

Con una ansiedad que era casi una agonía, dispuse a mi alrededor los instrumentos que me permitieron infundir una chispa vital a aquella cosa muerta yacente a mis pies.

Frankenstein, Mary Shelley

La aventura podrá ser loca, pero el aventurero ha de ser cuerdo.

Gilbert Keith Chesterton

CONTENIDOS

- Electrificación
- Carga eléctrica
- Interacciones electrostáticas
- Ley de Coulomb
- Campo eléctrico
- Corriente eléctrica
- Circuitos
- Ley de Ohm

10 ENERGÍA ELÉCTRICA

El intento por desentrañar qué es la energía eléctrica podría describirse como una aventura que, a pesar de llevar ya un largo recorrido, dista mucho de haber finalizado.

Los registros más antiguos corresponden a las observaciones del filósofo griego Tales de Mileto (600 a.C) con respecto a la propiedad que presenta el ámbar de atraer pequeños objetos al ser frotado. El ámbar es una resina vegetal fosilizada, proveniente de restos de coníferas y otros árboles muy antiguos. Presenta tonalidades generalmente amarillentas, y los griegos la llamaban **electrón**.

El primero en utilizar el término **eléctrico** para designar en general a los variados materiales que al ser frotados se comportan de manera similar al ámbar, fue William Gilbert (1544-1603), médico de la reina Elizabeth I de Inglaterra. Sus investigaciones tuvieron por objeto separar los efectos eléctricos de los magnéticos, que por entonces parecían más útiles por su aplicación a la navegación. Ambos fenómenos estaban, en apariencia, relacionados y permanecían sin explicación desde la Antigüedad.

Tradicionalmente, se interpretaba el movimiento de los cuerpos como asociado al impulso vital y a la presencia de un alma o ánima. En este contexto se pensaba que los fenómenos eléctricos y magnéticos eran capaces de otorgar esta animación a los objetos inanimados mediante la comunicación de una especie de fluido vital. En la atracción que despertaban estos fenómenos, subyacía la ilusión de comprender el fenómeno de la vida y eventualmente controlar la naturaleza, a partir del conocimiento de sus leyes.

A medida que la Física se fue organizando como ciencia y avanzando en la definición de su metodología, sus límites y posibilidades, la electricidad se sumó al cuerpo teórico de conceptos fundamentales que permiten interpretar la estructura de la materia y sus cambios, algunos de los cuales serán analizados en este capítulo.



Tormenta eléctrica fotografiada en Suiza.

Los trabajos de Gilbert son los primeros que intentan abordar la comprensión de un grupo de fenómenos a partir de una metodología verdaderamente experimental.

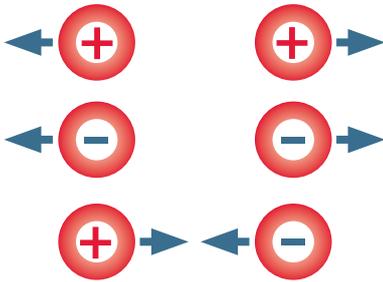
Gilbert comenzó por clasificar los materiales en dos grupos: aquéllos que adquirirían estado eléctrico por frotamiento, como el ámbar, y aquéllos que no lo hacían. Avanzó también en la determinación de que este efecto no tenía, en principio, relación con el aumento de temperatura, sino con el mismo frotamiento.

A comienzos del siglo XVIII, dos científicos, el inglés Stephen Gray (1696-1736) y el francés Jean Desaguliers (1683-1744), encontraron que podían electrificar un corcho si lo unían por medio de un alambre metálico a un tubo de vidrio previamente frotado. El fenómeno se evidenciaba incluso si se separaban ambos cuerpos. Luego realizaron otros experimentos que les permitieron plantear que al frotar los cuerpos aparecía una “virtud” o “fluido” eléctrico, que podía ser transmitido por algunos materiales, a los que llamaron **conductores**.

Un científico francés, François du Fay (1698-1739), descubrió que dos vidrios previamente frotados se repelían cuando se los acercaba. Al experimentar con otros materiales, como la resina, pudo identificar dos tipos de estados eléctricos a los que designó como **fluido vítreo** y **fluido resinoso**, según adquirieran al ser frotados con un paño de seda la carga del vidrio o de la resina. Llegó a determinar que dos estados eléctricos iguales se repelen, mientras que los estados distintos se atraen.

Unos pocos años después, Benjamín Franklin (1706-1790) realizó experimentos similares, pero analizó los resultados poniendo especial atención en que el vidrio había adquirido un estado eléctrico por su interacción con el paño de seda. Interpretó el fenómeno como la presencia en el vidrio de un exceso de lo que llamó **carga eléctrica** (q), que se corresponde con una falta o defecto de la misma carga, en la seda. Entonces los llamó respectivamente carga positiva y negativa, nombres que aún se usan.

Interacciones electrostáticas



Los cuerpos con cargas de igual signo se repelen, y los que tienen cargas de signos diferentes se atraen. Por tratarse de una interacción, las fuerzas aplicadas a cada cuerpo son de igual intensidad, igual dirección y sentidos opuestos.



Benjamin Franklin

(1706-1790) nació en

los Estados Unidos, fue hijo de un humilde fabricante de velas, participó activamente del proceso de independencia de su país además de destacarse en filosofía, ciencia y tecnología, y también como prolífico inventor. Se lo recuerda en particular por su invención del pararrayos. Se hizo famoso en Europa por sus logros en las áreas mencionadas, y por el libro *La ciencia del tío Richard*, una compilación de varias de sus máximas y frases que alaban la sencillez y el sentido común. Una de ellas es la siguiente: “¿Amas a la vida? Pues no pierdas el tiempo, porque de eso esta hecha la vida”.



Las interacciones eléctricas, como se expuso en el capítulo 3, corresponden a una de las fuerzas fundamentales de la naturaleza. Ellas pueden determinar fuerzas de repulsión, cuando las cargas son de igual signo, o de atracción, cuando son de distintos signos. Como en toda interacción, aparecen fuerzas sobre los dos cuerpos cargados, que son iguales en intensidad y dirección, aunque de sentidos contrarios. Este enunciado se conoce como el **Primer Principio de la Electroestática**.

Comparada con la fuerza gravitatoria, la **fuerza eléctrica** es muy intensa y su acción resulta fundamental para explicar la constitución de las estructuras de los cuerpos de tamaño ordinario, así como la fuerza gravitatoria rige la estructura de los sistemas de orden superior al planetario. Un sistema planetario es una estructura ligada por gravedad, ya que las fuerzas que predominan en su constitución derivan de la interacción gravitatoria, la cual toma valores significativos por la presencia de grandes masas. En los sistemas de tamaño menor, como por ejemplo el de los distintos seres vivos, moléculas y átomos, las fuerzas que predominan para explicar las uniones entre las distintas partes tienen origen eléctrico.

Los materiales que forman los cuerpos están constituidos por **átomos**, nombre de origen griego que significa “indivisible” o “sin partes”, ya que originariamente se lo concebía como la partícula fundamental. A pesar de que se mantiene este nombre, se sabe ahora que el átomo está formado por muchas partículas. Las más importantes para este estudio son los **protones** y los **electrones**. Los primeros, forman en gran medida la masa del núcleo, tienen carga positiva y permanecen ligados en la estructura del núcleo por su interacción con los neutrones, sin carga. Los electrones, de carga negativa equivalente a la de los protones, y masa ínfima comparada con la de éstos, se encuentran rodeando al núcleo, que los atrae con fuerzas de origen eléctrico. Generalmente, el átomo tiene el mismo número de protones que de electrones y la carga positiva del núcleo está neutralizada por la presencia de carga negativa a su alrededor. De esta forma, los efectos eléctricos se ponen de manifiesto solo cuando se quiebra el mencionado equilibrio. O sea que, desde un punto de vista eléctrico, el estado básico de los materiales es neutro.

Las partículas de un material con defecto o exceso de electrones se denominan **iones**. Mediante variados procedimientos, es posible desequilibrar la carga eléctrica de los cuerpos, es decir la equivalencia entre el número de partículas con carga negativa y positiva. Ello supone la entrega de energía extra a los electrones menos ligados para liberarlos de la estructura. Por ejemplo, al ser frotados dos materiales, algunos electrones se desprenden de uno de ellos y se alojan en el otro, de modo que ambos quedan cargados en iguales cantidades, en forma positiva y negativa respectivamente. Esta concepción de la carga eléctrica permite comprender la validez del **Segundo Principio de la Electroestática**, que postula que la carga no puede ser creada ni destruida. Formalmente se enuncia que:

La carga total, es decir, la suma algebraica de la carga positiva y negativa de todo sistema eléctricamente aislado, se conserva.

Conductores y aislantes

Los materiales pueden ser clasificados en **conductores** o **aislantes**, según que conduzcan la electricidad con facilidad o no lo hagan. Esta clasificación depende de cuán firmemente estén unidos los electrones a sus estructuras, ya que esto es un indicio de la energía necesaria para otorgarles movilidad dentro del material, es decir para conducir la electricidad. Esta diferenciación es útil dentro de ciertos límites. Por ejemplo, el cuarzo fundido es 10^{25} (10 cuatrillones de veces) mejor aislante que el cobre, por lo que ambos suelen ser señalados como excelentes aislante y conductor, respectivamente.

Los metales y el agua sin destilar son considerados buenos conductores, en cambio los plásticos y el vidrio son buenos aislantes.

A esta clasificación se agregan en la actualidad los materiales llamados **semiconductores**, como el silicio y el germanio, los cuales son buenos aislantes cuando están en estado cristalino puro, pero conducen la electricidad cuando se sustituyen solo algunos átomos del cristal con otros, como arsénico o boro, mediante la técnica conocida como dopado del material. Los semiconductores tienen amplia aplicación tecnológica, por ejemplo en la fabricación de transistores.

Algunos materiales que se consideran buenos conductores aumentan su conductividad hasta prácticamente el infinito cuando se los enfría a temperaturas cercanas al cero absoluto (-273 K): son los llamados **superconductores**. En la actualidad, se han encontrado algunos materiales cerámicos superconductores a temperaturas de algo más de 100 K. Existen grandes expectativas respecto del diseño de materiales superconductores a temperaturas más altas ya que permitirían un ahorro importante de energía.

En los materiales conductores, la carga se distribuye en la superficie, lo que es fácilmente explicable si se tiene en cuenta la repulsión entre las cargas de igual signo y la relativa movilidad con que cuentan en los materiales de buena conductividad. La concentración de carga depende de la curvatura de la superficie, y se puede comprobar experimentalmente que la máxima concentración se da en los vértices o puntas.

El cuerpo humano puede ser considerado como un buen conductor. Cuando la humedad relativa es baja, puede acumular cargas bastante altas, ocasionadas por ejemplo, por la fricción del calzado con suelos aislantes. También puede observarse la fricción de las prendas de seda, lana o fibras sintéticas, que al ser retiradas provocan muchas veces pequeñas chispas eléctricas visibles y también audibles como un débil chisporroteo.

Estas consideraciones adquieren significativa importancia en cuanto a evitar accidentes para aquellas personas que trabajan con materiales altamente inflamables y también para las que manipulan con equipos electrónicos muy sensibles, ya que éstos podrían sufrir algún desperfecto por la acción de esa pequeña descarga.

Procedimientos de carga

La principal fuente de electricidad con que se contaba en el siglo XVIII eran las máquinas por fricción. Se usaban solo con fines experimentales y en salones de juego, donde sus efectos resultaban sorprendentes y divertidos. El primer generador electrostático fue diseñado por Otto von Guericke (1602-1686). Producía cargas por fricción entre una esfera de azufre montada sobre un eje, y la mano de quien la accionaba haciéndola girar mientras la presionaba. Este tipo de electricidad, obtenida por fricción, recibe también el nombre de **triboelectricidad**.

 El agua en estado químicamente puro es una sustancia aislante. Sin embargo, en la naturaleza se la encuentra en solución con otras sustancias que presentan en su estructuras con relativa libertad de movimiento. En tales condiciones, estas soluciones son muy buenas conductoras de la electricidad. Una estrategia usada para evitar los accidentes causados por la acumulación de electricidad estática consiste en aumentar la conductividad superficial por elevación de la humedad relativa. Muchas veces se instala con este propósito un sistema de humidificación, integrado al equipo de aire acondicionado. El aire húmedo conduce la electricidad e impide que las superficies se carguen.

El llamado **poder de las puntas** se aplica en el diseño conveniente de los pararrayos. La descarga eléctrica entre las nubes y la Tierra se hace hacia la punta metálica más cercana que

es el pararrayos, y con eso se evita su caída en otros lugares.



Vista de la cúpula de la confitería El Molino, en la ciudad de Buenos Aires.

Otros procedimientos para establecer un desequilibrio entre las cargas eléctricas de los materiales son los métodos de carga por contacto y carga por inducción. En el método de **carga por contacto**, el desbalance eléctrico se produce estableciendo el contacto entre un cuerpo cargado eléctricamente y otro neutro. La carga eléctrica buscará distribuirse en la superficie del cuerpo compuesto por los dos, de tal manera que, al separarlos, ambos tendrán carga de igual signo. El total corresponderá a la que tenía el cuerpo inicialmente cargado, de acuerdo con el principio de conservación de la carga.

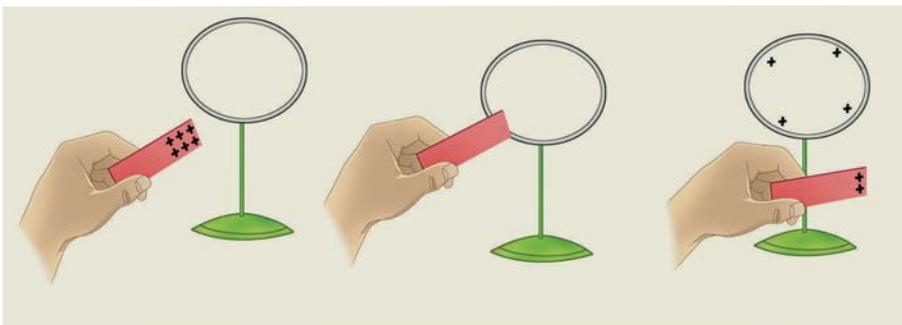
Experimentalmente puede comprobarse que, si un cuerpo tiene puntas, allí se registran los máximos efectos eléctricos. Esto se explica porque en esas zonas existe una gran concentración de cargas a una distancia mínima, lo que implica mayor fuerza de repulsión entre ellas, por lo que es fácil observar una chispa de descarga. Este hecho se conoce como **poder de puntas**.

En el procedimiento de **carga por inducción**, el desequilibrio en la distribución de la carga presente en un cuerpo es provocado por la aproximación de otro cuerpo cargado, llamado inductor. Este efecto se conoce como **polarización**. Muchas veces el desbalance desaparece cuando se aleja el inductor.

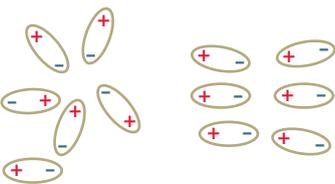
Aquellos materiales cuyas cargas están poco ligadas, como los metales que tienen gran cantidad de electrones libres, se pueden polarizar muy fácilmente. Si el signo de la carga del inductor es positivo, entonces los electrones menos ligados a la estructura del material neutro

responderán a la atracción electrostática. Se ubicarán en la zona más próxima posible al inductor, y dejarán menos pobladas electrónicamente las zonas alejadas de él.

Mediante un conductor, se puede descargar, normalmente a tierra, la carga de signo contrario al que se desea conservar. El procedimiento de descarga por



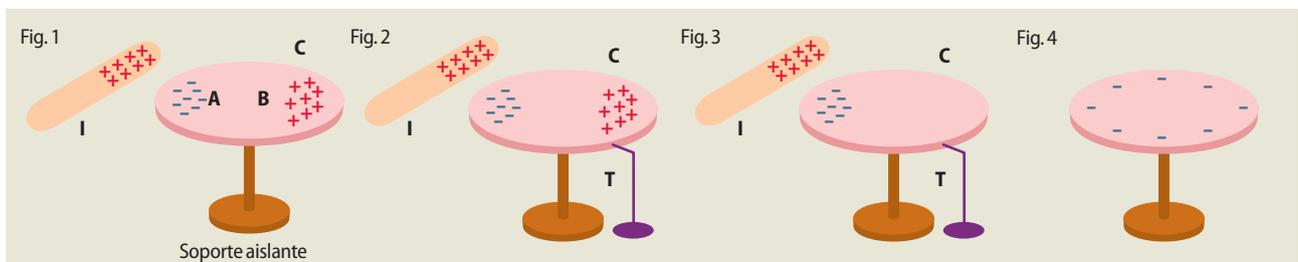
Carga por contacto.



Polarización de materiales aislantes.

contacto a tierra se basa en el hecho, anteriormente explicado, de la carga por contacto: en este caso uno de los conductores es enorme (el planeta Tierra), por lo que la carga que se ubica en la superficie de los cuerpos vinculados está casi en su totalidad en la Tierra y solo en una proporción mínima en el cuerpo, que, por este motivo, se puede considerar descargado.

Es posible polarizar también a los materiales aislantes, ya que aunque en ellos las cargas se encuentren muy vinculadas en la estructura, pueden cambiar algo su orientación en el material, de lo que resulta un ordenamiento que se manifiesta como una polarización eléctrica.



Si se acerca un inductor I, con carga positiva, a un conductor C en estado neutro, aparecen las cargas inducidas A y B.

Manteniendo el inductor I fijo, se efectúa una conexión T a tierra. (Esto se puede hacer tocando C.)

Hay, así, un flujo de electrones libres hacia C que anula la carga positiva inducida y produce un exceso de carga negativa.

Al eliminar la conexión a tierra y retirar el inductor, el exceso de electrones se redistribuye por el cuerpo.

Electroscopio

Nota importante: Ninguna de las experiencias sugeridas en esta unidad está preparada para ser realizada utilizando la energía eléctrica de la red domiciliaria. No intenten adaptar los diseños a partir de su uso ya que puede ser muy peligroso.

El objetivo de esta experiencia es la construcción de un electroscopio. Este instrumento permite, entre otras funciones, determinar la presencia y el signo de la carga en exceso de un cuerpo.

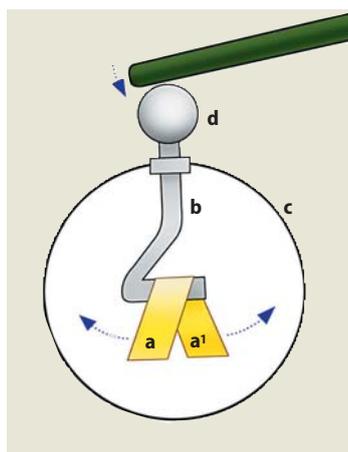
Su funcionamiento se basa en la repulsión electrostática entre dos hojas metálicas muy delgadas, frecuentemente de aluminio, que en estado descargado están suspendidas a la par, y al separarse evidencian la presencia de carga. Como son muy livianas, deben estar protegidas de eventuales corrientes de aire, por lo que en algunos diseños se encuentran dentro de un recipiente de vidrio. La carga llega hasta las hojas por un conductor metálico llamado vástago.

Materiales

Hojas de papel de aluminio, como el que se usa, por ejemplo, para cocinar. Varilla o alambre de metal. Frasco de vidrio (no es imprescindible). En realidad, los materiales pueden ser muy variados. La única recomendación es fabricar las hojas con papel metálico liviano. El resto admite muchas variaciones, aunque tendrán que tener mucho cuidado para elegir buenos conductores y buenos aislantes según la función que deban cumplir en el experimento diseñado.

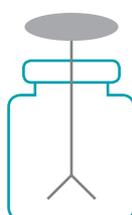
Construcción

Se recomienda definir por consenso el diseño y los materiales a utilizar. Pueden comenzar por analizar los diferentes modelos de los esquemas y discutir la función que creen que



El electroscopio se emplea para detectar la presencia de cargas eléctricas y para determinar su signo. El dibujo esquemático muestra las partes básicas del dispositivo: (a) y (a') son láminas metálicas delgadas colgadas de un soporte metálico (b) llamado vástago; (c) es un recipiente de vidrio, y (d) es una bola que recoge las cargas eléctricas. Las cargas (positivas o negativas) se conducen hasta las láminas a través del soporte metálico. Como las cargas iguales se repelen, las láminas se separan.

tiene cada uno de los elementos del diseño, para adaptarlos a su propio proyecto. Básicamente hay que unir las dos hojas de papel de aluminio a uno de los extremos de la varilla o alambre, de tal modo que queden cercanas entre sí y que se puedan separar. En el otro extremo de la varilla se puede colocar un conductor de mayor tamaño, como una chapa o un bollo del mismo papel de aluminio. Todo este sistema se sostiene de un soporte o se coloca en el interior del frasco como se indica en el siguiente esquema.



Funcionamiento

Para comprobar el funcionamiento del electroscopio se debe comenzar por cargar un objeto por frotamiento; por ejemplo, una lapicera de plástico

frotada vigorosamente con un paño de lana. También pueden utilizar una barra de vidrio frotada con lana, la cual tiene la ventaja adicional de poder asegurar su carga positiva.

El electroscopio se puede cargar por **a.** contacto: tocando con el objeto el vástago conductor del que están suspendidas las hojuelas; **b.** inducción: simplemente acercando el cuerpo cargado al vástago, sin tocarlo.

Luego del experimento, realicen las siguientes actividades.

1. Elaboren por escrito una explicación del funcionamiento de este instrumento para cada uno de los procedimientos de carga.
2. Expliquen cómo se podría saber cuál es el signo de la carga de un cuerpo, usando un electroscopio.

Nota: Es posible que las experiencias de electrostática sean difíciles de observar en días de alta humedad debido a que el aire, normalmente aislante, se vuelve conductor en esas condiciones.

Las **jaulas de Faraday** tienen una importante aplicación en la protección de equipos electrónicos, sobre todo aquellos que son muy sensibles o están demasiado expuestos a perturbaciones electromagnéticas que alterarían su funcionamiento. Por ejemplo, es posible observar a través de las puertas transparentes de los hornos de microondas una de las caras de la jaula de Faraday que blindada este equipo y confina las radiaciones en su interior.



El blindaje electromagnético o jaula de Faraday es un requisito básico para el funcionamiento del equipo de resonancia magnética.

Escudo electrostático: jaula de Faraday

En un conductor la carga en exceso se ubica en la parte más externa, como ya se explicó, debido a la repulsión electrostática entre las partículas elementales de carga. De esta manera, la carga en su interior es nula. Este fenómeno ya se conocía mucho tiempo antes del descubrimiento de la estructura del átomo.

En 1755, Benjamín Franklin quedó sorprendido por el resultado de un experimento que realizó. Electrizó un recipiente de plata y lo colocó sobre un soporte aislante. Luego hizo penetrar en su interior una bolita de corcho suspendida de un hilo de seda hasta tocar el fondo. Lo llamativo fue que no pudo reconocer en la bolita ningún efecto eléctrico. No se cargó por inducción, ni por contacto al tocar el interior, como si lo hubiera hecho con la superficie exterior.

El químico británico Joseph Priesley, amigo de Franklin, al analizar el mismo fenómeno, supuso que el resultado podría entenderse como una semejanza entre las fuerzas eléctricas y las gravitatorias, descritas por la Ley de Gravitación de Newton (ver capítulo 4):

¿No podemos acaso inferir de esto que la atracción de la electricidad está sometida a las mismas leyes que la de la gravitación y se ajusta por consiguiente a los cuadrados de las distancias; ya que fácilmente se demuestra que si la Tierra tuviera forma de cascarón, un cuerpo en su interior no sería atraído hacia un lado más que hacia el otro?

Un poco después, Michal Faraday (1791-1867) realizó un experimento muy impactante: construyó una caja metálica cerrada apoyada sobre unos soportes aislantes, la cargó con un poderoso generador electrostático, y se metió adentro para probar el efecto que le causaba. Según sus palabras:

No pude encontrar la más mínima influencia (...) a pesar de que estaban saliendo chispas y descargas dispersas en todos los puntos de su superficie exterior.

Actualmente, se llama **jaula de Faraday** a toda superficie conductora cerrada que rodea un espacio impidiendo efectos eléctricos en él, por lo que actúa en la práctica como un blindaje eléctrico. Es muy usada para proteger equipos electrónicos de perturbaciones indeseadas. En realidad, no es necesario que la superficie conductora sea de paredes cerradas; puede formar un enrejado cuya separación se calcula cuidadosamente.



Jaula de Faraday

Para probar el mismo fenómeno, puede realizarse un experimento mucho menos peligroso y más accesible, que sin duda hubiera deslumbrado al mismo Faraday. Normalmente no se está interesado en aislar la antena de una radio de las influencias eléctricas del entorno, sino todo lo contrario: es así como se

recibe la señal y es posible disfrutar, por ejemplo, de una bella canción que está siendo transmitida.

Materiales

Una radio con antena. Papel de aluminio.

Procedimiento

1. Prendan la radio y verifiquen que se escuche correctamente.

2. Apáguenla y envuelvan la antena con el papel metálico.

3. Préndanla nuevamente y verifiquen qué sucede.

Luego de realizar el experimento contesten.

a. ¿Qué pasó cuando se colocó el papel?

b. Describan físicamente la situación.

Aplicación del electroscopio

Cuando un cuerpo cargado entra en contacto con otro, le transfiere su carga, aunque normalmente no toda. Con un electroscopio se puede comprobar que la forma de descargar por completo un cuerpo es establecer contacto con la parte interior de un conductor. Al tocar la parte interior de un conductor con un cuerpo cargado, las cargas que le transmite se ubican en la parte exterior del conductor hasta que el primer cuerpo queda descargado.

Materiales

Electroscopio. Una lata de conservas vacía a la que se le quitará una de sus tapas. Un cuerpo que se pueda electrizar por frotamiento, como una lapicera de plástico o una varilla de vidrio.

Procedimiento

1. Toquen el exterior de la lata con un objeto cargado, por ejemplo una lapicera de plástico frotada. Se puede comprobar con el electroscopio que ambos cuerpos tienen carga.

2. Descarguen el cilindro metálico, por ejemplo tocándolo.

3. Comprueben con el electroscopio su descarga y la presencia de carga en la varilla.

4. Agreguen algo de carga en la varilla para mejorar la observación. Vuelvan a comprobar su estado con el electroscopio.

5. Establezcan ahora contacto entre la varilla y el interior de la lata. Comprueben la presencia de carga en la lata y la descarga completa de la varilla.

Generación y almacenamiento de carga

La **botella de Leyden** es un aparato diseñado para almacenar electricidad estática inventado en 1746 por Pieter van Musschenbroek en la ciudad de Leyden, Holanda, y, casi simultáneamente, por el alemán Ewald Georg von Kleist. El modelo original sufrió sucesivas transformaciones hasta adquirir un diseño más o menos estandarizado que hoy en día recibe el nombre de condensador o **capacitor**. El propósito de esta actividad es construir un capacitor con materiales caseros.

Materiales

Un frasquito de rollo fotográfico. Papel de aluminio. Un tornillo con una tuerca o un clip para sujetar. Un trozo de alambre. Un trozo de cable de varias puntas. Caño de policloruro de vinilo (PVC).

Procedimiento

1. Tomen el frasquito y fórrerlo con papel de aluminio por dentro y por fuera.

2. Rodeen el frasco con un alambre para sujetar la cara externa y para descargarla a tierra; como se muestra en la figura.



3. Perforen la tapa del frasquito con el tornillo y fijen su posición con la tuerca o el clip.

4. Coloquen otro trozo de alambre entre el tornillo y la capa interior del aluminio para asegurar el contacto entre ellos.

5. Coloquen el cable en el tornillo y separen sus puntas a modo de peine de recolección.

6. Generen las cargas mediante la fricción del caño de PVC con un paño, y luego pónganlo en contacto con el peine de recolección, tantas veces como deseen. La cara externa del capacitor debe estar en contacto con la tierra.

Nota: cuando se establece el contacto eléctrico entre las caras, el capacitor se descarga, por lo que deben tener cuidado de no tocar a la vez el alambre externo y el tornillo. Cuando deseen descargar el capacitor, por ejemplo para verificar si hay carga, acerquen al tornillo el alambre que está en contacto con la cara externa. Si la carga es suficiente, es posible observar una chispa entre ambos. Recuerden no tocar las partes metálicas sin estar debidamente aislados.

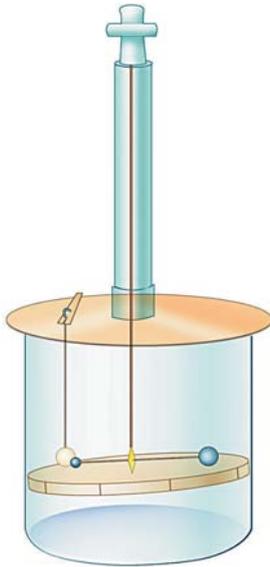
7. Una vez finalizada la experiencia, realicen un informe en el cual se incluya la explicación del funcionamiento del capacitor, utilizando los conceptos de electricidad ya estudiados.



Cálculo de la fuerza eléctrica: Ley de Coulomb

Cuando Charles Augustin de Coulomb (1736-1806) logró llegar empíricamente a la ley que permite calcular la intensidad de la interacción eléctrica, ya Priesley había especulado con que, a semejanza de la ley de gravedad, también la fuerza eléctrica debía depender de la inversa del cuadrado de la distancia. En 1785, Coulomb decidió aplicar los conceptos de la mecánica newtoniana bajo las siguientes suposiciones.

- Dos pequeñas esferitas frotadas juntas tendrían la misma carga si se las separara; a esta cantidad se la puede llamar q . A partir de ella es posible definir una carga unitaria, la suma, la resta de cargas y cualquier valor de carga de un cuerpo.
- Si estas esferitas son suficientemente pequeñas, pueden ser consideradas cargas puntuales.
- Estas pequeñas porciones de materia electrizada interactúan a distancia.



Esquema de la balanza de torsión de Coulomb

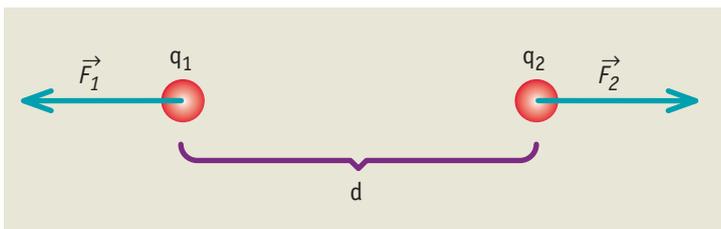
A partir de este modelo, realizó numerosas mediciones de las fuerzas eléctricas usando un aparato de su invención: la **balanza de torsión**. Ella consta de una delgada varilla sostenida por un hilo en forma horizontal. En cada extremo de la varilla se ubican unas pequeñas esferitas, ambas cargadas. Una tercera esfera cargada está ubicada en el extremo de un soporte móvil, el cual puede alejarse o acercarse a las esferitas suspendidas. La medida de la fuerza de atracción o repulsión electrostática está asociada a la torsión de las fibras del hilo.

Sus resultados le permitieron inferir que la intensidad F de la fuerza entre dos cargas, q_1 y q_2 , es directamente proporcional al producto de los valores absolutos de esas cargas, e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia d que las separa.

En símbolos:

$$F_e = K \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{d^2}$$

donde F_e es la fuerza de interacción entre dos cargas q_1 y q_2 , y d es la distancia que las separa.



Representación gráfica de la Ley de Coulomb para dos cargas del mismo signo.

La constante electrostática K toma valores según el sistema de unidades y del medio en el que interactúan las cargas. En el Sistema Internacional, la unidad de carga se llama **coulomb** (C), y para el caso del vacío, la constante vale:

$$K = 9 \cdot 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2}$$

se trata de un valor aproximado que también puede tomarse para el aire.

El coulomb (C) se define a partir del **ampere**, unidad de intensidad de corriente eléctrica que se explicará más adelante, en este mismo capítulo.

El coulomb es una unidad muy grande para los valores habituales de carga. Un cuerpo tendría una carga de un coulomb si tuviese en defecto o en exceso $6,25 \cdot 10^{18}$ electrones, ya que la carga de cada electrón es de $1,6 \cdot 10^{-19}$ C.

Aplicaciones de la Ley de Coulomb

1. ¿Cuánto vale la atracción electrostática entre el protón y el electrón de un átomo de hidrógeno, si puede suponerse una distancia típica entre ambos de alrededor de $5,3 \cdot 10^{-11} \text{ m}$?

Como ambas cargas son de igual valor y pueden aproximarse en el valor $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ y $K = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}$, entonces si se reemplaza en $F_e = K \frac{q_1 \cdot q_2}{d^2}$, se obtiene:

$$F_e = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} \cdot \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}}{(5,3 \cdot 10^{-11} \text{ m})^2} = 8,2 \cdot 10^{-8} \text{ N}$$

2. Una moneda de 3 g cargada eléctricamente logra sostenerse en el aire a 1 cm de altura, repelida por otra moneda que tiene una carga idéntica a ella y reposa sobre una mesa. ¿Cuánto vale su carga?

El peso de la moneda es:

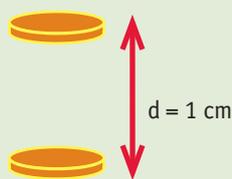
$$P = m \cdot g = 0,003 \text{ kg} \cdot 9,8 \text{ m/s}^2 \approx 0,03 \text{ N}$$

$$\text{Entonces: } 0,03 \text{ N} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} \cdot \frac{q^2}{(0,01 \text{ m})^2}$$

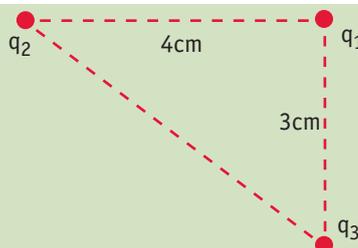
$$\text{Luego: } q^2 = \frac{0,03 \text{ N} \cdot 0,0001 \text{ m}^2 \cdot \text{C}^2}{9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2} \Rightarrow$$

$$q = 1,8 \cdot 10^{-8} \text{ C}$$

$$m_1 = m_2 = 3 \text{ g}$$



3. Tres cargas idénticas cuyo valor es $2 \cdot 10^{-6} \text{ C}$ se encuentran ubicadas en los extremos de un triángulo rectángulo cuyos catetos miden 3 cm y 4 cm, como muestra la figura. ¿Cuánto vale la fuerza electrostática neta sobre q_1 ?



Cuando hay más de dos cargas interactuando, se aplica a cada pareja la Ley de Coulomb y luego se suman vectorialmente las fuerzas para obtener la fuerza eléctrica resultante. La validez de este resultado se conoce como **principio de superposición**. En este caso:

$$F_{q_1; q_2} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} \cdot \frac{(2 \cdot 10^{-6} \text{ C})^2}{(0,03 \text{ m})^2} \Rightarrow F_{q_1; q_2} = 40 \text{ N}$$

$$F_{q_1; q_3} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} \cdot \frac{(2 \cdot 10^{-6} \text{ C})^2}{(0,04 \text{ m})^2} \Rightarrow F_{q_1; q_3} = 22,5 \text{ N}$$

La dirección de las fuerzas de interacción entre las cargas q_1 y q_2 es la de la línea que las une y su sentido es el que corresponde a una repulsión, según se muestra en el dibujo. Lo mismo ocurre entre las cargas q_1 y q_3 . Como ambas fuerzas son perpendiculares entre sí, su módulo se puede calcular mediante el teorema de Pitágoras. Por lo tanto:

$$F = \sqrt{(40 \text{ N})^2 + (22,5 \text{ N})^2} = 45,89 \text{ N}$$



1. Si dos cargas eléctricas ubicadas a cierta distancia experimentan una fuerza de atracción, ¿cómo cambiará la magnitud de la fuerza si se disminuye a la mitad la separación entre ambas?

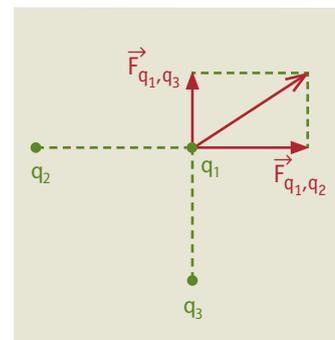
2. Dos pequeños cuerpos cargados con cargas positivas $q_1 = 3 \cdot 10^{-5} \text{ C}$ y $q_2 = 4 \cdot 10^{-5} \text{ C}$ se encuentran separados 10 cm. Calculen la intensidad de la fuerza que actúa sobre cada uno de ellos y realicen un esquema de la situación en el que dibujen ambas fuerzas.

3. Dos cargas puntuales positivas $q_1 = 2 \cdot 10^{-6} \text{ C}$ y $q_2 = 6 \cdot 10^{-6} \text{ C}$ se encuentran separadas 10 cm. En un punto situado sobre el segmento determinado por ellas y a 4 cm de q_1 se coloca una carga $q_3 = 3 \cdot 10^{-6} \text{ C}$. Calculen la fuerza que actúa sobre esta última carga en las siguientes situaciones:

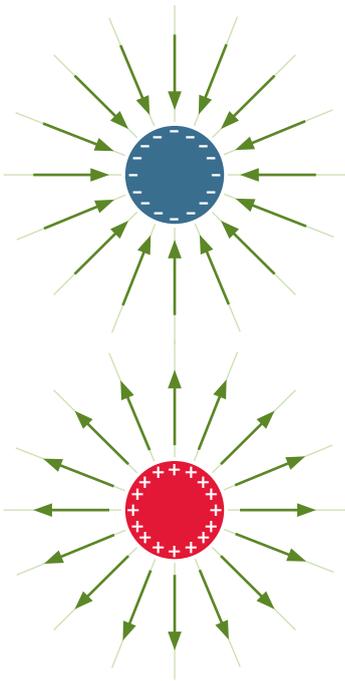
a. q_3 es positiva,

b. q_3 es negativa.

4. Dos cargas puntuales negativas $q_1 = 5 \cdot 10^{-6} \text{ C}$ y $q_2 = 8 \cdot 10^{-6} \text{ C}$ se encuentran en los extremos de un segmento de 20 cm de largo. ¿En que posición habrá que colocar otra carga puntual para que la fuerza total debido a q_1 y q_2 sea cero?



Campo eléctrico



El campo eléctrico creado por cargas puntuales queda representado por líneas radiales. Estas son salientes en las cargas positivas y entrantes en las negativas.

● Visualizar el campo eléctrico requiere algún cuidado, aunque es posible hacerlo con algunas experiencias sencillas. La más simple de todas es observar la orientación del vello que recubre el antebrazo cuando, por ejemplo, le acercamos una regla de plástico frotada. También es posible obtener una representación en el plano de las líneas de campo eléctrico de la siguiente manera: colocar una mezcla de aceite para el cuerpo y trocitos muy pequeños de cabello humano, de no más de 2 mm de largo, sobre un vidrio plano, como el de un portaobjetos de microscopio. Si le acercamos un objeto cargado, observaremos que la orientación de los trocitos de cabello seguirá las líneas del campo eléctrico.

Una de las suposiciones en las que se basaba Coulomb para la formulación de su ley, era que las cargas eléctricas interactuaban a distancia, al igual que las masas frente a las fuerzas gravitatorias. Es decir, que una masa o una carga podrían inexplicablemente, sin ningún mediador, advertir la presencia de otra en sus entornos. Esta idea incomodaba a los físicos, aun al propio Newton. Faraday propuso una interpretación alternativa, de mucha utilidad, basada en la idea de campo: el espacio que rodea a una carga eléctrica se ve afectado por su presencia, ya que ella modifica sus características.

En su intento por representarlo, Faraday lo describía como unos tentáculos invisibles que avanzan desde la carga. De esta manera, a partir del momento en que un cuerpo adquiere carga, esta información o novedad va extendiéndose en su entorno rápidamente, de hecho a la velocidad de la luz, y puede alcanzar eventualmente a otra carga.

Así como es válido hablar de la interacción entre una carga y otra, es posible también describir el mismo hecho a partir de la interacción de una carga con el campo en el que se encuentra.

Al **campo eléctrico** se lo puede representar con unas líneas que, por convención, salen de las cargas positivas y entran a las negativas. Ellas indican la dirección del campo en cada ubicación, es decir la dirección de la fuerza eléctrica que experimentaría una carga puntual y positiva, llamada carga de prueba, si se ubicara en cada posición del campo. El número de líneas es proporcional a la intensidad del campo, es decir que donde las líneas están muy cercanas, el campo es grande y donde están separadas, el campo es pequeño.

A pesar de las muchas similitudes entre las acciones eléctricas y gravitatorias, cabe aclarar una diferencia: el campo gravitatorio es siempre entrante a su fuente (una masa) mientras que el campo eléctrico puede ser entrante o saliente respecto de la carga que lo genera, ya que existen dos clases diferentes de carga.

Una forma más precisa de representar el campo eléctrico es mediante un vector de igual nombre que se representa \vec{E} . Su dirección y sentido son los de la fuerza que actúa sobre la carga de prueba positiva, en cada punto. Este vector resulta tangente a las líneas de campo en cada punto.

La **intensidad del vector campo eléctrico** se determina mediante el cociente entre la intensidad de la fuerza que actúa sobre una carga de prueba colocada en un punto, y el valor de dicha carga, es decir que resulta numéricamente igual a la fuerza eléctrica, por unidad de carga:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

y su unidad en el SI es $[\frac{N}{C}]$.

La fuerza que experimenta una carga en el campo puede expresarse como:

$$\vec{F}_e = q \cdot \vec{E}$$

para interacciones eléctricas, análoga de $\vec{P} = m \cdot \vec{g}$ para el caso gravitatorio.

Es decir que si en un punto cuyo campo eléctrico tenga un valor de 1000 N/C se coloca una carga de $10^{-5} C$, recibe una fuerza cuya intensidad es: $F = 10^{-5} C \cdot 1000 N/C = 0,01 N$.

Esta fuerza tendrá la dirección del campo. Si la carga es positiva, los sentidos de ambos vectores \vec{F} y \vec{E} coinciden. Por el contrario, si la carga es negativa, son opuestos.

Potencial eléctrico

El campo eléctrico se puede describir también mediante una cantidad escalar llamada **potencial eléctrico**.

Ya se explicó en el capítulo 6 que la fuerza eléctrica, al igual que la gravitatoria, es una fuerza conservativa, por lo que una carga almacena energía potencial eléctrica cuando se trabaja en contra de las fuerzas del campo.

Así como al subir un cuerpo en el campo gravitatorio, éste aumenta su energía potencial debido al trabajo que se ejerce sobre él, cuando se desplaza una carga positiva en sentido opuesto al campo, porque algún agente externo la empuja, realiza un trabajo y la carga adquiere una cantidad igual de energía potencial, en este caso eléctrica. Es decir que si por ejemplo, para llevar una carga desde un punto A de un campo eléctrico hasta otro punto B, algún agente externo le tiene que entregar 10 joules, el cuerpo cargado tiene en el punto B, 10 joules más de energía potencial eléctrica que la que tenía en el punto A. Como el campo eléctrico es conservativo, esta cantidad es independiente del camino seguido para ir desde A hasta B.

Por lo tanto, en función de su posición en el campo eléctrico, se puede asociar a una carga eléctrica una cierta cantidad de energía potencial eléctrica, de la misma manera que a una masa ubicada a una cierta altura en un campo gravitatorio se le asigna una energía potencial de tipo gravitatorio.

Es posible caracterizar a cada punto del campo eléctrico mediante un valor numérico que esté relacionado con las variaciones de energía que experimenta una carga al pasar de un punto a otro. Para ello, se define la diferencia de potencial entre dos puntos del campo eléctrico como el cociente entre la variación de energía potencial experimentada por una carga positiva al pasar de un punto a otro y el valor de dicha carga.

$$\Delta V = \frac{\Delta U}{q}$$

donde ΔV es la diferencia de potencial entre dos puntos, ΔU la variación de energía potencial eléctrica experimentada por una carga que pasa de un punto al otro, y q el valor de la carga.

En la expresión anterior las unidades son J/C o sea joule/coulomb, que se denomina **volt (V)**.

Por ejemplo, si una carga positiva de $3 \cdot 10^{-5}$ C al pasar de un punto A a otro B incrementa su energía potencial eléctrica en 0,015 J, la diferencia de potencial será:

$$V_B - V_A = \frac{0,015 \text{ J}}{3 \cdot 10^{-5} \text{ C}} = 500 \text{ volt}$$

Esta diferencia de potencial es característica de ambos puntos, es decir, que es independiente de las cargas que eventualmente se desplacen entre ellos.

Los 500 V significan 500 J/C es decir que cualquier carga positiva tendrá en el punto B, 500 J más de energía potencial eléctrica que en el A por cada coulomb de carga. Si la carga es negativa, habrá una disminución de la energía potencial eléctrica del mismo valor cuando pasa de A a B.

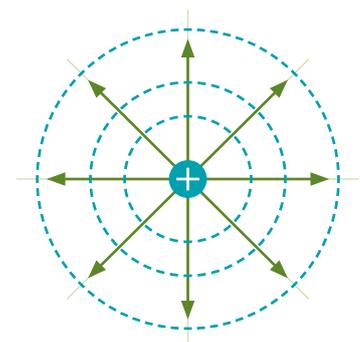
Por la forma en que fue definida solo se puede calcular la diferencia de potencial entre dos puntos. En electrostática se ha adoptado como referencia a un punto muy lejano, en el infinito, al que se le asigna arbitrariamente el valor cero. O sea, cuando se dice que el potencial de un punto es 100 V, significa que la diferencia de potencial entre ese punto y uno infinitamente alejado vale 100 V.

● Líneas y superficies equipotenciales

Así como se puede caracterizar al campo eléctrico por líneas de campo, resulta posible describirlo mediante líneas o superficies equipotenciales que están formadas por conjuntos de puntos de igual potencial.

Por ejemplo, alrededor de una carga puntual se generan superficies equipotenciales que son esferas concéntricas.

Si en lugar de una sola carga puntual se tienen otras distribuciones de carga, las superficies equipotenciales adoptarán diferentes formas. Cuando una carga eléctrica se desplaza dentro de una misma superficie equipotencial, su energía no varía, es decir el trabajo de la fuerza eléctrica resulta nulo.



En la figura, se representan las líneas de fuerza de una carga puntual, que son líneas rectas que pasan por la carga. Las equipotenciales son superficies esféricas concéntricas.

Pilas y contaminación

Las pilas de zinc-carbón, también llamadas pilas comunes, presentan dióxido de manganeso y cloruro de amoníaco en su composición, con menos de 0,01 % de mercurio, por lo que son poco contaminantes. Las alcalinas utilizan dióxido de manganeso, hidróxido de potasio y pasta de zinc amalgamada con mercurio en una proporción del 1%. Las pilas más contaminantes son las de botón o micropilas, que se construyen de acero, óxido de mercurio, grafito, hidróxido de potasio y pasta de zinc disueltos en mercurio, el cual alcanza una proporción superior al 25 %. En este caso, una sola pila puede contaminar algo más de 500 000 litros de agua.

Las pilas de níquel-cadmio son diseños recargables. Están constituidas por estos metales separados por polipropileno. No contienen mercurio, sin embargo el cadmio también resulta muy nocivo para la salud y es considerado un contaminante del ambiente.



Distintos tipos de pilas.

Pilas

Hacia fines del siglo XVIII, uno de los temas preferidos por los científicos era la posible conexión entre la electricidad y los impulsos nerviosos, dentro de lo que se llamaba electricidad animal. Desde mucho tiempo atrás ya se había especulado sobre los posibles efectos terapéuticos de las descargas eléctricas, asociando las convulsiones que podía experimentar el cuerpo humano con el abandono de sus supuestas almas primitivas e inconvenientes. Así, muchos pacientes eran tratados con terapias de este tipo, muy criticadas por aquellos que pensaban que no tenían otro efecto que hacer sufrir más aún a los enfermos.

Dos importantes científicos italianos, Luigi Galvani (1737-1798), doctor en Medicina y profesor de Anatomía de la Universidad de Bologna, y Alessandro Volta (1745-1827), físico de la ciudad de Como, sostuvieron una larga discusión acerca de la interpretación de ciertos fenómenos presentes en las investigaciones sobre la electricidad animal.

Es muy conocido el experimento de Galvani en el cual se lograba la contracción de algún músculo de la pata de una rana, mediante el contacto en dos puntos del tejido con metales diferentes. Galvani atribuía el origen de esa contracción a la presencia de una electricidad proveniente del tejido muscular del animal. Volta, por su parte, creía que la clave estaba en las dos clases diferentes de metal y que el músculo era un mero conductor. Su evidente contracción a lo sumo permitía catalogarlo como sensor o electroscopio muy sensible. Supuso, además, que cada metal posee una cantidad de electricidad que le es propia y que si ambos se ponen en contacto con un material humedecido, la corriente logra fluir desde uno hacia el otro. Ese fluir de electricidad era lo que estimulaba la contracción del músculo.

En el año 1800, tras experimentar con distintos metales, Volta descubrió que el efecto más satisfactorio lo obtenía con cobre y zinc, con los que fabricó 30 discos que apiló en forma alternada, separándolos con paños embebidos en ácido. El aparato, que pronto se hizo conocido como la **pila de Volta**, fue el primer dispositivo electroquímico que pudo ser usado como fuente de electricidad, mucho más simple y más útil que los métodos por frotamiento, por cuanto era capaz de entregar la energía en forma continua y estable.

En la actualidad existen distintos tipos de pilas, aunque todas ellas suponen un sistema que permite la obtención de energía eléctrica a partir de una reacción química.

En las sociedades desarrolladas, las pilas constituyen un elemento de extensa aplicación sobre todo por la ventaja de su autonomía respecto de la red eléctrica. Sin embargo, así como sucede con otras formas de generar energía, algunos diseños son muy cuestionados a causa de los efectos contaminantes provocados por su contenido de metales perjudiciales para la salud, como son el mercurio y el cadmio.



La pila de Volta.

5. Lean el siguiente texto y elaboren una explicación a partir de los fundamentos teóricos antes analizados. El **electróforo de Volta** es un aparato diseñado para obtener cantidades de carga eléctrica relativamente grandes. Su funcionamiento se basa en la inducción eléctrica. Consta de dos discos metálicos separables, uno de los cuales está cubierto en una de sus caras por resina aislante y el otro está en contacto eléctrico con la tierra.

El disco metálico móvil tiene una manija aislante que permite acercarlo al otro disco y, además, transportarlo.

Funcionamiento

Se frota la resina con un paño y se acerca a ella el disco móvil. Luego se toca la cara del disco que se opone a la resina. Se transporta la carga eléctrica obtenida en el disco móvil hasta donde se desee utilizarla o almacenarla.

Corriente eléctrica

El movimiento intelectual y cultural del siglo XVIII conocido como Ilustración, esperaba de la ciencia en general y de la electricidad en particular las múltiples aplicaciones prácticas que llegarían más adelante.

A partir del invento de Volta, que fue mejorándose en forma constante, la investigación de los fenómenos eléctricos avanzó velozmente.

El misterioso fluido eléctrico de otros tiempos ha revelado hoy casi todos sus secretos. Se sabe que la carga eléctrica se encuentra en la naturaleza más o menos ligada en la estructura de los materiales, es decir con mayor o menor capacidad de desplazarse en respuesta a su interacción con los campos eléctricos. La carga negativa residente en los electrones es la que, con más frecuencia, se encuentra libre, por ejemplo en los metales. En ellos, algunos electrones tienen un grado de libertad semejante al de las moléculas en el estado gaseoso. Su movimiento es errático y, como en el gas, no puede reconocerse un sentido neto de circulación. Cuando se instala un campo dentro de un conductor metálico, las partículas tienden a seguir preferentemente la señal del campo y puede entonces establecerse un sentido de circulación en sus movimientos, que se llama **corriente eléctrica**. Como la mayoría de los conductores de los circuitos eléctricos son metálicos, es necesario considerar que en ellos el sentido real o físico de circulación es el de los electrones en contra del campo eléctrico.

En los electrolitos o en los conductores gaseosos, los portadores de carga también pueden ser positivos, por lo que su desplazamiento es contrario al anterior.

Por simplicidad, se establece un sentido convencional de circulación de la corriente y es el de los portadores de carga positivos, o sea, a favor del campo eléctrico.

Se define como **intensidad** de la corriente eléctrica al cociente entre la carga neta Δq que atraviesa una determinada sección del conductor por unidad de tiempo Δt .

En símbolos:

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

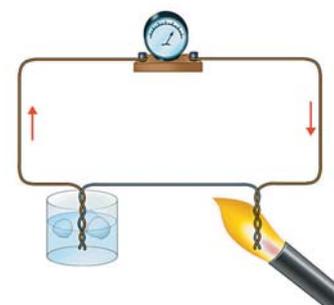
La unidad de intensidad de corriente es el **ampere** (A) que corresponde a una corriente constante por la cual una carga de un coulomb atraviesa cualquier sección normal del conductor por cada segundo. Su nombre fue elegido en homenaje a los aportes del francés André Marie Ampère (1775-1836), quien a comienzos del siglo XIX estableció los principios de la electrodinámica, relacionando los conceptos de corriente eléctrica y potencial eléctrico, y además realizó otros aportes importantes en la teoría de la electricidad y el magnetismo.

Diferencia de potencial y corriente eléctrica

Una de las ventajas de la pila es la permanencia en el desnivel eléctrico que se establece entre sus terminales. Es útil considerar la diferencia de potencial como un desnivel eléctrico similar a un desnivel gravitatorio que permite, por ejemplo, el flujo de una corriente de agua a través de una cañería inclinada. Esta idea es la que, como modelo, permitió el desarrollo de la teoría de circuitos.

Termoelectricidad

Es posible generar electricidad a partir de dos electrodos metálicos que están a diferentes temperaturas. Este efecto recibe el nombre de efecto Seebeck, por el físico alemán Thomas Seebeck que lo descubrió en 1821. El efecto contrario, es decir, la aparición de una diferencia de temperatura en la unión de dos metales distintos cuando son recorridos por una corriente, fue descubierto en 1834 por Peltier. Por ejemplo, si se tiene una barra de cobre soldada con otra de antimonio (par bimetálico), cuando circula corriente se verifica un cambio de temperatura que corresponde a un aumento o una disminución en la corriente según el sentido de circulación.



Al colocar las dos uniones de cobre y hierro a diferentes temperaturas, una en agua y la otra a la llama, se genera una corriente eléctrica que es detectada por el instrumento.

La **resistividad** de los materiales, y también su inversa, llamada **conductividad**, se relaciona con el llamado tiempo de redistribución de la carga libre. El valor de la resistividad es muy pequeño para los buenos conductores y bastante alto para los buenos aislantes. Por ejemplo, si se toca una esfera de cobre con una barra de vidrio cargada, éste se llevará las cargas del vidrio muy rápidamente, ya que el valor del tiempo de redistribución de la carga libre para el cobre es de aproximadamente 10^{-19} segundos. En algunos materiales como el selenio, llamados por este motivo semiconductores, es posible controlar este tiempo mediante la intensidad de la luz que incide sobre ellos. Su tiempo de redistribución de la carga es del orden de los 50 segundos en condiciones de oscuridad, pero cuando se lo expone a la luz, su conductividad aumenta en proporción a la intensidad de la luz incidente.



La fotocopiadora es una aplicación de esta propiedad. En ella, una placa de selenio sobre un rodillo y cargada electrostáticamente es alumbrada en forma diferente por la luz reflejada por el original que se desea copiar. Las zonas blancas reflejan toda la luz y las oscuras menos. Por esto, las zonas alumbradas se descargan mientras que otras zonas mantienen su carga en forma total o parcial. Al rodar la placa sobre el toner (tinta seca o tonificador) también cargado electrostáticamente, se puede obtener una copia del original, en principio sobre el rodillo y luego sobre un papel que se presiona sobre él.

Resistencia eléctrica y Ley de Ohm

Ya se mencionó que no todos los materiales se comportan de la misma manera frente a la conducción de la electricidad.

Dentro de cierta aproximación, se cumple en la mayoría de los conductores que la intensidad de la corriente es proporcional a la diferencia de potencial aplicada.

Esta relación se conoce como **Ley de Ohm** y se expresa matemáticamente de la siguiente manera:

$$\Delta V = R \cdot I$$

donde ΔV es la diferencia de potencial entre dos puntos de un conductor, I la intensidad de la corriente, y R la constante de proporcionalidad que se conoce como **resistencia** del cuerpo conductor.

Su unidad es el **ohm** (Ω) y equivale a volt/ampere (V/A).

Para los materiales que cumplen con la Ley de Ohm su resistencia es constante en tanto no haya cambios de temperatura. Esto es válido para la mayoría de los conductores metálicos.

La resistencia de un conductor depende de su forma, tamaño, material y temperatura. Dado que una forma habitual de conductores, como los cables, es la cilíndrica, se puede determinar que para un mismo material los valores de resistencia cambian según la sección y el largo del conductor.

Las características de conducción del material se expresan mediante un coeficiente llamado **resistividad**, ρ , que depende solo del tipo de material del conductor y de la temperatura. Sus valores se pueden encontrar en tablas.

La resistencia, R , de un conductor cilíndrico (un cable) se puede calcular mediante la expresión:

$$R = \rho \cdot \frac{L}{S}$$

donde L es el largo del conductor y S es la sección transversal.

La unidad en que se expresa la resistividad de un material es ohm por m ($\Omega \cdot m$).

Aplicaciones de la Ley de Ohm

Calculen la resistencia de un alambre de acero de 0,0025 m de diámetro y 5 m de largo y la intensidad que circula por él cuando se aplica entre sus extremos una diferencia de potencial de 1,2 V si se sabe que la resistividad del acero es $6 \cdot 10^{-7} \Omega \cdot m$.

La sección trasversal del alambre es: $S = \pi \cdot \left(\frac{0,0025 \text{ m}}{2}\right)^2 = 5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$; su largo es de 5 m, por lo tanto, la resistencia de este conductor vale:

$$R = 6 \cdot 10^{-7} \Omega \cdot m \cdot \frac{5 \text{ m}}{5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 0,6 \Omega$$

Si entre los extremos de este cable se aplica una diferencia de potencial de 1,2 volt se puede calcular la intensidad de corriente mediante la ley de Ohm $I = \frac{\Delta V}{R}$, en este caso

$$I = \frac{1,2 \text{ V}}{0,6 \Omega} = 2 \text{ A}$$

La intensidad de corriente es de 2 ampere.

Circuitos eléctricos

La figura muestra los elementos básicos de los llamados **circuitos eléctricos**: una fuente que aporta energía y mantiene una diferencia de potencial constante entre dos puntos a y b denominados bornes. Puede ser, por ejemplo, una pila. Entre ellos se encuentra conectado otro elemento que presenta una resistencia eléctrica de valor R. Los tramos rectos suponen un conductor que, idealmente, no presenta una resistencia significativa y por lo tanto se considera nula. En los circuitos reales, éstos son normalmente cables de cobre. Por el

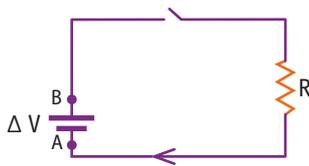


Figura 1.

circuito circula una corriente cuya intensidad es I. Muchas veces en los circuitos se representa una llave, es decir un interruptor que permite abrir y cerrar el circuito. Se dibuja como muestra la figura 1.

Para que circule la corriente es necesario que el circuito esté cerrado, es decir que los extremos de la llave estén en contacto.

Un **multímetro** es un aparato que permite medir diferencias de potencial, corrientes y resistencias en un circuito eléctrico, las cuales se determinan con la posición de un selector. Puede también seleccionarse la medición de tensiones continua o alterna y los rangos de medición, es decir para múltiplos o submúltiplos de las unidades volt, ampere y ohm. Una vez hechas las adaptaciones, se ubican las puntas de prueba en los puntos convenientes para realizar la medición deseada.

Conexión de elementos en un circuito

Las formas básicas de conectar los elementos de un circuito eléctrico se llaman: **serie y paralelo**.

■ Dos elementos están conectados en serie cuando están atravesados por la misma corriente.

■ Dos elementos de un circuito están conectados en paralelo cuando están sometidos a la misma diferencia de potencial o tensión eléctrica.

Conexión de resistencias

La manera de representar a las resistencias de un circuito es:

Si son lámparas, su representación es:



Es posible reemplazar, con igual efecto, al conjunto de resistencias en serie por una única resistencia equivalente. Como están atravesadas por la misma corriente, I, la resistencia equivalente al total vale: $R_{AD} = \frac{V_{AD}}{I}$ lo que implica que $V_{AD} = R_{AD} \cdot I$ (1) aplicando la Ley de Ohm a cada resistencia:

$$V_{AB} = R_1 \cdot I ; \quad V_{BC} = R_2 \cdot I ; \quad V_{CD} = R_3 \cdot I \quad (2)$$

$$V_{AD} + V_{BC} + V_{CD} = V_{AD} \text{ se puede reemplazar por las expresiones: } (2)$$

$$V_{AD} = R_1 \cdot I + R_2 \cdot I + R_3 \cdot I = (R_1 + R_2 + R_3) \cdot I \quad (3)$$

Comparando las expresiones (1) y (3) se obtiene:

$$R_{AD} = R_1 + R_2 + R_3$$

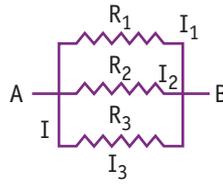
Es decir, que la serie de resistencias puede considerarse una resistencia única cuyo valor corresponde a la suma de las resistencias individuales.



Multímetro.

Los artefactos eléctricos domiciliarios se conectan en paralelo. De esta manera, todos están entre los mismos valores de potencial, que es de alrededor de 220 V. También se evita que, al desconectar o cortarse la conexión de un elemento se interrumpa el circuito, lo cual sucedería si estuvieran conectados en serie. En las conexiones domiciliarias se utiliza tensión alterna; es decir que la diferencia de potencial a la que están conectados los distintos aparatos no es constante sino que varía periódicamente 50 veces por segundo.

b. Paralelo:



Se trata también de encontrar una resistencia equivalente al total de resistencias conectadas en paralelo, en este caso, entre los puntos A y B.

Las tres resistencias están entre los mismos puntos de tensión, V_{AB} , por lo tanto:

$$V_{AB} = R_1 \cdot I_1 \quad V_{AB} = R_2 \cdot I_2 \quad V_{AB} = R_3 \cdot I_3 \quad V_{AB} = R \cdot I$$

Por el principio de conservación de la carga, la corriente I que ingresa y se reparte debe ser igual a la que sale, entonces:

$$I = I_1 + I_2 + I_3 \Rightarrow \frac{V_{AB}}{R} = \frac{V_{AB}}{R_1} + \frac{V_{AB}}{R_2} + \frac{V_{AB}}{R_3}$$

Por lo tanto:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

Es decir que la inversa de la resistencia equivalente a varias resistencias conectadas en paralelo es igual a la suma de las inversas de las resistencias individuales.

Conexión de pilas

En un circuito, las fuentes, como las pilas, suelen conectarse en serie, debido a que en estos casos se suman las diferencias de potencial entre los bornes de cada una. Por ejemplo, en las baterías de 9 V, se encuentran conectadas en serie 6 pilas de 1,5 V cada una. En este tipo de conexión, el borne de mayor potencial se pone en contacto eléctrico con el de menor potencial de la siguiente pila.

El símbolo con el que se representa a una fuente de tensión en un circuito es: 

Amperímetros y voltímetros

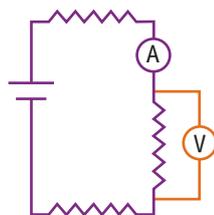
Un amperímetro es un aparato diseñado para medir corrientes eléctricas. Si se desea, por ejemplo, determinar el valor de la corriente que circula por un cable en un circuito, es necesario interrumpirlo para conectar el amperímetro de manera que la corriente a medir lo atraviese. Es decir, el instrumento se conecta en serie. La resistencia interna del amperímetro debe ser muy pequeña de manera que el agregado de un elemento nuevo al circuito no afecte significativamente la medición a realizar.

Con un voltímetro se miden diferencias de potencial. No es necesario interrumpir el circuito, sino conectar cada una de las terminales del voltímetro a los puntos entre los cuales se desea conocer la diferencia de potencial, por lo que está conectado en paralelo.

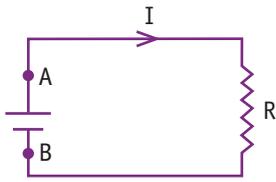
La resistencia interna del voltímetro debe ser muy grande comparada con cualquiera del circuito. De esta manera, la corriente que circularía por él sería casi nula y no alteraría significativamente el valor de la diferencia de potencial a medir.



Amperímetro.



Intercambios de energía en un circuito



A continuación, se considerará el caso de un circuito elemental por el que circula la corriente I . Allí se encuentra conectada una resistencia de valor R y la fuente que aporta una diferencia de potencial ΔV . Toda carga que recorre el circuito entre los puntos A y B disminuye su energía potencial, y, de acuerdo con el principio

de conservación de la energía, esta diferencia debe transformarse en otro tipo de energía.

Este cambio de energía será denotado como ΔU para evitar confusiones.

Ya se explicó que la diferencia de potencial es igual a la variación de energía por unidad de carga transportada, por lo tanto: $\Delta V = \frac{\Delta U}{q}$ lo cual es equivalente a:

$$\Delta U = \Delta V \cdot q$$

La expresión de la variación de energía por unidad de tiempo resulta:

$$\frac{\Delta U}{\Delta t} = \Delta V \cdot \frac{q}{\Delta t}$$

donde la expresión del primer miembro corresponde a la potencia, por lo que $P = \Delta V \cdot I$.

Como ya se ha visto en capítulos anteriores, la unidad de potencia es el watt (W).

En una resistencia, la energía se irradia como calor, lo que se conoce con el nombre de efecto Joule. Para las resistencias, donde es válida la expresión $\Delta V = I \cdot R$, se puede utilizar la expresión:

$$P = I^2 \cdot R$$

donde P es la potencia, R la resistencia del cuerpo conductor e I la intensidad de la corriente.

Aplicaciones de la fórmula de intercambio de energía

- a. ¿Cuál es la intensidad de la corriente que circula por una lamparita de 100 W conectada a la red eléctrica que aporta una diferencia de potencial de 220 V?
- b. ¿Cuánto “gasta” esa lamparita si funciona durante 10 horas?

a. Como $P = 100 \text{ W}$ y $\Delta V = 220 \text{ V}$, la intensidad de la corriente puede calcularse por aplicación de la ecuación $P = \Delta V \cdot I$, con lo cual:

$$100 \text{ W} = 220 \text{ V} \cdot I \Rightarrow I = 0,45 \text{ A}$$

b. La estimación del gasto puede entenderse como el cálculo de la energía transformada por la resistencia de la lamparita en luz y calor. Como la potencia es la energía por unidad de tiempo, se tiene: $100 \text{ W} = \frac{\Delta U}{\Delta t}$.

Para un intervalo de tiempo de 10 horas, equivalente a 36 000 segundos, la energía vale:

$$\Delta U = 100 \text{ W} \cdot 36\,000 \text{ s} = 3\,600\,000 \text{ J}$$

Como puede verse, las cantidades de energía del consumo expresadas en joules alcanzan cifras muy altas. Por este motivo se utiliza la unidad kilowatt-hora, que equivale a la energía utilizada durante una hora a una potencia de 1 kw, o sea:

$$1000 \text{ W} \cdot 1 \text{ h} = 1000 \text{ W} \cdot 3600 \text{ s} = 3\,600\,000 \text{ J}$$

El consumo de esta lamparita en el tiempo indicado es, entonces, de 1 kwh.

6. Tres resistencias en serie de valores $R_1 = 10 \Omega$, $R_2 = 20 \Omega$ y $R_3 = 30 \Omega$ se encuentran conectadas a una batería de 12 volt. Calculen:

- a. la potencia a la que disipa energía la resistencia
- b. la potencia a la que entregada la batería.

7. Una lamparita disipa energía a una potencia de 60 watt cuando está conectada a 220 volt. Calculen su resistencia en esas condiciones y la corriente que circula por ella.

8. Si se conectan dos resistencias de 20Ω y 30Ω a una batería de 12 volt ¿en que caso disiparán más calor?

- a. si se conectan en serie.
- b. si se conectan en paralelo.

9. Se coloca en un termo medio litro de agua a 20°C y se la calienta hasta 80°C , mediante un calentador de inmersión consistente en una resistencia de 50Ω , por la que circula una corriente de 2 ampere. ¿Cuánto tiempo requiere este proceso?



Cortocircuitos, fusibles y llaves térmicas

Cuando se conecta en forma voluntaria o accidental un conductor de resistencia muy baja (casi cero) en paralelo a uno o varios conductores, la intensidad de la corriente eléctrica aumenta considerablemente debido al brusco descenso de la resistencia del circuito. Este hecho se llama cortocircuito, y la mayor parte de la corriente se deriva en el paralelo por el conductor de muy baja resistencia.

Este aumento de la intensidad puede dañar o producir accidentes en diversas partes del circuito. Para evitarlo se pueden colocar dispositivos en serie que corten la corriente cuando ésta supera determinado valor.

Uno de estos dispositivos es el fusible, un conductor diseñado para cortarse (fundirse) cuando la corriente llega a cierto valor. Una vez reparado el desperfecto, el fusible debe ser reemplazado.

Otro dispositivo es la llave térmica que abre el circuito en condiciones de cortocircuito. Cuando se repara el desperfecto, sólo hay que conectarla nuevamente.



Fusibles para proteger el circuito eléctrico de un automóvil.



Llaves térmicas de un edificio.

Resolución de circuitos

Resolver un circuito significa determinar la corriente que circula por cualquier sector y la diferencia de potencial entre cualquier par de puntos. En circuitos simples se puede usar un procedimiento que consiste en calcular el valor de una única resistencia equivalente al total de resistencias conectadas en el original.

Para resolver cualquier circuito eléctrico también se pueden aplicar unas reglas generales llamadas Leyes de Kirchoff, que resultan especialmente útiles cuando se necesita resolver circuitos con distintas trayectorias para las corrientes. En ellas, la derivación de corrientes comienza en los llamados nudos, que son puntos del circuito en donde entran o salen varias corrientes. Un nudo es análogo a una rejilla de distribución cuando circula agua por diferentes tuberías. Es muy frecuente utilizar esta comparación entre la corriente eléctrica y la circulación de un fluido por una red de tuberías.

Leyes de Kirchoff

1ra. Ley: en cualquier nudo, la suma algebraica de las corrientes que entran y salen vale cero.

La validez de esta ley se basa en el principio de la conservación de la carga.

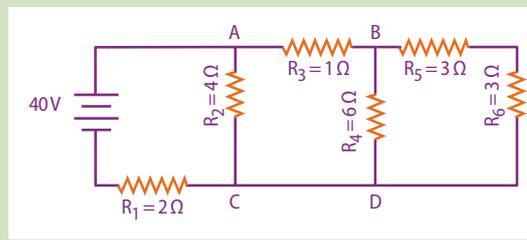
2da. Ley: la suma algebraica de tensiones de todos los componentes de un circuito en una trayectoria cerrada, llamada malla de un circuito, vale cero.

Esta ley resulta válida por aplicación del principio de conservación de la energía.

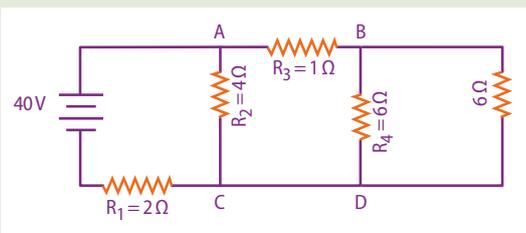
Aplicaciones de las Leyes de Kirchoff

¿Cuánto vale la resistencia total en este circuito?

¿Cuánto vale la intensidad de corriente en cada rama?



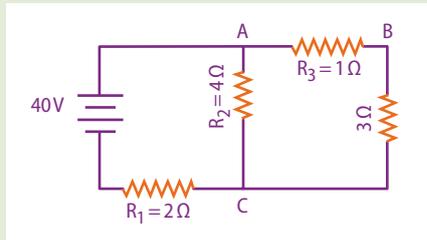
Para comenzar, puede plantearse la supuesta circulación de las corrientes. Si se razona usando la analogía hidráulica, suponiendo que la fuente es una canilla que permite circular agua por una cañería, la corriente de agua que entra en el circuito se encuentra con las rejillas A, B, C y D y se divide en las llamadas corrientes derivadas. Este análisis permite reconocer si hay resistencias atravesadas por la misma corriente, como es claramente el caso de R_5 y R_6 , las que están en serie. Por lo tanto, en este caso se las reemplaza por su equivalente, una única resistencia de $6\ \Omega$. El circuito queda simplificado de la siguiente manera.



La resistencia de $6\ \Omega$, que reemplaza a las anteriores, está conectada entre los mismos puntos de potencial que R_4 , es decir entre B y D. Por lo tanto, pueden ser reemplazadas por otra de valor:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{6\ \Omega} + \frac{1}{6\ \Omega} \Rightarrow R_{BD} = 3\ \Omega$$

El circuito queda entonces simplificado así:



Razonando de igual manera se tiene que la resistencia equivalente a esta última y R_3 equivale a:

$3 \Omega + 1 \Omega = 4 \Omega$ y entre el nudo A y C la resistencia total vale entonces:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{4 \Omega} + \frac{1}{4 \Omega}$$

o sea $R_{AC} = 2 \Omega$, la cual está en serie con R_1 , por lo que la resistencia equivalente a todas las conectadas en el circuito vale:

$$R_{total} = 4 \Omega$$

La corriente que pasa desde la fuente, también llamada corriente principal o I_0 tiene un valor fácilmente calculable por la Ley de Ohm:

$$40 \text{ V} = 4 \Omega \cdot I_0 \Rightarrow I_0 = 10 \text{ A}$$

Las corrientes derivadas se calculan también por la Ley de Ohm de esta manera: en primer lugar es necesario calcular la diferencia de potencial entre los puntos A y C razonando que:

$$V_{AC} = R_{AC} \cdot I_{AC}$$

donde I_{AC} es la corriente que entra por A y sale por C, que en este caso es I_0 , y R_{AC} es la resistencia equivalente al total de resistencias conectadas entre esos nudos. Entonces:

$$V_{AC} = 20 \text{ V}$$

Por aplicación nuevamente de la Ley de Ohm, se puede calcular el valor de cada una de las corrientes derivadas entre los nudos A y C, dado que 20 V es la diferencia de potencial entre las que se encuentran de las dos ramas en que se bifurca el circuito. Por lo tanto:

$$I_{AC} = \frac{20 \text{ V}}{4 \Omega} = 5 \text{ A}$$

Este resultado es válido para ambas ramas, ya que la corriente se encuentra, en este ejemplo, con la misma resistencia. Un razonamiento cualitativo que puede orientar la solución es suponer que la corriente sigue prioritariamente el camino de menor resistencia: será mayor en la rama que presente menor resistencia. En este caso en ambas ramas se encuentra con resistencias idénticas, por lo que se reparte en mitades.

Finalmente, para calcular las corrientes que circulan por las otras ramas del circuito, es necesario volver a calcular la diferencia de potencial entre los puntos B y D, entre los cuales se separan.

$$V_{BD} = R_{BD} \cdot I_{BD} = 3 \Omega \cdot 5 \text{ A} = 15 \text{ V}$$

Y además $I_{BD} = \frac{15 \text{ V}}{6 \Omega} = 2,5 \text{ A}$ para cada rama.

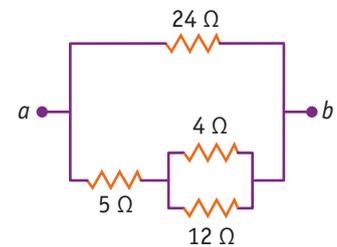
Con los valores que se han obtenido se puede calcular el valor de la potencia de cualquier elemento del circuito que se desee.

10. En el circuito de la figura calculen la intensidad de corriente en cada una de las resistencias.



11. Calculen en el circuito de la figura:

- la resistencia equivalente entre los puntos a y b;
- la intensidad de corriente en cada resistencia si se aplica entre a y b una diferencia de potencial de 48 volt.



Celdas de combustible

NUESTRO PAÍS OBTIENE LA MAYOR CANTIDAD DE SU ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE SU “PARQUE TÉRMICO”, ES DECIR, POR COMBUSTIÓN DE HIDROCARBUROS.

Los hidrocarburos también se aplican ampliamente a la producción de energía mecánica. Este proceso tiene, entre otros aspectos, una gran desventaja: produce dióxido de carbono (CO_2) que es un gas cuya acumulación por encima de ciertos niveles está relacionada con trastornos ecológicos importantes, especialmente el efecto invernadero. En el mundo desarrollado, la reducción de las emisiones de CO_2 se ha convertido en un desafío. Estos intentos se orientan en dos líneas: utilizar combustibles de origen no fósil, o aumentar el rendimiento de los convertidores de energía que emplean hidrocarburos. En el primer caso, intervienen los dispositivos llamados **celdas de combustible**, que permiten la conversión de la energía de una reacción química en energía eléctrica. En el caso más sencillo se aprovecha la reacción de formación de agua a partir de hidrógeno y oxígeno. Para ello, se separan ambos gases por un electrolito sólido, o “conductor iónico”, que puede conducir por iones óxido (O^{2-}) o por protones hidrógeno (H^+). El electrolito permite el transporte de los iones de un lado al otro de la celda para

producir la reacción entre ambos gases.

Propuesta en 1839 por William Grove, la posibilidad de obtener energía eléctrica mediante celdas de combustible recién fue aplicada en el programa espacial de los Estados Unidos durante la década de los sesenta, para dar energía eléctrica, calor y agua a las misiones Apolo.

Existen distintas clases de celdas de combustible, que se diferencian por el tipo de electrolito empleado y la temperatura a la que operan. En la actualidad los dos tipos que reciben la atención de los centros de investigación y de las grandes empresas de energía son:

a. las celdas que operan a temperaturas más bajas, de aproximadamente 80°C , denominadas *celdas de membrana de intercambio protónico* (PEMFCs), que emplean electrolitos poliméricos que conducen por H^+ . Las PEMFCs requieren H_2 de alta pureza, que es relativamente difícil de producir y de almacenar. Además, se degradan en presencia de monóxido de carbono (CO), aun en muy bajas proporciones. Por lo tanto, en el caso de que se desee emplear PEMFCs para generar

energía a partir de hidrocarburos, es necesario introducir una etapa previa de conversión de los hidrocarburos a H_2 , conocida como *reformado externo*;

b. las *celdas de combustible de óxido sólido* (SOFCs) que, en cambio, normalmente emplean electrolitos cerámicos basados en dióxido de zirconio (ZrO_2) que conducen por anión O^{2-} a muy alta temperatura ($800\text{-}1000^\circ\text{C}$). Las SOFCs pueden operar directamente con H_2 , metano (CH_4), gas natural u otros hidrocarburos. El rendimiento de estas celdas llega al 65 %. Son las de mayor eficiencia, a pesar de su alta temperatura de operación. Actualmente existe una tendencia mundial hacia el estudio de SOFCs de temperatura intermedia (IT-SOFCs), que operan a temperaturas entre 500 y 700°C , que emplean nuevos materiales para electrolito y electrodo eficientes a estas temperaturas. En la Argentina está trabajando en este tema el grupo CINSO (Centro de Investigación en Sólidos), perteneciente al CONICET-CITEFA (Consejo de Investigaciones Científicas y Técnicas e Instituto de Investigaciones Científicas y Técnicas de las Fuerzas Armadas).



Si ya existen diseños de celdas de combustible que funcionan, ¿por qué creen que todavía no se ha generalizado su uso?

IDEAS BÁSICAS DE LA UNIDAD

■ Existen dos clases de **carga** denominadas **negativa** y **positiva**. La negativa es la clase de electricidad que tienen los electrones y la positiva la que tienen los protones. Las cargas de igual signo se repelen, y las de signo contrario se atraen. No es posible crear ni destruir la carga eléctrica.

■ La **intensidad de la fuerza de interacción** entre dos cargas puntuales resulta directamente proporcional al producto de dichas cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa.

■ Un **campo eléctrico** es una región del espacio en la que se verifican acciones eléctricas sobre los cuerpos cargados ubicados en él.

■ En el campo eléctrico existen niveles de **potencial**. Se dice que entre dos niveles eléctricos distintos existe una diferencia de potencial.

■ Una **pila** es un dispositivo que mantiene una diferencia de potencial aproximadamente constante entre dos de sus puntos.

■ Se llama **intensidad de corriente** a la cantidad neta de carga que atraviesa una sección del conductor por unidad de tiempo.

■ Los elementos de un circuito básico pueden ser conectados en **serie** o en **paralelo**.

■ La **Ley de Ohm** expresa que en los conductores metálicos la intensidad de la corriente eléctrica es proporcional a la diferencia de potencial entre sus extremos, es decir, $\Delta V = R \cdot I$.

Fórmulas

$$F_e = K \frac{q_1 \cdot q_2}{d^2}$$

Ley de Coulomb

$$R = \rho \cdot \frac{L}{S}$$

Resistencia de un conductor cilíndrico

$$K = 9 \cdot 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2}$$

Constante de la Ley de Coulomb

$$R_s = R_1 + R_2 + R_3 + \dots$$

Resistencia equivalente a una serie

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

Campo eléctrico

$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

Resistencia equivalente a un paralelo

$$\Delta V = \frac{\Delta U}{q}$$

Diferencia de potencial

$$P = \Delta V \cdot I$$

Potencia en un tramo de circuito

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

Intensidad de corriente

$$P = R \cdot I^2$$

Potencia en una resistencia

ACTIVIDADES DE INTEGRACIÓN

1. ¿Por qué no es posible cargar fácilmente una barra de metal si se la sostiene con la mano y sí es posible hacerlo en caso de tener un mango de aislante?

2. ¿Cómo se carga una persona que pierde electrones mientras camina?

3. ¿Por qué se dice que la fuerza eléctrica es más poderosa que la gravitatoria?

4. ¿Cómo varía la fuerza entre dos partículas cargadas si su distancia se triplica?

5. ¿Con qué signo se carga un pararrayos si se acerca una nube cargada en forma negativa? ¿Por qué?

6. ¿Por qué es importante que la carga de prueba sea pequeña para definir la medida del campo eléctrico?

7. Se frota una varilla de vidrio y ésta se carga en forma positiva. Si atrae a un objeto, ¿es suficiente para afirmar que el objeto tiene carga negativa?

8. ¿Cuánto vale la resistencia equivalente a dos resistencias de $4\ \Omega$ cuando se conectan en serie? ¿Y cuando se conectan en paralelo?

9. ¿Por qué Volta apiló varios discos en lugar de usar solo dos?

10. ¿Cuál es la resistencia de un artefacto eléctrico si circula una corriente de 15 ampere cuando está conectado a 220 volt?

11. ¿Por qué si estamos aislados disminuye el peligro al cambiar una lamparita eléctrica?

12. ¿Tienen peligro de sufrir descargas eléctricas los pasajeros de un avión que vuelan en medio de una tormenta eléctrica?

13. ¿Por qué el kwh es una unidad de energía y no de potencia?

14. Un aparato de mayor potencia, ¿consume necesariamente más energía?

15. ¿A qué distancia deberían estar separados dos protones para que la fuerza de repulsión entre ambos sea igual a su peso? (La masa del protón es de aprox. $1,7 \cdot 10^{-27}\ \text{kg}$ y su carga $1,6 \cdot 10^{-19}\ \text{C}$.)

16. La fuerza de atracción entre dos esferas cargadas es de $5,4 \cdot 10^{-3}\ \text{N}$. Si la distancia que las separa es de 1 cm, y una de las esferas está cargada con $3 \cdot 10^{-8}\ \text{C}$, ¿cuál es el valor de la carga de la segunda esfera?

17a. ¿Cuál es la intensidad de la fuerza de interacción entre dos cargas puntuales de $+12 \cdot 10^{-8}\ \text{C}$ y de $-8 \cdot 10^{-8}\ \text{C}$, si se encuentran en el aire separadas 15 cm una de otra?

b. ¿Cuál sería la fuerza resultante sobre cada carga si se ubica una tercera carga de $+5 \cdot 10^{-8}$ entre ambas y en el punto medio del segmento determinado por ellas?

18. Para que la intensidad de una corriente sea de 13,6 mA, ¿cuánta carga debe atravesar la sección del conductor en un segundo?

19. ¿Cuál deberá ser el largo de un cable conductor de cobre de 2 mm de diámetro para tener una resistencia de $2\ \Omega$? (La resistividad del cobre es $1,72 \cdot 10^{-8}\ \Omega\text{m}$.)

20. ¿Cuánta energía eléctrica requiere en un mes un televisor de 80 W que funcione durante 4 horas todos los días? Averigüen el costo del kwh y estimen el gasto.

21. Por un cable de $0,20\ \Omega$ circula una corriente de 10 A. ¿Cuánto vale la potencia desprendida por calentamiento?

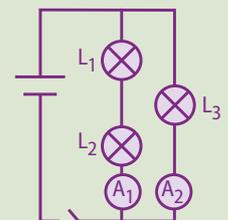
22. Una plancha de 1200 W se conecta a una línea eléctrica domiciliar de 220 V protegida con una llave térmica que se desconecta cuando pasa una corriente superior a 10 A. ¿Logrará funcionar?

23. En el circuito de la figura se muestra la conexión de tres lámparas idénticas.

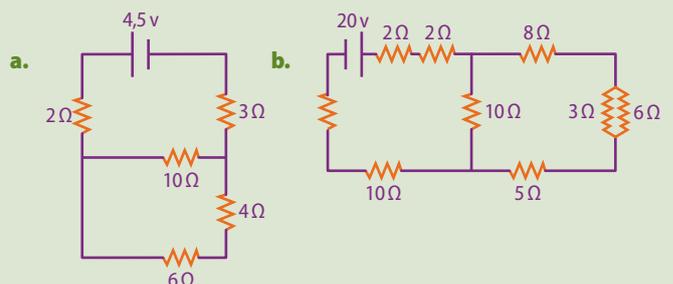
a. ¿Cuál es la lámpara que prende con la máxima intensidad al cerrar la llave?

b. ¿Cómo son entre sí las lecturas de cada amperímetro?

c. ¿Cuál o cuáles de las lámparas permanecen encendidas si se corta el filamento de L_2 ?



24. ¿Cuánto vale la resistencia equivalente total de resistencias conectadas en cada uno de los siguientes circuitos? ¿Cuánto vale la intensidad de corriente en cada una de las ramas?



AUTOEVALUACIÓN

Determinen si las siguientes afirmaciones son verdaderas (V) o falsas (F). Justifiquen sus respuestas.

- 1 Solo es posible cargar eléctricamente a los materiales conductores.
- 2 El vidrio siempre se carga en forma positiva.
- 3 Un cuerpo con exceso de electrones está cargado en forma negativa.
- 4 Un cuerpo puede ser conductor o aislante según las circunstancias.
- 5 Al tocar un cuerpo conductor con un objeto cargado éste se descarga totalmente.
- 6 Cuando un cuerpo se polariza, su carga neta permanece constante.
- 7 Con un electroscopio se puede saber que un cuerpo tiene carga pero no qué clase de carga tiene.
- 8 La jaula de Faraday aísla campos eléctricos.
- 9 En una tormenta eléctrica se está más protegido dentro del auto que fuera de él.
- 10 Los teléfonos celulares no funcionan bien dentro de los ascensores.
- 11 La ley de Coulomb postula que la masa es equivalente a la carga eléctrica.
- 12 Si la distancia entre dos cargas se disminuye a la décima parte, la fuerza eléctrica se centuplica.
- 13 El campo eléctrico de una carga negativa es entrante como el gravitatorio.
- 14 Siempre que se acerca una carga a otra, su energía potencial disminuye.
- 15 Una pila guarda corriente eléctrica.
- 16 Siempre que se acerca una carga a otra, su energía potencial disminuye.
- 17 La Ley de Ohm es válida para cualquier conductor.
- 18 Si hay dos resistencias en serie y una de ellas se corta, la otra sigue siendo atravesada por una corriente eléctrica.
- 19 Dos resistencias conectadas en serie pueden ser equivalentes a otra menor a ambas.
- 20 No hay manera de cambiar la resistividad de los materiales.