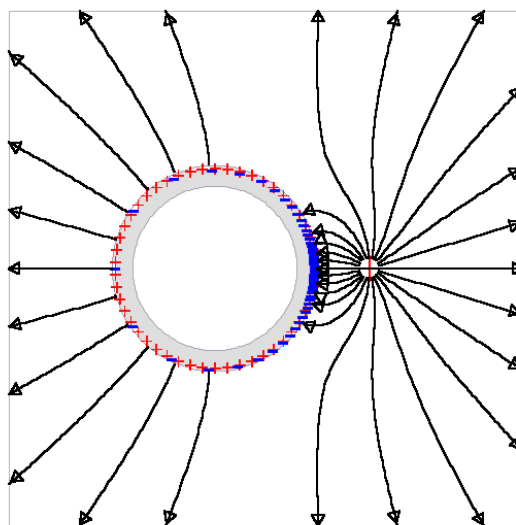


Figura 21: blindaje electrostático.

Es justamente este efecto el que permite protegernos, por ejemplo, de grandes descargas de alta tensión aplicadas a una jaula que nos rodea (figura 22).

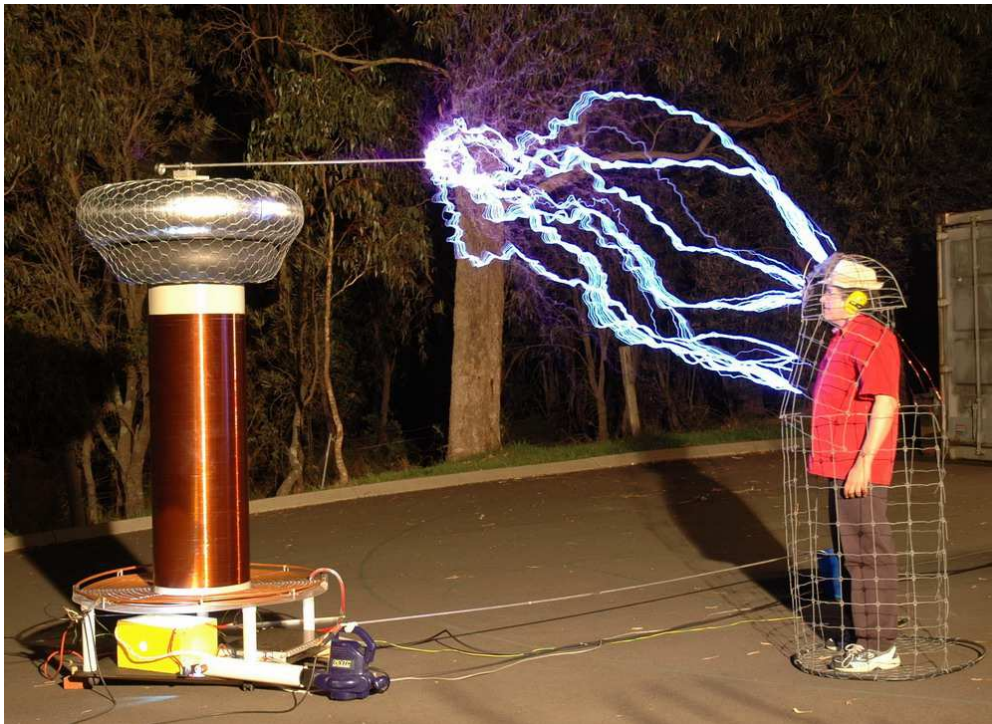


Figura 22: blindaje electrostático mediante una jaula de Faraday aplicado a una descarga eléctrica de alta tensión.

Actividades propuestas

La figura 23 ilustra el cacharro de Faraday de Pasco disponible en el laboratorio.



Figura 23: cacharro de Faraday Pasco (Faraday Ice Pail). El recipiente interior es el cacharro propiamente dicho, el exterior es el blindaje.

1. Intente comprobar el concepto de carga por inducción. Para ello conecte el electrómetro como ilustra la figura 24. Conecte a tierra el cacharro de manera que la lectura del electrómetro sea nula, indicando la ausencia de cargas. Cargue un objeto e introdúzcalo en el interior del cacharro sin tocar las paredes, tocando

con una mano la malla de blindaje. Observe el electrómetro. Luego retire el objeto y verifique que el electrómetro vuelva a dar lectura nula.

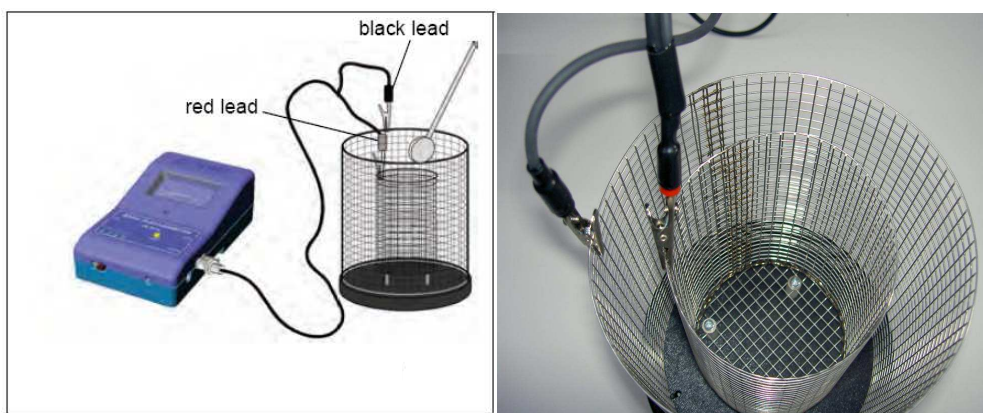


Figura 24: conexión del electrómetro al cacharro de Faraday Pasco.

2. Ahora compruebe la carga por contacto. Introduzca el cuerpo cargado en el interior del cacharro y toque con el mismo la pared interior del cacharro. Observe la lectura del electrómetro. Retire el objeto y observe la lectura nuevamente. Toque ahora al cacharro con la mano y observe nuevamente lo que ocurre en el electrómetro.
3. Proponga y experimente una forma de verificar el concepto de blindaje electrostático.

Preguntas

1. En la configuración de la figura 20, demuestre formalmente que el campo eléctrico dentro del recipiente es nulo.
2. Tanto para el cacharro de Faraday como para una superficie de blindaje, ¿existe alguna diferencia en que sea continua o una malla (como el accesorio de Pasco)?
3. Interprete lo observado durante la actividad 1. ¿Por qué la lectura del electrómetro vuelve a ser nula al retirar el cuerpo cargado?
4. Interprete lo observado en la actividad 2. ¿Queda cargado el cacharro al retirar el cuerpo? ¿Por qué?
5. Describa su propuesta para la realización de la actividad 3.

Carrete o bobina de Ruhmkorff

Heinrich Daniel Ruhmkorff (1803 – 1877), físico alemán a quien se atribuye la invención de la bobina de inducción. Trabajó en París donde se dedicó a la construcción de instrumentos eléctricos. En 1851 diseña el carrete que lleva su nombre, el cual fue luego utilizado en diferentes aplicaciones, como por ejemplo en sistemas de telegrafía sin hilos (primeros sistemas de comunicación inalámbricos), de uso masivo hacia fines del siglo XIX. Un ejemplo de aplicación puede encontrarse en una importante patente

de G. Marconi [15]. Estos eventos son contemporáneos con la discusión de la teoría electromagnética de J. C. Maxwell, y una intensa actividad científica y técnica relacionada al electromagnetismo y sus aplicaciones. Recordamos, por ejemplo, que hacia 1888 R. H. Hertz demuestra la posibilidad de crear y detectar ondas electromagnéticas.

El carrete o bobina de Ruhmkorff (figura 24) es esencialmente un generador eléctrico que permite obtener tensiones elevadas a partir de una fuente de corriente continua.

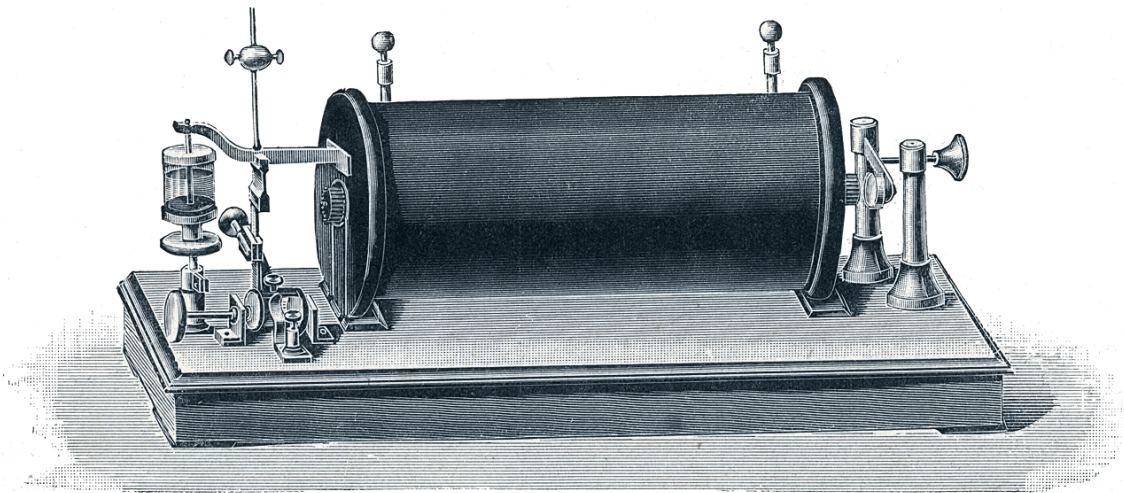


Figura 24: carrete de Ruhmkorff

El carrete o bobina de Ruhmkorff se constituye de dos bobinados de inducción: primario **A** y secundario **B** (figura 25). El primario consiste de algunas decenas de vueltas de alambre de cobre esmaltado del orden de un milímetro de diámetro, mientras que el secundario se compone de un bobinado de muchas vueltas de alambre de cobre de buena aislación y de algunas décimas de milímetro de diámetro. Ambos bobinados están enrollados alrededor de un núcleo magnético **C** formado por alambres de hierro dulce dispuestos paralelos unos con otros.

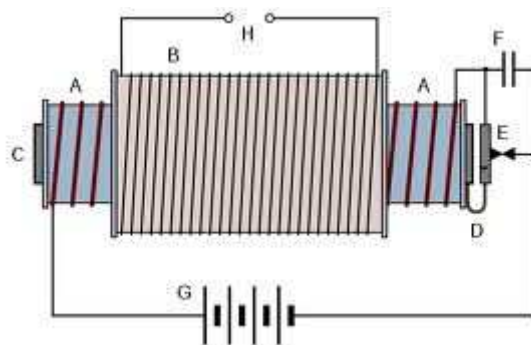


Figura 25: esquema de funcionamiento del carrete de Ruhmkorff

Cuando el primario es excitado por una corriente variable (por ejemplo, una corriente continua aplicada al cerrar un interruptor), la variación del campo magnético inducida en el secundario origina en éste una tensión proporcional a la relación entre el

número de vueltas entre ambos bobinados. En este sentido, el carrete funciona como un transformador elevador de tensión [14]. El detalle del carrete de Ruhmkorff es que la *relación de transformación* es muy alta, permitiendo obtener tensiones de varios kilovoltios. Al corte de la corriente (abertura del circuito primario) es cuando la tensión inducida es más elevada y produce una chispa entre los bornes **H**.

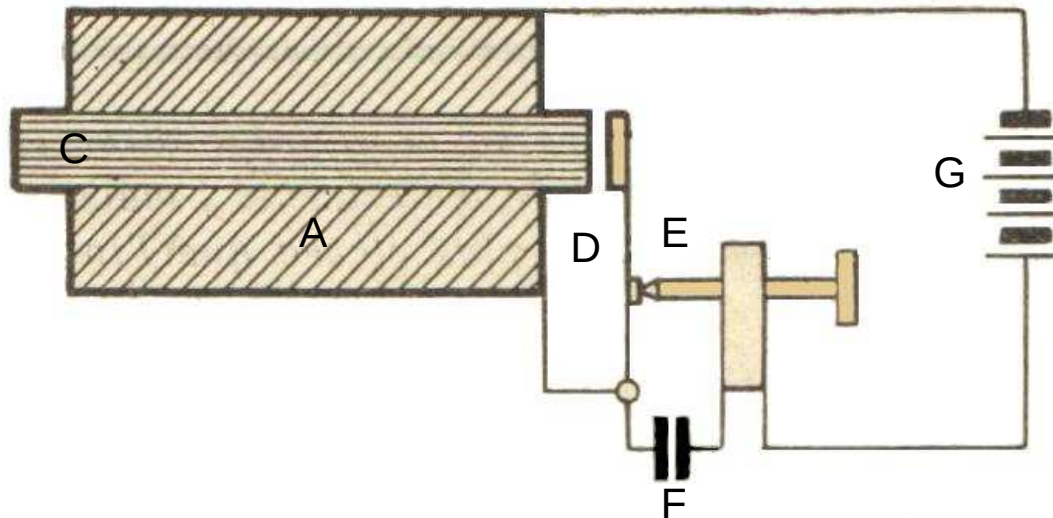


Figura 26: Circuito primario del carrete de Ruhmkorff donde se muestra el tornillo utilizado para optimizar el funcionamiento del oscilador

El carrete observado en la figura 1 utiliza un interruptor de Foucault [16]. Para producir chispas en forma continua se utiliza un dispositivo mecánico que consiste en una chapa flexible **D** que actúa como resorte y un platino **E** (llamado originalmente *oscilador*). Al conectar la batería **G**, se establece una corriente por el primario que circula a través del platino cerrado. Dicha corriente en el primario origina un campo magnético que magnetiza al núcleo de hierro, el cual atrae el contacto del platino montado sobre la chapa-resorte. En dicho instante se interrumpe la corriente del primario generando una alta tensión inducida en el secundario, y como consecuencia, se origina una chispa en **H**. Al cortarse la corriente en el primario, el contacto del platino se cierra nuevamente por acción de la chapa-resorte, iniciando el ciclo nuevamente. El tiempo que separa dos cortes del circuito se llama *período de corte*. Depende de diversos parámetros como pueden ser la atracción del núcleo, la rigidez de la chapa-resorte, etc. La optimización del *oscilador* puede lograrse mediante el ajuste de un tornillo ubicado en el platino (figura 26).

El mismo principio de funcionamiento, salvando detalles del accionamiento mecánico del platino, fue utilizado por muchos años en motores de explosión para generar las chispas detonadoras en las bujías de ignición. El uso persiste hasta nuestros días, donde la evolución tecnológica se concentra fundamentalmente en la forma de excitar el primario (sin piezas mecánicas).

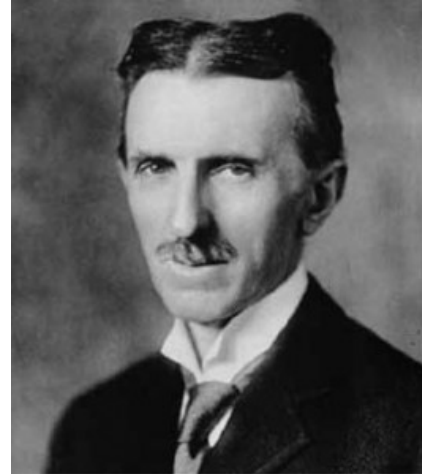
Preguntas

1. ¿Qué rol cumple el capacitor **F** ubicado en paralelo al platino?
2. ¿Por qué resulta conveniente que el núcleo **C** este construido superponiendo alambres en vez de una barra maciza de hierro?

3. ¿Por qué la tensión inducida en el secundario es mayor al cortar la corriente que al conectarla?

Bobina de Tesla

Nikola Tesla (1856-1943) nació en Similjan, Imperio Austrohúngaro (hoy Croacia). Estudió ingeniería mecánica y eléctrica en Austria y física en Checoslovaquia. Trabajó en varias compañías eléctricas y telefónicas en Europa y Estados Unidos [17]. En 1909 Marconi gana el premio Nobel por su aparato de radio, el cual estaba basado en 17 patentes de Tesla [18]. Con dicho aparato se transmitió la primera señal de radio que cruzó el Océano Atlántico en 1901. No fue hasta 1943, una vez muerto Tesla, cuando la Corte Suprema de los Estados Unidos reconoció la prioridad de Tesla sobre la patente de la radio.



Nikola Tesla

Más allá del campo de las comunicaciones, Tesla aportó una importante cantidad de invenciones y patentes. Entre estos se destacan el sistema polifásico alterno utilizado hasta la actualidad para la distribución de energía eléctrica, y el motor de corriente alterna.

La bobina de Tesla (figuras 27 y 28) es básicamente un transformador resonante elevador de tensión. Tesla experimentó una gran variedad de configuraciones, de manera que existen varias alternativas constructivas. En general trabajaban con corrientes de alta frecuencia, logrando voltajes de RF (radio frecuencia) de hasta varios millones de voltios [19]. Las primeras bobinas usaban la acción disruptiva de un *explosor* en el circuito primario.

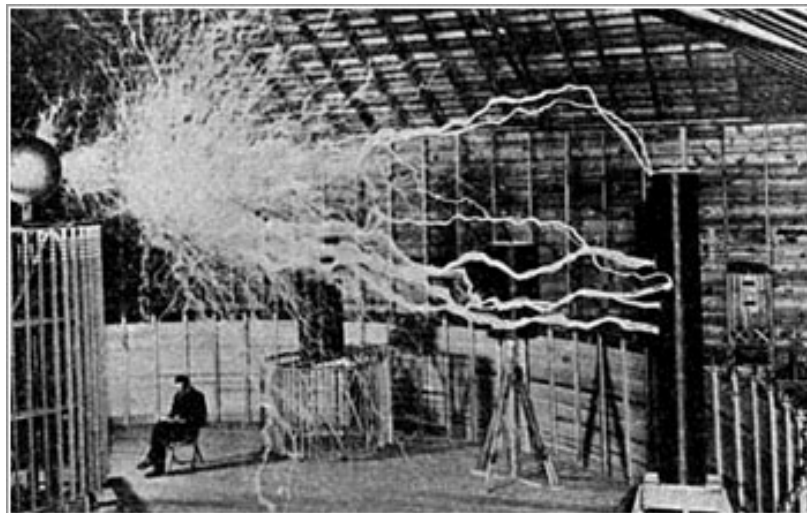


Figura 27: Fotografía tomada con fines publicitarios en doble exposición (año 1900), en la cual se muestra a Tesla leyendo totalmente ajeno al estruendo provocado por las descargas de una de sus bobinas [29].

En la configuración ilustrada en la figura 28, un transformador es utilizado para elevar la tensión provista por una fuente de CA. El secundario de dicho transformador alimenta con al circuito primario de la bobina. Al producirse una chispa en el *explosor* (o *espinterómetro*, o....simplemente chispero), el primario de la bobina se acopla con la capacidad formando con ésta un circuito oscilatorio resonante. Si la relación de transformación es suficientemente alta, el secundario de la bobina producirá una importante elevación de tensión.

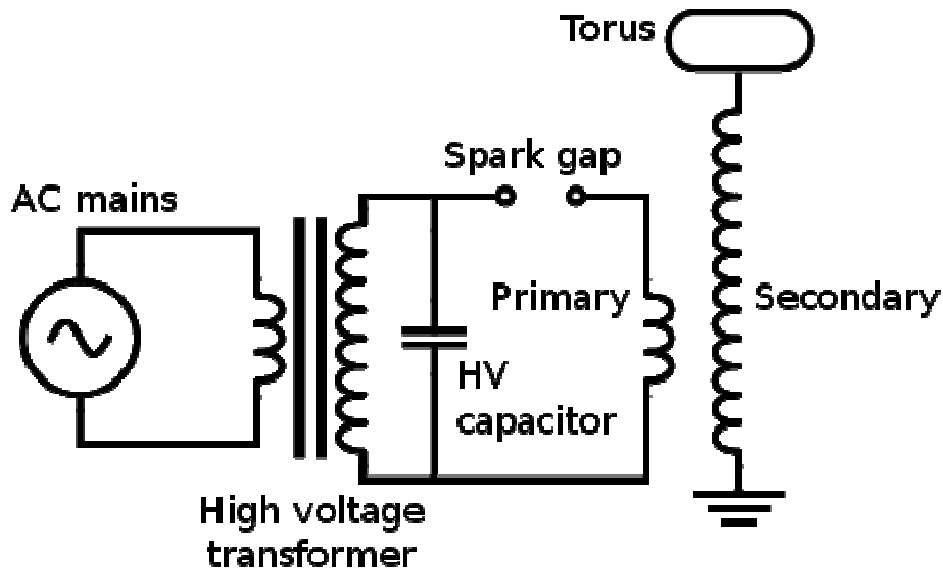


Figura 28: esquema circuital típico de una bobina de Tesla.

En la figura 29 se reconoce la configuración ilustrada en la figura 28, donde la alta tensión generada en la bobina se utiliza para producir iluminación mediante bombitas eléctricas especialmente diseñadas a tal fin [21]. En la figura identificamos P y S con el primario y secundario del transformador, mientras que P' y S' son los respectivos bobinados de la bobina elevadora de tensión, C el capacitor y a el explosor.

Una de las aplicaciones que más obsesionó a Tesla fue, sin lugar a dudas, la de poder transmitir energía de manera inalámbrica. No sólo la transmisión de señales para uso en comunicación, sino la posibilidad de poder controlar “autómatas” en forma remota [22], o entregar potencia a artefactos de iluminación y motores a través las propiedades conductoras de los gases enrarecidos de la atmósfera [23,24] o por propagaciones a través del suelo [25]. Algunas de estas ideas lo condujeron a fracasados y costosos experimentos como la construcción de la torre de Wardenclyffe [20]. Sin embargo, sus ideas persisten y están presentes en numerosos desarrollos tecnológicos de la actualidad, como por ejemplo puede observarse en una reciente patente del MIT (Massachusetts Institute of Technology) sobre transmisión inalámbrica de energía [26].

Los dispositivos de Tesla fueron muy usados posteriormente en una gran variedad de situaciones experimentales, como por ejemplo, en aceleradores de partículas y generación de RX [27-29].

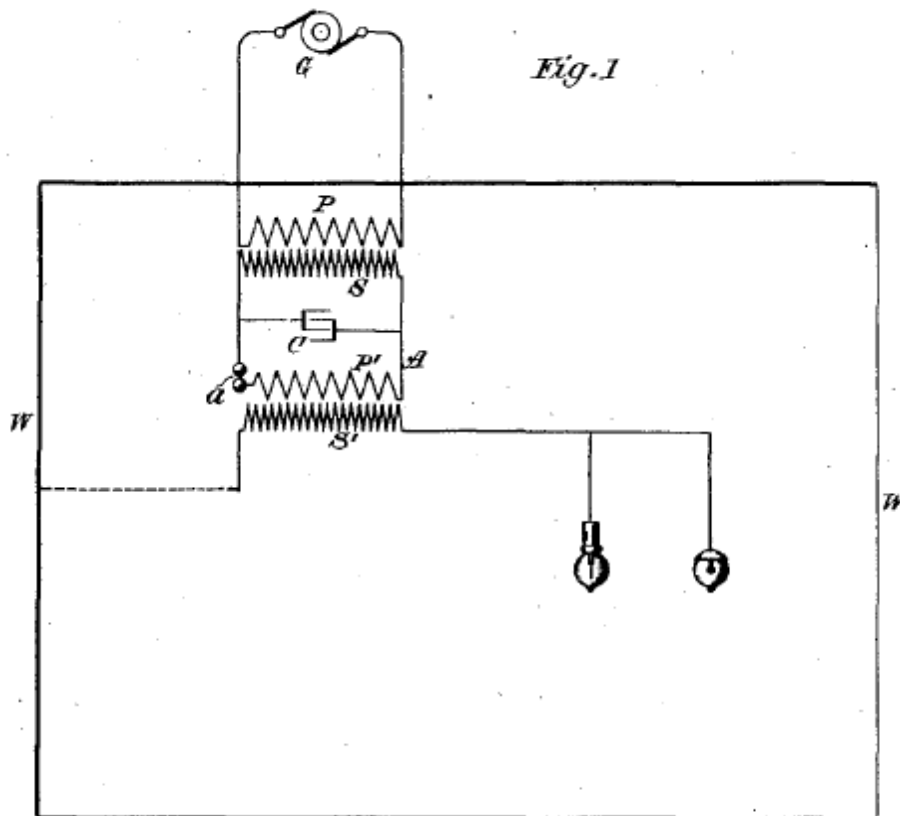


Figura 29: figura extraída de la patente 454.622 (Estados Unidos) de Tesla en la cual se ilustra la aplicación de una bobina elevadora de tensión para uso en iluminación.

Preguntas

- 1- ¿Por qué el transformador que alimenta al circuito primario de la bobina debe ser elevador de tensión?
- 2- ¿Es necesario que la fuente de AC que alimenta al transformador de alta tensión sea de la misma frecuencia que la resonancia del circuito primario de la bobina? ¿Por qué?
- 3- ¿Qué condiciones debe satisfacer el secundario de la bobina para que la tensión lograda en el toroide sea máxima?
- 4- ¿Por qué un extremo del secundario de la bobina debe estar conectado a tierra?

Referencias

- [1]- *The Encyclopedia of Physics*, Third Ed., Robert M. Besancon, editor, Van Nostrand Reinhold Co., New York, (1985).
- [2]- R. J. Van de Graaff, U.S. Patent 1.991.236 (1935).
- [3]- *“Electrostatic Motors: Their History, Types and Principles of Operation”*, Oleg Jefimenko, Electret Scientific Co. (1973).
- [4]- J. Gallegos, U.S. Patent 633,829 (1899).
- [5]- E. Thomson, U.S. Patent 735,621 (1903).
- [6]- H. B. Smith, U.S. Patent 993,561 (1911).
- [7]- T. T. Brown, U.S. Patent 1,974,483 (1934).

- [8]- P. Robert, et al, U.S. Patent 5,965,968 (1999).
- [9]- L. Fan, Y. Tai, R. Muller, "Integrated Movable Micromechanical Structures for Sensors and Actuators", IEEE Trans. On Electron Devices, **35** 724-730 (1988).
- [10]- "Franklin electric motor" Am. J. Phys. **39**, 1139-1141 (1971).
- [11]- <http://www.rexresearch.com/jefimenko/jefimenko.htm>
- [12]- Marcelo Alonso y Edward J. Finn, *Física*. Addison-Wesley Iberoamericana. Wilmington, 1995.
- [13]- Agustín Udías Vadiñas, *Historia de la Física: De Arquímedes a Einstein*. Editorial Síntesis. Madrid, 2004.
- [14]- E. Perucca, *Física General y Experimental*, Editorial Labor, Barcelona (1958).
- [15]- G. Marconi, US Patent 586.193: "Transmitting electrical signals" (1897).
- [16]- A. Ganot, *Tratado Elemental de Física Experimental y Aplicada y de Metrología*, Bailly-Bailliere, París (1874).
- [17]- <http://www.anotherhistory.com/nikola-tesla>.
- [18]- G. Marconi, US Patent 792.528 (1905).
- [19]- G. Breit, M. A. Tuve y O. Dahl, Phys. Rev. **35**, 51–65 (1930).
- [20]- M. Cheney, Nikola Tesla. El genio al que le robaron la luz. Turner publicaciones. Madrid (2009).
- [21]- N. Tesla, US Patent 454.622 (1891).
- [22]- N. Tesla, US Patent 723.188 (1903).
- [23]- N. Tesla, US Patent 645.576 (1900).
- [24]- N. Tesla, US Patent 649.621 (1900).
- [25]- N. Tesla, US Patent 787.412 (1905).
- [26]- A. Karalis, A. Kurs, R. Moffat, J. Joannopoulos, P. Fisher y M. Soljacic, US Patent 7.825.543 B2 (2010).
- [27]- J. D. Cockcroft y E. T. S. Walton, Proc. R. Soc. Lond. **129**, 477-489 (1930).
- [28]- C. C. Lauritsen, R. Crane, Rev. Sci. Instrm. **4**, 497 – 500 (1933).
- [29]- D. H. Sloan, Phys. Rev. **47**, 62–71 (1935).

CAPITULO 2

Fuentes de energía eléctrica de corriente continua. Instrumentos de medición de tensión y corriente. Características tensión-corriente. Resistividad.

En este capítulo se resumen algunos aspectos básicos sobre las diferentes posibilidades de generación de energía eléctrica de corriente continua, principalmente las que utilizaremos en el laboratorio. La generación de energía eléctrica incluye diferentes posibilidades, como por ejemplo métodos basados en la electroquímica (pilas, celdas de combustibles, baterías, etc.), la generación hidroeléctrica, la nuclear y la térmica en general, la conversión de otros tipos de energía en energía eléctrica (entre ellas las denominadas *alternativas*, por ejemplo, solar, eólica, geotérmica, mareomotriz, etc.), entre otras. Restringiendo la discusión a los laboratorios de la materia, cuando se trata de obtener una fuente de voltaje continuo, utilizaremos pilas/baterías o bien, fuentes de alimentación capaces de proveer esta condición. Estas últimas, se basan en la conversión de la tensión alterna disponible en la red eléctrica en una tensión que se aproxima en mayor o menor grado, dependiendo del diseño, a una fuente ideal de voltaje continuo. Dicha conversión se logra mediante la *rectificación* de la tensión alterna, y luego mediante la aplicación de un *filtro* dimensionado según las características de la carga. Además, se resumen las características de tensión-corriente de algunos elementos como son las resistencias y los diodos. Por último, se hace una breve reseña de la dependencia de la resistencia con diferentes parámetros como son la longitud y la temperatura.

Pila eléctrica o alcalina

La primera pila eléctrica fue inventada en 1800 por el físico italiano Alessandro G. A. Volta (1745-1827). Consistía en una serie de discos apilados alternados de zinc y cobre, separados unos de otros por trozos de cartón humedecidos (figura 1). Volta descubrió que al conectar en serie los elementos aumentaba la diferencia de potencial, permitiendo disponer de tensiones y corrientes que hasta la fecha estaban limitadas a las prestaciones de los generadores electrostáticos.



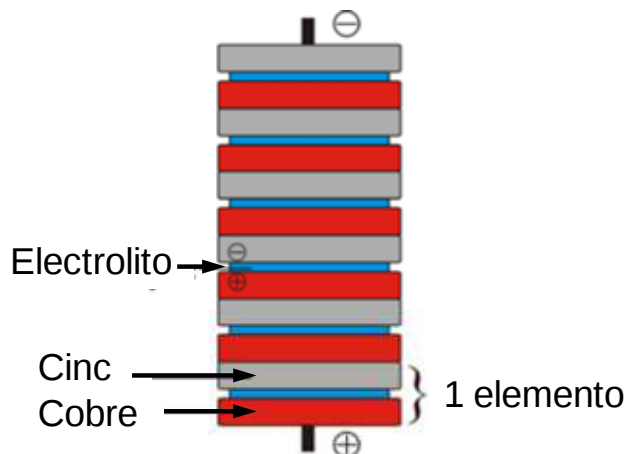
Alessandro Volta

Otra disposición también descrita por Volta para el aparato estaba formada por una serie de recipientes con líquido (unos junto a otros, en batería), en los que se sumergían

tiras metálicas. Cuando se fijó una unidad de medida para la diferencia de potencial, se utilizó el voltio justamente en homenaje a Volta.



a)

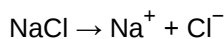


b)

Figura 1: pila de Volta

La pila eléctrica es un dispositivo capaz de transformar energía potencial química en energía eléctrica. La estructura fundamental de una pila consiste en dos electrodos, metálicos en muchos casos, en contacto con una disolución conductora de la electricidad o electrolito (figura 2).

El electrolito es una sustancia que contiene iones libres, los que se comportan como un medio conductor eléctrico. Debido a que generalmente consisten de iones en solución, los electrolitos también son conocidos como soluciones iónicas, pero también son posibles electrolitos fundidos y electrolitos sólidos. El ejemplo más común es la sal (NaCl) disuelta en agua (H₂O). La reacción química que se genera es la siguiente:



Cuando ésta reacción entra en proceso, los componentes de la sal se disocian debido a las interacciones entre las moléculas del solvente y el soluto, en un proceso denominado solvatación, resultando de este modo una solución conductora de corriente eléctrica.

La pila más sencilla para explicar el funcionamiento posee un ánodo (polo negativo) hecho de polvo de Cinc y un cátodo (polo positivo) de cobre. Durante la descarga de la pila, el cinc metálico (Zn) se oxida en el ánodo liberando dos electrones y por lo tanto queda cargado negativamente, mientras que el cátodo de cobre (Cu) capta esos electrones quedando cargado positivamente. Por lo tanto, si se conectan ambos polos, generarán una corriente eléctrica.

La pila durará hasta que se consume uno o mas componentes que intervienen en dicha reacción, tras lo cual cesa su actividad

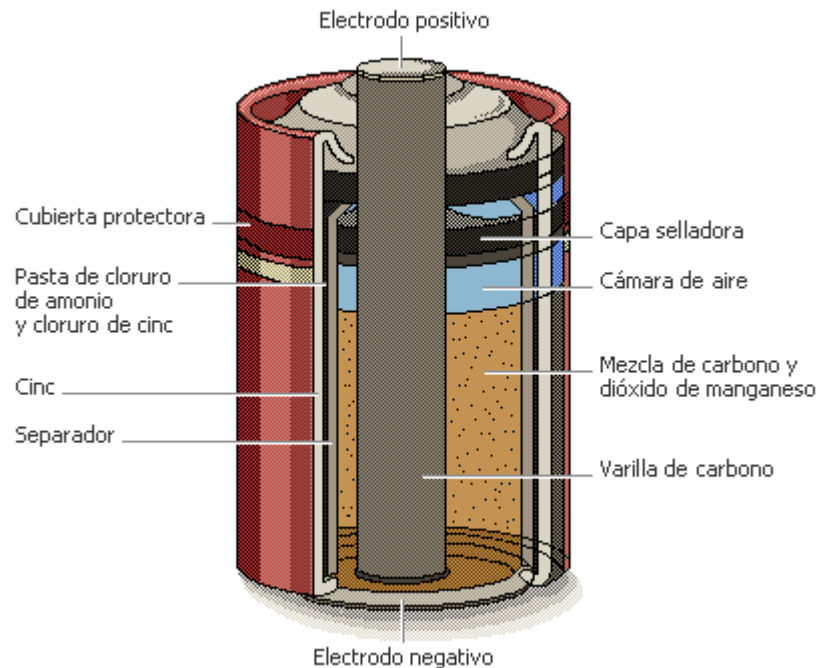


Figura 2: esquema constructivo de una pila seca o pila de Leclanché. El cátodo está compuesto por la barra de carbono (como medio vehiculizador de las cargas) y en dióxido de manganeso. El ánodo está constituido por el cinc, mientras que el electrolito está compuesto por la pasta de cloruro de amonio y cloruro de cinc (disueltas en agua). Al descargar la pila, el cinc se oxida y el dióxido de manganeso se consume en esta reacción [1].

Al invento de Volta siguieron una serie de nuevos diseños incorporando diversas mejoras, como la pila de La pila Daniell (1836), de Grove (1839) y Leclanché (1868), siendo esta última la antecesora directa de las pilas que se utilizan hasta la actualidad. En este caso se utiliza una solución de cloruro amónico en la que se sumergen electrodos de zinc y de carbono, rodeado éste último por una pasta de dióxido de manganeso y polvo de carbono. Suministra una tensión de 1,5 V y su principal ventaja es que puede almacenarse ya que el zinc sólo se consume al extraer corriente.

Existen normas internacionales para la estandarización de los tamaños y voltajes de las pilas para permitir su uso en aparatos eléctricos a nivel mundial.

Los metales y productos químicos utilizados en las pilas son altamente contaminantes. Son consideradas residuos peligrosos, por lo que es importante descartar las pilas agotadas en lugares específicos dedicados al tratamiento responsable de dichos residuos.

La principal diferencia entre una pila y una batería o acumulador reside en que cuando los elementos activos de la pila se consumen, ésta es reemplazada por una nueva pila, mientras que al consumirse los elementos activos de una batería, los mismos pueden ser recuperados mediante un proceso de carga. Para ello la misma se conecta a una fuente de fuerza electromotriz haciendo circular corriente en el sentido contrario, logrando que la acción química se revierta.

Las pilas no son fuentes ideales, esto significa que posee una resistencia interna, así como también capacitancias e inductancias. Aquí sólo consideraremos que posee una resistencia interna, de modo que la pila se caracterizará por su fuerza electromotriz $\mathcal{E}$ y por su resistencia interna r . El modelo eléctrico más simplificado de una pila es el que se muestra en la figura 3a, que consiste de una fuente ideal con la resistencia interna, conectadas en serie.

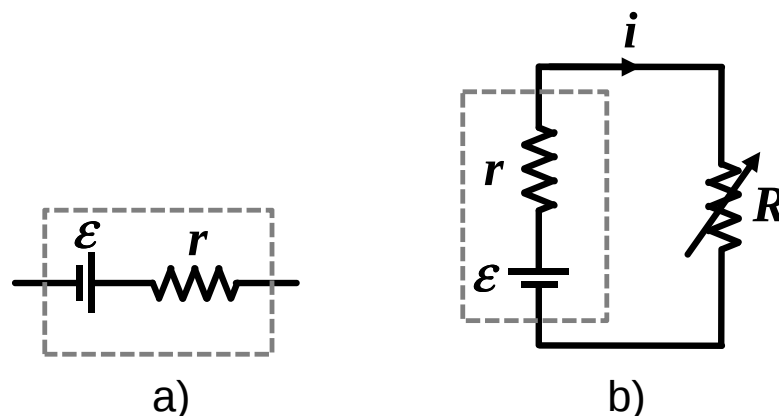


Figura 3: modelo eléctrico simplificado de una pila a) y circuito eléctrico para determinar la resistencia eléctrica de una pila.

En la figura 3b se muestra un posible circuito para medir la resistencia interna de la pila. Cuando el valor de la resistencia R baja, lo que se observa es que la tensión a lo bornes de la pila también baja.

Haciendo uso de este comportamiento y con la ayuda de la ley de Ohm, deduzca como se podría medir la resistencia interna de una pila.

Fuente de alimentación

Una fuente de alimentación es un dispositivo que convierte una tensión alterna en continua para alimentar aparatos electrónicos.

La fuente más simple es la fuente de alimentación lineal (figura 4). Ésta esta compuesta por: un transformador que adapta los niveles de tensión, un circuito que convierte la corriente alterna en continua llamado rectificador, compuesto por cuatro diodos, luego le sigue un circuito que suaviza la forma de onda que se logra con un filtro de condensador, y finalmente el regulador de tensión, que estabiliza la tensión a un valor establecido.

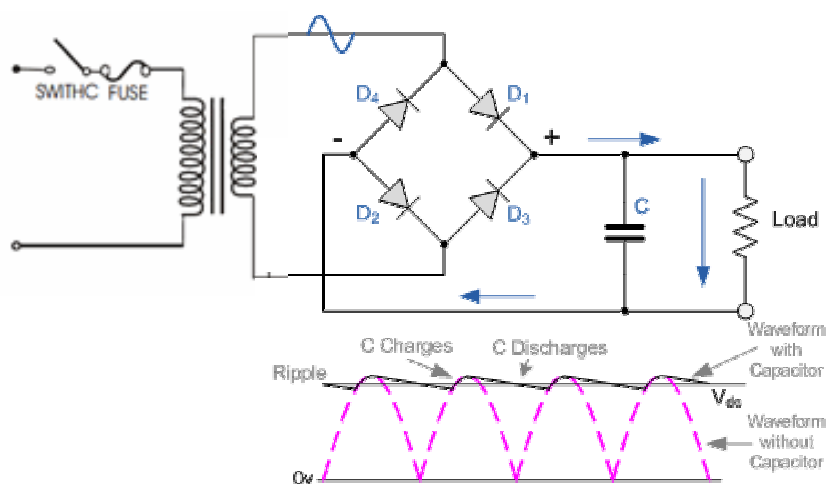


Figura 4. Fuente de alimentación lineal.

Instrumentos de medición de tensión y corriente

Multímetro

Un multímetro es un instrumento que permite medir directamente magnitudes eléctricas activas como corrientes y diferencia de potenciales o pasivas como resistencias, capacidades y otras. Las medidas pueden realizarse para corriente continua o alterna.

Funcionamiento

El funcionamiento se basa en la utilización de un *galvanómetro* que se emplea para todas las mediciones. Para poder medir cada una de las magnitudes eléctricas, el galvanómetro se debe completar con un determinado circuito eléctrico que dependerá también de dos características del galvanómetro: la resistencia interna (R_i) y la inversa de la sensibilidad. Esta última es la intensidad que, aplicada directamente a los bornes del galvanómetro, hace que la aguja llegue al fondo de escala.

Nota: El aparato descrito corresponde al diseño original, ya que en la actualidad los multímetros utilizan un conversor analógico/digital y un microprocesador para realizar los cálculos que se presentan en un display numérico.

Un *galvanómetro* es un instrumento que se usa para detectar y medir la corriente eléctrica. Este instrumento consta de una bobina, por la cual circula la corriente que se quiere medir, y de un imán. El campo magnético generado por la bobina, produce una fuerza de atracción o repulsión con el imán que se traduce en una rotación de una aguja.

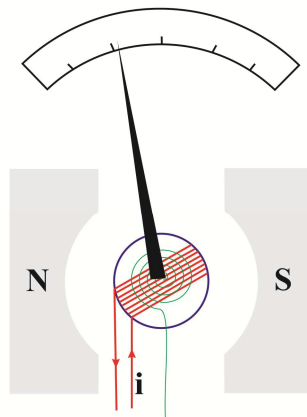


Figura 5. Galvanómetro.

Amperímetro

Un amperímetro es un instrumento que sirve para medir la intensidad de corriente que está circulando por un circuito eléctrico.

Para que el multímetro trabaje como amperímetro se conecta una resistencia R_s en paralelo con el galvanómetro (Figura 6). El valor de R_s depende del valor en amperios que se quiera alcanzar cuando la aguja alcance el fondo de escala.

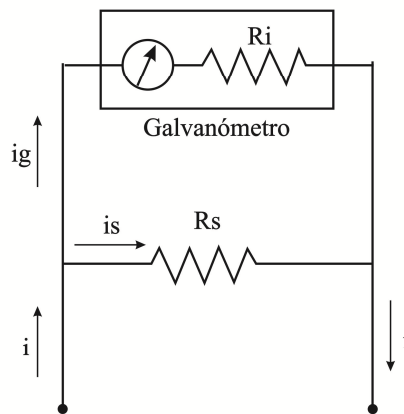


Figura 6. Esquema de Amperímetro.

Utilización

Para medir la intensidad de la corriente que circula por un circuito, el amperímetro debe colocarse en serie para que toda la corriente pase a través del mismo. El amperímetro debe poseer una resistencia interna lo más pequeña posible con la finalidad de evitar una caída de tensión apreciable.

Voltímetro

Un voltímetro es un instrumento que sirve para medir la diferencia de potencial entre dos puntos de un circuito eléctrico.

Para que el multímetro trabaje como voltímetro es preciso conectar una resistencia R_v en serie con el galvanómetro (Figura 7). El valor de R_v depende del valor en voltios que se quiera alcanzar cuando la aguja alcance el fondo de escala.

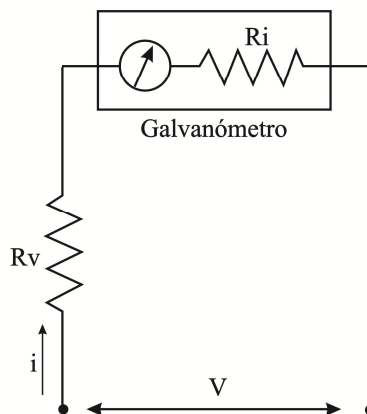


Figura 7. Esquema voltímetro

Utilización

Para medir la diferencia de potencial, el voltímetro ha de colocarse en paralelo. Entonces, el voltímetro debe poseer una resistencia interna lo más alta posible, a fin de que la corriente que circula por el voltímetro sea lo más chica posible.

Óhmetro

El óhmetro permite medir resistencias. Para ello se utiliza una pila interna que hace circular una corriente a través de la resistencia a medir, el instrumento y una resistencia adicional de ajuste (Figura 8).

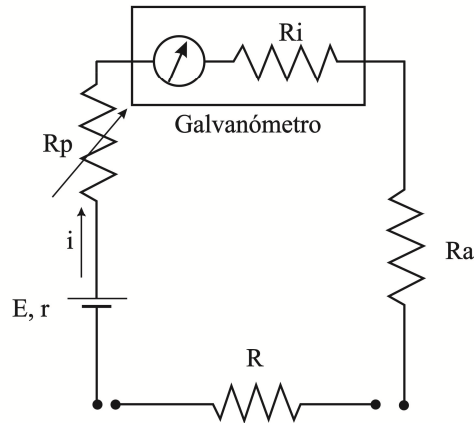


Figura 8. Esquema de óhmetro

Utilización del multímetro



Figura 9. Multímetro

En la Figura 10 se muestra un multímetro genérico donde se observa la llave selectora (1), con la que se elige la posición correspondiente a la medición que se quiere efectuar. El punto central superior (OFF) es la posición de apagado, donde debe quedar cuando no se lo utiliza (para protección del instrumento y su batería). Para cada posición de la llave, se observa un valor que indica el valor máximo que se puede medir en esa posición. Si se supera dicho valor el display (2) mostrará 1 _ _ _ , indicando que se ha excedido el fondo de la escala del instrumento.

En general, para todas las mediciones, las puntas de prueba del multímetro van insertadas en dos conectores: el positivo (4) y el negativo (3) COM. El conector positivo tiene una etiqueta donde se indica que mediciones se realiza con este conector (V, mA,

Ω). En caso que la corriente que se quiere medir supere los 200mA (y sea menor a 10A), la punta de pruebas debe insertarse en el zócalo (5) -10ADC- y la llave selectora debe llevarse a la posición 10A.

La resistencia interna del instrumento para todos los rangos de medición de corriente es muy baja, por lo que si se lo conecta accidentalmente a una fuente de tensión se producirá un cortocircuito que puede arruinar el instrumento y **poner en riesgo su seguridad**.

Siempre debe comenzarse una medición por el rango más alto.

Pregunta

Dada una resistencia R en un circuito, se quiere determinar el voltaje aplicado y la corriente que circula por la misma. De acuerdo al funcionamiento del amperímetro y voltímetro, cuál de las configuraciones mostrada en la Figura 10 es conveniente usar. Explique.

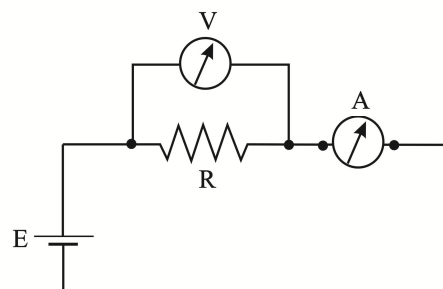
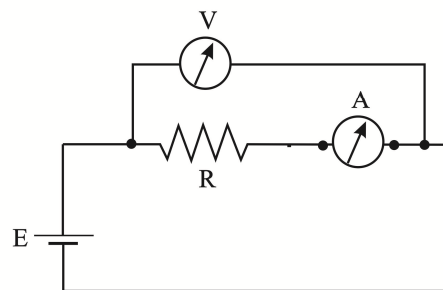


Figura 10.

Característica Tensión-Corriente

Existen elementos que tienen características tensión-corriente distinta. Es decir, si se aplica a los bornes del elemento una diferencia de potencial, la intensidad de corriente que circula por el mismo puede presentar comportamiento distintos. En particularmente, existen elementos, como las resistencias eléctricas, que cumplen la ley de Ohm.

Georg Simon Ohm (1789 - 1854), físico y matemático alemán, estudió la relación que existe entre la intensidad de una corriente eléctrica, su fuerza electromotriz y la resistencia, y formuló, en 1827, la ley que lleva su nombre. También se interesó por la acústica, la polarización de las pilas y las interferencias luminosas. La unidad de resistencia eléctrica, el ohmio, recibe este nombre en su honor.



Georg Ohm

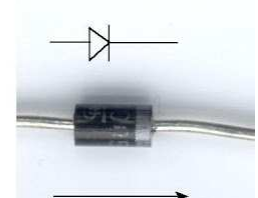
El postulado general de la ley de Ohm establece que,

el flujo de corriente en ampere [A] que circula por un circuito eléctrico cerrado, es directamente proporcional a la tensión o voltaje aplicado [V], e inversamente proporcional a la resistencia en ohm [Ω] de la carga que tiene conectada.

La resistencia eléctrica de un elemento es, entonces una medida de la oposición de este al paso de corriente, y depende de su geometría y de su coeficiente de resistividad (ρ) a una determinada temperatura. Según sea la magnitud de la resistividad, los materiales se pueden clasificar en conductores, aislantes y semiconductor. Existen además ciertos materiales en los que, en determinadas condiciones de temperatura, aparece un fenómeno denominado superconductividad, en el que el valor de la resistencia es prácticamente nulo.

Los materiales semiconductores son elementos que se comportan como un conductor o como un aislante dependiendo de diversos factores, como por ejemplo el campo eléctrico o magnético, la presión, la radiación que le incide, o la temperatura del ambiente en el que se encuentre. Con este tipo de material es posible fabricar componentes electrónicos que tiene una característica tensión-corriente particular como son los diodos.

Los diodos son elementos que, idealmente, funcionan como una llave, dado que permiten que circule corriente en un sentido y no en el sentido opuesto. Si bien los diodos reales presentan un comportamiento similar al ideal existen diferencias importantes. Un modelo matemático para la relación entre la tensión aplicada a los bornes del diodo (V) y la corriente que circula por el mismo (I) es el modelo Shockley (en honor a William Bradford Shockley),



Diodo. Representación, Imagen real y sentido de circulación de la corriente

$$I = I_S(e^{\alpha V} - 1) \quad (1)$$

donde I_s se denomina corriente de saturación y α es una constante que depende del proceso de fabricación del diodo y de la temperatura.

Actividades

Diseñe un circuito para determinar la característica tensión-corriente de tres elementos: una resistencia, una lámpara y un diodo rectificador.

Preguntas

1. Estudie la validez de los modelos presentados.
2. ¿Los elementos son simétricos frente a una inversión en la polaridad de la fuente?
3. ¿La lámpara cumple la ley de Ohm?
4. Para el caso de la lámpara, ¿Qué sucede cuando se enciende la misma?

Precauciones

Dado el modelo matemático del diodo, se puede observar que una pequeña variación en el valor del voltaje aplicado al diodo, produce una gran variación en la corriente. Por lo tanto, es necesario agregar al circuito una resistencia limitadora de corriente.

Resistividad

La resistividad (ρ) es la resistencia eléctrica específica de un material y es la inversa de la conductividad (σ). En los conductores óhmicos, relaciona la densidad de corriente $\mathbf{J}$ con el campo eléctrico $\mathbf{E}$.

Suponga un conductor cilíndrico de longitud L y sección transversal S como se muestra en la Figura 11. Sea V la diferencia de potencial en los extremos del conductor e i la corriente que circula por el mismo. Entonces, se puede ver que,

$$V = \rho \frac{L}{S} i \quad (2)$$

Dada la Ley de Ohm, se puede obtener que,

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (3)$$

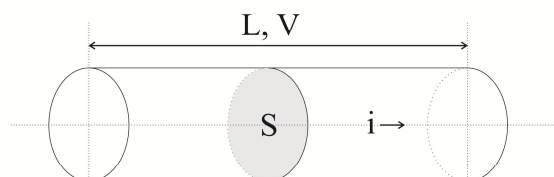


Figura 11.

Actividades

Determine la resistividad de dos materiales distintos. En base a los valores de resistividad encontrados, determine que materiales se utilizó en la experiencia.

Preguntas

1. En base a la teoría, realice el desarrollo para obtener la ecuación (2). Estudie la validez de la misma.

Dependencia de la Resistencia con la temperatura

El valor de la resistencia depende del material del conductor, de su longitud (L), de su sección (S) y de la temperatura.

Para temperaturas no muy elevadas, se puede observar para materiales conductores que,

$$R(T) = R_0(1 + \alpha\Delta T) \quad (4)$$

Donde R_0 es la resistencia a 20°C y α es una constante.

Actividades

Implemente un método para observar la dependencia del valor de la resistencia con la temperatura. En base a sus observaciones, estudie la validez de la ecuación (4).

Preguntas

1. De una explicación microscópica de la dependencia de la resistencia con la temperatura.
2. ¿Esperaría la misma dependencia para el caso de un semiconductor? Explique.
3. Si desea fabricar una “resistencia patrón” con la cual comparar otras resistencias, ¿qué parámetros son importantes de considerar para una buena elección del material a usar?

Leyes de Kirchhoff. Teorema de Thévenin

Las **leyes de Kirchhoff** se basan en la conservación de la energía y de la carga en circuitos eléctricos. Estas fueron descritas por Gustav Kirchhoff (1824 - 1887) en 1845, y son una consecuencia directa de las ecuaciones de Maxwell para circuitos de baja frecuencia. Sin embargo, Kirchhoff precedió a Maxwell.



Gustav Robert
Kirchhoff

Leyes de Kirchhoff

- 1) Ley de Kirchhoff de las corrientes. La suma algebraica de las corrientes en un nudo es igual a cero.
- 2) Ley de Kirchhoff de las tensiones. En un circuito cerrado o malla, la suma algebraica de las tensiones a los bornes de los diferentes elementos es cero.

Actividades

Estudie experimentalmente la validez de las leyes de Kirchhoff.

Preguntas

1. A partir de la conservación de energía y de carga, derive las Leyes de Kirchhoff.
2. A partir de las ecuaciones de Maxwell, derive las Leyes de Kirchhoff.
3. Determine teóricamente las corrientes y voltajes de los elementos del circuito utilizados en la experiencia.

El **teorema de Thévenin** establece que cualquier parte de un circuito eléctrico lineal, comprendido entre dos terminales A y B, puede ser reemplazado por una fuente de tensión en serie con una impedancia, de manera tal que al conectar un elemento entre los terminales A y B, la tensión y la corriente que atraviesa al elemento serán las mismas tanto en el circuito real como en el equivalente.

Este teorema fue enunciado por primera vez por el científico alemán Hermann Von Helmholtz en el año 1853, pero fue redescubierto en 1883 por el ingeniero de telégrafos francés Léon Charles Thévenin (1857–1926).



Léon Charles
Thévenin

Actividades propuestas

Estudie experimentalmente la validez del teorema.

Preguntas

1. Determine teóricamente los valores de la fuente y la impedancia equivalente para el circuito utilizado en la experiencia.

Puente de Wheatstone

Es un instrumento eléctrico que permite medir resistencias desconocidas. Fue inventado por Samuel Hunter Christie (1802 - 1875) en 1832, mejorado y popularizado por Sir Charles Wheatstone en 1843. Asimismo, existen variaciones que permiten determinar impedancias, capacitancias e inductancias.



Samuel Hunter Christie

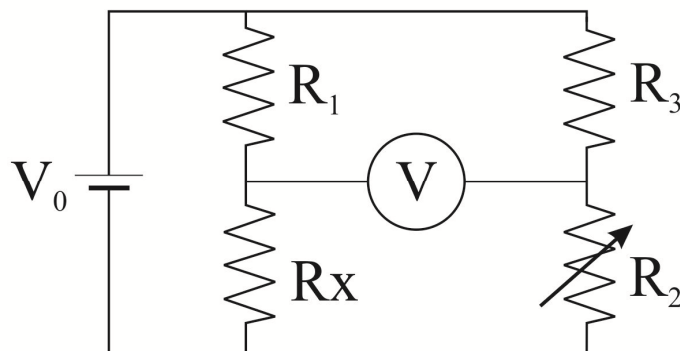


Figura 12. Puente de Wheatstone.

En la figura 12 se esquematiza un circuito Puente de Wheatstone donde R_X es una resistencia incógnita (que se quiere determinar); R_1 y R_3 son resistencias de valor conocido; R_2 es una resistencia variable y V es un voltímetro.

Actividades

Determine experimentalmente el valor de una resistencia incógnita.

Preguntas

1. Determine la condición de equilibrio de las ramas del puente de Wheatstone (caso en el cual el voltímetro marca una tensión cero).
2. A partir de lo anterior, encuentre una forma de determinar el valor de R_X .
3. ¿Qué determina la precisión en la medición del valor de R_X ?

Características del LED y de LDR

Un diodo emisor de luz (**Light Emitting Diode; LED**) es un diodo semiconductor que emite fotones cuando circula corriente por el mismo. Esto se debe a que los electrones pierden energía cuando atraviesan el material semiconductor, y esta energía se manifiesta con la emisión de un fotón. La longitud de luz emitida por el LED

depende del material semiconductor con el cual fue construido y la intensidad depende de la corriente que circula por el mismo.

Actividades propuestas

Desarrolle un experimento para determinar la dependencia de la intensidad de luz y la corriente que circula por el LED.

Preguntas

1. ¿Existe diferencias entre un LED y un diodo semiconductor en cuanto a su funcionamiento?
2. ¿Qué cuidados hay que tener para utilizar un LED sin quemarlo?

Las fotorresistencias son resistencias que dependen de la luz (**Light Dependent Resistors; LDR**). Están construidas con un material que tiene muy pocos electrones libre cuando se lo mantiene en completa oscuridad, por lo cual tiene una resistencia muy alta al paso de la corriente. En cambio, cuando se hace incidir luz sobre el material, este absorbe la luz y libera electrones, por lo cual aumenta su conductividad.

La relación entre la iluminación y el valor de la resistencia en una LDR está dado por,

$$R = A L^{-\alpha} \quad (5)$$

Donde R es el valor de la resistencia en Ohm (Ω), L la iluminación en Lux, y A y α son constantes que dependen del material y del proceso de fabricación de la fotorresistencia.

Actividades propuestas

Desarrolle un experimento para comprobar la relación dada por la ecuación (5).

Preguntas

1. ¿Existe una dependencia del valor de la LDR con la longitud de onda? Explique.
2. ¿Existe una dependencia del valor de la LDR con la temperatura? Explique

Referencias

A. Gray y G. A. Wallace, *Electrotecnia, fundamentos teóricos y aplicaciones prácticas*, Aguilar, Madrid (1958).

Standard Handbook for Electrical Engineers, D. G. Fink y H. W. Beaty Editores, McGraw Hill, New York (1978).

Raymond A. Serway, *Física, Tomo II, Cuarta Edición*, Ed. McGraw-Hill, 1997.

Experimental Determination of the Laws of Magneto-electric Induction in different masses of the same metal, and its intensity in different metals, Royal Society Bakerian Lecture, 1833.

An Account of Several New Instruments and Processes for Determining the Constants of a Voltaic Circuit, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, vol. 133, 1843, pp. 303--329.

H. Helmholtz (1853) "Über einige Gesetze der Vertheilung elektrischer Ströme in körperlichen Leitern mit Anwendung auf die thierisch-electrischen Versuche", *Annalen der Physik und Chemie*, vol. 89, n.º 6, páginas 211–233,

L. Thévenin (1883) "Extension de la loi d'Ohm aux circuits électromoteurs complexes", *Annales Télégraphiques* (Troisième série), vol. 10, págs. 222–224. Reimpresión como: L. Thévenin (1883) "Sur un nouveau théorème d'électricité dynamique", *Comptes Rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des Sciences*, vol. 97, págs. 159–161.

J. E. Fernández y E. Galloni, *Trabajos prácticos de física* (Editorial Nigar, Buenos Aires, 1968).

CAPITULO 3

Magnetostática

Historia del electromagnetismo

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

El primer filósofo que estudió el fenómeno del magnetismo fue Tales de Mileto. Descubrió la propiedad de atracción de ciertos metales en un mineral denominado "magnetita" (óxido férrico), que era abundante en la región de Magnesia. También descubrió que frotando el hierro con magnetita, o manteniéndola durante un cierto tiempo bajo su influencia, se imantaba. Tales explica la atracción magnética atribuyendo vida al imán (alma).

El conocimiento del magnetismo se mantuvo limitado a los imanes, hasta que en 1820, el físico y químico Danés Hans Christian Ørsted (1777 - 1851), descubre que la electricidad y el magnetismo están relacionados [1]. Según historiadores, Ørsted llevó a cabo en su lugar de residencia, experimentos demostrativos dedicados a amigos y estudiantes sobre electricidad y magnetismo. Con la ayuda de una pila voltaica hizo circular una corriente eléctrica a través de un alambre. Ørsted notó que cada vez que la corriente circulaba por el alambre, la aguja de una brújula que había colocado cerca se movía, sugiriendo así, que debía haber una relación entre la electricidad y el magnetismo.

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



Hans Christian Ørsted (1777 - 1851)



André-Marie Ampère (1775 - 1836)

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

Galvanómetro

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

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

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

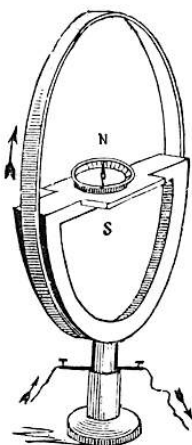


Figura 1: Galvanómetro tangencial.

Actividad

Conociendo el campo magnético generado por la bobina circular (¿en que región del espacio?):

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

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

Pregunta

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

Fuerza magnética

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

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

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

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

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

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

Con el siguiente dispositivo se intenta mostrar como un alambre conductor por el cual circula una corriente, se mueve en presencia de un campo magnético externo debido a las fuerzas magnéticas que aparecen sobre dicho alambre. Se trata de un alambre conductor con forma de columpio que cuelga de un soporte horizontal (Figura 2 (a)). Un imán permanente con caras polares planas es colocado de tal forma que la parte horizontal del alambre quede entre las cara polares del imán (Figura 2 (b)). Al

conectar los extremos del alambre a una fuente de corriente, el alambre se apartará de su posición de equilibrio debido a las fuerzas magnéticas.

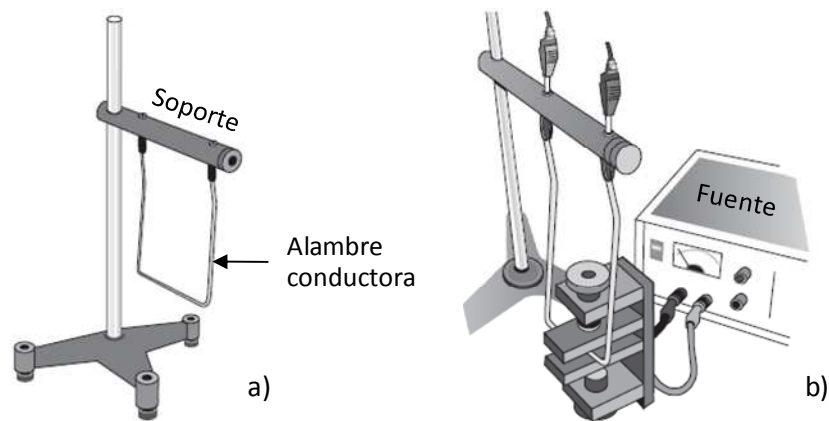


Figura 2: dispositivo para la demostración de la fuerza magnética.

Actividades

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

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

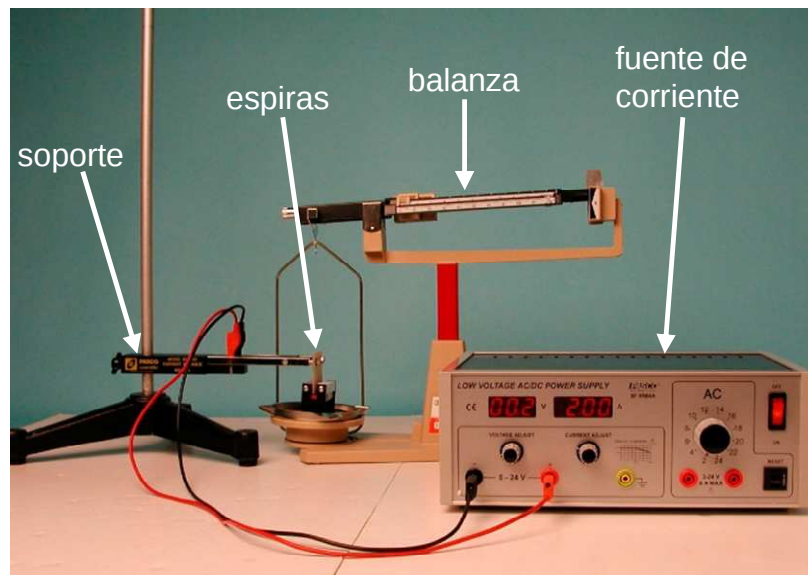


Figura 3: balanza magnética.

Actividades

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

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

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

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

El dispositivo (figura 4) consiste de una válvula que contiene un cátodo en su interior. Dicha válvula contiene helio a baja presión. Cuando el cátodo comienza a emitir electrones, algunos colisionan con los átomos del helio, excitándolos y emitiendo luz visible, permitiendo visualizar el haz de electrones. Rodeando la válvula, se encuentra un par de bobinas de Hemholtz que son las responsables de generar un campo uniforme en la región donde se encuentra la válvula.



Figura: 4. Tubo de rayos filiformes

Actividad

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

Inducción magnética

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

Mas tarde, en 1831 Faraday y Joseph Henry descubren casi al mismo tiempo y en forma independiente, que en un circuito se inducía una corriente eléctrica cuando otra

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

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

Actividad

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

En 1855, el físico francés Jean Bernard Léon Foucault (1819 - 1868) publicó un trabajo sobre los efectos que se producían en un disco de cobre cuando se le hacía girar entre los polos de un imán: el disco se calentaba y ofrecía resistencia al giro. La explicación de esto es que cuando un flujo magnético a través de un trozo de material conductor cambia con el tiempo, se inducen corrientes en dicho conductor. Estas corrientes se llaman *corrientes de Foucault* o *corrientes parasitas* (También se las suelen llamar en inglés, *Eddy currents*), y estas eran las responsables del fenómeno observado por Gambey y Arago. Como se puede notar, el principio es siempre el mismo, pero ha recibido diferentes nombres dependiendo del tipo de experimento en el que es observado.

Actividades

Con el dispositivo de la figura 5 es posible observar los efectos que producen las corrientes de Foucault sobre un cuerpo conductor que oscila en un campo magnético.

- 1) Colocar la paleta en el soporte como muestra la figura 5(a) y compruebe que ésta puede oscilar libremente. Notar que la paleta es de material no ferromagnético (aluminio).
- 2) Acercar lentamente el imán a la paleta como muestra la figura 5(b) (Si el imán se acerca a la paleta rápidamente, ésta comenzará a moverse).
- 3) Aparte la paleta de su posición de equilibrio y suéltela para que comience a oscilar.
- 4) Repita los procedimientos anteriores con las distintas paletas.

Describa las diferencias entre los casos.

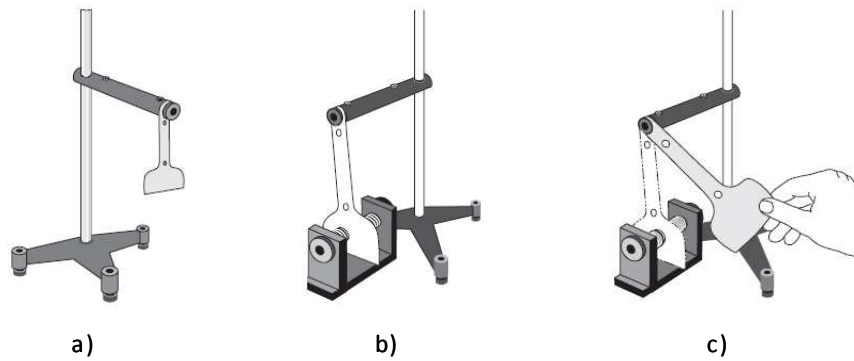


Figura 5: dispositivo para la observación de la inducción magnética.

Diamagnetismo y Paramagnetismo

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

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

Para observar los efectos de diamagnetismo y paramagnetismo se utilizará el dispositivo mostrado en la figura 6, que consta de dos imanes permanentes y dos barras cilíndricas, una de material diamagnético y otra de material paramagnético. Notar que ambos materiales (aluminio y vidrio) no son ferromagnéticos.

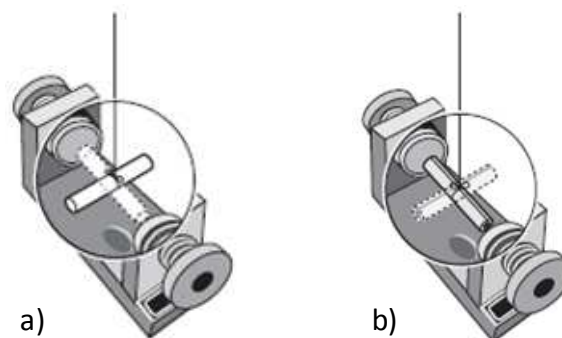


Figura 6: dispositivo para la observación del diamagnetismo y paramagnetismo.

Actividades

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

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

Motor de corriente continua.

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

Motor homopolar

Después de que los trabajos de Ørsted y Ampère hicieran intuir la existencia de fuerzas con simetría circular, la mayoría de los científicos aún se aferraban a la idea de que las fuerzas debían tener dirección radial. Faraday sin embargo, menos influenciado por la tradición estaba dispuesto a demostrarlo, y para eso, en la navidad de 1821, diseñó un ingenioso dispositivo (Figura 7) que fue mostrado en una de sus conferencias [6].

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

Mediante el uso de la electricidad para generar un movimiento mecánico, Faraday había dado el primer paso hacia la creación del mundo moderno industrializado, que depende en gran medida del uso del motor eléctrico. Este tipo de motor se lo llama *motor homopolar* ya que no hay ningún cambio de polaridad, contrariamente a lo que sucede con los motores bipolares, como se verá luego.

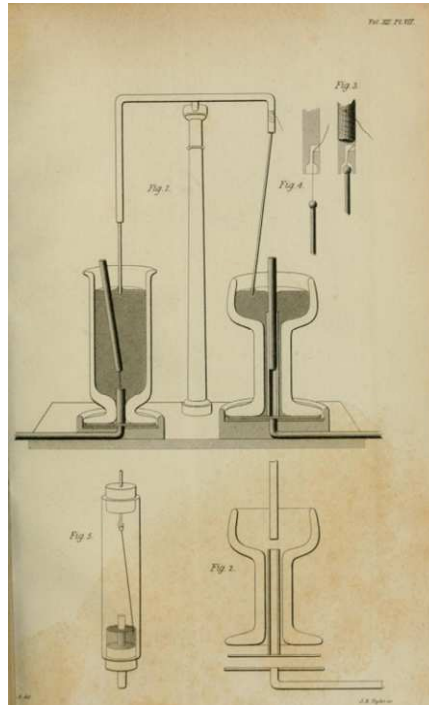


Figura 7. Diseño del primer motor eléctrico de Faraday (dibujo original de la revista *Quarterly Journal of Science*, Vol VII, 1821)

Actividad

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

Motor bipolar

Diez años después de que Faraday publicara su primer motor eléctrico, en 1831, Joseph Henry había mejorado el motor eléctrico de Faraday. Henry construyó un dispositivo (figura 8) simple cuya parte móvil era un electroimán (AB) el cual podía balancearse sobre un eje horizontal. Su polaridad se invertía de forma automática al tiempo que este se movía a través de un par de cables que sobresalían y hacían contacto alternadamente con dos celdas electroquímicas. Dos imanes permanentes colocados verticalmente (C y D) atraían y repelían alternadamente los extremos del electroimán.

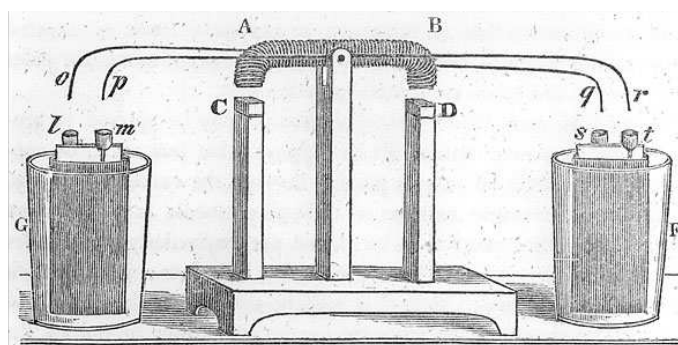


Figura 8: primer motor eléctrico de Joseph Henry.

Aún está en discusión quién fue el inventor del primer motor eléctrico con *conmutador* capaz de convertir energía eléctrica en energía mecánica suficiente para mover una maquinaria. A dos personas se les atribuye el invento, los científicos británicos William Sturgeon (1783 - 1850) y William Ritchie (1790-1837) [7,8]. Aunque estos motores eran dispositivos muy simples, fueron los primeros en proporcionar un movimiento rotatorio continuo y que contenía esencialmente todos los elementos de un motor moderno de corriente continua. En la figura 9 se muestran dos replicas de los motores de Sturgeon a) y Ritchie b).



Figura 9: motores con conmutador de W. Sturgeon a) y W. Ritchie b).

En la figura 10 se muestra un ejemplo simple de un motor bipolar o con conmutador como el que será utilizado en la experiencia demostrativa. Este consiste de un bobinado montado sobre un eje sobre el cual puede girar libremente. El bobinado está conectado a una fuente de corriente mediante un conmutador de manera tal que después de cada media vuelta, la corriente que circula cambia de sentido y así, la fuerza magnética entre el imán y el bobinado tiene siempre el mismo sentido.



Fig. 10: motor de CC con conmutador

Líneas de campo magnético.

Mientras Faraday estudiaba los patrones formados por limadura de hierro desparramada sobre un papel (figura 11), el cual colocaba sobre imanes arreglados en diferentes configuraciones, fue cuando comenzó a desarrollar el concepto de las líneas de fuerza alrededor de un imán.

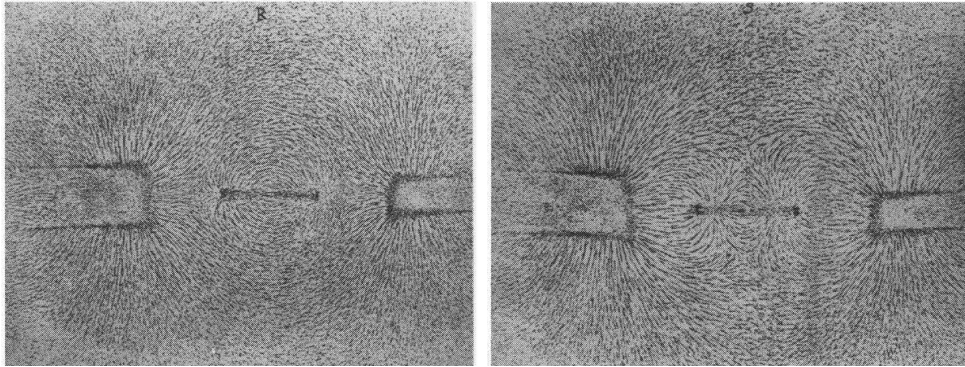


Figura 11: Un par de bocetos de Faraday de los patrones del campo magnético que observó con limaduras de hierro esparcidas sobre un papel colocado sobre varias combinaciones de imanes.

El siguiente dispositivo consta de un recipiente sellado conteniendo glicerina y limadura de hierro en su interior (figura 12). En el centro posee una cavidad cilíndrica por la cual se puede insertar un imán también cilíndrico. Al introducir el imán se podrá observar como la limadura de hierro ira acomodándose para formar patrones correspondientes a las líneas de campo magnético.

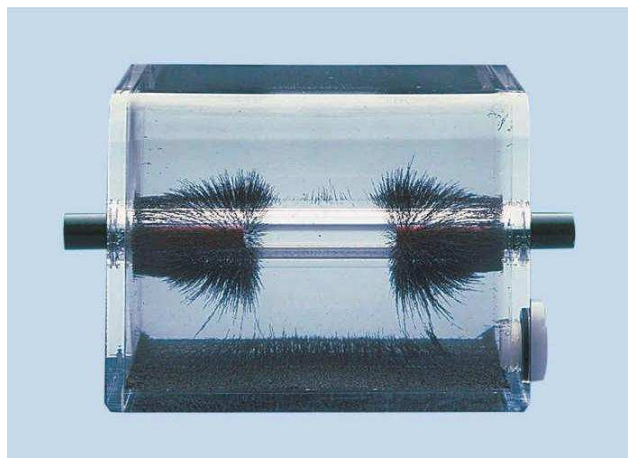


Figura 12. Dispositivo para observar líneas de campo magnético.

Magnetómetro – Gaussímetro/teslametro

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

Los sensores de efecto Hall son pequeños encapsulados con tres o mas patas dependiendo del tipo de sensor (figura 13). En la siguiente experiencia se utilizara una sonda que será conectada a un data-logger. Dicha sonda contiene en su extremo dos sensores de efecto Hall, uno para medir la componente longitudinal del campo magnético y otro para la componente transversal. Estos se encuentran alojados en un extremo de una sonda

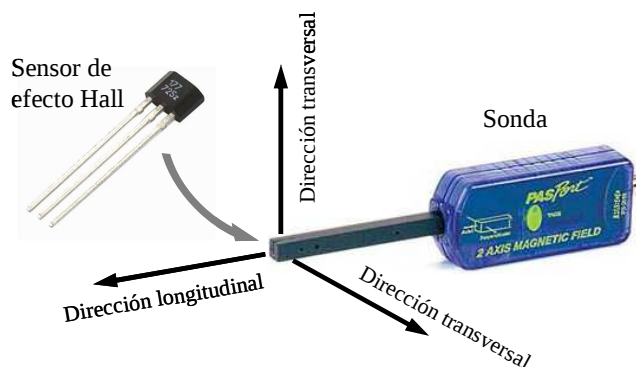


Figura 13: Sensor de efecto Hall y sonda de un magnetómetro Pasco.

Actividades

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

Bobinas de Helmholtz.

En muchos experimentos se desea generar un campo magnético uniforme dentro de una región determinada del espacio. Un ejemplo es el experimento de J. J. Thomson para encontrar la relación e/m (carga del electrón/masa), en el cual se desea un campo uniforme para desviar el haz de electrones. Una forma se logra utilizando un par de bobinas de Helmholtz, que consiste de dos bobinas circulares separadas por una distancia cierta (Figura 14).



Figura 14: Bobinas de Hemholtz.

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

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

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

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

Actividades

- 1) Utilizando una sonda Hall, mida el campo magnético longitudinal (B_z) a lo largo del eje que pasa por el centro de una sola bobina para varias posiciones (ver figura 15).
- 2) Deduzca como deben circular las corrientes en cada bobina para lograr un campo magnético uniforme en el centro geométrico del par de bobinas.
- 3) Deduzca como deben circular las corrientes en cada bobina para lograr un gradiente de campo magnético en el centro geométrico del par de bobinas.
- 4) Utilizando la sonda Hall, mida el campo magnético longitudinal (B_z) a lo largo del eje que pasa por el centro del par de bobinas para varias posiciones. Repita este procedimiento para varias separaciones de las dos bobinas. Determine la separación óptima para obtener un campo uniforme y la región de uniformidad.
- 5) Repita el paso 4) pero esta vez para obtener un gradiente uniforme.

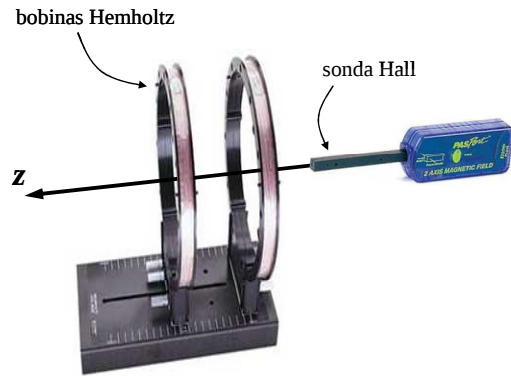


Figura 15. Disposición del par de bobinas Hemholtz y la sonda Hall para la medición del campo magnético.

Referencias

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

CAPITULO 4

Fenómenos transitorios en circuito de corriente continua.

En electrodinámica un **circuito RLC serie** es un circuito lineal que contiene una resistencia eléctrica, una bobina (o inductor) y un condensador (o capacitor) conectados en serie. El comportamiento de estos circuitos se describe generalmente por una ecuación diferencial de segundo orden, y donde los casos particulares: circuitos RC o RL responden a ecuaciones de primer orden. Para comprender el funcionamiento de un circuito RLC conviene empezar analizando el caso más simple.

Circuitos RC

Considere un circuito *RC* en serie con una fuente de tensión continua *V* como el que se muestra en la Figura 1 en la cual el condensador *C* se halla inicialmente descargado.

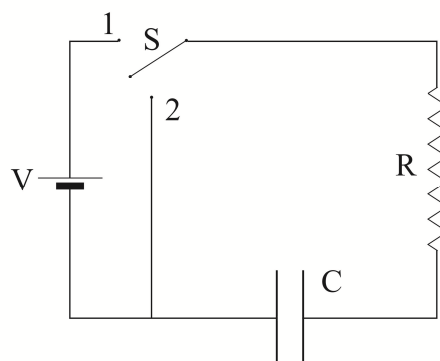


Figura 1

No hay corrientes cuando el interruptor *S* está abierto. Sin embargo, con la llave *S* en la posición (1) se establece una corriente en el circuito, en sentido horario, y el condensador empieza a cargarse. Las cargas eléctricas se acumulan a ambos lados de las placas del condensador sin poder atravesarlo ya que el espacio entre las mismas representa un circuito abierto. Conforme el condensador comienza a cargarse, la diferencia de potencial entre sus bornes aumenta. Para una cierta capacidad *C*, el valor máximo de la carga depende del voltaje de la batería. Una vez “alcanzada” la carga máxima por el condensador, la corriente en el circuito es cero porque se iguala su diferencia de potencial a la de la fuente. Para analizar cuantitativamente este circuito se aplica la regla de Kirchhoff después de que se cierra el interruptor ($t = 0$). Al recorrer el circuito en sentido horario se obtiene la ecuación:

$$V - q/C - iR = 0$$

Donde q/C es la diferencia de potencial en el condensador, e iR la caída de potencial en la resistencia. Observe que tanto q como i son valores instantáneos que dependen del tiempo conforme el condensador se está cargando. Como se trata de un circuito serie, la corriente que circula por la resistencia es la misma que carga al condensador por lo que $i = dq/dt$. De esta manera la ecuación anterior puede reescribirse en forma diferencial:

$$q/(RC) + dq/dt - V/R = 0 \quad (\text{ec. de carga})$$

la cual es una ecuación diferencial, lineal, de primer orden en la variable q .

Suponga ahora que el condensador se halla totalmente cargado y se cambia la posición de la llave S a la (2). En estas condiciones el condensador comienza a descargarse a través de la resistencia. La ecuación que gobierna la carga existente en el condensador es similar a la deducida anteriormente solo que ahora se ha eliminado la batería:

$$q/(RC) + dq/dt = 0 \quad (\text{ec. de descarga})$$

Ambas ecuaciones diferenciales tienen como solución la carga $q(t)$ presente en el condensador. Por diferenciación puede obtenerse la corriente $i(t)$ en el circuito como función del tiempo.

Actividades propuestas

Proponga un método para determinar la capacidad C de un capacitor y luego determine su valor.

Preguntas

1. Para el caso en que el capacitor está inicialmente descargado y la llave S se encuentra en la posición 1, ¿Cómo es la dependencia de la corriente $i(t)$ y del voltaje a los bornes del capacitor $V_c(t)$ con el tiempo?
2. Para el caso en que el capacitor está completamente cargado y la llave S se encuentra en la posición 2, ¿Cómo es la dependencia de la corriente $i(t)$ y del voltaje a los bornes del capacitor $V_c(t)$ con el tiempo?
3. ¿Qué efecto tiene el uso del voltímetro y/o del amperímetro en la medición de C ?

Considere ahora el circuito de la Figura 1, con la llave S en la posición 1, pero reemplazando la fuente de tensión continua por un generador de onda cuadrada.

Actividades propuestas

Determine la capacidad C del capacitor.

Preguntas

1. Determine $i(t)$ teóricamente. ¿La dependencia de la corriente con el tiempo difiere del circuito con fuente continua?
2. Implemente un método para obtener la derivada de la señal de la fuente. Explique.
3. Implemente un método para obtener la integral de la señal de la fuente. Explique.

Circuito RL

Considere a continuación un circuito RL en serie, alimentado por un generador de ondas como se muestra en la Figura 2.

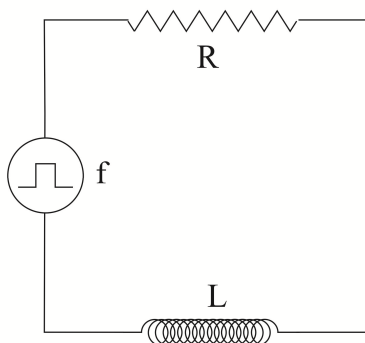


Figura 2.

En todo circuito que contenga una bobina (o inductor), su auto inductancia evita que la corriente en el circuito aumente o disminuya en forma instantánea. Ya que la inductancia L resulta en una f.e.m. inversa (Ley de Lenz), un inductor en un circuito se opone a los cambios en la corriente a través de dicho circuito. Si como en la Figura 2, el voltaje de la fuente es cambiante, el inductor provoca que el circuito se vuelva “perezoso” conforme reacciona a los cambios en la corriente. De acuerdo con la Ley de Lenz esta fem inversa viene dada por $\epsilon_L = -L di/dt$. De esta manera aplicando la regla de Kirchhoff al circuito se obtiene la ecuación diferencial que gobierna el comportamiento de la corriente para todo tiempo:

$$V(t) - iR - L di/dt = 0$$

Actividades propuestas

Determine la inductancia L de la bobina.

Preguntas

1. ¿Cómo es la dependencia de la corriente $i(t)$ y del voltaje a los bornes de la bobina $V_L(t)$ con el tiempo?

Circuito RLC

Considere el circuito *RLC* serie que se muestra en la Figura 3 el cual se halla alimentado por un generador de ondas cuadradas de frecuencia f .

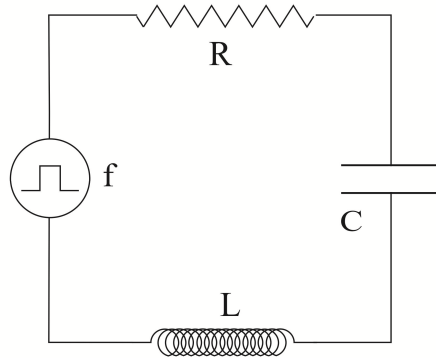


Figura 3.

En estas condiciones el condensador podrá por ciclos almacenar la energía de la fuente en el campo eléctrico existente entre sus placas. Cuando el generador cambia la polaridad el condensador comienza a descargarse y la corriente aumenta y entonces la energía comienza a almacenarse en el campo magnético del inductor, volviendo a comenzar todo en el ciclo siguiente. Por su parte la resistencia siempre disipará la energía de la fuente.

Actividades propuestas

Estudie experimentalmente la dependencia de la corriente que circula por el circuito para distintos valores de R , L y C .

Preguntas

1. ¿Cuál es la ecuación diferencial que debe cumplir la corriente $i(t)$ en el circuito?
2. ¿Qué tipo de soluciones admite la ecuación encontrada en el punto anterior? ¿Bajo qué condiciones se puede obtener cada tipo de solución?
3. ¿Qué sucede cuando el valor de R es muy chico (tiende a cero)?