

4. ELECTROMAGNETISMO

4.2. CIRCUITOS DE CORRIENTE ELÉCTRICA CONTINUA

En este apartado nos ocuparemos de la fenomenología relacionada con las cargas eléctricas en movimiento, es decir, con la corriente eléctrica o, como se denomina en algunos textos, electrocinética.

4.2.1. Corriente eléctrica

Una corriente eléctrica es un movimiento continuo y ordenado de partículas cargadas a lo largo de un conductor. En un conductor metálico las partículas que se mueven son los electrones. Para que una corriente eléctrica exista permanentemente en el interior del conductor debe existir un campo eléctrico que proporcione la energía necesaria para moverse a las partículas cargadas.

En muchos materiales, tales como el cobre y otros metales, parte de los electrones pueden moverse libremente en el seno del material. Estos materiales se denominan conductores. En otros materiales, tales como la madera o vidrio, todos los electrones están ligados a los átomos próximos y ninguno puede moverse libremente. Estos materiales se denominan aislantes.

En un simple átomo de cobre existen 29 electrones ligados al núcleo por atracción electrostática entre los electrones cargados negativamente y los núcleos cargados positivamente. Los electrones más externos están ligados más débilmente que los más internos a causa de su mayor distancia al núcleo y la repulsión de los electrones más internos. Cuando un gran número de átomos de cobre se combinan en una pieza de cobre metálico, el enlace de los electrones de cada átomo individual se modifica por interacciones con los átomos próximos. Uno o más de los electrones externos de cada átomo queda en libertad para moverse por todo el metal. El número de electrones libres depende del metal particular, pero típicamente oscila alrededor de un electrón por átomo.

Parece razonable que si una corriente eléctrica es un movimiento de cargas, necesitaremos una magnitud que nos indique si ese movimiento es más o menos intenso. La magnitud que proporciona una “medida de la corriente” es la *intensidad de corriente eléctrica*, I , que se define como el cociente entre la carga ΔQ que atraviesa la sección recta (llamamos sección recta a la superficie perpendicular a la dirección de la corriente) del conductor en el intervalo de tiempo Δt :

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

La intensidad de corriente eléctrica se mide en Amperios, esto es, $\frac{C}{s}$.

El movimiento de los electrones en el interior de un material ocurre aproximadamente de la siguiente manera:

- 1) Se aplica un campo eléctrico E
- 2) Los electrones libres experimentan una aceleración instantánea debida a una fuerza eléctrica de módulo eE
- 3) Parte de la energía cinética así adquirida es disipada por choques con los iones fijos en la red cristalina del material

- 4) Los electrones son de nuevo acelerados por el campo eléctrico
 5) El resultado neto de esta serie de procesos de aceleración y disipación de energía repetidos es que los electrones se mueven con una velocidad media dentro del material conductor llamada **velocidad de desplazamiento**.

Es posible relacionar la expresión de la intensidad de corriente eléctrica con la velocidad de desplazamiento de los electrones dentro del material de la siguiente manera:

La carga ΔQ que en un intervalo de tiempo Δt atraviesa el área transversal S , será la carga comprendida en un volumen de conductor de área S y de longitud L igual al recorrido de las cargas en un intervalo de tiempo Δt , esto es $L = v\Delta t$. Si llamamos n al número de electrones por unidad de volumen que se mueven bajo la acción del campo eléctrico en material conductor, podemos escribir:

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{nqV}{\Delta t} = \frac{nqSL}{\Delta t} = \frac{nqSv\Delta t}{\Delta t} = nqSv$$

Por tanto la intensidad de corriente eléctrica es una **magnitud vectorial** cuyo módulo es $I = nqSv$, y cuya dirección y sentido son los de un flujo de cargas positivas en el interior del material. Debe tenerse en cuenta que el descubrimiento de la corriente eléctrica es anterior al de la estructura de la materia. Por eso se asignó inicialmente a la corriente eléctrica el sentido del movimiento de las cargas positivas. Cuando se profundizó en el conocimiento de la estructura de la materia, y se llegó a establecer que eran las cargas negativas, los electrones, las responsables de la corriente eléctrica en los metales, se optó por mantener la situación inicial. Por eso se habla de un sentido real de la corriente, el que llevan los electrones, y un sentido convencional de la corriente, el que llevarían las cargas positivas.

El movimiento de electrones en una dirección es equivalente al flujo de cargas positivas en sentido opuesto. En casi todas las aplicaciones, el movimiento de cargas negativas hacia la izquierda es indistinguible del movimiento de cargas positivas hacia la derecha. Así, pues los electrones se mueven en sentido opuesto a la corriente.

4.2.2. Conductividad eléctrica y resistencia. Ley de Ohm.

Se define la densidad de corriente eléctrica J como la intensidad de corriente eléctrica por unidad de área transversal que atraviesa el conductor:

$$J = \frac{I}{S} = nqv$$

Cuando una corriente se establece en un conductor, experimentalmente se comprueba que es proporcional a la intensidad del campo eléctrico \vec{E} aplicada al conductor y depende de características propias o intrínsecas del conductor. Esto permite escribir J también de la siguiente manera:

$$J = \sigma E$$

siendo σ la **conductividad eléctrica** del material (no confundir con densidad superficial de carga, masa...) dependiente de propiedades intrínsecas tales como estructura cristalina, densidad de electrones,

concentración de impurezas... e independiente de la geometría del mismo. La inversa de la conductividad eléctrica es la **resistividad eléctrica**: $\rho = \frac{1}{\sigma}$.

Los valores de la resistividad de las distintas sustancias abarcan un intervalo muy amplio, sin embargo por su orden de magnitud podemos distinguir si el material es un conductor o un aislante:

Conductores	$\rho(\Omega \times m / 20^\circ C)$
Aluminio	2.8×10^{-8}
Cobre	1.7×10^{-8}
Hierro	10×10^{-8}
Plata	1.6×10^{-8}
Aislantes	
Madera	$10^8 - 10^{11}$
Vidrio	$10^{10} - 10^{14}$
Mica	$10^{11} - 10^{15}$
Semiconductores	
Germanio	0.45
Silicio	640

Otra ley empírica que describe como es la corriente eléctrica que se establece en un material al aplicarle un campo eléctrico es la **ley de Ohm**. Supongamos un hilo de material conductor de longitud L , sección transversal S , conductividad eléctrica σ y al que se le aplica un campo eléctrico E , la intensidad de corriente eléctrica I que lo atraviesa se puede expresar de la siguiente manera:

$$I = JS = \sigma ES = \sigma \frac{V}{L} S = \frac{V}{\frac{1}{\sigma} \frac{L}{S}} = \frac{V}{R} \Rightarrow$$

$$I = \frac{V}{R} \quad R = \frac{1}{\sigma} \frac{L}{S} = \rho \frac{L}{S}$$

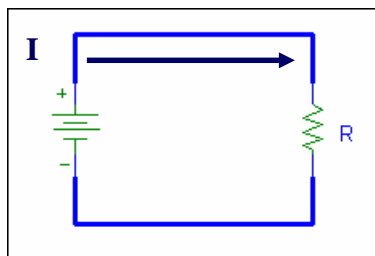
Obtenemos que la corriente eléctrica es directamente proporcional a la diferencia de potencial aplicada entre los extremos del conductor e inversamente proporcional a una magnitud que llamamos **resistencia eléctrica** R del conductor, dependiente de características intrínsecas del conductor y de su

geometría. La principal consecuencia de que los electrones encuentren una resistencia a su movimiento en el conductor es que pierden energía cediéndosela al conductor, que se calienta (efecto Joule). Por último, el conductor, cede esta energía en forma de calor al medio que lo rodea. La ley de Ohm es una ley empírica (experimental) que describe una propiedad compartida por muchos materiales. Los conductores metálicos cumplen esta ley y se les llama **conductores óhmicos o lineales**.

4.2.3. Circuito eléctrico. Generalización de la ley de Ohm.

Para construir un circuito eléctrico básico necesitamos:

1. Los hilos conductores o cables de conexión a través de los cuales circulan los electrones y a los que les asignamos una resistencia eléctrica nula.
2. Un aparato que suministre la energía eléctrica necesaria a la carga para que continúe moviéndose por el circuito: pila o batería, generador. Este dispositivo convierte energía química, mecánica... en energía eléctrica. En el símbolo que representa este dispositivo el segmento más largo corresponde al borne, o polo de potencial más alto, es decir, el positivo.
3. Un dispositivo que transforma la energía eléctrica en otro tipo de energía, por ejemplo, una resistencia eléctrica en calor.



La magnitud que caracteriza a cualquier pila o batería se denomina fuerza electromotriz o fem, igual a la diferencia de potencial entre sus placas ($\mathcal{E} = V_+ - V_-$). Esta fem es la energía (o trabajo) por unidad de carga que suministra a la carga eléctrica que se mueve en el circuito. Básicamente, la carga eléctrica pierde su energía eléctrica a su paso por la resistencia eléctrica del circuito, para que la carga continúe moviéndose en el circuito cerrado la energía perdida debe ser repuesta por la pila o batería.

Si en un intervalo de tiempo Δt , una cantidad de carga ΔQ atraviesa la pila, la energía total suministrada por la pila es $\Delta Q \mathcal{E}$. La potencia suministrada por la pila:

$$P_{pila} = \frac{\Delta Q \mathcal{E}}{\Delta t} = I \mathcal{E}$$

Esta debe ser igual a la potencia disipada en la resistencia, ya que la energía debe conservarse en el circuito:

$$P_R = IV = I^2 R = \frac{V^2}{R} \Rightarrow P_R = P_{pila}$$

¿Por qué se calientan las pilas de un aparato eléctrico, por ejemplo, una radio, después de estar un rato funcionando? Eso se debe a que las pilas y baterías además de su fuerza electromotriz poseen una cierta resistencia interna r que disipa energía por efecto Joule cuando circula una corriente a través de ella. Entonces, parte de la energía suministrada por la pila la pierde la carga eléctrica al atravesarla. De esta manera, a la expresión de la potencia suministrada por la pila debemos restarle esta energía perdida y que sería igual a la energía disipada en una resistencia de valor r :

$$P_{pila} = I\varepsilon - I^2 r$$

Para una pila real se debe seguir cumpliendo $P_R = P_{pila}$, de esta igualdad se deduce la diferencia de potencial en bornes de una pila o batería real:

$$P_R = P_{pila} \Rightarrow I\varepsilon - I^2 r = IV \Rightarrow V = \varepsilon - Ir$$

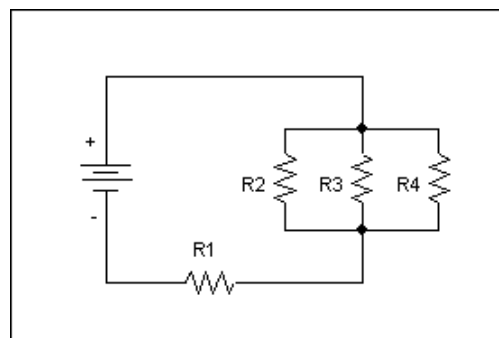
Para calcular la corriente que atraviesa el circuito, en la expresión de la conservación de la energía utilizamos $P_R = I^2 R$ para la potencia disipada en bornes de la resistencia:

$$I^2 R = I\varepsilon - I^2 r \Rightarrow I = \frac{\varepsilon}{R + r}$$

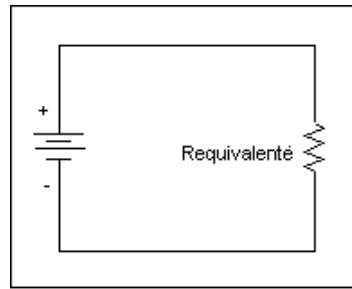
expresión conocida como la *ley de Ohm generalizada*.

4.2.4. Asociación de resistencias

Cuando en un circuito existe más de una resistencia es posible sustituirla por una sola resistencia equivalente a las asociadas sin que se produzca ninguna modificación en el circuito. Por ejemplo el siguiente circuito:

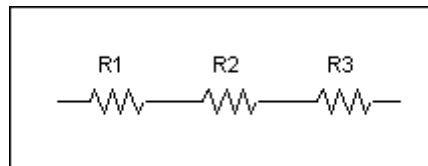


Puede ser sustituido por este otro equivalente:



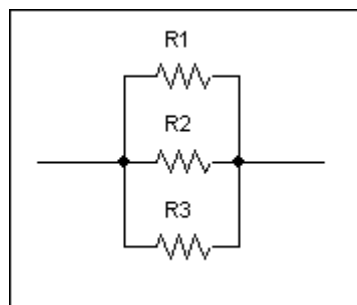
Las resistencias se pueden asociar en serie y en paralelo:

- **En serie:** Esta asociación proviene de unir el extremo de una resistencia con al comienzo de la siguiente. En este caso pasa la misma intensidad por todas las resistencias, la diferencia de potencial entre los extremos de la resistencia equivalente es igual a la suma de las diferencias de potenciales entre los extremos de las resistencias asociadas y la resistencia equivalente es igual a la suma de las resistencias asociadas:



$$I_{eq} = I_i ; \quad V_{eq} = \sum_{i=1}^n V_i ; \quad R_{eq} = \sum_{i=1}^n R_i$$

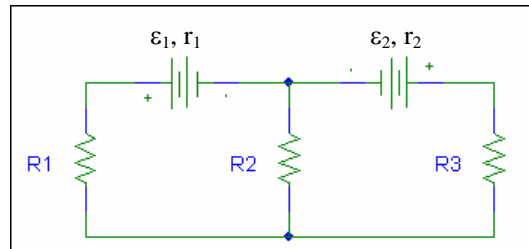
- **En paralelo:** Esta asociación proviene de unir varias resistencias de forma que tengan sus extremos comunes, de un nudo parten varios conductores que vuelven a unirse en el nudo siguiente:



$$I_{eq} = \sum_{i=1}^n I_i ; \quad V_{eq} = V_i ; \quad \frac{1}{R_{eq}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}$$

3.2.5. Leyes de Kirchhoff

La ley de Ohm generalizada y las expresiones de agrupación de componentes eléctricos no basta para resolver cualquier circuito de corriente continua, por ejemplo el siguiente en el que las resistencias no están agrupadas ni en serie ni en paralelo:



Para resolver este circuito, calcular la corriente que circula por él y las diferencias de potencial en bornes de cada uno de sus componentes es necesario usar las leyes de Kirchhoff. Antes de enunciar dichas leyes es necesario introducir las siguientes definiciones:

Red eléctrica: conjunto de hilos conductores y dispositivos (resistencia, baterías...) unidos entre sí de forma arbitraria.

Nudo: punto de una red eléctrica en el que se unen tres o más hilos conductores (la red del ejemplo tiene dos nudos)

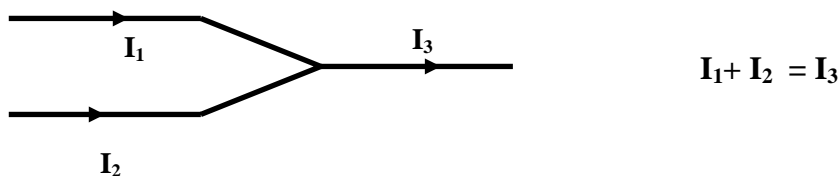
Rama: conjunto de elementos de una red eléctrica que se encuentran entre dos nudos consecutivos (la red del ejemplo consta de tres ramas)

Malla: circuito de una red eléctrica que se puede recorrer volviendo al punto de partida sin pasar dos veces por el mismo lugar (la red del ejemplo consta de tres mallas)

Primera ley de Kirchhoff o ley de los nudos:

Esta ley no es más que la conservación de la carga eléctrica:

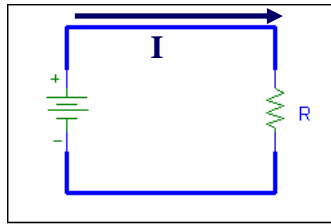
“La suma de las intensidades de las corrientes que se dirigen a un nudo es igual a la suma de las intensidades que salen de él”



Segunda ley de Kirchhoff o ley de las mallas:

“La suma algebraica de las diferencias de potencial a lo largo de una malla de un circuito eléctrico es igual a cero”

La segunda ley de Kirchhoff no es más que la ley de conservación de la energía, la energía por unidad de carga suministrada por algunos dispositivos del circuito debe ser igual a la energía disipada por unidad de carga en otros elementos del circuito. Lo podemos aplicar al circuito más básico:



$$IR - (\varepsilon - Ir) = 0 \Rightarrow IR - \varepsilon + Ir = 0 \Rightarrow I(R + r) = \varepsilon \Rightarrow I = \frac{\varepsilon}{R + r}$$

Para resolver circuitos más complejos en los que se nos pide el cálculo de las corrientes, por ejemplo, para obtener las corrientes del circuito del ejemplo inicial mediante las leyes de Kirchhoff conviene seguir las siguientes pautas:

- 1) Identificar el número de ramas del circuito. En un circuito existirán tantas corriente distintas como ramas.
- 2) Establecer el sentido de la corriente de manera arbitraria. Si al resolver el circuito una corriente resulta positiva, el sentido supuesto inicialmente y el real coinciden, si por el contrario resulta negativa, el sentido supuesto inicialmente no es el correcto, sino que el sentido de la corriente es el contrario al supuesto.
- 3) Se deben establecer tantas ecuaciones como corrientes existen en el circuito y resolver. De aplicar la primera ley de Kirchhoff se pueden obtener tantas ecuaciones como nudos menos uno tiene el circuito. De aplicar la segunda ley de Kirchhoff se pueden obtener tantas ecuaciones como mallas tiene el circuito. De entre todas las posibles ecuaciones se escogen tantas como incógnitas.

Nota: Para determinar la diferencia de potencial en bornes de una resistencia o resistencia interna hay que fijarse en la posición de los terminales que estamos restando y en el sentido de la corriente a través de ella. Para determinar la diferencia de potencial en bornes de una pila hay que fijarse en la posición de sus placas sin que importe el sentido de la corriente a través de ella.