

8. Electricidad

Electrostática:

A veces, especialmente en tiempo seco, al peinarse con una peineta plástica se ven pequeñas chispas acompañadas de chasquidos; además, el pelo es atraído por la peineta. Lo mismo llega a suceder con las prendas de vestir: al frotarlas también despiden luz y chasquidos.

En un día tormentoso saltan rayos entre las nubes y el suelo acompañados del fuerte ruido y el trueno. Todos estos fenómenos descritos son fenómenos eléctricos.

Ya Thales de Mileto, un griego que vivió 600 años antes de nuestra era, describe que el ámbar (una resina fósil que los fenicios traían de las costas del mar Báltico) frotado es capaz de atraer cuerpos ligeros. Como ámbar en griego se dice electrón, a esta propiedad del ámbar se le llama electricidad. Hasta el año 1600, Guillermo Gilbert (1544-1603) médico inglés, observó que otros materiales tales como el vidrio, azufre, piedras preciosas, etc. eran también “eléctricos”, pero que los metales no lo eran. Benjamín Franklin (1706-1790), que tuvo entre otros méritos el de ser el primer físico norteamericano, luego de una serie de experimentos, llamó positiva a la clase de electricidad que aparece en el vidrio y negativa a aquella que ocurre en el plástico; donde estos nombres han permanecido a través del tiempo. Podemos suponer que la materia posee dos clases de masa: la habitual que conocemos, como el contenido de materia en kilogramos, por ejemplo, y la masa eléctrica, responsable de la electricidad denominada carga eléctrica.

De los experimentos de Franklin se dedujo que además de existir dos clases de electricidad, las cargas iguales se atraen y opuestas se repelen. La interpretación actual de los cuerpos materiales es que, en su estado normal o neutro, contiene igual cantidad de electricidad positiva y negativa. Si se frota dos cuerpos, por ejemplo, vidrio y seda, se transfiere una pequeña parte de un cuerpo hacia el otro, alterando su neutralidad eléctrica. En este caso, el vidrio adquiere una carga positiva o déficit de carga negativa, en tanto la seda se cargará negativamente o déficit de carga positiva. Pero si una vez efectuada la electrización se envuelve el vidrio con la seda, no se aprecia fuerza alguna sobre el cuerpo anterior. Ello indica que a pesar de estar electrizadas sus partes, el conjunto vidrio-seda se comporta como si no lo estuviera, manteniendo una *neutralidad eléctrica*.

Este fenómeno fue interpretado por Franklin introduciendo el *principio de conservación de la carga*, según el cual cuando un cuerpo es electrizado por otro, la cantidad de electricidad que recibe uno de los cuerpos es igual a la que cede el otro, pero en conjunto no hay producción neta de carga. En términos de cargas positivas y negativas ello significa que la aparición de una carga negativa en el vidrio va acompañada de otra positiva de igual magnitud en la seda o viceversa, de modo que la suma de ambas es cero.

Por otro lado, si una barra metálica, que se sostiene en la mano se frota con piel, no parece adquirir carga alguna. Sin embargo si se le toma con una manilla de madera y el metal no se toca con las manos mientras se frota es posible cargarla. Esto se explica diciendo que los metales, el cuerpo humano, y la tierra son conductores de la electricidad y que el vidrio, los plásticos, la madera, etc. son aislantes o dieléctricos.

De acuerdo a este análisis, los cuerpos están formados por protones (carga positiva), electrones (carga negativa) y neutrones que son partículas sin carga eléctrica. Dos protones se rechazan entre sí, dos electrones se rechazan entre sí, un protón y un electrón se atraen entre sí y los neutrones no ejercen fuerza eléctrica alguna.

La carga eléctrica, al igual que la masa, constituye una propiedad fundamental de la materia. Se manifiesta a través de fuerzas, denominadas estas electrostáticas, que son las responsables de los fenómenos eléctricos. Su influencia en el espacio puede describirse con el auxilio de la noción física de campo eléctrico. El concepto de potencial eléctrico hace posible una descripción alternativa de dicha influencia en términos de energías.

La *electrostática* forma parte de una rama de la física la cual estudia el comportamiento de la carga eléctrica en la materia, es decir, de la medida de la carga eléctrica o cantidad de electricidad presente en los cuerpos y, en general, de los fenómenos asociados a las *cargas eléctricas en reposo*.

El desarrollo de la teoría atómica permitió aclarar el origen y la naturaleza de los fenómenos eléctricos; la noción de *fluido eléctrico*, introducida por Benjamín Franklin para explicar la electricidad, fue precisada a principios de siglo al descubrirse que la materia está compuesta íntimamente de átomos y éstos a su vez por partículas que tienen propiedades eléctricas.

Como sucede con otras áreas de la física, el interés de la electrostática reside no sólo en que describe las características de una de las fuerzas fundamentales de la naturaleza, sino también en que facilita la comprensión de sus aplicaciones tecnológicas. Desde el pararrayos hasta la televisión una amplia variedad de dispositivos científicos y tecnológicos están relacionados con los fenómenos electrostáticos.

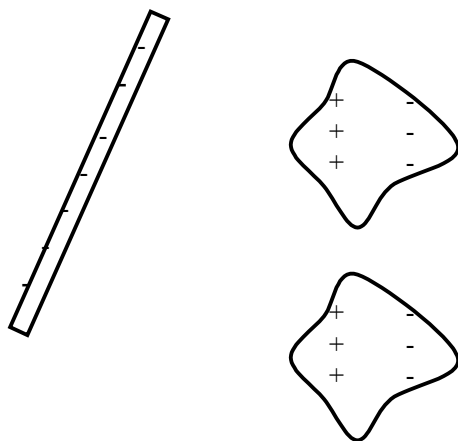
Electrización:

Existen tres formas de poder electrizar un cuerpo. Estas son por frotamiento, por contacto, y por influencia o inducida.

La *electrización por frotamiento* se explica del siguiente modo. Por efecto de la fricción, los electrones externos de los átomos del paño de lana son liberados y cedidos a la barra de ámbar, con lo cual ésta queda cargada negativamente y el paño de lana positivamente. En términos análogos puede explicarse la electrización del vidrio por la seda. En cualquiera de estos fenómenos se pierden o se ganan electrones, pero el número de electrones cedidos por uno de los cuerpos en contacto es igual al número de electrones aceptado por el otro, de ahí que en conjunto no hay producción ni destrucción de carga eléctrica. Esta es la explicación, desde la teoría atómica, del principio de conservación de la carga eléctrica formulado por Franklin con anterioridad a dicha teoría sobre la base de observaciones sencillas.

La *electrización por contacto* es considerada como la consecuencia de un flujo de cargas negativas de un cuerpo a otro. Si el cuerpo cargado es positivo es porque sus correspondientes átomos poseen un defecto de electrones, que se verá en parte compensado por la aportación del cuerpo neutro cuando ambos entran en contacto. El resultado final es que el cuerpo cargado se hace menos positivo y el neutro adquiere carga eléctrica positiva. Aun cuando en realidad se hayan transferido electrones del cuerpo neutro al cargado positivamente, todo sucede como si el segundo hubiese cedido parte de su carga positiva al primero. En el caso de que el cuerpo cargado inicialmente sea negativo, la transferencia de carga negativa de uno a otro corresponde, en este caso, a una cesión de electrones.

La *electrización por influencia* es un efecto de las fuerzas eléctricas. Debido a que éstas se ejercen a distancia, un cuerpo cargado positivamente en las proximidades de otro neutro atraerá hacia sí a las cargas negativas, con lo que la región próxima queda cargada negativamente. Si el cuerpo cargado es negativo entonces el efecto de repulsión sobre los electrones atómicos convertirá esa zona en positiva. En ambos casos, la separación de cargas inducida o formación de polos eléctricos por las fuerzas eléctricas es transitoria y desaparece cuando el agente responsable se aleja suficientemente del cuerpo neutro. La formación de estas dos regiones o *polos* de características eléctricas opuestas hace que a la electrización por influencia se la denomine también *polarización eléctrica*. Esto explica el porque una barra, por ejemplo de plástico, electrizada, en las cercanías de trocitos de papel, estos son atraídos hacia la barra.



La barra electrizada crea un campo eléctrico en toda la región circundante que la rodea. Este campo produce la polarización de los trocitos de papel. Si el campo eléctrico desaparece (descargando la barra), la polarización también desaparece.

Cuando a un cuerpo se le dota de propiedades eléctricas sacándole o entregándole electrones, se dice que ha sido electrizado. La electrización por frotamiento permitió, a través de unas cuantas experiencias fundamentales y de una interpretación de las mismas cada vez más completa, sentar las bases de lo que se entiende por electrostática.

La teoría atómica moderna explica el por qué de los fenómenos de electrización y hace de la carga eléctrica una propiedad fundamental de la materia en todas sus formas. Un átomo de cualquier sustancia está constituido, en esencia, por una región central o *núcleo* y una envoltura externa formada por *electrones*.

El núcleo está formado por dos tipos de partículas, los *protones*, dotados de carga eléctrica positiva, y los *neutrones*, sin carga eléctrica aunque con una masa semejante a la del protón. Tanto unos como otros se hallan unidos entre sí por efecto de unas fuerzas mucho más intensas que las de la repulsión electrostática, las fuerzas nucleares, formando un todo compacto. Su carga total es positiva debido a la presencia de los protones.

Los electrones son partículas mucho más ligeras que los protones y tienen carga eléctrica negativa. La carga de un electrón es igual en magnitud, aunque de signo contrario, a la de un protón. Las fuerzas eléctricas atractivas que experimentan los electrones respecto del núcleo hace que éstos se muevan en torno a él en una situación que podría ser comparada, en una primera aproximación, a la de los planetas girando en torno al Sol por efecto, en este caso de la atracción gravitatoria. El número de electrones en un átomo es igual al de protones de su núcleo correspondiente, de ahí que en conjunto y a pesar de estar formado por partículas con carga, el átomo completo resulte eléctricamente neutro.

Aunque los electrones se encuentran ligados al núcleo por fuerzas de naturaleza eléctrica, en algunos tipos de átomos les resulta sencillo liberarse de ellas (ionización). Cuando un electrón logra escapar de dicha influencia, el átomo correspondiente pierde la neutralidad eléctrica y se convierte en un *ion positivo*, al poseer un número de protones superior al de electrones. Lo contrario sucede cuando un electrón adicional es incorporado a un átomo neutro. Entonces el *ion* formado es *negativo*.

La carga del electrón (o del protón) constituye el valor mínimo e indivisible de cantidad de electricidad. Es, por tanto, la carga elemental y por ello constituye una unidad natural de cantidad de electricidad. Cualquier otra carga equivaldrá a un número entero de veces la carga del electrón. El

coulomb es la unidad de carga eléctrica en el Sistema Internacional y equivale a $6,27 \cdot 10^{18}$ veces la carga del electrón (e), es decir:

$$1 [C] = 6,27 \cdot 10^{18} e.$$

Por consiguiente, a un conductor que tuviera la carga positiva de un coulomb, le faltarían 6,27 trillones de electrones. Un conductor que tuviera la carga negativa de un coulomb tendría un exceso de 6,27 trillones de electrones. ¡Para la electrostática, el coulomb es una unidad de carga extremadamente grande!

LA LEY DE COULOMB

El físico Francés Charles A. Coulomb (1736-1806) en 1785, por medio de una balanza de torsión inventada por él, logró establecer que entre dos cuerpos cargados eléctricamente se ejercía una fuerza que seguía una ley parecida a la de Newton referente a la ley de gravitación universal, aunque con dos importantes diferencias:

- La fuerza eléctrica (o de Coulomb) puede ser repulsiva.
- La fuerza eléctrica entre dos cuerpos disminuye si se interpone un tercer cuerpo (lo que no sucede a la fuerza de Newton).

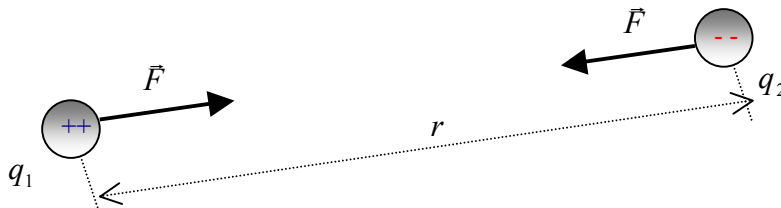
El enunciado de la Ley de Coulomb es el siguiente:

La fuerza que ejercen entre sí dos cuerpos cargados eléctricamente, es directamente proporcional al producto de sus masas eléctricas o cargas, e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa. Tal fuerza se aplica en los respectivos centros de las cargas y están dirigidas a lo largo de la línea que las une.

Si q_1 y q_2 representan las cargas de cada uno de los cuerpos y r la distancia que los separa, la ley de Coulomb puede ser escrita en la forma:

$$F = K_e \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}. \quad (8.1)$$

K_e es la constante de proporcionalidad, llamada constante electrostática cuyo valor en el SI y en el vacío es aproximadamente $9 \cdot 10^9 [N/m^2 \cdot C^2]$.



La ecuación (8.1) es válida, como se dijo, en el vacío y cuando la distancia r es grande comparada con el tamaño de las cargas, es decir, para partículas puntuales. Si entre las cargas existe otro medio o sustancia, la fuerza electrostática se vuelve menor. El cociente entre la fuerza en el vacío

y la fuerza en otro medio se llama permitividad eléctrica relativa al vacío (ϵ_r) o coeficiente dieléctrico de dicha sustancia, es decir,

$$\epsilon_r = \frac{F}{F'}, \quad (8.2)$$

donde F es la fuerza entre las dos cargas colocadas en el vacío y F' la fuerza entre las cargas en el medio.

<i>Medio</i>	ϵ_r
<i>Vacio</i>	1,0000
<i>Aire</i>	1,0005
<i>Aceite</i>	2,5
<i>Mica</i>	6
<i>Vidrio</i>	5–10
<i>Agua</i>	80,4
<i>Titanato(bario)</i>	5000

Permitividades eléctricas relativas de algunos medios

EL CAMPO ELECTRICO:

Las cargas eléctricas no necesitan de un medio material para ejercer su influencia sobre otras, de ahí que las fuerzas eléctricas sean denominadas *fuerzas de acción a distancia*. Cuando en la naturaleza se da una situación de este estilo, se recurre a la idea de *campo* para facilitar la descripción en términos físicos de la influencia que uno o más cuerpos ejercen sobre el espacio que les rodea. En el caso gravitacional la influencia gravitatoria de la tierra sobre el espacio se hace visible cuando a modo de prueba se coloca un cuerpo y se mide su peso \vec{w} . El campo gravitatorio o aceleración de gravedad es $\vec{g} = \vec{w}/m$, es decir, la fuerza gravitacional por unidad de masa. Análogamente para el caso eléctrico es posible describir las influencias de cargas eléctricas sobre otras definiendo el campo eléctrico como la fuerza eléctrica por unidad de carga (positiva). De un modo equivalente es posible también, por ejemplo, introducir la noción de *campo magnético*.

Cuando dos cargas están próximas y, por ejemplo, se rechazan, puede imaginarse que cada fuerza aparece instantáneamente en cuanto aparezca la carga que la origina, sin que nada la transmita, o bien puede suponerse que la fuerza es transmitida con cierta velocidad por el espacio que rodea a las cargas: este punto de vista se ha encontrado más acorde con los experimentos que el anterior. La zona del espacio que rodea a una carga es, pues, diferente del espacio normal: a esta zona se le llama campo eléctrico \vec{E} . Las fuerzas entre los cuerpos cargados se considera que son debidas a la interacción mutua de sus campos eléctricos. La velocidad con que se transmite esta interacción es la de la luz ($300000[km/s] = 3 \cdot 10^8[m/s]$). En general para cuantificar la región del espacio donde está presente un campo eléctrico se utiliza una carga de

prueba. Recibe este nombre una carga muy pequeña (para que su propio campo sea muy pequeño) y positiva (por convención). De este modo:

“En una región del espacio existirá un campo eléctrico \vec{E} si la carga de prueba (y también cualquier otra carga) siente una fuerza de origen eléctrico”.

Se llama intensidad de campo eléctrico \vec{E} en un punto, al cociente de dividir la fuerza \vec{F} que recibe la carga de prueba q , cuando la carga se pone en el punto considerado, es decir:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} . \quad (8.3)$$

De acuerdo con esta ecuación, también puede decirse que la intensidad del campo eléctrico es igual a la fuerza que recibe la unidad de carga. En el sistema internacional, la unidad de campo eléctrico es el $[N/C]$. En (8.3) se hace notar el carácter vectorial del campo eléctrico. La intensidad del campo eléctrico es un vector cuya dirección y sentido son los de la fuerza. El campo puede representarse por las llamadas líneas de fuerzas; estas líneas deben trazarse de acuerdo a las convenciones siguientes:

- La tangente a una línea de fuerza en cualquier punto es la dirección de \vec{E} en ese punto. Estas salen de una carga positiva y entran a las negativas.
- Las líneas de fuerza se dibujan de tal forma que el número de líneas por unidad de área transversal (perpendicular a las líneas) es proporcional a la magnitud de \vec{E} . Cuando las líneas son próximas unas a las otras, \vec{E} y la fuerza \vec{F} sobre una carga colocada en dicho punto es grande y cuando estas líneas están separadas tanto \vec{E} como \vec{F} son pequeñas.

Las figuras representan en el plano del papel a diversos campos eléctricos de cargas puntuales. En todas las figuras se han representado en dos puntos cualesquiera a los vectores que representan la intensidad del campo, para hacer notar que, que son siempre tangentes a la línea de fuerza que pasa por ellos. Note que el vector \vec{A} es mayor, porque se encuentra en una zona donde las líneas de fuerza están más juntas que la zona donde está el vector \vec{B} .

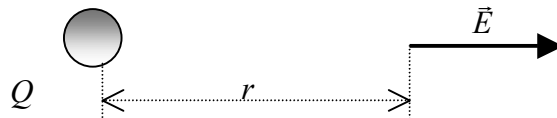
Campo eléctrico de una carga positiva.
Las líneas salen radialmente de la carga

Campo eléctrico de una carga negativa.
Las líneas entran radialmente a la carga

Campo de dos carga de magnitud iguales pero de signo opuesto.

Por otro lado, combinando la ley de coulomb (8.1) con la definición de campo eléctrico (8.3), si Q es la carga generadora del campo y q por lo tanto la carga de prueba positiva que siente la fuerza \vec{F} , el campo eléctrico creado por la carga Q a la distancia r de esta será:

$$E = \frac{F}{q} = K_e \frac{Q \cdot q}{r^2 \cdot q} = K_e \frac{Q}{r^2}. \quad (8.4)$$



Diferencia de potencial:

Si se mueve una carga de prueba entre dos puntos de un campo eléctrico, en sentido contrario a las líneas de fuerza, habrá que realizar un trabajo para vencer la fuerza que recibe la carga de prueba. En la figura se ha supuesto que el camino seguido se encuentra sobre una línea de fuerza. Al trasladar la carga del punto 1 al punto 2, se realiza un trabajo que se almacena en la carga en forma de energía potencial.

Se llama diferencia de potencial (o de tensión) entre el punto 2 y el 1, al trabajo realizado por un agente externo por unidad de carga para trasladar a esta desde el punto 1 al 2, es decir

$$V_2 - V_1 = V_2 - V_1 = \frac{W_{12}}{q}, \quad (8.5)$$

donde W_{12} es el trabajo realizado por el agente externo para llevar la carga q del punto 1 al punto 2. En el sistema internacional, la unidad de diferencia de potencial es el $[volt]$, en honor del físico italiano Alejandro Volta (1745-1827). De este modo, entre dos puntos habrá una diferencia de potencial de $1[volt]$ cuando hay que realizar un trabajo de $1[volt]$, para llevar una carga de 1 coulomb desde un punto a otro.

Diferencia de potencial. Representa el trabajo por unidad de carga que hay que realizar para trasladar una carga de 1 a 2.

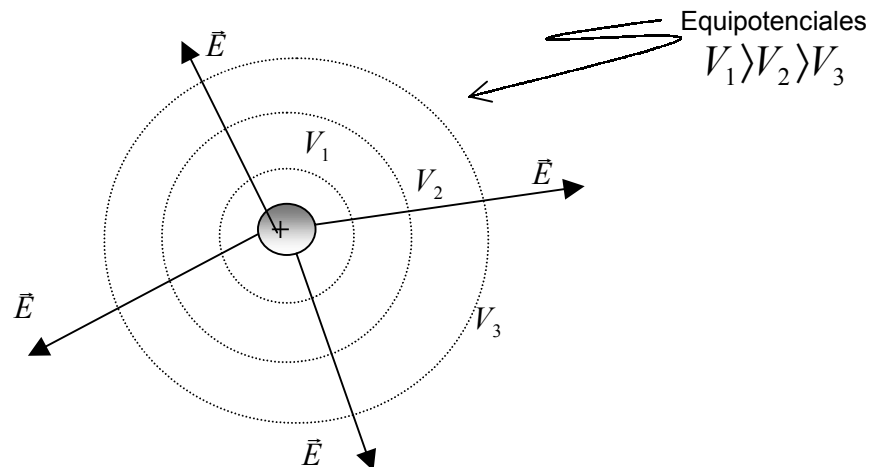
Potencial eléctrico en un punto:

Si al punto 1 se le supone un potencial cero (por ejemplo, en el infinito o en un punto muy alejado de donde se encuentra la carga generadora del campo eléctrico), el potencial del punto 2, o en general de un punto cualquiera, se define como:

El potencial en un punto es el trabajo realizado por un agente externo por unidad de carga para trasladar esta desde el infinito hasta el punto considerado, es decir

$$V_p = \frac{W_{\infty p}}{q}. \quad (8.6)$$

La visualización de cómo varía el potencial de un punto a otro en un campo electrostático se efectúa recurriendo a la noción de *superficie equipotencial* como lugar geométrico de los puntos del campo que se encuentran a igual potencial. Su representación gráfica da lugar a una serie de superficies que, a modo de envolturas sucesivas, rodean al cuerpo cargado cuyo campo se está considerando. Cada una de ellas une todos los puntos de igual potencial. El campo eléctrico queda siempre perpendicular a las superficies equipotenciales apuntando hacia las superficies de menor potencial eléctrico.



Superficies equipotenciales y campo eléctrico para una carga positiva.

De acuerdo con la definición de trabajo $W = \vec{F} \cdot \Delta \vec{r}$ y recordando que en este caso la fuerza F es la electrostática (no constante), el potencial eléctrico creado por una carga puntual Q a una distancia r de esta es dado por:

$$V_p = K_e \frac{Q}{r}. \quad (8.7)$$

Capacitancia:

Cuando a dos vasos diferentes se les agrega agua, almacena más el que tiene mayor capacidad. Análogamente cuando dos conductores diferentes reciben una carga eléctrica, la carga almacenada será mayor en el de mayor capacidad eléctrica o capacitancia, es decir,

La capacitancia de un conductor es la medida de su capacidad eléctrica.

Si se tienen dos vasos cilíndricos iguales el nivel que alcance el agua será directamente proporcional al volumen agregado. En forma similar:

El potencial que adquiere un conductor, es directamente proporcional a la carga que recibe.

Si se tienen dos vasos cilíndricos de distinta capacidad el nivel al que sube el mismo volumen de agua agregado, será inversamente proporcional a la capacidad del vaso. En la misma forma:

El potencial que adquiere un conductor es inversamente proporcional a su capacitancia.

De este modo reuniendo los dos enunciados anteriores:

El potencial que adquiere un conductor es directamente proporcional a la carga que recibe, e inversamente proporcional a su capacitancia.

La ecuación correspondiente se escribe:

$$V = \frac{q}{C},$$
$$C = \frac{q}{V}, \quad (8.8)$$

siendo C su capacitancia, la cual depende de las propiedades geométricas que presente el conductor. La unidad de capacitancia es el coulomb sobre volt $[C/V]$ que se abrevia como farad $[F]$, en honor al físico inglés Miguel Faraday (1791-1867). De este modo, un conductor tiene un farad de capacitancia, si al recibir la carga de un coulomb, su diferencia de potencial o tensión aumenta en un volt.

Corriente eléctrica:

Un conductor metálico está formado por iones positivos (átomos desprovistos de un electrón). Los electrones perdidos por los átomos se mueven desordenadamente saltando de átomo en átomo, uniéndose ocasionalmente y brevemente con algunos de ellos. Estos electrones se denominan libres, los cuales se mueven con velocidades del orden de $10^{-7} [m/s]$. La carga neta del conductor es nula, pues existe el mismo número de cargas positivas que de negativas.

Si un conductor se encuentra en un campo eléctrico, tanto los iones positivos como los electrones quedan sometidos a fuerzas que tiende a moverlos; como sólo los electrones libres pueden hacerlo, sólo se moverán en sentido contrario al campo. Al aplicar el campo, los electrones inician su movimiento sin que haya acumulación de electrones en el conductor, de tal manera que en cualquier porción de este el número de iones positivos y de electrones libre es el mismo, por lo que:

Un conductor que lleva una corriente eléctrica no está cargado eléctricamente.

Si el campo aplicado es constante, los electrones en cualquier instante se moverán en el mismo sentido dentro del conductor y la corriente se llama continua (C.C.). Si el campo eléctrico aplicado cambia alternativamente de sentido dentro del conductor la corriente se llama alterna (C.A.).

En un conductor metálico, un alambre por ejemplo, los electrones se mueven y las cargas positivas, unidas a los átomos, permanecen ancladas en su lugar. En los fluidos, la corriente puede estar formada por iones positivos y negativos moviéndose en sentido opuesto. Se ha convenido que el sentido de la corriente eléctrica sea el de las cargas o iones positivos. En un alambre, por tanto, la corriente eléctrica será contraria al sentido de la velocidad de los electrones, llamada electrónica.

Cuando pasa una corriente eléctrica por un conductor se producen, principalmente, tres fenómenos o efectos:

- La temperatura del conductor aumenta, comunicando calor a sus alrededores.
- El conductor se rodea de un campo magnético y ejerce fuerzas sobre otras corrientes o sobre imanes.
- La corriente, al atravesar ciertas sustancias o fluidos, las descompone químicamente (proceso de electrólisis).

Intensidad de corriente:

Se llama intensidad de corriente eléctrica i al cuociente entre la carga eléctrica Δq que atraviesa la sección transversal de un conductor y el tiempo Δt requerido, es decir:

$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t}. \quad (8.9)$$

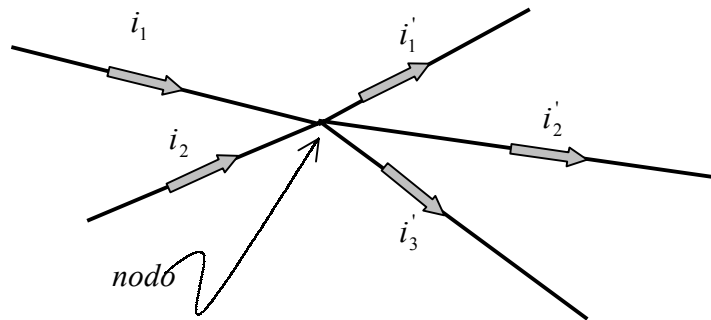
En el sistema internacional, la corriente se mide en $\left[\frac{C}{s}\right]$, unidad que se denomina ampere $[A]$, en honor del físico francés Andrés María Ampère (1786-1853). Por tanto, en un conductor circulará una corriente de un ampere cuando en un segundo lo atraviere una carga de un coulomb a través de su sección transversal.

La corriente eléctrica se comporta como un fluido, por ejemplo agua que pasa a través de un tubo. Si por cualquier sección de este pasan, digamos 5 [lt] de agua en 1 [s], la misma cantidad pasará por cualquier otro (recuerde que el caudal o gasto Q se conserva). Lo mismo pasa con la corriente eléctrica. Por tanto, la intensidad de corriente en cualquier parte de un conductor es la misma. Volviendo a la analogía hidráulica, si el tubo que lleva 5 [lt] de agua en 1 [s] se bifurca y por un tubo pasan 2 [lt] de agua en 1 [s], por el otro pasarán tres, aplicando el concepto a la corriente eléctrica y generalizando, se tiene la primera regla de Kirchhoff,

En un nodo, la suma de las intensidades de corrientes que llegan es igual a la suma de las intensidades de las corrientes que salen. Un nodo es el punto donde se encuentran dos o más conductores.

Si i_1, i_2, i_3, \dots representan las corrientes que llevan a un nodo e i'_1, i'_2, i'_3, \dots las corrientes que salen del nodo:

$$i_1 + i_2 + i_3 \dots = i'_1 + i'_2 + i'_3, \dots \quad (8.10)$$



Ley de ohm:

Siguiendo la analogía hidráulica, para que por un tubo que une dos depósitos de agua pase una corriente de agua, es preciso que haya una diferencia de niveles entre el agua de los depósitos. Cuando mayor sea la diferencia de niveles pasarán más litros de agua por segundo y cuando mayor sea la oposición que presente el tubo al paso del agua (porque sea rugoso, largo o estrecho) menos agua podrá pasar. En cada sección del tubo pasa el mismo número de litros de agua por segundo, pues de no ser así, habría acumulación o pérdida de agua, lo que no puede ser, ya que el agua es un fluido incompresible.

Análogamente, para que pase una corriente por el alambre que une a dos conductores, es preciso que haya una diferencia de potencial V entre ellos. Cuanto mayor sea la diferencial de potencial, pasarán más coulomb por segundo (corriente i) y cuanto mayor sea la oposición o resistencia R al paso de la corriente eléctrica (por la naturaleza, largo o diámetro del alambre), menos corriente podrá pasar. Además como ya se dijo, en cada sección del alambre la intensidad de corriente es la misma, puesto que se comporta como un fluido incompresible. De este modo:

La intensidad de la corriente que pasa por un conductor es directamente proporcional a la diferencia de potencial V aplicado entre sus extremos e inversamente proporcional a la resistencia R del conductor.

Esta ley, enunciada por el físico alemán Jorge Simón Ohm (1787-1854) puede ser escrita en la forma:

$$i = \frac{V}{R}. \quad (8.11)$$

De este modo, un conductor tiene una resistencia eléctrica de 1 ohm ($1[\Omega]$), si al aplicarle una diferencia de potencial de un volt, deja pasar una corriente de un ampere.

Energía eléctrica:

Recordando que la diferencia de potencial V entre dos puntos es $V = W/q$ y que la potencia es $P = W/t$, la cual representa el trabajo en la unidad de tiempo o energía eléctrica en la unidad de tiempo, esta podrá ser escrita como

$$P = \frac{qV}{t}.$$

Como q/t es la corriente eléctrica i , la expresión anterior puede ser escrita como:

$$P = V \cdot i.$$

Por otro lado, usando la ley de ohm, se encuentra,

$$P = i^2 \cdot R = \frac{V^2}{R}. \quad (8.12)$$

Cuando un coulomb pasa a través de un conductor, consume una energía igual a la diferencia de potencial aplicada. La pregunta es, ¿qué le pasa a esta energía?. Si no hay un motor o algún otro aprovechamiento de la energía, ésta se convierte en calor. Como ya se vio por cada Joule que desaparece, aparecen $1/4,1860 = 0,238[cal]$; por lo tanto la expresión anterior ($P = i^2 \cdot R$) podrá anotarse como:

$$\frac{Q}{t} = i^2 \cdot R, \quad (8.13)$$


donde Q es el calor (en Joule) disipado por el conductor. De esta forma,

El calor que se obtiene de un conductor en la unidad de tiempo, es directamente proporcional al cuadrado de la intensidad de corriente que circula sobre él. Esto identifica la llamada ley de Joule.

Aunque el calentamiento de un conductor es a veces indeseable, tiene aplicaciones útiles siendo la más importante, las parrillas, radiadores, planchas, estufas eléctricas; las ampollitas, cuyo filamento eleva tanto su temperatura que su incandescencia es tal que sirve para el alumbrado, etc.

El efecto calorífico, también llamado efecto Joule, puede ser explicado a partir del mecanismo de conducción de los electrones en un metal. La energía disipada en los choques internos aumenta la agitación térmica del material, lo que da lugar a un aumento de la temperatura y a la consiguiente producción de calor. La ley de Joule, por su parte, puede ser enfocada como una consecuencia de la interpretación energética de la ley de Ohm

Conexiones de resistencias:

Un sistema, ya sea conductor, semiconductor o algún otro que presente resistencia al paso de la corriente se llama resistor, el cual se representa por una línea en zigzag (). Existen dos modos en la cual se puede conectar los resistores: en serie y paralelo.

i. Conexión en serie:

En este caso los resistores se conectan uno a continuación del otro, entonces la intensidad de corriente será la misma en los dos resistores:

$$i_1 = i_2 = i.$$

El trabajo V para pasar a la unidad de carga q de a a c , será la suma de los trabajos para pasarla, primero de a a b y después de b a c , es decir,

$$V = V_{ab} + V_{bc}.$$

Aplicando la ley de ohm:

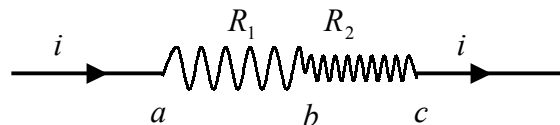
$$i \cdot R = i_1 \cdot R_1 + i_2 \cdot R_2,$$

donde R es la resistencia equivalente (que hace los mismos efectos) de los dos resistores R_1 y R_2 . Como $i_1 = i_2 = i$, la ecuación anterior se simplifica y queda finalmente como:

$$R = R_1 + R_2.$$

Cuando dos (o más) resistores están en serie, se suman para obtener la resistencia total, es decir:

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots = \sum_{i=1}^n R_i \quad (\text{resistores en serie}) \quad (8.14)$$



Resistores en serie.

ii. Conexión en paralelo:

En este caso los extremos de los dos resistores se conectan juntos y la corriente se bifurca en un extremo, volviéndose a reunir en el otro. Llamando i a la corriente total e i_1 e i_2 a las corrientes que pasan por cada resistor, se tiene, por el principio de conservación de la corriente eléctrica:

$$i = i_1 + i_2.$$

El Trabajo V por unidad de carga de a a b es el mismo, a través de cualquier camino seguido, es decir:

$$V = V_1 + V_2,$$

Aplicando la ley de Ohm,

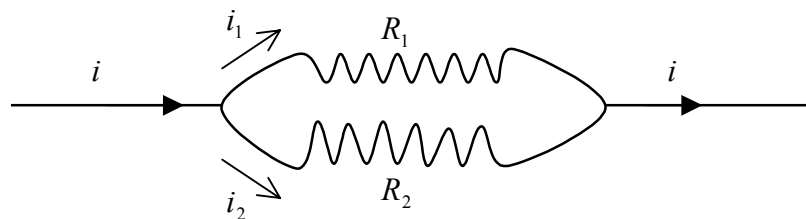
$$\frac{V}{R} = \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2},$$

siendo R la resistencia equivalente a las resistencias R_1 y R_2 . Como los numeradores son iguales, se tiene finalmente,

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

Cuando dos (o más) resistores se conectan en paralelo, se suman los valores recíprocos de sus resistencias, para obtener el valor recíproco de la resistencia total o equivalente. Por lo tanto,

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i} \quad (\text{resistencias en paralelo}) \quad (8.15)$$



Resistores en paralelo.

Fuerza electromotriz (f.e.m.):

La fuerza electromotriz es la magnitud que caracteriza el comportamiento del generador en un circuito eléctrico. En el caso de una bomba hidráulica la potencia mecánica representa la energía que suministra al circuito por unidad de tiempo. En los circuitos eléctricos se define la fuerza electromotriz de un generador y se representa mediante la letra \mathcal{E} , como la energía que cede el generador al circuito por cada unidad de carga que lo atraviesa y que se invierte en incrementar su energía potencial eléctrica. Cada carga al pasar por el generador recibe una dosis de energía que podrá gastar después en su recorrido a lo largo del circuito.

Con frecuencia, se emplean las iniciales f.e.m. para designar esta magnitud, que siendo una energía se la denomina impropriamente fuerza. Según su definición la f.e.m. se expresará en unidades de energía partido por unidades de carga. Este es también el caso de las magnitudes potencial y diferencia de potencial. Por tal motivo su unidad en el SI es el volt.

Tipos de generadores

De entre los tipos de generadores, el más conocido es el *generador químico*, al cual corresponde a la habitual pila eléctrica, pila seca o batería. Este generador transforma energía química a eléctrica a través de una reacción química. El dispositivo es capaz de mantener una diferencia de potencial constante entre sus polos o bornes. Una pila de zinc - carbón, como las que se emplean para alimentar un aparato de radio portátil, está constituida formada por dos electrodos de diferentes sustancias. Uno es de zinc que envuelve en forma de envoltura a una barra de carbón. Entre ambos existe una mezcla húmeda de cloruro de amonio (el electrolito), bióxido de manganeso (el despolarizante) y de polvo de carbón para hacerla conductora, las cuales sirven para el proceso de generación de la tensión. La reacción química que se produce en el electrodo de cinc libera electrones, con lo que éste se convierte en un polo negativo (cátodo); la que se produce en el electrodo de carbón da lugar a una disminución de electrones, resultando de signo positivo (ánodo). La tensión producida por la pila es constante, hasta el desvanecimiento del electrolito, y al aplicarla sobre un circuito eléctrico produce una C.C.. Este tipo de corriente se caracteriza porque el sentido del movimiento de los portadores de carga (electrones libres) se mantiene constante.

La pila de combustible es otro tipo de generador químico de uso frecuente en el suministro de energía eléctrica a naves o cohetes espaciales. Recibe este nombre porque las sustancias que participan en las correspondientes reacciones químicas son, en parte, introducidas desde el exterior como si de un combustible se tratara. Una pila de combustible típica es la que se basa en las reacciones del hidrógeno - oxígeno que se producen con pérdida de electrones en un electrodo y ganancia en el otro, dando lugar a una diferencia de potencial capaz de producir una corriente eléctrica exterior.

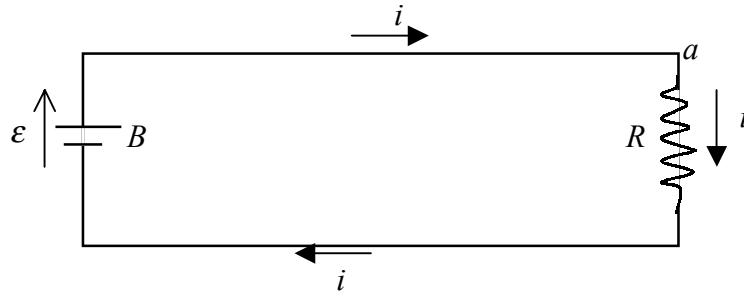
Un termopar, dispositivo directo de la termocupla, es un generador termoelectrónico que transforma energía calórica en eléctrica. Se produce cuando dos alambres conductores de diferente material, unidos entre sí por sus extremos respectivos se someten a una diferencia de temperatura. Sumergiendo una de las soldaduras en hielo fundente, por ejemplo, y aplicando a la otra soldadura una temperatura alta, entre ambos puntos se genera una diferencia de potencial que aumenta con la variación de la temperatura.. El efecto generador de electricidad, conocido como efecto Seebeck, se emplea principalmente en la medida de temperaturas de instrumentos digitales.

La célula fotovoltaica es un generador de tipo fotoeléctrico (dispositivo directo del efecto fotoeléctrico explicado por Einstein en 1905) que transforma la energía electromagnética (en el rango visible) en energía eléctrica. Se basa en la capacidad de los semiconductores para conducir la electricidad en un sentido dado, pero no en el opuesto. Al incidir la luz sobre la célula, arranca algunos electrones de sus átomos (fotoelectrones) produciendo una corriente fotoeléctrica. Estos electrones que se acumulan en una región determinada (cátodo) a expensas de la pérdida de electrones en la región opuesta (ánodo). Al igual que en una pila seca, estas dos regiones constituyen los polos negativo y positivo de la célula.

El generador electromagnético se basa en el principio de la inducción electromagnética (ley de Faraday y Lenz). Cuando un conductor cerrado se hace girar en un campo magnético producido por un imán, por ejemplo, se genera en su interior una diferencia de potencial capaz de producir una corriente eléctrica. Es el tipo de generador denominado alternador que se emplea en las grandes plantas de producción de energía eléctrica. En ellas, diferentes formas de energía, cuya naturaleza depende del tipo de central, se invierten en mover grandes bobinas de conductores, haciéndolas girar en los campos magnéticos. De este modo se producen tensiones eléctricas entre sus bornes cuya polaridad positiva/negativa, se invierte alternativamente con el tiempo a razón de cincuenta veces en cada segundo. Cuando esta tensión se aplica a un circuito eléctrico, produce en él una corriente alterna que se caracteriza por una inversión alternativa, con idéntica frecuencia, del sentido del movimiento de los portadores de carga.

Ley de las mallas en un circuito eléctrico:

Además de la primera regla de Kirchhoff o ley de los nodos (8.10), es posible encontrar otra regla llamada ley o teorema de las mallas. En el circuito representado en la figura, la batería B es de f.e.m. ε y la resistencia del circuito es R . La fuente de f.e.m. mantiene al terminal superior a un voltaje positivo y a la inferior en uno negativo, lo cual se indica con los signos $+$ y $-$. En el circuito externo conectado a B los transportadores de carga positiva se moverán en la dirección mostrada por las flechas marcadas con i . En otras palabras, se establecerá una corriente que circula en el mismo sentido que el de las manecillas del reloj.



Una f.e.m. se representa mediante una flecha colocada próxima a la fuente, y que apunta en la dirección en la que se movería los transportadores de carga positiva en el circuito externo, si la fuente actuara por sí sola. Supóngase que en la figura se inicia un recorrido en el sentido de las manecillas del reloj, partiendo del punto a , cuyo potencial eléctrico es V_a . Al pasar a través de la resistencia hay un cambio $-i \cdot R$ en el potencial. El signo menos indica que la parte superior de la resistencia está a un potencial mayor que la parte inferior, lo cual debe ser cierto debido a que los transportadores de carga positiva se mueven por sí mismos de un potencial mayor a uno menor. Al atravesar la batería de la parte inferior a la superior, existe un aumento $+\varepsilon$ en el potencial, debido a que la batería realiza un trabajo (positivo) sobre los transportadores de carga; esto es, los mueve desde un punto de potencial menor hasta uno de mayor. La suma algebraica de los cambios de potencial y del potencial inicial V_a , debe resultar en el mismo valor V_a , es decir,