IV. Electrocinética

Corriente Eléctrica:

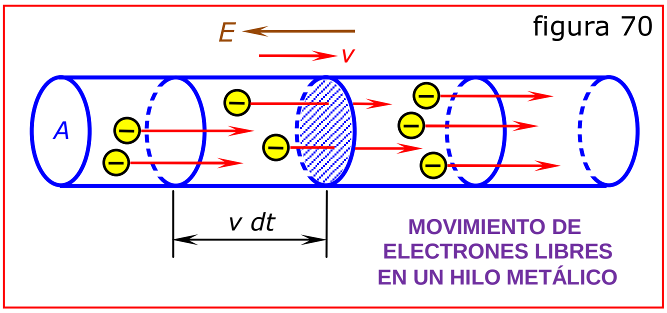
Las cargas libres en un conductor aislado se encuentran en movimiento irregular como las moléculas de un gas encerrado en un recipiente. No tienen definida ninguna dirección de movimiento. Si consideramos una sección cualquiera de un conductor, tendremos que la velocidad con la cual pasan cargas de derecha a izquierda a través de dicha sección, es la misma que la velocidad con la cual pasan de izquierda a derecha. Es decir, la velocidad neta es cero.

Vamos a estudiar el movimiento de las cargas en un conductor cuando se mantiene un campo eléctrico dentro del mismo. Este movimiento constituye una corriente. Sabemos que las cargas libres se mueven por la fuerza ejercida sobre ellas por el campo eléctrico. Las cargas libres en un conductor metálico son electrones. Las cargas libres en un electrolito son iones positivos y/o negativos. Un gas en condiciones adecuadas, como el de una lámpara fluorescente, es también un conductor y sus cargas libres son iones positivos y/o negativos y electrones.

Hemos visto que cuando un conductor aislado se coloca en un campo eléctrico, las cargas dentro del conductor se reagrupan de modo que el interior del mismo sea una región libre de campo, en toda la cual el potencial es constante. El movimiento de las cargas en el proceso de reagrupación constituye una corriente, pero es de corta duración y se denomina corriente transitoria. Si deseamos que circule una corriente permanente en un conductor, hemos de mantener continuamente un campo o un gradiente de potencial dentro de él. Si el campo tiene siempre el mismo sentido, la corriente se denomina continua. Si el campo se invierte periódicamente, el flujo de carga se invierte también y la corriente es alterna.

Los dispositivos eléctricos más conocidos que tienen la propiedad de mantener constantemente sus bornes (terminales de conexión) a potenciales diferentes, son las pilas (convierten energía química en energía eléctrica), las baterías (conjunto de pilas) y los generadores (convierten energía mecánica en energía eléctrica). Si los extremos de un hilo metálico se conectan a los bornes de cualquiera de estos dispositivos, se mantiene un gradiente de potencial (o sea un campo eléctrico) dentro del hilo y habrá un movimiento continuo de carga a través de él. Bajo la influencia de este campo, los electrones libres del hilo metálico experimentan una fuerza de sentido opuesto al del campo y son acelerados en el sentido de esta fuerza.

Los choques con las partículas que quedan fijas en el metal, frenan a los electrones libres o los detienen, después de lo cual vuelven a ser acelerados y así sucesivamente. Su movimiento es, por lo tanto, una sucesión de aceleraciones y frenados, pero adquieren cierta velocidad media en sentido opuesto al campo. Supondremos que los electrones libres se mueven uniformemente con esta velocidad media, llamada velocidad de desplazamiento o velocidad de deriva.



La *figura 70* representa una porción de un *hilo metálico* en el cual hay un *campo eléctrico* hacia la *izquierda* y, consecuentemente, un *movimiento de electrones libres* hacia la *derecha*. Suponemos que cada electrón se mueve con la misma *velocidad* v y que en el *tiempo* dt cada uno avanza una *distancia* $v\,dt$. El *número de electrones* que en ese tiempo atraviesa una *sección* de área A *(rayado en la figura)* es el contenido en una porción de hilo de *longitud* $v\,dt$, o sea de *volumen* $A\,v\,dt$. Si hay n *electrones libres por unidad de volumen*, el *número* de los que cruzan la *sección* A en el *tiempo* dt es $n\,A\,v\,dt$. Si e representa la *carga* de cada electrón, la *carga total* dq que atraviesa la *sección* A en el *tiempo* dt, es:

$$dq = n\,e\,v\,A\,dt \qquad (88)$$

La corriente o *INTENSIDAD DE CORRIENTE* $\boldsymbol{i}$ se define como *la cantidad de carga que atraviesa una sección del hilo conductor por unidad de tiempo*:

$$\boxed{i = \frac{dq}{dt}} \qquad (89)$$

De las ecuaciones *(88)* y *(89)* se deduce:

$$\boxed{i = n\,e\,v\,A} \qquad (90)$$

La unidad del SI para la intensidad de corriente es el amperio (A). 1 A = 1 C/s.

Cuando circula una corriente por un conductor en el cual existen *cargas libres de ambos signos*, como en el caso de los *electrolitos*, las *cargas negativas* cruzan la sección en un sentido y las *cargas positivas* en el otro. En general, si hay presente un número cualquiera de diferentes clases de partículas cargadas, la *carga neta* que atraviesa la superficie en el tiempo dt, es:

$$dq = A\,dt\,(n_1 q_1 v_1 + n_2 q_2 v_2 + \cdots)$$

y la *intensidad de corriente*: $$i = A \sum n\,q\,v$$

Todos los *productos* $n\,q\,v$ *tendrán el mismo signo, puesto que las cargas de signo* *contrario se moverán en sentidos opuestos.*

La DENSIDAD DE CORRIENTE J en el conductor, se define como la *razón de la intensidad de la corriente a la sección transversal*:

$$\boxed{J = \frac{i}{A} = n\,e\,v} \qquad (91)$$

La ecuación *(91)* define la *densidad media*. Si la corriente no está distribuida uniformemente, la densidad se define de *forma más general* como:

$$\boxed{J = \frac{di}{dA}} \qquad (92)$$

Es interesante calcular la *velocidad de desplazamiento* de los *electrones libres* en un conductor por el cual circula una corriente. Consideremos un conductor de *cobre* de *1 cm* de diámetro, en el cual la corriente es de *200 A*. Mediante la fórmula *(91)* podemos calcular que $J = 2{,}55 \times 10^{6}\ A/m^{2}$. Conociendo que en el cobre hay alrededor de $8{,}5 \times 10^{28}$ *electrones libres/m*^{3} y que $q = e = 1{,}6 \times 10^{-19}\ C$, podemos determinar, nuevamente a través de la *(91)*, que $v_d \approx 2 \times 10^{-4}\ m/s$. Por consiguiente, la *velocidad de desplazamiento de los electrones libres es muy pequeña*.

La velocidad del *movimiento aleatorio de los electrones* es de aproximadamente $10^{6}\ m/s$, es decir 5×10^{9} *veces* mayor que la *velocidad de desplazamiento*. La *figura 71* es muy ilustrativa al respecto.

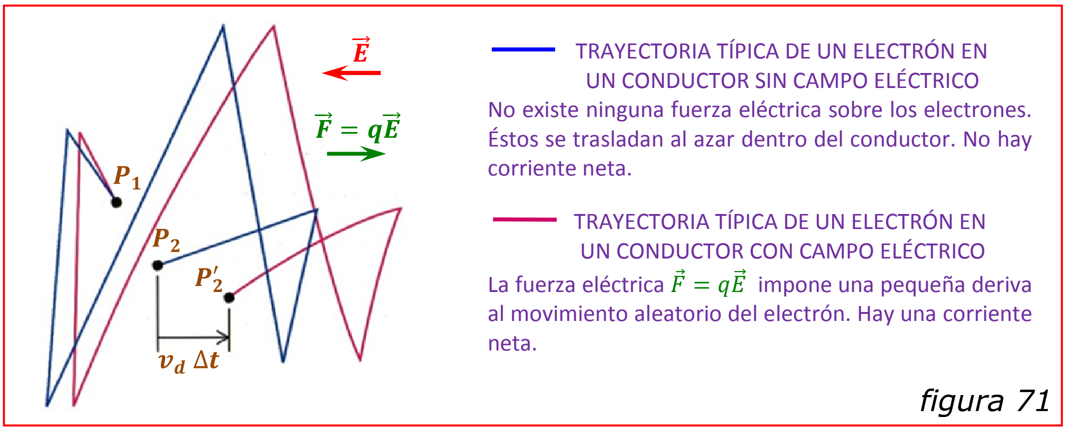
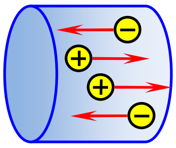


figura 71

Sentido de la Corriente: *Parece lógico definir el sentido de una corriente como igual al del movimiento de los electrones libres. Pero inmediatamente tropezamos con la dificultad de que en un conductor electrolítico o gaseoso, las cargas libres de ambos signos se mueven en sentidos opuestos. Cualquiera que fuera el sentido adoptado para la corriente, encontraríamos cargas que*

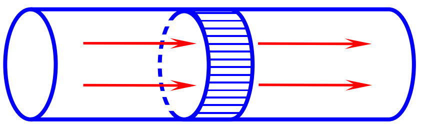


se mueven en sentido contrario. Por tal motivo, se ha convenido en considerar el sentido de una corriente como si las cargas que se mueven fuesen todas positivas. En consecuencia, en un conductor metálico los electrones se mueven en sentido opuesto al sentido convencional de la corriente. Por ejemplo, en la figura 70, el sentido de la corriente se dice que es de derecha a izquierda, puesto que los electrones se mueven de izquierda a derecha. Desde ahora adoptaremos este convenio y hablaremos de la corriente en un metal como si consistiese verdaderamente en un movimiento de cargas positivas.

Circuito Eléctrico:

Cuando se conectan los extremos de un *hilo metálico* a *dos puntos* mantenidos a *potenciales fijos* pero *distintos*, tales como los bornes de una *batería*, se establece una *corriente* en el hilo, pero el *potencial* de *cada punto* del mismo permanece *constante*. Consideremos un *elemento del hilo* limitado por *dos planos transversales (figura 72)*. Si los electrones del hilo se mueven de izquierda a derecha, está entrando carga negativa al elemento por su cara izquierda y saliendo por su cara derecha. La *cantidad de carga que entra* en el elemento en cualquier intervalo de tiempo tiene que ser *exactamente igual a la que sale*, puesto que si no fuera así, la cantidad de carga en el elemento variaría y por lo tanto también *variaría* su *potencial*. Deducimos entonces que la *intensidad* tiene que ser *la misma en ambas caras del elemento* y, en consecuencia, ha de ser *igual en todas las secciones del hilo*.

figura 72

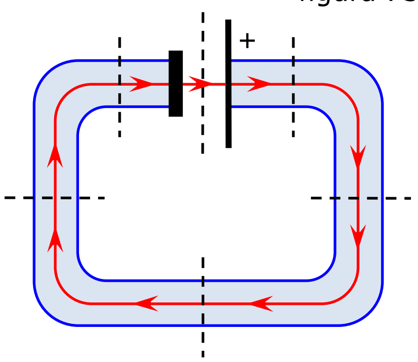


CARGA ELÉCTRICA QUE ENTRA Y SALE EN UN PEQUEÑO ELEMENTO DE UN HILO CONDUCTOR

La intensidad de la corriente es la misma en todas las secciones transversales de un conductor, aunque la superficie transversal sea distinta en varios puntos. La densidad de corriente J cambiará al modificarse la sección transversal, pero la corriente i permanecerá invariable.

El *hilo conductor* y la *batería* a la cual están conectados sus extremos, se dice que forman un circuito completo o circuito cerrado. Como se aprecia en la *figura 73*, la batería se representa por *dos líneas paralelas de distinta longitud y grosor*. La línea *más larga* siempre indica el terminal o borne positivo de dicha batería.

figura 73



CIRCUITO CERRADO FORMADO POR UNA BATERÍA ELÉCTRICA Y UN HILO CONDUCTOR

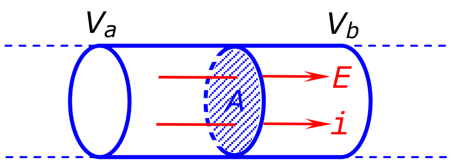
La *línea* marcada con *flechas* indica el *sentido convencional* de la *corriente*. Los *electrones* circulan en el hilo en *sentido contrario*. Los *iones positivos* se mueven, dentro de la batería, en el *mismo sentido* que el *convencional*, y los *iones negativos*, en el *sentido opuesto*.

El *sentido convencional* de la corriente es *de más a menos* únicamente en el *circuito exterior*. Dentro de la *batería*, el sentido es *de menos a más*.

En la figura se han representado varias *secciones del circuito* por líneas de trazos. La *intensidad* es *igual* en todas estas secciones, incluida la que atraviesa la *batería*.

Una *corriente permanente* sólo puede existir en un *circuito cerrado* análogo al de la *figura 73*. Si desconectamos el hilo conductor de la batería por cualquiera de sus extremos, o se hace una interrupción en cualquier punto del circuito, *la corriente cesa inmediatamente*. Se dice que *el circuito está abierto*.

Conductibilidad o Conductividad:



INTENSIDAD DE LA CORRIENTE DENTRO DE UNA PORCIÓN DE CONDUCTOR

figura 74

Las *sustancias conductoras* difieren entre sí en el valor de la *densidad de corriente* establecida por un *campo eléctrico* dado. La *figura 74* representa una porción de un conductor de *sección* A, dentro del cual hay una *intensidad de corriente* (convencional) i y una *densidad de corriente* $J = i/A$. El *campo eléctrico* en la *sección* A es E. La *razón de la densidad de corriente a la intensidad del campo eléctrico* se denomina CONDUCTIBILIDAD ELÉCTRICA σ de la sustancia:

$$\boxed{\sigma = \frac{J}{E}} \quad \Rightarrow \quad \boxed{J = \sigma\, E} \qquad (93)$$

Cuanto mayor es la conductibilidad, tanto mayor es la densidad de corriente para un campo eléctrico dado. La conductibilidad de una sustancia varía con la temperatura y en grado muy pequeño con otras condiciones físicas que veremos más adelante. Para *muchas sustancias, principalmente los metales, la conductibilidad es independiente de la densidad de corriente. Por el contrario, hay sustancias para las cuales la conductibilidad varía sensiblemente con la densidad de corriente.*

La densidad de corriente es un vector que tiene la misma dirección que el campo. La forma vectorial de la ecuación *(93)* es:

$$\boxed{\vec{J} = \sigma \, \vec{E}}$$

Reemplazando E por $-\,dV/dx$ y J por $i\,/A$ en la ecuación *(93)*, se obtiene:

$$\boxed{i = -\sigma \, A \, \frac{dV}{dx}} \qquad (94)$$

(Es interesante observar que esta ecuación es exactamente análoga a la ecuación de la conductibilidad calorífica estacionaria. No se trata sólo de una simple analogía matemática, ya que existe una correlación entre la conductibilidad eléctrica y la térmica)

Resistencia y Resistividad. Ley de Ohm:

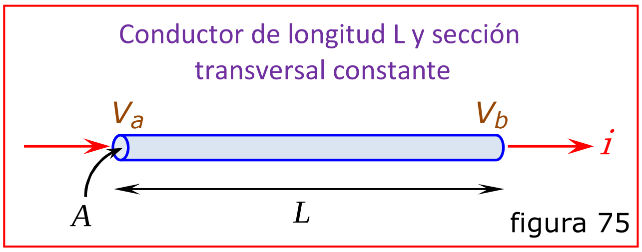


figura 75

Consideremos un conductor de longitud L y sección constante A *(figura 75)* por el cual circula una corriente de intensidad i. Sean V_a y V_b los potenciales en sus extremos. Limitaremos el estudio a sustancias para las cuales σ *es independiente de* J y supondremos que la temperatura *(y cualquier otro factor que influya sobre* σ*)* permanece constante en todos los puntos del conductor. En estas condiciones, i, σ y A son constantes y la ecuación *(94)*, a partir de la cual haremos nuestro cálculo, puede integrarse fácilmente. Tomando el eje x a lo largo del conductor y el origen en su extremo a, se tiene:

$$i \, dx = -\,\sigma \, A \, dV$$

$$i \int_0^L dx = -\,\sigma \, A \int_{V_a}^{V_b} dV$$

$$i \, L = \sigma \, A \, (V_a - V_b)$$

$$i = \frac{\sigma A}{L}(V_a - V_b) \qquad (95)$$

El factor $\sigma A/L$ se denomina CONDUCTANCIA G del conductor. Cuanto mayor es la conductancia, tanto mayor es la intensidad de corriente para una diferencia de potencial dada.

La *inversa* de la *conductancia* se denomina RESISTENCIA R. Evidentemente:

$$R = \frac{L}{\sigma A} \qquad (96)$$

Las tablas proporcionan corrientemente las propiedades conductoras de las sustancias en función de la *inversa* de la *conductibilidad*, llamada RESISTIVIDAD ρ:

$$\boxed{\rho = \frac{1}{\sigma}} \qquad (97)$$

En función de la *resistividad*, la ecuación *(96)* se convierte en:

$$\boxed{R = \rho\,\frac{L}{A}} \qquad (98)$$

En función de la *resistencia*, la ecuación *(95)* se transforma en:

$$i = \frac{V_a - V_b}{R} = \frac{V_{ab}}{R}$$

o bien: LEY DE OHM $\Rightarrow$ $\boxed{V_{ab} = R\,i}$ *(99)*

Observemos que esta relación sólo se aplica cuando el conductor que *une* a y b es una *resistencia pura*, es decir, no contiene otros elementos como baterías, motores, generadores, etc. Más adelante, deduciremos la expresión general de la diferencia de potencial entre dos puntos cualesquiera en un circuito de corriente continua.

Recordemos también que al deducir la ecuación *(99)*, a partir de la ecuación fundamental $J = \sigma\, E$, se supuso la *constancia* de la *conductibilidad* σ. Sólo si σ es independiente de J, la *resistencia* R es una *constante* independiente de la *corriente* i. En tal caso, la *diferencia de potencial* V_{ab} entre los bornes de un conductor es *función lineal* de la *corriente* i en el conductor. Esta proporcionalidad directa entre la intensidad de corriente en un *conductor metálico* y la diferencia de potencial entre sus bornes, fue descubierta experimentalmente por el físico alemán Georg Simon Ohm *(1789-1854)* y por ello se conoce como ley de Ohm.

Las sustancias que respetan la ley de Ohm, o sea aquellas para las cuales *R* es constante, se denominan *conductores lineales* u *óhmicos*. Las demás sustancias, se llaman *conductores no lineales* o *no óhmicos*. Afortunadamente, para mayor sencillez de los cálculos, *los metales*, que son los más usados como conductores, son *conductores lineales* y su resistencia es independiente de la intensidad. No obstante, dado que hay muchas sustancias que no cumplen con la ley de Ohm, cabe consignar que esta ley expresa una característica particular de ciertas sustancias y no una propiedad general de la materia *(ver figura 76)*.

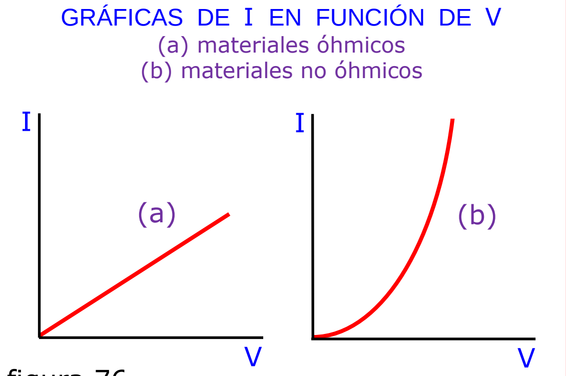


figura 76

La unidad del SI de *resistencia* es el *ohmio* (Ω), siendo 1 Ω = 1 V/A.

La unidad del SI de *conductancia* es el *siemens* (S), siendo 1 S = 1 A/V.

Las *resistencias* que tienen un *valor fijo*, se representan por el símbolo de la *figura 77a*. Una *resistencia variable* se denomina *reóstato* y se representa por cualquiera de los símbolos de las *figuras 77b/c*. Las porciones del circuito que tienen *resistencia despreciable*, se representan por *líneas rectas*.

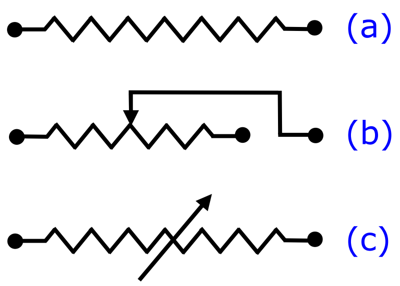


figura 77

La resistencia de un conductor homogéneo de sección constante está dada por la ecuación (98), donde la resistencia es directamente proporcional a la longitud del conductor e inversamente proporcional a su sección transversal. Si el conductor tiene una longitud igual a la unidad y una sección también unidad, la resistencia R y la resistividad ρ son numéricamente iguales. Por lo tanto, la resistividad de una sustancia es igual numéricamente a la resistencia de una muestra de longitud y sección igual a la unidad.

En el SI, donde la unidad de longitud es el metro y la unidad de superficie el metro cuadrado, la unidad de resistividad es el ohmio-metro (Ω.m). *La resistividad de una sustancia en ohmios-metro es numéricamente igual a la resistencia en ohmios entre*

las caras opuestas de un cubo de dicha sustancia de un metro de arista.
La unidad SI de conductividad es el siemens por metro (S/m = $[\Omega.m]^{-1}$).
De la definición de resistividad resulta evidente que las sustancias que tienen *resistividades grandes* son malos conductores o buenos aisladores. Inversamente, las sustancias de *pequeña resistividad* son buenos conductores. Un aislador perfecto tendría una resistividad infinita *($\rho = \infty$)* y un conductor perfecto tendría una resistividad cero *($\rho = 0$)*. Existen grandes diferencias entre las resistividades de las distintas sustancias, las cuales pueden en general agruparse en tres clases: *conductores*, *semiconductores* y *aisladores* *(ver tabla siguiente)*.
Los *semiconductores* tienen *resistividades intermedias* entre las de los metales y las de los aisladores. Estos materiales son importantes en virtud de la manera en que la temperatura y la presencia de *pequeñas cantidades de impurezas* influyen en su resistividad.

RESISTIVIDADES A TEMPERATURA AMBIENTE (20 ºC)					
MATERIAL	ρ (Ω.m)	MATERIAL	ρ (Ω.m)	MATERIAL	ρ (Ω.m)
CONDUCTORES		Plomo	$22x10^{-8}$	**AISLANTES**	
Plata	$1,47x10^{-8}$	Mercurio	$95x10^{-8}$	Ámbar	$5x10^{14}$
Cobre	$1,72x10^{-8}$	Manganina (∗)	$44x10^{-8}$	Vidrio	$10^{10}/10^{14}$
Oro	$2,44x10^{-8}$	Constantán (∗)	$49x10^{-8}$	Lucita	$>10^{13}$
Aluminio	$2,75x10^{-8}$	Nicromo (∗)	$100x10^{-8}$	Mica	$10^{11}/10^{15}$
Tungsteno	$5,25x10^{-8}$	**SEMICONDUCTORES**		Cuarzo (fundido)	$75x10^{16}$
Hierro	$10x10^{-8}$	Germanio puro	0,60	Azufre	10^{15}
Latón (∗)	$7x10^{-8}$	Silicio puro	2.300	Teflón	$>10^{13}$
Platino	$11x10^{-8}$	Selenio puro	10^{4}	Madera	$10^{8}/10^{11}$

(∗) *aleaciones*

Las variaciones de la estructura cristalina de un *metal* debidas a tratamientos térmicos, deformaciones mecánicas o impurezas aleadas con el metal, pueden tener un efecto muy pronunciado sobre su resistividad *(la resistividad del cobre comercial recocido es de 1,72 x 10^{-8}* Ω.m *y la del cobre estirado, a la misma temperatura, es de 1,77 x 10^{-8}* Ω.m*)*. La resistividad del *bismuto* aumenta cuando éste se encuentra en un campo magnético, lo cual proporciona un método adecuado para la medida de dicho campo. La resistividad del *selenio metálico* disminuye cuando se ilumina el metal, debido a que la luz libera electrones dentro del metal y lo hace mejor conductor.

La *resistividad* de todas las *sustancias conductoras* varía con la *temperatura*. La *figura*

VARIACIÓN DE LA RESISTIVIDAD DE UN METAL CON LA TEMPERATURA

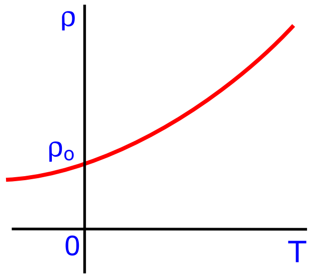


figura 78

78 muestra una gráfica de la *resistividad* en función de la *temperatura*, para un *conductor metálico*. La curva puede representarse satisfactoriamente por una ecuación de la forma $\rho = \rho_0 + a\,(T - T_0) + b\,(T - T_0)^2 + \cdots$, siendo: ρ la *resistividad a la temperatura T*, ρ_0 la *resistividad a la temperatura de referencia T_0* y a, b, etc., *constantes características de cada sustancia*. Para *temperaturas no demasiado grandes y dentro de un intervalo de ± 100 ºC (aprox.)*, pueden despreciarse los términos en T^2 y potencias superiores, quedando $\rho = \rho_0 + a\,(T - T_0)$. *Pero resulta ventajoso poner esta ecuación en la forma* $\Rightarrow$ $\rho = \rho_0 + \dfrac{\rho_0\, a\,(T - T_0)}{\rho_0}$

o bien $\Rightarrow$ $\boxed{\rho = \rho_0[1 + \alpha_0(T - T_0)]}$ *(100)*

donde $\Rightarrow$ $\boxed{\alpha_0 = \dfrac{a}{\rho_0} = \dfrac{\rho - \rho_0}{\rho_0\,(T - T_0)}}$ *coeficiente de variación de la resistividad con la temperatura (ºC^{-1})*

Puesto que la resistencia de un conductor dado es proporcional a su resistividad, la ecuación *(100)* puede también escribirse:

$$\boxed{R = R_0[1 + \alpha_0(T - T_0)]} \qquad (101)$$

donde R_0 es la resistencia a la temperatura de referencia T_0 *(generalmente 0ºC o 20ºC)* y R la resistencia a la temperatura T. En la tabla siguiente están indicados los coeficientes de temperatura de algunas sustancias corrientes.

COEFICIENTES DE TEMPERATURA DE LA RESISTIVIDAD *(valores a la temperatura ambiente de 20ºC)*			
MATERIAL	α (ºC^{-1})	MATERIAL	α (ºC^{-1})
Plata	0,0038	Plomo	0,0043
Cobre	0,00393	Mercurio	0,00088
Aluminio	0,0039	Manganina	0,000000
Tungsteno	0,0045	Constantán	0,000002
Hierro	0,0050	Nicromo	0,0004
Latón	0,0020	Carbono *(Grafito)*	−0,0005

Las resistividades de los *no metales* *(como el Grafito)* disminuyen al aumentar la temperatura y sus *coeficientes* de variación de resistividad con la temperatura son *negativos*. Esto ocurre porque a temperaturas más altas se "*sueltan*" de los átomos

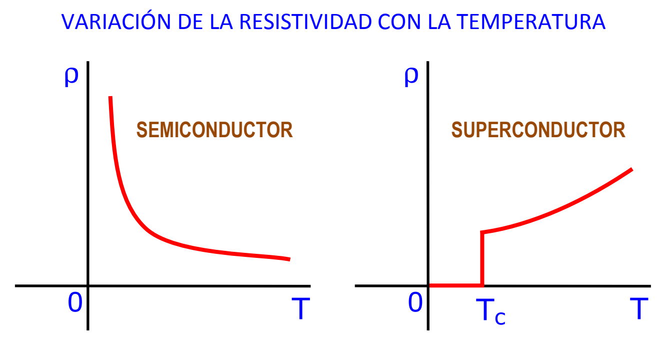


figura 79

más electrones, que se tornan móviles. Este mismo comportamiento se presenta en los *semiconductores* *(ver figura 79)*.

Los *electrolitos* tienen también *coeficientes* de temperatura *negativos*. Es decir, conducen más fácilmente a elevadas temperaturas, lo cual probablemente es debido a la disminución de su viscosidad con la temperatura, lo que ocasiona una menor oposición al transporte de iones a través de ellos.

Ciertos materiales, entre ellos varias aleaciones y óxidos metálicos, presentan un fenómeno llamado *superconductividad*. A medida que la temperatura baja, al principio la resistividad disminuye uniformemente, como la de cualquier metal. Pero luego, a cierta *temperatura crítica* T_c, se produce una transición de fase y *la resistividad desciende abruptamente a cero*, como se muestra en la *figura 79*. Una vez que se ha establecido una corriente en un anillo superconductor, continúa indefinidamente sin la presencia de campo alguno que la impulse.

La mayoría de los circuitos eléctricos usan elementos llamados *resistores* o *resistencias* para controlar la corriente en las diferentes partes del circuito. Dos tipos muy comunes son la *resistencia de material aglomerado* *(generalmente de carbono)* y la *resistencia bobinada*, que consiste en una bobina de alambre *(normalmente de alguna aleación metálica)*. Los valores de los resistores en ohmios, por lo general se indican mediante un código de bandas de colores, como se muestra en la *figura 80*.

figura 80

Medición de Intensidad de Corriente y Diferencia de Potencial:

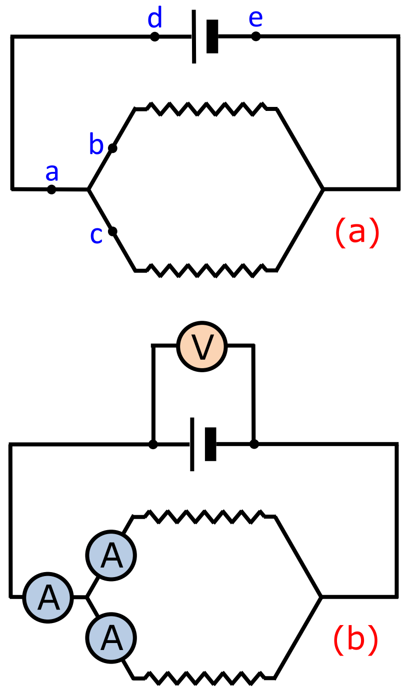


figura 81

Para medir la intensidad de una corriente en puntos tales como a, b y c de la *figura 81a*, es necesario abrir el circuito e *intercalar* el *amperímetro* en el punto, de modo que la corriente que tenga que medirse pase *a través* del aparato como se indica en la *figura 81b*.

Para medir la *diferencia de potencial* entre dos puntos tales como el d y e de la *figura 81a*, los bornes del *voltímetro* se deben conectar a dichos puntos, tal como se representa en la *figura 81b*.

Los instrumentos de medición idealizados no alteran el circuito al cual están conectados. Un *amperímetro idealizado* tiene una *resistencia cero* y ninguna diferencia de potencial entre sus bornes. Un *voltímetro idealizado* tiene una *resistencia infinita* y mide la diferencia de potencial sin desviar ninguna corriente a través de él. *Siendo que los instrumentos de medición actúan como parte de los circuitos a los cuales están conectados, es importante recordar estas propiedades teniendo en cuenta que las condiciones ideales no son habituales y por lo tanto puede ser necesario efectuar correcciones a las lecturas, salvo que estas correcciones puedan considerarse despreciables (Sin embargo, cabe aclarar que, como consecuencia del vertiginoso avance desplegado por la electrónica digital, ha sido posible desarrollar instrumentos de medición de características cuasi ideales y de costo relativamente bajo).*

Ejercicio Nº 50: Un hilo conductor transporta una corriente constante de 15 amperios. ¿Cuántos electrones pasan a través de una sección del hilo en 30 segundos?

$$i = \frac{q}{t} \quad \Rightarrow \quad q = i\,t = 15\,A \times 30\,s = 450\,C$$

$$N = \frac{q}{e} = \frac{450\,C}{1{,}6 \times 10^{-19}\,C} = 2{,}8 \times 10^{21}\ electrones\ cada\ 30\ segundos$$

Ejercicio Nº 51: Un amperímetro sensible puede medir una corriente del orden de 10^{-10} amperios *(una diezmilésima de microamperio)*. a) ¿Cuántos electrones atraviesan, por segundo, una sección de un conductor por el cual circula una corriente de este valor? b) Siendo el conductor de cobre, que tiene 8,5 x 10^{28} electrones libres por metro cúbico, ¿cuál será la velocidad de desplazamiento de los electrones en el mismo, si su sección transversal es de 1 mm^2? c) ¿Cuánto tiempo se requiere, por término medio, para que un electrón avance una distancia de 1 cm a lo largo del conductor?

a) $i = \dfrac{q}{t} \quad \Rightarrow \quad q = i\,t = 10^{-10} A \times 1\,s = 10^{-10}\,C$

$$N = \frac{q}{e} = \frac{10^{-10}\,C}{1{,}6 \times 10^{-19}\,C} = 625 \times 10^{6}\ electrones\ cada\ segundo$$

b) $i = n\,e\,v\,A \quad \Rightarrow \quad v = \dfrac{i}{n\,e\,A} = \dfrac{10^{-10} A}{(8{,}5 \times 10^{28}\,/m^3)(1{,}6 \times 10^{-19}\,C)(10^{-6}\,m^2)}$

$$v = 7{,}353 \times 10^{-15}\,m/s$$

No confundir n *(electrones libres por m3 de conductor)* con
N *(electrones que atraviesan una sección durante un tiempo determinado).*

c) $v = \dfrac{L}{t} \quad \Rightarrow \quad t = \dfrac{L}{v} = \dfrac{0{,}01\,m}{7{,}353 \times 10^{-15}\,m/s} = 1{,}36 \times 10^{12}\,s \ \cong\ 43 \times 10^{3}\ años$

Ejercicio Nº 52: Un conductor de cobre de 70 cm de largo y 2 mm de diámetro, transporta 5,85 amperios. ¿Cuánto tiempo le toma a un electrón recorrer este conductor a lo largo?

$$v = \frac{i}{n\,e\,A} = \frac{5{,}85\,A}{(8{,}5 \times 10^{28}\,/m^3)(1{,}6 \times 10^{-19}\,C)\left[\frac{\pi}{4}(2 \times 10^{-3})^2\,m^2\right]} = 1{,}37 \times 10^{-4} m/s$$

$$t = \frac{L}{v} = \frac{0{,}7\,m}{1{,}37 \times 10^{-4}\,m/s} = 5.109\,s \ \cong\ 85\,min$$

Ejercicio Nº 53: ¿Cuál es la intensidad del campo eléctrico en un conductor de cobre *(ρ = 1,72 x 10^{-8} s/tabla de pág. 106)* de 1 cm de diámetro, que transporta una corriente de 200 amperios?

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{1{,}72 \text{ x } 10^{-8}} = 5{,}81 \times 10^{7}\ \ S/m$$

$$J = \frac{i}{A} = \frac{200\,A}{\frac{\pi}{4}(10^{-2})^2\,m^2} = 2{,}546 \times 10^{6}\ \ A/m^2$$

$$E = \frac{J}{\sigma} = \frac{2{,}546 \times 10^{6}\ \ A/m^2}{5{,}81 \times 10^{7}\ \ S/m} = 4{,}38 \times 10^{-2}\ \ V/m$$

Ejercicio Nº 54: En un ensayo realizado a temperatura ambiente, fluye una corriente de 0,8 amperios por un conductor de 3 mm de diámetro. Hallar la magnitud del campo eléctrico en el conductor, si éste es de: a) tungsteno; b) aluminio.

a) $$E = \frac{J}{\sigma} = \frac{\rho I}{A} = \frac{(5{,}25 \times 10^{-8}\ \Omega.m)\ 0{,}8\ A}{\frac{\pi}{4}(3 \times 10^{-3})^2\ m^2} = 5{,}94 \times 10^{-3}\ V/m$$

b) $$E = \frac{J}{\sigma} = \frac{\rho I}{A} = \frac{(2{,}75 \times 10^{-8}\ \Omega.m)\ 0{,}8\ A}{\frac{\pi}{4}(3 \times 10^{-3})^2\ m^2} = 3{,}11 \times 10^{-3}\ V/m$$

Ejercicio Nº 55: ¿Cuál es la diferencia de potencial entre dos puntos del conductor del ejercicio Nº 53, distantes 100 m?

$$V_{ab} = E \times d = (4{,}38 \times 10^{-2}\ V/m) \times 100\ m = 4{,}38\ V$$

La resolución más corriente consiste en lo siguiente:

$$R = \rho\frac{L}{A} = (1{,}72 \times 10^{-8}\ \Omega.m)\ \frac{100\ m}{\frac{\pi}{4}(10^{-2})^2\ m^2} = 0{,}0219\ \Omega$$

$$V_{ab} = R \times i = 0{,}0219\ \Omega \times 200\ \mathrm{A} = 4{,}38\ V$$

Ejercicio Nº 56: Calcular: a) La resistencia de un hilo de cobre de 3 km de longitud y 78,54 mm^2 de sección. b) La diferencia de potencial entre los puntos extremos del mismo conductor, cuando circula una corriente de 37 amperios.

$$R = \rho\frac{L}{A} = (1{,}72 \times 10^{-8}\ \Omega.m)\ \frac{3.000\ m}{78{,}54 \times 10^{-6}\ m^2} = 0{,}657\ \Omega$$

$$V_{ab} = R \times i = 0{,}657\ \Omega \times 37\ \mathrm{A} = 24{,}3\ V$$

Ejercicio Nº 57: Una lámpara incandescente alimentada por una batería tiene un filamento de tungsteno. Cuando se cierra el interruptor y la temperatura es de 20 ºC, la corriente en el filamento es de 0,86 amperios. Después que la lámpara ha permanecido encendida durante 30 segundos, la corriente es de 0,22 amperios. ¿Cuál es la temperatura del filamento en ése momento?

Según la ley de Ohm, la resistencia de un conductor es inversamente proporcional a la corriente:

$$\frac{i_0}{i} = \frac{R}{R_0} = \frac{\rho}{\rho_0} = \frac{0{,}86\ A}{0{,}22\ A} = 3{,}909$$

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha\,\Delta T) \quad \Longrightarrow \quad \frac{\rho}{\rho_0} = 1 + \alpha(T - T_0) \quad \Longrightarrow \quad T = \frac{\frac{\rho}{\rho_0} - 1}{\alpha} + T_0$$

$$T = \frac{3{,}909 - 1}{0{,}0045\ °C^{-1}} + 20\ °C = 666\ °C$$

Ejercicio Nº 58: La resistencia de las bobinas de excitación de un motor, medida a 20 ºC, resultó ser 54 Ω. Se midió de nuevo la resistencia después de haber funcionado el motor y se encontró que era 60 Ω. Si los devanados son de hilo de cobre, ¿qué temperatura han alcanzado las bobinas?

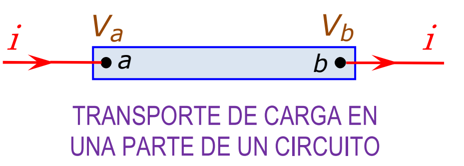
$$R = R_0(1 + \alpha\,\Delta T) \;\Longrightarrow\; \frac{R}{R_0} = 1 + \alpha(T - T_0) \;\Longrightarrow\; T = \frac{\frac{R}{R_0} - 1}{\alpha} + T_0$$

$$T = \frac{\frac{60\ \Omega}{54\ \Omega} - 1}{0{,}00393\ °C^{-1}} + 20\ °C = 48{,}27\ °C$$

Ley de Joule:

Cuando circula una corriente en un conductor, los electrones libres ganan energía cinética durante las trayectorias entre dos choques. En cada choque, ceden a las partículas fijas la misma cantidad de energía que habían ganado. La energía adquirida por las partículas fijas aumenta la amplitud de su vibración, o sea que se convierte en calor.

figura 82



Para deducir la *cantidad de calor* desarrollada en un *conductor* por *unidad de tiempo*, hallaremos primero la expresión general de la potencia suministrada a una parte cualquiera de un circuito eléctrico. El rectángulo de la *figura 82*, representa una parte de un circuito en el cual hay una *corriente (convencional) i* que circula de izquierda a derecha. V_a y V_b son los *potenciales* en los bornes *a* y *b*. La naturaleza del circuito comprendido entre *a* y *b* puede ser cualquiera, un conductor, un resistor, un motor, un generador, una batería o una combinación de estos elementos. La *potencia suministrada* depende únicamente, según demostraremos, de los valores y sentidos relativos de la *corriente* y de la *diferencia de potencial* entre los bornes.

En un intervalo de *tiempo dt*, entra por el borne *a* una *cantidad de carga dq = i dt* y la misma cantidad sale por el borne *b* en igual tiempo. Ha habido así un *transporte* de la *carga dq* desde un *potencial* V_a hasta un *potencial* V_b. La *energía dW cedida por la carga* es:

$$dW = dq\,(V_a - V_b) = i\,dt\,V_{ab}$$

y la cantidad de energía cedida por unidad de tiempo, o sea la POTENCIA P suministrada:

$$\boxed{P = \frac{dW}{dt} = i\, V_{ab}} \qquad (102)$$

Esto es, la potencia es igual al producto de la intensidad por la diferencia de potencial. En el SI, la unidad de potencia es el vatio (W). $1\ W = 1\ J/s$.

La ecuación (102) es una relación perfectamente general que se cumple cualquiera que sea la naturaleza de los elementos del circuito que estén situados entre a y b. Más adelante volveremos sobre esto.

Para el caso especial en que el circuito comprendido entre a y b es una resistencia pura R, toda la energía suministrada se convierte en calor y la diferencia de potencial V_{ab} está dada por:

$$V_{ab} = i\, R$$

Por consiguiente:

$$P = i\, V_{ab} = i \times i\, R$$

o bien:

$$\boxed{P = i^2\, R = \frac{V_{ab}^2}{R}} \qquad (103)$$

Para hacer evidente más categóricamente que, en este caso especial, la energía aparece en forma de calor, podemos poner $P = dQ/dt$, siendo dQ la cantidad de calor producida en el tiempo dt. La ecuación (103) se convierte entonces en:

$$\boxed{\frac{dQ}{dt} = i^2\, R} \qquad (104)$$

Si el conductor es lineal por ser R independiente de i, la ecuación (104) expresa que la cantidad de calor producida por segundo es directamente proporcional al cuadrado de la intensidad de la corriente. Este hecho fue descubierto experimentalmente por Joule en el transcurso de sus medidas del equivalente mecánico del calor y se conoce con el nombre de ley de Joule. Naturalmente, sólo es ley en el mismo sentido que la ley de Ohm, es decir, expresa una cualidad especial de ciertas sustancias y no una propiedad general de la materia.

La cantidad de calor desarrollada por segundo en un conductor no equivale al aumento de temperatura por segundo del mismo, ya que este último depende del calor específico del conductor y de la cantidad de calor que pueda escapar por segundo del mismo, por conducción, *convección y radiación. La temperatura de un conductor que transporta una corriente se elevará hasta que la cantidad de calor perdida por segundo se haga igual a la cantidad de calor desarrollada por segundo, después de lo cual la temperatura permanece constante. Así, cuando se cierra un circuito a través de una lámpara de incandescencia, la temperatura del filamento se eleva hasta alcanza un equilibrio entre la cantidad de calor perdido y la cantidad de calor desarrollado. Por el contrario, un fusible se construye de modo que cuando la intensidad de corriente exceda cierto valor prefijado, el mismo se funda antes de alcanzar la temperatura de equilibrio.*

Ejercicio Nº 59: La resistencia de una estufa eléctrica que tiene aplicada una diferencia de potencial de 220 voltios entre sus extremos, emite energía térmica a razón de 750 vatios *(julios/segundo)*. a) ¿Cuál es su resistencia? b) ¿Cuál es la corriente en la resistencia? c) Si la diferencia de potencial desciende a 110 voltios, ¿cuánta energía térmica por segundo emitirá esta resistencia? *(supondremos que la resistencia es constante, ya que la misma cambiará algo a causa de la variación de temperatura)*.

a) $$P = \frac{V_{ab}^2}{R} \quad \Longrightarrow \quad R = \frac{V_{ab}^2}{P} \quad \Longrightarrow \quad R = \frac{220^2}{750} = 64{,}53\ \Omega$$

b) $$V_{ab} = i\,R \quad \Longrightarrow \quad i = \frac{V_{ab}}{R} = \frac{220}{64{,}53} = 3{,}41\ A$$

$$también:\quad P = i^2\,R \quad \Longrightarrow \quad i = \sqrt{P/R} = \sqrt{750/64{,}53} = 3{,}41\ A$$

c) $$P = \frac{V_{ab}^2}{R} = \frac{110^2}{64{,}53} = 187{,}51\ W$$

Fuerza Electromotriz:

Todos los circuitos eléctricos requieren una *fuente externa de energía* para mover una *carga eléctrica* a través de ellos. Por ello, el circuito debe contener un dispositivo que mantenga la *diferencia de potencial entre dos puntos*, del mismo modo que el fluido circulante necesita de una bomba que mantenga una diferencia de presión entre dos puntos. El dispositivo que realiza esta función en un circuito eléctrico se denomina *fuente* o *generador* de FUERZA ELECTROMOTRIZ.

Las baterías, los generadores de las plantas de energía, las celdas solares, las pilas termoeléctricas, las celdas de combustible, etc., son ejemplos de fuentes de fuerza electromotriz. Todos estos dispositivos convierten *energía de alguna forma (mecánica, química, térmica, etc.)* en *energía potencial eléctrica* y la transfieren al circuito al cual