CAPÍTULO

27

Corrientes eléctricas y la ley de Ohm

27.1 La corriente eléctrica

27.2 Resistencia y la ley de Ohm

27.3 Resistividad de los materiales

27.4 Combinaciones de resistencias

CONCEPTOS EN CONTEXTO

Concep — en — contex

La electricidad que se usa para energizar electrodomésticos y aparatos electrónicos implica el movimiento de cargas, o corriente, que llega a los hogares a lo largo de un cable eléctrico, pasando por los conductores y aparatos, y saliendo de regreso. Los electrodomésticos, y hasta los alambres y cables ordinarios, presentan una oposición al flujo de la carga, que se llama resistencia. Hay alambres y cables especiales, llamados superconductores, que no ofrecen resistencia al flujo de cargas.

Al aprender acerca de la corriente y la resistencia en este capítulo será posible examinar preguntas como:

? Para una corriente conocida, ¿cuánta carga total pasa en determinada cantidad de tiempo? (Ejemplos 1 y 2, páginas 860-861)

? ¿Cómo se mide la resistencia de un tramo de cable? (Ejemplo 3, página 867)

? ¿Cuánto cambia la resistencia de un tramo de alambre al variar la temperatura? (Sección 27.3, página 877, y ejemplo 6, página 870)

? ¿Cómo decidir si es seguro conectar varios electrodomésticos en el mismo circuito? (Ejemplo 10, página 877)

En condiciones estáticas, dentro de un conductor no existe campo eléctrico. Pero, si de repente se depositan cantidades opuestas de carga eléctrica en los extremos de un conductor metálico largo, como cuando un cable de cobre se conecta a las placas opuestas de un capacitor (véase la figura 27.1), entonces, el conductor no estará en equilibrio electrostático, y las cargas generarán un campo eléctrico a lo largo y dentro del conductor (véanse las figuras 27.2 y 27.3). Este campo eléctrico impulsa las cargas una contra otra. Cuando las cargas se encuentran, se anulan y entonces desaparece el campo eléctrico: el conductor llega al equilibrio.

Para un buen conductor, como el cobre, la llegada al equilibrio es bastante rápida; por lo general, el tiempo necesario para alcanzar el equilibrio es una fracción muy pequeña de segundo. Sin embargo, se puede evitar en forma permanente que un conductor llegue al equilibrio si en forma continua se suministra más carga eléctrica a sus extremos. Por ejemplo, se pueden conectar los dos extremos de un alambre de cobre a las terminales de un acumulador o de un generador eléctrico. Las terminales de esos aparatos funcionan como fuente y sumidero de carga eléctrica, del mismo modo que la descarga y la succión de una bomba funcionan como fuente y sumidero de agua. Bajo las condiciones anteriores, la carga eléctrica pasará en forma continua, de una terminal hacia la otra. Ese flujo de carga eléctrica se llama corriente eléctrica. En este capítulo se examinarán algunas de las propiedades generales de las corrientes eléctricas, y en el siguiente se describirán las partes internas de baterías, generadores y otras "bombas" que sirven para mantener corrientes eléctricas.

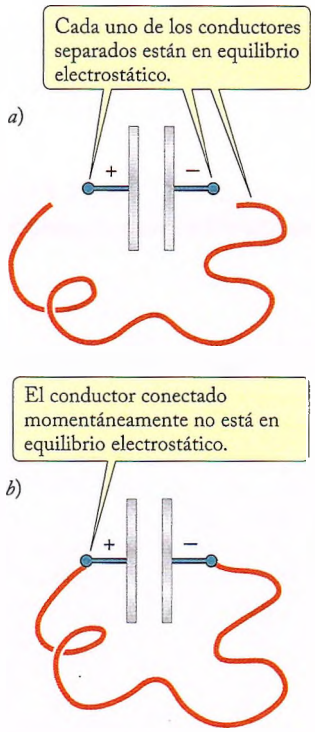


FIGURA 27.1 *a)* Un capacitor cargado y un tramo separado de alambre de cobre. *b)* Repentinamente se conectan los extremos del alambre a las placas del capacitor. Ahora, el alambre y las placas forman un solo conductor, con cantidades opuestas de carga en sus extremos.

27.1 LA CORRIENTE ELÉCTRICA

Cuando un conductor se conecta con las dos terminales de un acumulador o un generador, las cargas eléctricas son impulsadas de un extremo del alambre al otro, por el campo eléctrico que existe a lo largo y dentro del alambre. La mayor parte de las líneas de campo se originan en las terminales del acumulador o generador, pero algunas se originan en cargas que se han acumulado en el alambre mismo. Como muestran las figuras 27.2 y 27.3, las líneas de campo tienden a concentrarse dentro del conductor, y tienden a seguir por el conductor. Si el conductor no tiene deformaciones pronunciadas, las líneas de campo se distribuyen uniformemente en la sección transversal del

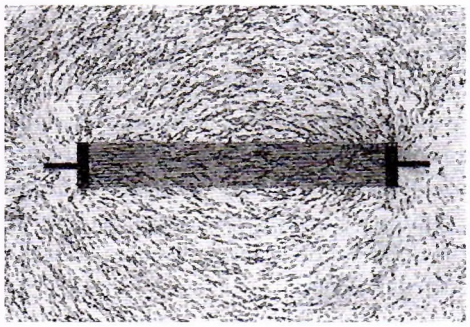


FIGURA 27.2 Líneas de campo eléctrico dentro y cerca de un conductor recto; no están en equilibrio. El conductor es una banda de pintura metálica sobre una superficie de papel. Las líneas de campo se hicieron visibles rociando semillas de pasto sobre el papel.

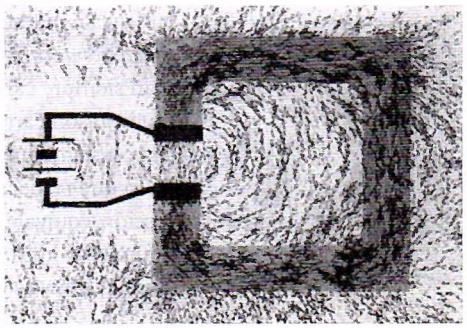


FIGURA 27.3 Líneas de campo eléctrico dentro y cerca de un conductor rectangular que lleva una corriente eléctrica.

conductor. Por ejemplo, si el conductor es un alambre más o menos recto, de grosor uniforme, el campo eléctrico dentro de él tendrá magnitud constante, y tendrá una dirección paralela al conductor. Si el tramo de alambre tiene longitud l, y si la batería o el generador mantienen una diferencia de potencial ΔV entre sus extremos, la magnitud de ese campo eléctrico constante en el alambre es [compárese con la ecuación (25.7)]

campo eléctrico en el conductor

$$E = \frac{\Delta V}{l} \tag{27.1}$$

Este campo eléctrico produce el flujo de carga, o **corriente eléctrica**, de uno de los extremos del alambre hacia el otro. Antes de investigar la dependencia entre la corriente y el campo eléctrico, se debe contar con una definición precisa de corriente. Suponga que en un tiempo Δt, pasa una cantidad de carga ΔQ por un punto determinado del alambre (por ejemplo, uno de sus extremos). *La corriente eléctrica se define como la carga que pasa dividida entre el tiempo*:

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \tag{27.2}$$

Si el flujo no es constante, se define la corriente en términos de la pequeña cantidad de carga dq que pasa por un lugar en un pequeño intervalo de tiempo dt; es decir, la razón instantánea

corriente eléctrica

$$I = \frac{dq}{dt} \tag{27.3}$$

Se observa que si la superficie del alambre no permite fugas (un buen aislamiento), para la conservación de la carga eléctrica se requiere que *la corriente sea igual en todo punto* a lo largo del alambre; es decir, la corriente no es más que la razón con la que la carga entra al alambre en uno de sus extremos, o la razón con la que sale la carga por el otro extremo.

La unidad SI de la corriente es el **ampere** (A); es un flujo de carga de un coulomb por segundo:

ampere (A)

$$1 \text{ ampere} = 1 \text{ A} = 1 \text{ C/s} \tag{27.4}$$

En la tabla 27.1 (página 862) se ven los valores de algunas corrientes.

En los conductores metálicos, los portadores de carga son los electrones; una corriente en un metal no es más que el flujo de electrones. En los electrolitos, como el agua salada, los portadores de carga son iones positivos, iones negativos o ambos; en esos conductores, la corriente es un flujo de iones. Para tener uniformidad matemática, siempre que haya necesidad de indicar la dirección de la corriente a lo largo de un conductor, en física e ingeniería *se adopta la convención de que la corriente tiene la dirección de un flujo hipotético de carga positiva*. Eso quiere decir que se pretende que las cargas que se mueven sean siempre cargas positivas. Naturalmente, en realidad en los metales las cargas que se mueven son cargas negativas (electrones), por lo que en la convención anterior se asigna a la corriente una dirección opuesta a la del movimiento real de las cargas. Sin embargo, en lo que respecta a la transferencia de carga, el transporte de carga negativa en una dirección equivale a la transferencia de carga positiva en la dirección contraria (véase la figura 27.4). La convención para identificar la dirección de la corriente como la dirección de flujo de cargas positivas aprovecha esta equivalencia.

Conceptos en contexto

EJEMPLO 1 En un faro de automóvil, pasa por el filamento del bulbo una corriente de 8.0 A. ¿Cuánta carga eléctrica pasa por el filamento en un minuto? ¿Cuántos electrones?

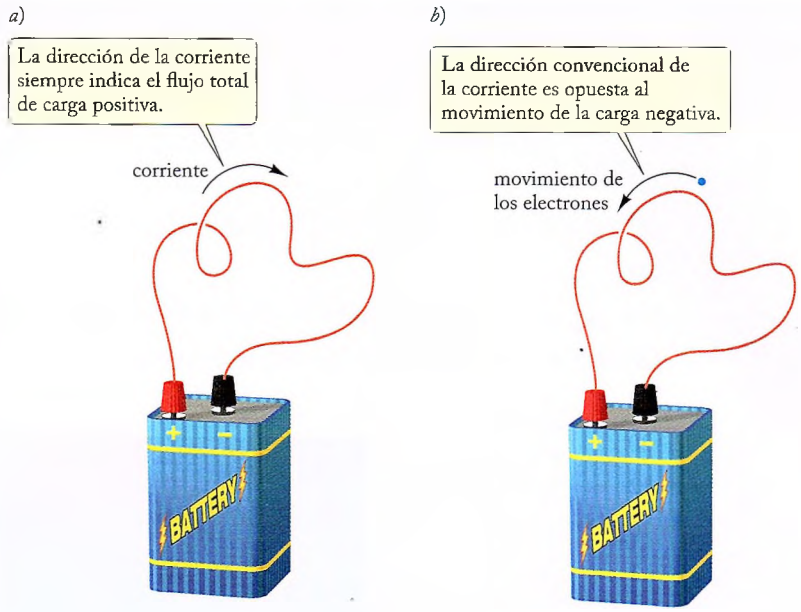


FIGURA 27.4 Flujo de carga en un alambre conectado con una batería. *a)* Movimiento de cargas positivas hipotéticas de la terminal positiva a la terminal negativa. *b)* El movimiento real de los electrones en el alambre, de la terminal negativa a la positiva. Los movimientos ilustrados en *a)* y *b)* son equivalentes, porque ambos transfieren carga positiva hacia la terminal negativa, y carga negativa hacia la terminal positiva. De acuerdo con la convención, se supone que la dirección de la corriente es de la terminal positiva hacia la negativa, aun cuando el movimiento real de los electrones sea lo contrario.

SOLUCIÓN: La cantidad de carga que pasa por el filamento en 1.0 min es, de acuerdo con la ecuación (27.2),

$$\Delta Q = I\,\Delta t = 8.0\text{ A} \times 1.0\text{ min} = 8.0\text{ A} \times 60\text{ s} = 480\text{ C}$$

Una carga de 480 C que pasa por el bulbo en una dirección equivale a una carga electrónica de −480 C pasando en dirección contraria. La cantidad de electrones es igual a la carga total dividida entre la carga del electrón:

$$[\text{número de electrones}] = \frac{-480\text{ C}}{-e} = \frac{-480\text{ C}}{-1.6 \times 10^{-19}\text{ C}} = 3.0 \times 10^{21}\text{ electrones}$$

EJEMPLO 2 Los superconductores pueden conducir grandes corrientes sin oposición, pero para evitar daños, esas corrientes deben cambiar en forma gradual. Por ejemplo, el suministro eléctrico de un imán superconductor suministra una corriente que comienza desde cero en el momento $t = 0$, y aumenta continuamente al paso del tiempo, con una razón constante de 0.080 A/s. ¿Cuánto tarda la corriente en alcanzar el valor de 60 A? En el instante en que la corriente llega a 60 A, ¿cuánta carga total ha pasado por el imán?

Conceptos en contexto

SOLUCIÓN: Como se conoce la razón constante de aumento de la corriente, el tiempo para llegar a 60 A se obtiene dividiendo el valor final entre la razón:

$$\Delta t = \frac{\Delta I}{\Delta I/\Delta t} = \frac{60\text{ A}}{0.080\text{ A/s}} = 750\text{ s}$$

La carga se puede obtener al ordenar la ecuación (27.3), despejando dq:

$$dq = I\,dt$$

para entonces integrar las contribuciones variables dq y obtener la carga total q que ha pasado:

$$q = \int dq = \int_0^{\Delta t} I\,dt \qquad (27.5)$$

TABLA 27.1 ALGUNAS CORRIENTES

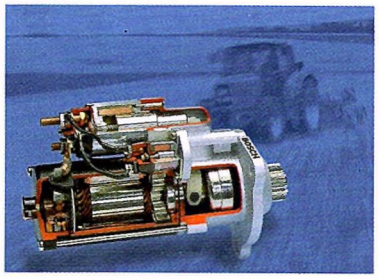
Rayo *a)*	10^4 A
Línea de transmisión en alta tensión *b)*	10^3
Transformador grande *c)*	10^3
Electroimán grande	200
Motor de arranque de un automóvil *d)*	100
Alternador de un automóvil	30
Falla de un fusible	30
Tratamiento desfibrilador del corazón	20
Acondicionador de aire	12
Secadora de cabello	10
Foco ordinario	1
Foco de linterna	0.5
Fibrilación letal del corazón	0.1
Apenas perceptible en la piel	1×10^{-3}
Calculadora electrónica *e)*	1×10^{-4}
Microscopio de barrido de efecto túnel	1×10^{-12}

a)

b)

c)

d)



e)

Cuando la rapidez de cambio es constante, la corriente I no es más que la razón de cambio multiplicada por el tiempo t, $I = (0.080\ \text{A/s}) \times t$, así que

$$q = \int_0^{\Delta t} (0.080\ \text{A/s}) \times t\, dt = (0.080\ \text{A/s})\left(\frac{t^2}{2}\right)\Big|_0^{\Delta t}$$

$$= (0.080\ \text{A/s})\left[\frac{(\Delta t)^2}{2} - 0\right] = (0.040\ \text{A/s})(\Delta t)^2$$

La expresión se evalúa con $\Delta t = 750$ s, y resulta

$$q = 0.040\ \text{A/s} \times (750\ \text{s})^2 = 22\,500\ \text{C} = 2.3 \times 10^4\ \text{C}$$

Revisión 27.1

PREGUNTA 1: El flujo de una corriente eléctrica en un alambre es análogo al flujo de agua por un tubo. Sin embargo, si se corta el tubo el agua continúa fluyendo y se derrama. ¿Continúan fluyendo los electrones si se corta un alambre que conduce una corriente? ¿Se derraman? ¿Por qué sí o por qué no?

PREGUNTA 2: Suponga que un alambre no tiene sección transversal uniforme (es más grueso en unas partes que en otras). Si al alambre entra una corriente eléctrica de 5 A por un extremo ¿es la corriente siempre 5 A a lo largo de este alambre, aun cuando el alambre sea grueso?

PREGUNTA 3: En un relámpago (véase la figura 22.13), la corriente eléctrica tiene la dirección hacia arriba, del suelo hacia la nube de tormenta. ¿Cuál es la dirección del campo eléctrico en este rayo? ¿Cuál es la dirección de movimiento de los electrones que forman esta corriente?

PREGUNTA 4: Supóngase que algunas corrientes consisten en cargas elementales móviles, tanto positivas como negativas, como muestra la figura 27.5. ¿Cuál de las corrientes tiene la mayor magnitud? ¿Y la menor magnitud? (Supóngase que todas las velocidades son iguales.)

(A) *a*), *b*) (B) *a*), *c*) (C) *b*), *c*) (D) *c*), *a*) (E) *c*), *b*)

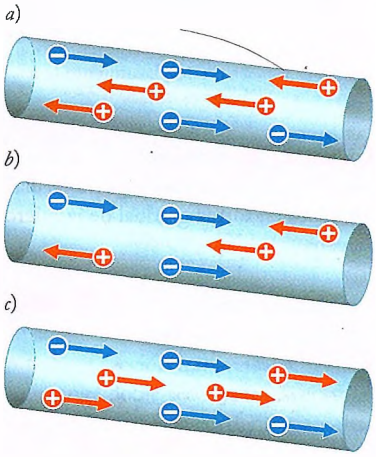


FIGURA 27.5 Varios movimientos de cargas positivas y negativas. Todas las cargas tienen la misma magnitud y la misma velocidad.

27.2 RESISTENCIA Y LA LEY DE OHM

Se examinará con detalle el comportamiento de una corriente en un conductor metálico. Esta clase de conductores contienen un vasto número de electrones libres, que no están unidos a determinado átomo, sino que tienen libertad de vagar por todo el volumen del metal; por ejemplo, el cobre tiene unos 8×10^{22} electrones libres por centímetro cúbico. Esos electrones se comportan como las partículas de un gas, que se mueven libremente dentro de un recipiente. Por analogía, se dice que los electrones forman un **gas de electrones** que llena todo el volumen del metal. Naturalmente, en un conductor eléctricamente neutro, la carga negativa de los electrones libres se compensa exactamente con la carga positiva de los iones que forman la red cristalina del metal. Una corriente en este conductor metálico es sólo el flujo del gas de electrones mientras los iones permanecen en reposo.

gas de electrones

El flujo del gas de electrones a lo largo de un alambre metálico es análogo al flujo de agua por un canal que baja por una pendiente suave. En ese canal, la fuerza de gra-

vedad, al actuar sobre el agua, tiene un componente en dirección del canal; ese componente impulsa el avance del agua. Pero el agua no acelera, porque la fricción entre el agua y las paredes del canal se opone al movimiento, y el agua se mueve con una rapidez constante, porque la fricción es exactamente igual al empuje de la gravedad.

De igual manera, el campo eléctrico en el alambre impulsa el gas de electrones a lo largo del mismo. Pero el gas de electrones no acelera, porque la fricción entre el gas y la red cristalina del alambre se opone al movimiento, y el gas se mueve con rapidez constante, porque esa fricción iguala exactamente el empuje del campo eléctrico.

La analogía entre el movimiento del agua y el movimiento del gas de electrones se extiende al movimiento de las moléculas individuales de agua, y de los electrones individuales. Aunque el agua en un canal suele tener una velocidad bastante baja, quizá de pocos metros por segundo, las moléculas individuales dentro del agua tienen una rapidez bastante grande; la rapidez del movimiento térmico aleatorio de las moléculas de agua es de unos 600 m/s a la temperatura ordinaria. Pero como ese movimiento térmico está formado por zigzagueos aleatorios rápidos, que causan por igual el avance y el retroceso de la molécula, esa alta velocidad no contribuye al movimiento neto del agua pendiente abajo. La figura 27.6 muestra el movimiento de una molécula de agua en un canal; en escala microscópica, ese movimiento consiste en rápido zigzagueo, al cual se sobrepone un "arrastre" mucho más lento a lo largo del canal.

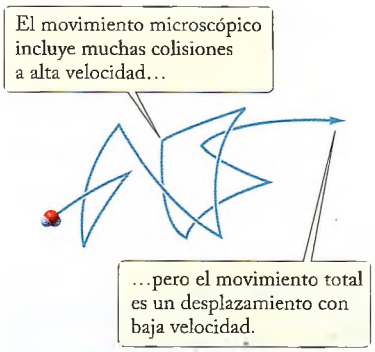


FIGURA 27.6 Trayectoria de una molécula de agua en un canal. La molécula se desplaza en forma gradual de izquierda a derecha.

De la misma manera, el gas de electrones avanza por el alambre a una rapidez bastante baja, quizá de 10^{-4} m/s, pero los electrones individuales se mueven con una rapidez mucho mayor; la rapidez del movimiento aleatorio de los electrones dentro de un metal es de unos 10^6 m/s (esta gran rapidez se debe a efectos mecánico cuánticos). Entonces, el movimiento total de un electrón en un metal consiste también en rápidos zigzagueos a los cuales se sobrepone un movimiento mucho más lento de arrastre a lo largo del alambre. En forma cualitativa, el movimiento se parece a la trayectoria de una molécula de agua, como muestra la figura 27.6, pero la cantidad de arrastre por zigzag es todavía menor que la que muestra esa figura.

La fricción entre el gas de electrones y el conductor se debe a colisiones entre electrones y los iones de la red cristalina del alambre. Un electrón que se mueve por un alambre de cobre tiene unas 10^{14} colisiones con iones por segundo. Esos choques hacen que el movimiento del electrón se produzca en zigzag. Debido a los efectos perturbadores de esas colisiones, el electrón nunca adquiere mucha velocidad por el campo eléctrico que trata de acelerarlo, y la velocidad de arrastre promedio del electrón a lo largo del alambre es baja. Las colisiones disipan la energía cinética que el electrón adquiere debido al campo eléctrico. Esa energía cinética disipada de los electrones permanece en la red cristalina, en forma de energía cinética aleatoria y energía potencial de los iones; esto es, permanece en forma de energía térmica o calor. En algunos casos, el calor producido en un alambre es tan grande que lo hace brillar. El gran brillo de un bulbo luminoso se produce en esta forma, y también el brillo rojo de las espiras en una estufa eléctrica.

El movimiento promedio de un electrón se determina examinando las pérdidas y ganancias de su cantidad de movimiento. Si la velocidad promedio, o **velocidad de arrastre** de un electrón es v_d, su cantidad de movimiento promedio es $p = m_e v_d$. Es de esperar que, en promedio, una colisión absorba toda esta cantidad de movimiento; es decir, una colisión destruya la velocidad de arrastre de avance, y deje al electrón sólo con movimiento térmico aleatorio. Eso quiere decir que, en intervalo de tiempo promedio τ (tau) entre colisiones, el electrón pierde una cantidad de movimiento $m_e v_d$. La rapidez promedio con la que el electrón pierde cantidad de movimiento en las colisiones es, entonces,

$$\left(\frac{\Delta p}{\Delta t}\right)_{\text{pérdida}} = \frac{m_e v_d}{\tau} \tag{27.6}$$

Por otra parte, la rapidez con que el electrón gana cantidad de movimiento por acción de la fuerza eléctrica es

$$\left(\frac{\Delta p}{\Delta t}\right)_{\text{ganancia}} = -eE \tag{27.7}$$

Bajo condiciones estables, la rapidez de pérdida de cantidad de movimiento debe ser igual a la rapidez de ganancia. Si se igualan los lados derechos de las ecuaciones (27.6) y (27.7), de inmediato se obtiene

$$v_d = \frac{-eE\tau}{m_e} \tag{27.8}$$

velocidad de arrastre (velocidad promedio)

Ésta es la velocidad promedio con la que avanza el gas de electrones a lo largo del conductor. Esta relación tan sólo refleja el hecho de que, si el campo eléctrico es mayor, el electrón gana más velocidad entre una colisión y la siguiente, por lo que adquiere una velocidad proporcionalmente mayor. De igual modo, si el tiempo entre colisiones es más largo, alcanza una velocidad promedio mayor.

La corriente eléctrica conducida por el alambre es proporcional a la velocidad promedio de los electrones, y por ello es proporcional al campo eléctrico. Eso se comprende al examinar la figura 27.7, donde la carga ΔQ que pasa por determinada área A se puede calcular como sigue:

$$\Delta Q = [\text{carga por electrón}] \times [\text{electrones por unidad de volumen}] \times [\text{volumen}] \tag{27.9}$$

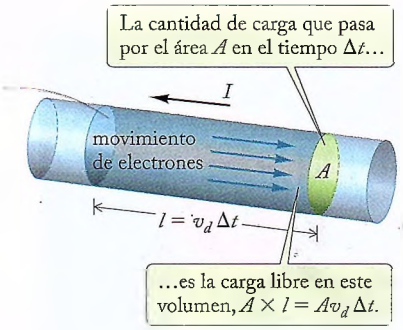


FIGURA 27.7 La corriente conducida por el alambre se distribuye uniformemente en toda su sección transversal. Un alambre que tenga doble sección transversal conduciría dos veces la corriente, con el mismo campo eléctrico.

Supóngase que el material es un metal con n electrones por unidad de volumen. En la figura 27.7 se puede ver que el volumen de la carga en movimiento que atraviesa un área transversal del alambre en el tiempo Δt es igual al área A multiplicada por la longitud l, es decir, [volumen] $= Al = Av_d\Delta t$. Así, la ecuación (27.9) se transforma en

$$\Delta Q = (-e) \times (n) \times (A\, v_d\, \Delta t)$$

Entonces, la corriente está definida por

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = -enAv_d \tag{27.10}$$

corriente de electrones libres

o bien, con la ecuación (27.8) para v_d,

$$I = \frac{ne^2\tau}{m_e}AE = \frac{1}{\rho}AE \tag{27.11}$$

donde ρ es una constante de proporcionalidad que depende de las características del material del alambre. A esta constante ρ se le llama **resistividad** del material. Es una propiedad intrínseca del *tipo de material*, pero no depende de la forma ni del tamaño del tramo particular de alambre. Es una medida de la fuerza que opone un material al paso de la carga. La ecuación (27.11) indica que la resistividad está determinada por la masa, la densidad, la carga y el tiempo promedio τ entre colisiones del electrón:

resistividad ρ

$$\rho = \frac{m_e}{ne^2\tau} \tag{27.12}$$

resistividad en función del tiempo promedio entre colisiones

La tabla 27.2 es una lista de resistividades de algunos materiales conductores.

Si $E = \Delta V/l$, de acuerdo con la ecuación (27.1), la corriente en la ecuación (27.11) es

$$I = \frac{1}{\rho}A\frac{\Delta V}{l} \tag{27.13}$$

Para el alambre de área A y longitud l, se acostumbra definir la **resistencia** R del alambre como sigue:

resistencia R en función de resistividad

$$R = \rho \frac{l}{A} \tag{27.14}$$

Así, la resistencia es directamente proporcional a la longitud e inversamente proporcional al área transversal del alambre. Entonces, la ecuación (27.13) se puede expresar en de esta sencilla manera

ley de Ohm

$$I = \frac{\Delta V}{R} \tag{27.15}$$

A esta ecuación se le llama **ley de Ohm**. Asevera que *la corriente es proporcional a la diferencia de potencial entre los extremos del conductor*. La ley de Ohm se puede escribir en tres formas útiles:

$$I = \frac{\Delta V}{R} \qquad \Delta V = IR \qquad \text{y} \qquad R = \frac{\Delta V}{I} \tag{27.16}$$

GEORG SIMON OHM (1787-1854)
Físico alemán. Formuló sus leyes con ayuda de una analogía entre la conducción de la electricidad y la conducción del calor.

Es importante tomar en cuenta que en la ecuación (27.15), la resistencia R tiene el papel de una constante de proporcionalidad; la resistencia es una medida cuantitativa de la oposición que presenta la pieza de metal al paso de la corriente. Para un alambre de área transversal uniforme, la resistencia se puede calcular con la sencilla fórmula (27.14). Pero la ley de Ohm también es válida para conductores de cualquier forma, como alambres de secciones transversales no uniformes, y en ellos se debe calcular la resistencia con una fórmula más complicada, adaptada a la forma y al tamaño del conductor (véase, por ejemplo, el problema 43).

La ley de Ohm es válida para conductores metálicos y también para muchos conductores no metálicos (carbón, por ejemplo), en los que la corriente es conducida por un flujo de electrones. También es válida para plasmas y electrolitos, en los que la corriente es conducida por un flujo tanto de electrones como de iones. Sin embargo, se

TABLA 27.2 RESISTIVIDADES Y COEFICIENTES TÉRMICOS DE RESISTENCIA DE METALES[a]

MATERIAL	ρ	α
Plata	$1.6 \times 10^{-8}\ \Omega \cdot \text{m}$	$3.8 \times 10^{-3}\ /°\text{C}$
Cobre	1.7×10^{-8}	3.9×10^{-3}
Aluminio	2.8×10^{-8}	3.9×10^{-3}
Latón	$\approx 7 \times 10^{-8}$	2×10^{-3}
Níquel	7.8×10^{-8}	6×10^{-3}
Hierro	10×10^{-8}	5×10^{-3}
Acero	$\approx 11 \times 10^{-8}$	4×10^{-3}
Constantán	49×10^{-8}	1×10^{-5}
Nicromo	100×10^{-8}	4×10^{-4}

[a] A una temperatura de 20°C.

debe tener en cuenta que a pesar de sus amplias aplicaciones, la ley de Ohm no es una ley general de la naturaleza, como la ley de Gauss, por ejemplo. En muchos materiales la ley de Ohm falla cuando la corriente es grande, y en materiales no homogéneos, como los materiales estratificados que se usan en los dispositivos semiconductores, la ley de Ohm no se aplica, aun cuando la corriente sea pequeña (de hecho, el funcionamiento de los dispositivos semiconductores se debe con frecuencia al aprovechamiento de este comportamiento no óhmico). Así, la ley de Ohm no es de aplicación universal; sólo es una afirmación acerca de las propiedades eléctricas de muchos materiales conductores.

EJEMPLO 3 Para medir la resistencia de un cable muy largo, se conecta ese alambre con las terminales de una batería de 6.0 volt, y se observa que se produce una corriente de 30 A en el alambre. ¿Cuál es la resistencia del alambre?

Conceptos en contexto

SOLUCIÓN: De acuerdo con la ley de Ohm,

$$R = \frac{\Delta V}{I}$$

Ya que la diferencia de potencial a través del alambre es $\Delta V = 6.0$ volts, y la corriente es 30 A, resulta

$$R = \frac{6.0\ \text{V}}{30\ \text{A}} = 0.20\ \text{V/A}$$

A la unidad V/A se le llama *ohm* (véase la sección 27.3); entonces, esa resistencia es 0.20 ohm.

EJEMPLO 4 En la plata hay un electrón libre por átomo. Calcular el valor del tiempo promedio entre colisiones, τ. La densidad de masa de la plata es 10.5×10^3 kg/m^3.

SOLUCIÓN: De la ecuación (27.12) se puede despejar el tiempo entre colisiones, τ, en función de las cantidades ρ, m_e, e y n, en esa ecuación. En la tabla 27.2 se ve que la resistividad de la plata es $\rho = 1.6 \times 10^{-8}$ ohm · m. Se conoce la carga e y la masa m_e del electrón, por lo que sólo es necesario calcular la densidad n del número de electrones. En la tabla periódica (apéndice 8) se ve que la masa atómica de la plata es 108 g/mol = 0.108 kg/mol. Entonces, hay $10.5 \times 10^3/0.108$ mol/m^3, y como cada mol tiene 6.02×10^{23} átomos (el número de Avogadro), hay $(10.5 \times 10^3/0.108) \times 6.02 \times 10^{23}$ átomos/m^3, cada uno con un electrón libre. La densidad del número de electrones libres es

$$n = \frac{1\ \text{electrón/átomo} \times 6.02 \times 10^{23}\ \text{átomos/mol} \times 10.5 \times 10^3\ \text{kg/m}^3}{0.108\ \text{kg/mol}}$$

$$= 5.85 \times 10^{28}\ \text{electrones/m}^3$$

Se despeja el tiempo promedio entre colisiones de la ecuación (27.12), para obtener

$$\tau = \frac{m_e}{ne^2\rho}$$

$$= \frac{9.11 \times 10^{-31}\ \text{kg}}{5.85 \times 10^{28}\ \text{electrones/m}^3 \times (1.60 \times 10^{-19}\ \text{C})^2 \times 1.6 \times 10^{-8}\ \text{ohm} \cdot \text{m}}$$

$$= 3.8 \times 10^{-14}\ \text{segundo}$$

McGraw - Hill INTERAMERICANA S.A
RDC
MUESTRA PARA EVALUACION
Prohibida su Venta

Revisión 27.2

PREGUNTA 1: Suponga que un alambre tiene sección transversal no uniforme (es más grueso en unas partes que en otras). ¿Es igual la velocidad de arrastre de los electrones en todos los puntos de este alambre?

PREGUNTA 2: Dos alambres de cobre tienen el mismo diámetro, pero uno es 3 veces más largo que el otro. ¿En cuánto aumenta su resistencia? Dos alambres de cobre tienen la misma longitud, pero uno tiene el doble de diámetro que el otro. ¿En cuánto disminuye la resistencia del más grueso?

PREGUNTA 3: Cuando un alambre delgado se conecta con las terminales de una batería de 6 V, la corriente es 0.1 A. ¿Cuál será la corriente si se conecta el mismo alambre a las terminales de una batería de 12 V? ¿De una de 18 V?

PREGUNTA 4: Cuando se conecta un alambre con las terminales de un acumulador de automóvil, la corriente es 0.2 A. ¿Cuál será la corriente si se corta ese alambre a la mitad de su longitud original, y se conecta ese medio alambre a las terminales del acumulador?

PREGUNTA 5: Si el tiempo promedio entre colisiones es mayor ¿qué sucede con la resistividad? ¿Qué sucede con la resistividad cuando aumenta la densidad de electrones?

(A) Aumenta, aumenta (B) Aumenta, disminuye
(C) Disminuye, aumenta (D) Disminuye, disminuye

27.3 RESISTIVIDAD DE LOS MATERIALES

Como se vio en la sección anterior, la resistencia R de un alambre uniforme es directamente proporcional a la resistividad ρ y a la longitud l, e inversamente proporcional al área transversal A:

$$R = \rho \frac{l}{A} \tag{27.17}$$

Con esta fórmula se puede calcular la resistencia, si se conoce la resistividad del material, y también se puede calcular la resistividad si se ha medido experimentalmente la resistencia. Este último cálculo es importante en la determinación experimental de la resistividad de un material, que se hace midiendo la diferencia de potencial y la corriente en un alambre de determinada longitud y área transversal, hecho con una muestra del material.

Es obvio, de acuerdo con la ley de Ohm, ecuación (27.15), que *la unidad SI de resistencia es 1 volt por ampere; a esta unidad se le llama* **ohm**, *abreviado* Ω:

ohm (Ω)

$$1 \text{ ohm} = 1\ \Omega = 1\ \text{V/A} \tag{27.18}$$

La unidad de resistividad es el ohm-metro ($\Omega \cdot$ m). La tabla 27.2 contiene las resistividades de varios materiales conductores.

EJEMPLO 5 Un alambre, de los que suelen usarse en las instalaciones eléctricas domésticas, está hecho de cobre número 10, cuyo radio es 0.129 cm. ¿Cuál es la resistencia de un tramo de ese alambre, de 30 m de longitud? ¿Qué diferencia de potencial hay a lo largo de ese alambre cuando la corriente que conduce es 10 A?

SOLUCIÓN: El área transversal del alambre es

$$A = \pi r^2 = \pi \times (0.129 \times 10^{-2}\ \text{m})^2 = 5.2 \times 10^{-6}\ \text{m}^2$$

La resistividad del cobre, que aparece en la tabla 27.2, es $\rho = 1.7 \times 10^{-8}\ \Omega \cdot \text{m}$. Según la ecuación (27.17), la resistencia es

$$R = \rho \frac{l}{A} = 1.7 \times 10^{-8}\ \Omega \cdot \text{m} \times \frac{30\ \text{m}}{5.2 \times 10^{-6}\ \text{m}^2} = 0.098\ \Omega$$

Para una corriente de 10 A, la ley de Ohm indica entonces que la diferencia de potencial es

$$\Delta V = IR = 10\ \text{A} \times 0.098\ \Omega = 0.98\ \text{volt}$$

Si se reacomoda la ecuación (27.13) se ve con facilidad que

$$\frac{I}{A} = \frac{1}{\rho}\frac{\Delta V}{l} \tag{27.19}$$

La relación de la corriente I entre el área transversal A es la **densidad de corriente** j,

$$j = \frac{I}{A} \tag{27.20}$$

densidad de corriente j

Ésta es la corriente por unidad de área en un punto del conductor. De la ecuación (27.1), $\Delta V/l$ es el campo eléctrico E en el conductor, y entonces la ecuación (27.19) se puede escribir como sigue:

$$j = \frac{1}{\rho}E \tag{27.21}$$

Entonces, la densidad de corriente es directamente proporcional al campo eléctrico. Ésta es otra expresión de la ley de Ohm. Esta ecuación relaciona dos cantidades locales: la densidad de corriente en un punto dentro del conductor y el campo eléctrico en ese punto.

La resistividad de los materiales depende de la temperatura. *En los metales ordinarios, la resistividad aumenta al aumentar la temperatura.* Eso se debe a un aumento en la frecuencia de colisiones entre los electrones en movimiento y los átomos de la red: a mayor temperatura, los átomos saltan más violentamente en torno a sus posiciones en la red, y entonces es más probable que perturben el movimiento de los electrones, disminuyendo el tiempo promedio entre colisiones. Los números de la tabla 27.2 son las resistividades a temperatura ambiente (20°C). A temperaturas muy bajas, la frecuencia de colisiones y la resistividad tienden hacia valores constantes, por las colisiones residuales con las impurezas en el material. La figura 27.8 muestra el aumento característico de la resistividad al aumentar la temperatura en un metal.

En los bulbos incandescentes ordinarios se observa un aumento drástico de resistencia al aumentar la temperatura. La resistencia del filamento de uno de esos bulbos (a su temperatura de operación) es unas 10 veces mayor que estando frío (a la temperatura ambiente). Al encender una bombilla fría hay un gran golpe inicial de corriente que pasa por el filamento, y esa corriente decrece con rapidez, y se estaciona en un valor a medida que el filamento llega a su temperatura de operación. El golpe inicial, debido a la baja "resistencia en frío" del filamento, es la razón por la que con frecuencia los filamentos se queman en el instante de encenderlos.

Conceptos en contexto

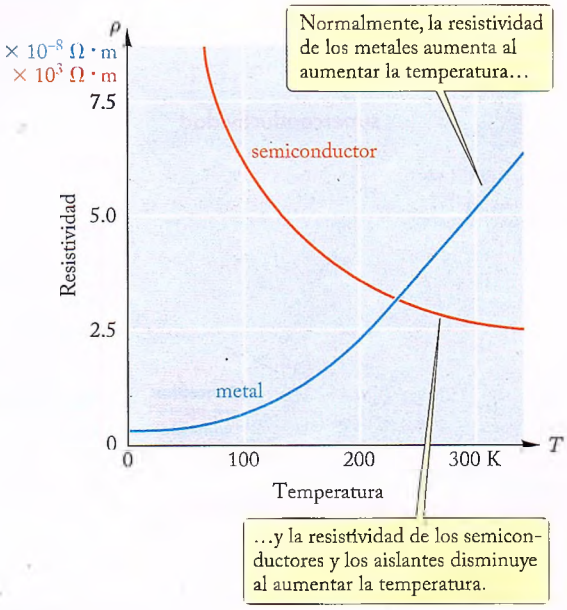


FIGURA 27.8 Resistividad en función de la temperatura, para un metal y para un semiconductor (silicio). La resistividad de los metales aumenta al aumentar la temperatura, mientras que la de los semiconductores disminuye.

Para un aumento razonablemente pequeño de temperatura, el aumento en la resistividad y en la resistencia de un metal es directamente proporcional al incremento de la temperatura. La ecuación matemática que expresa ese aumento de resistencia es

cambio de resistencia con la temperatura

$$\Delta R = \alpha R_0 \, \Delta T \tag{27.22}$$

donde R_0 es la resistencia a la temperatura inicial. [Obsérvese que esta ecuación recuerda a la de la dilatación térmica de la longitud de un sólido; véase la ecuación (20.6).] La constante de proporcionalidad α se llama **coeficiente térmico de la resistencia**. La tabla 27.2 (página 866) presenta valores de ese coeficiente para algunos conductores metálicos.

coeficiente térmico de resistencia α

Conceptos en contexto

EJEMPLO 6 Supóngase que, debido a una sobrecarga de corriente, la temperatura del alambre de cobre del ejemplo 5 aumentó de 20°C a 50°C. ¿Cuánto aumenta la resistencia?

SOLUCIÓN: La resistencia inicial es $R_0 = 0.098\ \Omega$, obtenida en el ejemplo 5. El incremento de temperatura es $\Delta T = 30°\text{C}$. De acuerdo con la tabla 27.2, el coeficiente térmico de resistencia para el cobre es $\alpha = 3.9 \times 10^{-3}/°\text{C}$. Entonces, el cambio de resistencia es

$$\Delta R = \alpha R_0 \, \Delta T = 3.9 \times 10^{-3}/°\text{C} \times 0.098\ \Omega \times 30°\text{C}$$
$$= 0.012\ \Omega$$

Así, la nueva resistencia del alambre será

$$R = R_0 + \Delta R = 0.098\ \Omega + 0.012\ \Omega = 0.110\ \Omega$$

El cambio de resistencia eléctrica al cambiar la temperatura se aprovecha en el funcionamiento del **termómetro de resistencia**. La figura 27.9 muestra uno de esos termómetros, formado por un serpentín de alambre de platino. Ese termómetro se puede calibrar de la misma manera que, por ejemplo, un termómetro de mercurio: primero se sumerge en una mezcla de hielo y agua (0°C) y después en agua hirviendo (100°C). Las mediciones de la resistencia en esas dos temperaturas indican cuántos ohms corresponden a 100°C y, por extrapolación corresponden a cualquier otra temperatura.

termómetro de resistencia

A temperaturas muy bajas, la resistividad de un metal es sustancialmente menor que a temperatura ambiente. Algunos elementos metálicos, como plomo, estaño, zinc y niobio, y también muchas aleaciones y compuestos, presentan el fenómeno de **superconductividad**: *su resistencia desaparece por completo a cierta temperatura crítica sobre el cero absoluto*. Por ejemplo, la figura 27.10 muestra una gráfica de resistividad del estaño en función de temperatura; a una temperatura absoluta de 3.72 K, la resistividad desaparece en forma abrupta. En un experimento, se hizo pasar una corriente de varios cientos de amperes en un anillo superconductor; la corriente continuó circulando sin que disminuyera su intensidad durante más de un año, y sin tener alguna batería o generador que la sostuviera.

superconductividad

Conceptos en contexto

En algunos superconductores a base de óxido de cobre, la resistencia desaparece a temperaturas hasta de 138 K (a presión normal) o hasta a 162 K (a alta presión). Estos **superconductores de alta temperatura** fueron descubiertos en 1986, y hoy se usan en algunos aparatos: imanes y líneas de transmisión para grandes corrientes. Aunque los cables superconductores eléctricos requieren mayor inversión y complicaciones de enfriamiento criogénico para que funcionen, tienen la ventaja de una mucho mayor capacidad de corriente que los cables convencionales, lo cual tiene especial importancia en los túneles de servicios urbanos, donde el espacio es muy importante.

superconductores de alta temperatura

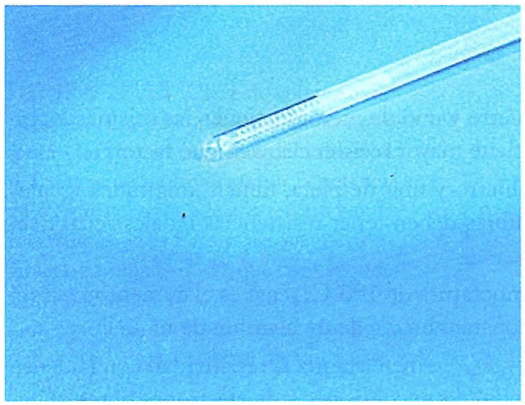


FIGURA 27.9 Un serpentín de alambre de platino sirve de sensor en un termómetro de resistencia.

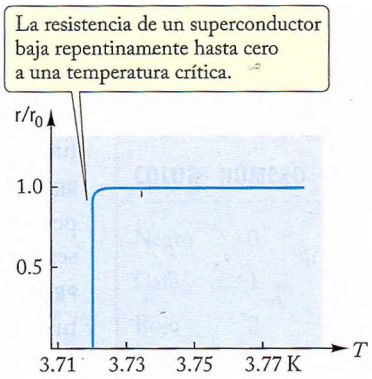


FIGURA 27.10 Resistividad del estaño en función de la temperatura. A menos de 3.72 K, la resistividad es cero. Para el objeto de esta gráfica, la resistividad se expresó como fracción de la resistividad a 4.2 K, el punto de ebullición del helio.

De acuerdo con la definición que se presentó en la sección 22.5, un aislante ideal es un material que no permite movimiento alguno de cargas eléctricas. Los **aislantes** reales, como la porcelana o el vidrio, sí permiten cierto movimiento muy pequeño de cargas. Lo que los distingue de los conductores es su resistividad, enormemente grande. Las resistividades de los aislantes suelen ser más de 10^{20} veces mayores que las de los conductores (compárese los valores de la tabla 27.3 con los de la tabla 27.2). Eso quiere decir que aunque se aplique un alto voltaje a una pieza de vidrio, el flujo de corriente será insignificante (siempre que, claro está, no sufra rompimiento eléctrico). De hecho, en un día húmedo, es probable que pase más corriente por la película microscópica de agua que tiende a formarse sobre la superficie del aislante, que a través del aislante mismo. Las resistividades de los **semiconductores**, como el carbono y el silicio, están entre las de los conductores y las de los aisladores (véase la tabla 27.4).

Tanto en los aisladores como en los semiconductores, el coeficiente térmico de resistividad suele ser negativo, al contrario de lo que sucede con los metales. Eso se debe a que al calentar el material se liberan algunos de los electrones enlazados y aumenta la densidad de los electrones libres [n en la ecuación (27.12)], y por ello baja la resistividad. En la tabla 27.4 se muestran valores de α para semiconductores a temperaturas cercanas a la temperatura ambiente. La dependencia entre temperatura y resistividad en el silicio se ve en la figura 27.8. Debido al rápido aumento de la resistividad al disminuir la temperatura, se usan con frecuencia resistores de semiconductores como termómetros, en especial a bajas temperaturas.

TABLA 27.3 RESISTIVIDADES DE AISLADORES

MATERIAL	
Polietileno	$2 \times 10^{11}\ \Omega \cdot \mathrm{m}$
Vidrio	$\approx 10^{12}$
Porcelana sin vidriar	$\approx 10^{12}$
Ebonita	$\approx 10^{13}$
Resina epóxica	$\approx 10^{15}$

TABLA 27.4 RESISTIVIDADES Y COEFICIENTES TÉRMICOS DE RESISTENCIA PARA SEMICONDUCTORES[a]

MATERIAL	ρ	α
Carbón (grafito)	$3.5 \times 10^{-5}\ \Omega \cdot \mathrm{m}$	$-5 \times 10^{-4}\ /°\mathrm{C}$
Silicio	2.6×10^{3}	-8×10^{-2}
Germanio	4.2×10^{-1}	-5×10^{-2}

[a] A 20°C de temperatura.

Revisión 27.3

PREGUNTA 1: Dos alambres, uno de hierro y uno de nicromo, tienen las mismas longitudes y los mismos diámetros. ¿Cuál tiene mayor resistencia, y en qué factor?

PREGUNTA 2: Dos alambres, uno de hierro y uno de plata, tienen longitudes iguales, pero distintos diámetros. Si esos alambres deben tener resistencias iguales ¿cuál debe ser la relación de sus diámetros?

PREGUNTA 3: Para un aumento de temperatura de 100°C, ¿cuál es el aumento porcentual de resistencia de un alambre de constantán? ¿Y de un alambre de níquel?

PREGUNTA 4: La ecuación (27.12), $\rho = m_e/(ne^2\tau)$ relaciona la resistividad con la densidad de electrones n y el tiempo promedio entre colisiones τ de electrones libres. ¿Cuál de esas dos cantidades domina la dependencia térmica de la resistividad en un metal? ¿Y en un semiconductor?

(A) n, n (B) n, τ (C) τ, τ (D) τ, n

27.4 COMBINACIONES DE RESISTENCIAS

resistor

Los alambres metálicos de cualquier circuito tienen cierta resistencia eléctrica. Pero en los artículos electrónicos, como reproductores de CD, televisores, computadoras, etc., la principal parte de la resistencia suele deberse a dispositivos específicamente diseñados para que tengan alta resistencia. Esos dispositivos se llaman **resistores** y se usan para controlar y modificar las corrientes. Por ejemplo, los controles manuales de volumen en los radios son resistores ajustables. Uno de esos controles de volumen se fabrica con un tramo largo y enrollado de alambre de alta resistencia, sobre el cual descansa un contacto deslizante o cursor (véase la figura 27.11); al mover el contacto deslizante, se aumenta o disminuye la resistencia eléctrica, y con ello se controla la corriente que llega al altavoz o bocina. Los resistores ajustables, o variables, de esta clase se llaman **reóstatos** o **potenciómetros** cuando se usan para limitar la corriente, o seleccionar un voltaje, respectivamente. El nombre potenciómetro también se usa en un sentido más técnico para indicar un medidor de potencial, que contiene un contacto deslizante parecido al de la figura 27.11.

reóstato

potenciómetro

Los resistores que se usan en los circuitos de los aparatos electrónicos suelen fabricarse con una pieza de carbono puro (grafito) conectada entre dos terminales (figura 27.12*a*). El carbono tiene gran resistividad, de ahí que una pieza pequeña de carbono puede tener mayor resistencia que un tramo largo de alambre metálico. Esos resistores se apegan a la ley de Ohm (corriente proporcional a la diferencia de potencial) dentro de amplios límites de valores de corriente; pero si el resistor se sobrecarga, se calienta y posiblemente hasta se queme; la ley de Ohm ya no se aplica.

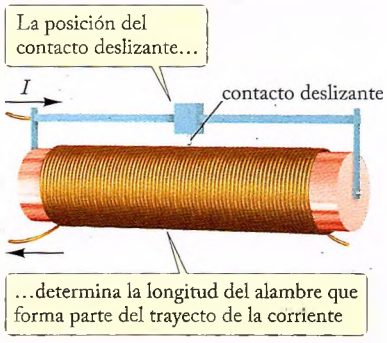


FIGURA 27.11 Un reóstato o potenciómetro, formado por un alambre largo y enrollado, con un contacto deslizante.

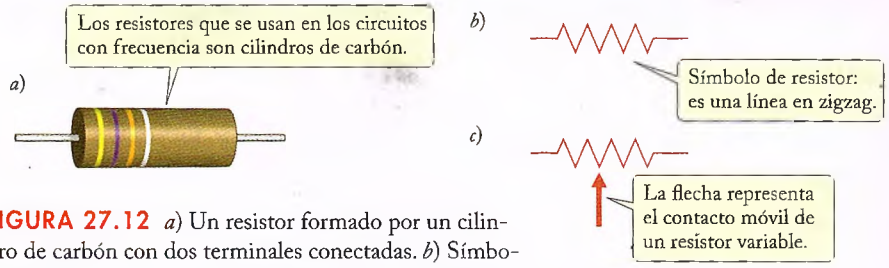


FIGURA 27.12 *a)* Un resistor formado por un cilindro de carbón con dos terminales conectadas. *b)* Símbolo de un resistor en diagramas eléctricos. *c)* Símbolo de un resistor variable también llamado potenciómetro.

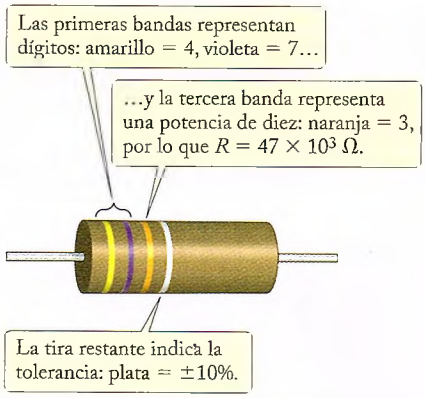


FIGURA 27.13 Clave de colores para resistores. Las dos primeras bandas representan los primeros dígitos del valor de la resistencia; se multiplican por la potencia de 10 que corresponde a la tercera banda. Las bandas de este resistor son amarillo-violeta-naranja (4-7-3), que corresponden a una resistencia de $47 \times 10^3\ \Omega$, o 47 kΩ. Una cuarta banda representa la tolerancia, o exactitud, del valor especificado (véase la tabla 27.5).

TABLA 27.5 CLAVE DE COLORES EN RESISTORES[a]

COLOR	NÚMERO	POTENCIA	TOLERANCIA
Negro	0	10^0	
Café	1	10^1	
Rojo	2	10^2	
Naranja	3	10^3	
Amarillo	4	10^4	
Verde	5	10^5	
Azul	6	10^6	
Violeta	7	10^7	
Gris	8	10^8	
Blanco	9	10^9	
Dorado		10^{-1}	±5%
Plateado		10^{-2}	±10%
Nada			±20%

[a] La figura 27.13 describe el uso de esta clave de colores.

En los diagramas eléctricos, o diagramas de circuitos, el símbolo de un resistor es una línea en zigzag, huella del camino de un electrón dentro de un material conductor (véase la figura 27.12*b*). El símbolo del potenciómetro es el de una resistencia con una flecha, que representa el contacto deslizante (figura 27.12*c*). El valor de la resistencia a veces aparece impreso al lado del resistor; con más frecuencia, ese valor está codificado en una serie de bandas de color en torno al resistor. La tabla 27.5 muestra los valores numéricos correspondientes a los diversos colores, y la figura 27.13 muestra un ejemplo de un resistor de carbón con clave de colores.

Incluso los circuitos sin resistores, como el cableado de una casa, suelen tener concentrada, o agrupada, la parte principal de su resistencia en un lugar. Por ejemplo, cuando se conecta un tostador eléctrico o una bombilla eléctrica a un contacto eléctrico, la corriente que pasa por el circuito encuentra la mayor parte de la resistencia en el tramo relativamente corto de alambre en el interior del tostador o de la bombilla. La pieza corta de alambre, de alta resistencia, en el utensilio, tiene el mismo efecto sobre el flujo de la corriente que un resistor de carbón, y en un diagrama eléctrico se puede considerar que es un resistor. Los conductores externos del aparato se pueden considerar como si no tuvieran resistencia; su resistencia es extremadamente pequeña, en comparación con la del aparato o resistor.

Las conexiones en serie y en paralelo son las formas más sencillas de conectar algunos resistores y capacitores. La figura 27.14 muestra dos resistores conectados en **serie**. Como cada uno de esos resistores presenta resistencia a la corriente que entra al alambre, la intuición indica que la resistencia total o equivalente de esta combinación es igual a la suma de las resistencias individuales,

$$R = R_1 + R_2 \tag{27.23}$$

La deducción formal de este resultado parte de la observación de que si las diferencias de potencial a través de los resistores individuales son ΔV_1 y ΔV_2, la diferencia neta de potencial a través de la combinación es

$$\Delta V = \Delta V_1 + \Delta V_2 \tag{27.24}$$

La aditividad de los potenciales es consecuencia directa de la definición de potencial: el trabajo total efectuado por el campo eléctrico sobre una unidad de carga que atraviesa el primer resistor, y que después atraviesa el segundo, simplemente es la suma del trabajo efectuado en el primero y el trabajo efectuado en el segundo. Además, *las corrientes en ambos resistores son exactamente iguales*, porque cualquier carga que pase por el primer resistor continúa y pasa por el segundo. Por consiguiente, al aplicar la ley de Ohm, $\Delta V = IR$, se ve que

$$\Delta V = \Delta V_1 + \Delta V_2 = IR_1 + IR_2 = I(R_1 + R_2)$$

En esta relación queda claro que la resistencia de la combinación equivale a una sola resistencia $R = R_1 + R_2$, como indica la ecuación (27.23).

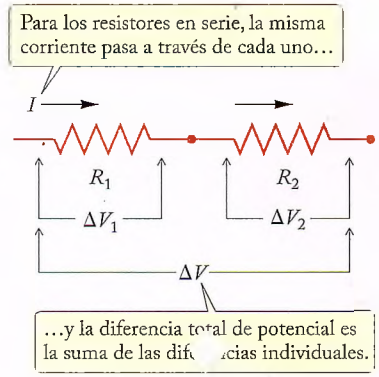


FIGURA 27.14 Dos resistores conectados en serie.

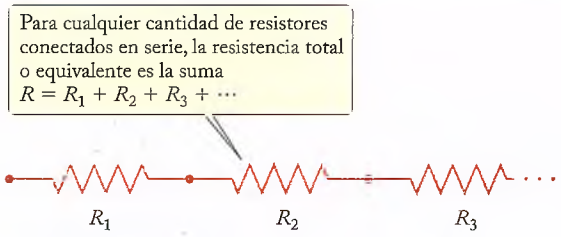


FIGURA 27.15 Varios resistores conectados en serie.

Este resultado se puede generalizar con facilidad a cualquier cantidad de resistores en serie (véase la figura 27.15). La resistencia total, o resistencia equivalente de la combinación en serie, es

resistores en serie

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \cdots \tag{27.25}$$

La figura 27.16 muestra dos resistores en **paralelo**. Como el caso de cualquier elemento de circuito conectado *en paralelo, la diferencia de potencial a través de cada resistor es igual* a la diferencia de potencial a través de la combinación. Así, de acuerdo con la ley de Ohm, las corrientes son

$$I_1 = \frac{\Delta V}{R_1} \quad \text{e} \quad I_2 = \frac{\Delta V}{\quad} \tag{27.26}$$

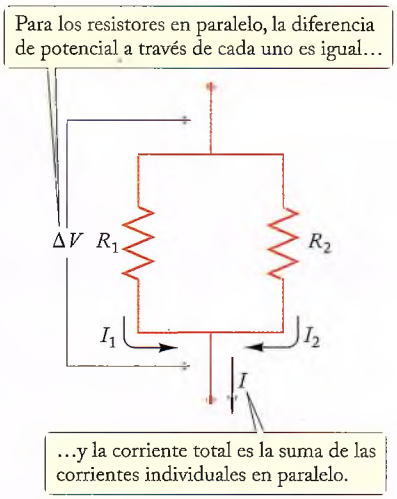


FIGURA 27.16 Dos resistores conectados en paralelo.

Los resistores en paralelo se parecen a los diversos carriles paralelos de una carretera. El flujo total de automóviles es la suma de los flujos en los carriles individuales; de igual manera, el flujo total de cargas eléctricas a través de una combinación de resistores en paralelo es la suma de los flujos en los resistores individuales. Así, la corriente total que pasa por la combinación es la suma de las corrientes individuales en paralelo.

$$I = I_1 + I_2 = \frac{\Delta V}{R_1} + \frac{\Delta V}{R_2} = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)\Delta V \tag{27.27}$$

Al comparar la ecuación (27.27) con la ley de Ohm, $I = \Delta V/R$, se ve que la resistencia de la combinación es equivalente, entonces, a una sola resistencia R definida por

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \tag{27.28}$$

Se observa que la resistencia de la combinación en paralelo es menor que cada una de las resistencias individuales. Por ejemplo, si $R_1 = R_2 = 1.0\ \Omega$, entonces $R = 0.5\ \Omega$.

También se podrá generalizar lo anterior para cualquier cantidad de resistores en paralelo (véase la figura 27.17). La resistencia total o equivalente R de la combinación en paralelo es

resistores en paralelo

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \cdots \tag{27.29}$$

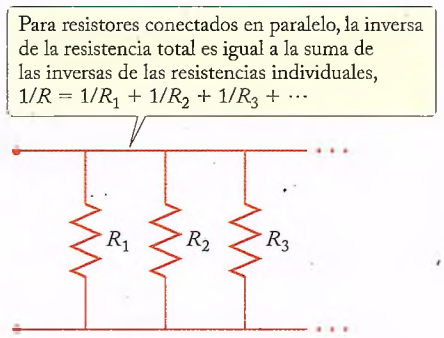


FIGURA 27.17 Varios resistores conectados en paralelo.

EJEMPLO 7 Dos resistores, con $R_1 = 10\ \Omega$ y $R_2 = 20\ \Omega$, se conectan en serie (véase la figura 27.18), y por la combinación pasa una corriente de 1.8 A. ¿Cuál es la diferencia de potencial a través de la combinación? ¿Cuál es la diferencia de potencial a través de cada resistor?

SOLUCIÓN: De acuerdo con la ecuación (27.25), la resistencia total es

$$R = R_1 + R_2 = 10\ \Omega + 20\ \Omega = 30\ \Omega$$

La ley de Ohm, aplicada a este sistema combinado de dos resistores, indica que la diferencia de potencial es

$$\Delta V = IR = 1.8\ \text{A} \times 30\ \Omega = 54\ \text{volts}$$

Además, la ley de Ohm, aplicada a cada resistor individual, indica que las diferencias de potencial son

$$\Delta V_1 = IR_1 = 1.8\ \text{A} \times 10\ \Omega = 18\ \text{volts}$$

$$\Delta V_2 = IR_2 = 1.8\ \text{A} \times 20\ \Omega = 36\ \text{volts}$$

Como se esperaba, la suma de esas dos diferencias de potencial es 54 volts, que es la diferencia de potencial a través de la combinación. El arreglo de la figura 27.18 se llama **divisor de voltaje** o **divisor de potencial**, porque sirve para dividir la diferencia de potencial total entre los dos resistores conectados en serie, en proporción con su resistencia.

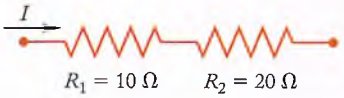


FIGURA 27.18 Una corriente pasa por dos resistores conectados en serie.

divisor de voltaje

EJEMPLO 8 Supóngase que se conectan en paralelo los mismos dos resistores, con $R_1 = 10\ \Omega$ y $R_2 = 20\ \Omega$ (véase la figura 27.19), y que por esa combinación pasa una corriente neta de 1.8 A. ¿Cuál es la diferencia de potencial a través de esa combinación? ¿Cuánta corriente pasa por cada resistor?

SOLUCIÓN: De acuerdo con la ecuación (27.29), la resistencia total es

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{1}{10\ \Omega} + \frac{1}{20\ \Omega} = \frac{30}{200\ \Omega}$$

y el resultado es $R = 200\ \Omega/30 = 6.7\ \Omega$. Por consiguiente, la ley de Ohm, aplicada a la combinación total, indica que la diferencia de potencial es

$$\Delta V = IR = 1.8\ \text{A} \times 6.7\ \Omega = 12\ \text{volts}$$

y la ley de Ohm, aplicada a las dos ramas, indica que las corrientes individuales son

$$I_1 = \frac{\Delta V}{R_1} = \frac{12\ \text{volts}}{10\ \Omega} = 1.2\ \text{A}$$

$$I_2 = \frac{\Delta V}{R_2} = \frac{12\ \text{volts}}{20\ \Omega} = 0.60\ \text{A}$$

Como se esperaba, la suma de las dos corrientes es 1.8 A, que es la corriente total a través de la combinación.

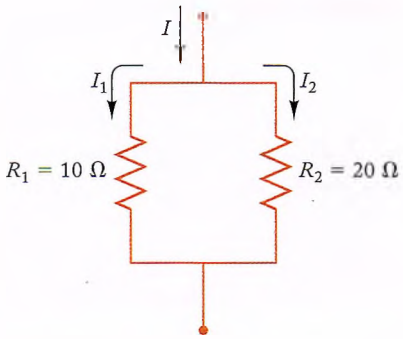


FIGURA 27.19 Una corriente pasa por los mismos dos resistores, pero conectados en paralelo.

En los cálculos del ejemplo anterior no se tomaron en cuenta las resistencias de los alambres que conectan a los resistores. Es una buena aproximación, si la resistencia de esos alambres es pequeña en comparación con las resistencias de los resistores. Si no es así, se debe tomar en cuenta la resistencia de los alambres en los cálculos. En los diagramas eléctricos se acostumbra representar esquemáticamente la resistencia de un alam-

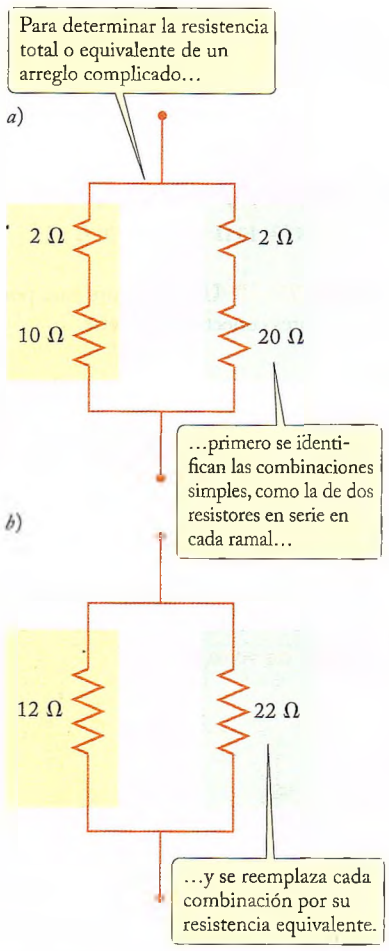


FIGURA 27.20 *a)* En este diagrama eléctrico, las resistencias de los alambres se representan mediante dos resistores pequeños. *b)* Las ramas derecha (verde) e izquierda (naranja) del circuito equivalen a dos resistores de 12 Ω y 22 Ω conectados en paralelo.

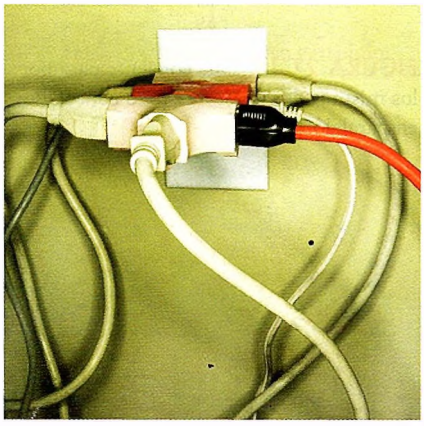


FIGURA 27.21 Varios aparatos eléctricos conectados a los receptáculos en una casa.

bre con un resistor equivalente de magnitud adecuada; aquí se sobreentiende que tod la resistencia de un alambre está concentrada, o agrupada, en un lugar. Se puede supc ner, entonces, que los segmentos de recta que conectan esos resistores equivalentes co el resto del circuito tienen resistencias exactamente iguales a cero. Por ejemplo, si cad uno de los dos alambres que conectan a los resistores de la figura 27.19 es largo, y cad uno tiene 2 Ω de resistencia, el diagrama eléctrico que incluye la resistencia de lo alambres a las conexiones es como se ve en la figura 27.20. Se observa que en es diagrama se colocan los resistores de 2 Ω, que representan las resistencias de los alam bres, directamente arriba de los resistores R_1 y R_2. También se podían haber colocad esos resistores equivalentes directamente abajo de R_1 y R_2, o la mitad de cada un arriba y la otra mitad abajo de cada resistor; todos esos arreglos son realmente equiva lentes, y conducen a la misma distribución de la corriente entre las dos ramas del cir cuito. También se observa que no se toma en cuenta la resistencia de los conductore cortos que salen del circuito, arriba y abajo de él; si tuvieran una resistencia importante habría también que tomarla en cuenta.

EJEMPLO 9 Si, como en el ejemplo anterior, pasa una corriente de 1.8 A po la combinación de resistores y alambres resistivos que muestra e esquema de la figura 27.20*a*, ¿cuál es la diferencia de potencial a través de toda l combinación? ¿Cuál es la corriente en cada resistor?

SOLUCIÓN: Para resolver este problema se seguirán dos pasos. Primero, se determinarán las resistencias de las ramas izquierda y derecha del circuito. La rama izquierda consta de un resistor R_1 de 10 Ω, en serie con 2 Ω, y la rama derecha, de un resistor R_2 de 20 Ω en serie con 2 Ω. Por tanto, la resistencia de la rama izquierda del circuito es $R_1' = R_1 + 2\ \Omega = 12\ \Omega$, y la de la rama derecha es $R_2' = R_2 + 2\ \Omega = 22\ \Omega$.

A continuación se determina la resistencia total del circuito, combinando R_1' y R_2' en paralelo (véase la figura 27.20*b*). Esta combinación en paralelo de las resistencias de las ramas izquierda y derecha da como resultado

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1'} + \frac{1}{R_2'} = \frac{1}{12\ \Omega} + \frac{1}{22\ \Omega} = \frac{34}{264\ \Omega}$$

De aquí se ve que $R = 264\ \Omega/34 = 7.8\ \Omega$, que es la resistencia total o equivalente del circuito. Así, por la ley de Ohm, la diferencia de potencial a través de la combinación es

$$\Delta V = IR = 1.8\ \text{A} \times 7.8\ \Omega = 14\ \text{volts}$$

y las corrientes individuales en las ramas son

$$I_1 = \frac{\Delta V}{R_1'} = \frac{14\ \text{volts}}{12\ \Omega} = 1.2\ \text{A}$$

$$I_2 = \frac{\Delta V}{R_2'} = \frac{14\ \text{volts}}{22\ \Omega} = 0.64\ \text{A}$$

Los electrodomésticos ordinarios, conectados en los receptáculos de una casa, se conectan en paralelo (véase la figura 27.21). La diferencia de potencial a través de cada uno de esos aparatos es 115 V, que es la diferencia de potencial suministrada entre los hilos que alimentan electricidad a la casa.* Algunos de estos dispositivos, como los fo-

* La diferencia de potencial suministrada entre hilos de corriente en realidad es una diferencia de potencial que oscila, que periódicamente invierte su signo. Se explicarán los detalles de esos potenciales y corrientes oscilantes, o alternos, en el capítulo 32.

cos, tostadores eléctricos, planchas, parrillas y cobijas, sólo constan de un tramo de alambre resistivo en el que la disipación de la energía eléctrica produce calor. Los electrodomésticos más complicados, como refrigeradores, ventiladores, lavadoras, radios, televisores, cámaras de video, reproductores de CD, etc., pueden tener motores eléctricos y una diversidad de dispositivos electrónicos. Esos aparatos complicados no suelen apegarse a la ley de Ohm; por ejemplo, al conectar un televisor en un contacto de 120 V, en lugar de uno de 115 V, la corriente no aumenta en proporción con el potencial. Sin embargo, para fines de comparación, con frecuencia es útil asignar una resistencia efectiva $R = \Delta V/I$ a un aparato complicado, como si fuera válida la ley de Ohm. Ya que esta resistencia efectiva de un aparato complicado *no es* constante, sólo se puede usar en los cálculos con la diferencia indicada y fija de potencial, por ejemplo 115 V.

EJEMPLO 10 Una aspiradora, una secadora de cabello y una plancha eléctrica se conectan al mismo tiempo a un solo contacto (véase la figura 27.22*a*). Sus resistencias son 9.0 Ω, 10 Ω y 12 Ω, respectivamente. El contacto suministra una diferencia de potencial de 115 V. ¿Cuál es la corriente neta que pasa por el contacto? Si la corriente máxima segura que puede manejar el contacto es 30 A, ¿es aconsejable conectar todos estos electrodomésticos al contacto?

Conceptos en contexto

SOLUCIÓN: Todos los aparatos están conectados en paralelo (véase la figura 27.22*b*); entonces, la diferencia de potencial a través de cada uno es 115 V. De acuerdo con la ley de Ohm, $I = \Delta V/R$, las corrientes individuales son, respectivamente,

$$I_1 = 115\ \text{V}/9.0\ \Omega = 12.8\ \text{A}$$

$$I_2 = 115\ \text{V}/10\ \Omega = 11.5\ \text{A}$$

$$I_3 = 115\ \text{V}/12\ \Omega = 9.6\ \text{A}$$

La corriente total es igual a la suma de las corrientes individuales en paralelo, 12.8 A + 11.5 A + 9.6 A = 34 A. Es más de lo que puede manejar el contacto con seguridad. Esos aparatos no se deben conectar al mismo contacto, y tampoco a varios contactos abastecidos con el mismo conductor.

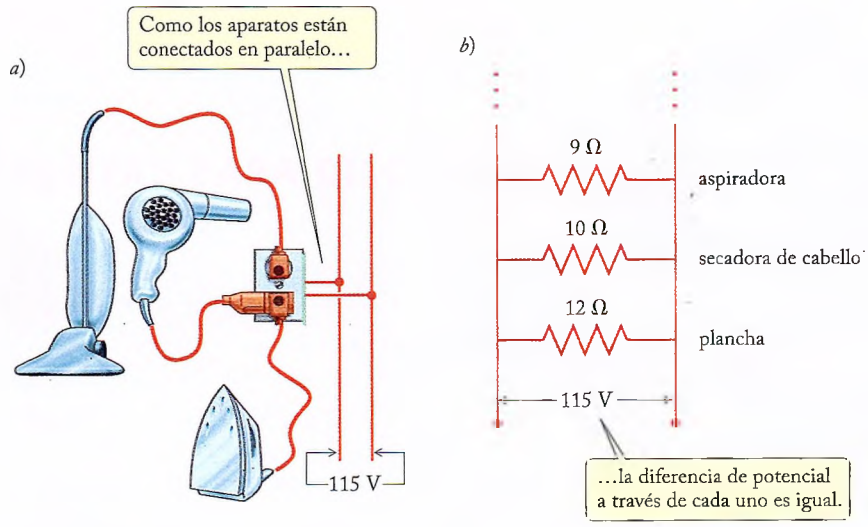


FIGURA 27.22 *a*) Tres electrodomésticos conectados al mismo contacto. *b*) Diagrama eléctrico que muestra cómo están conectadas las resistencias.

TÉCNICAS PARA RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS — COMBINACIONES DE RESISTORES

Cuando se determina la resistencia total o equivalente de un circuito que contiene varios resistores conectados en forma complicada, proceda en etapas, como en el caso de un circuito con capacitores:

1. El primer paso es buscar grupos de resistores que formen combinaciones simples en paralelo o en serie (como el grupo de dos resistores en la rama izquierda y dos en la rama derecha, en la figura 27.20*a*). Evalúese la resistencia de cada uno de esos grupos.
2. En el segundo paso, véase cómo se conectan esas resistencias efectivas de grupo entre sí, como en la figura 27.20*b*, y evalúese la resistencia total de la combinación de grupos.
3. En algunos casos se deberán repetir estos pasos hasta obtener una sola resistencia equivalente.

Revisión 27.4

PREGUNTA 1: Un alambre tiene 3 Ω de resistencia. Si se corta a la mitad y se conectan las dos piezas en paralelo ¿cuál será la nueva resistencia?

PREGUNTA 2: Cualitativamente ¿por qué la resistencia total o equivalente de una combinación de varios resistores en serie es mayor que las resistencias individuales? ¿Por qué la resistencia total de una combinación de resistores iguales en paralelo es menor que las resistencias individuales?

PREGUNTA 3: Un alambre de cobre y uno de plata se conectan en paralelo a una batería. Ambos alambres tienen las mismas longitudes y los mismos diámetros. ¿Cuál conduce más corriente?

PREGUNTA 4: Si se conectan 10 resistores de 1 Ω en serie ¿cuál es su resistencia total? ¿Y si se conectan en paralelo?

(A) 10 Ω, 10 Ω (B) 0.1 Ω, 10 Ω (C) 10 Ω, 0.1 Ω (D) 0.1 Ω, 0.1 Ω

RESUMEN

TÉCNICAS PARA RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS Combinaciones de resistores		**(página 878)**
CAMPO ELÉCTRICO EN UN ALAMBRE UNIFORME DE LONGITUD *l*	$E = \dfrac{\Delta V}{l}$	**(27.1)**
CORRIENTE ELÉCTRICA (FLUJO DE CARGA POR UNIDAD DE TIEMPO)	$I = \dfrac{\Delta Q}{\Delta t}$ o $I = \dfrac{dq}{dt}$	**(27.2, 3)**
UNIDAD SI DE CORRIENTE ELÉCTRICA	1 ampere = 1 A = 1 C/s	**(27.4)**
VELOCIDAD DE ARRASTRE (VELOCIDAD PROMEDIO) EN FUNCIÓN DEL TIEMPO PROMEDIO ENTRE COLISIONES τ	$v_d = \dfrac{-eE\tau}{m_e}$	**(27.8)**
CORRIENTE DE ELECTRONES LIBRES EN UN CONDUCTOR donde n es la densidad del número de electrones libres, v_d es la velocidad de arrastre y A es el área transversal.	$I = -nev_dA$	**(27.10)**
UNIDAD SI DE RESISTENCIA	1 ohm = 1 Ω = 1 V/A	**(27.18)**

RESISTIVIDAD EN FUNCIÓN DEL TIEMPO PROMEDIO ENTRE COLISIONES τ

$$\rho = \frac{m_e}{ne^2\tau} \qquad (27.12)$$

RESISTENCIA EN FUNCIÓN DE RESISTIVIDAD

$$R = \rho\frac{l}{A} \qquad (27.14)$$

LEY DE OHM

$$I = \frac{\Delta V}{R} \quad \Delta V = IR \quad R = \frac{\Delta V}{I} \qquad (27.16)$$

DENSIDAD DE CORRIENTE

$$j = \frac{I}{A} \qquad (27.20)$$

LEY DE OHM Y DENSIDAD DE CORRIENTE

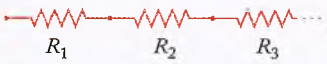
$$j = \frac{1}{\rho}E \qquad (27.21)$$

CAMBIO DE RESISTENCIA CON LA TEMPERATURA
donde α es el coeficiente térmico de resistividad (tabla 27.2).

$$\Delta R = \alpha R_0 \Delta T \qquad (27.22)$$

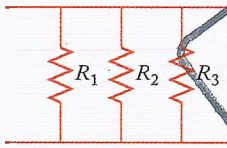
COMBINACIÓN DE RESISTORES EN SERIE
Para resistores conectados en serie, la misma corriente pasa a través de cada uno y la diferencia neta de potencial es la suma de las diferencias de potencial individuales.

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \ldots \qquad (27.25)$$



COMBINACIÓN DE RESISTORES EN PARALELO
Para resistores conectados en paralelo, la corriente total es la suma de las corrientes individuales en paralelo, y la diferencia de potencial a través de cada resistor es la misma.

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \cdots \qquad (27.29)$$



McGraw - Hill
INTERAMERICANA S.A
RDC
MUESTRA PARA EVALUACION
Prohibida su Venta

PREGUNTAS PARA DISCUSIÓN

1. Un alambre conduce 15 A de corriente. ¿Está ese alambre en equilibrio electrostático?
2. ¿Puede pasar una corriente por un conductor cuando no hay campo eléctrico? ¿Puede existir un campo eléctrico en un conductor, cuando no hay corriente?
3. La figura 27.23 muestra una supuesta analogía mecánica de un conductor eléctrico con resistencia. Una canica que baja por la tabla inclinada es detenida con tal frecuencia por choques con los pernos, que mantiene una velocidad promedio constante v_d. ¿Es buena esa analogía, esto es, la velocidad promedio v_d es proporcional a g? (Sugerencia: Supóngase que la canica rueda una distancia promedio d entre choques.)

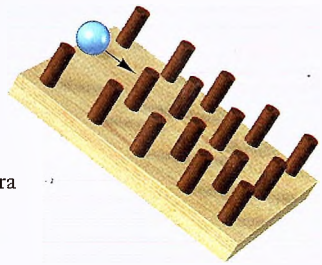


FIGURA 27.23
Analogía mecánica para un conductor eléctrico con resistencia.

4. ¿En qué factor se debe aumentar el diámetro de un alambre para que su resistencia disminuya en un factor de 2?
5. Demuéstrese que, para un alambre de determinada longitud y determinado material, la resistencia es inversamente proporcional a la masa del alambre.

6. ¿Qué desviaciones respecto a la ley de Ohm se pueden esperar si la corriente es muy grande?
7. La ley de Ohm es un enunciado aproximado de las propiedades eléctricas de un cuerpo conductor, como la ley de Hooke es un enunciado aproximado de las propiedades mecánicas de un cuerpo elástico. ¿Hay una analogía eléctrica del límite de elasticidad?
8. Un acumulador de automóvil tiene 12 V de diferencia de potencial entre sus postes, aun cuando no pase corriente por el acumulador. ¿Viola eso la ley de Ohm?
9. La figura 27.24 representa dos arreglos experimentales alternativos para determinar la resistencia de un cilindro de carbón. Se aplica una diferencia de potencial conocida mediante las terminales de cobre, se mide la corriente y se calcula la resistencia con $R = \Delta V/I$. El arreglo de la figura 27.24*a* indica una resistencia mayor que el de la figura 27.24*b*. ¿Por qué?

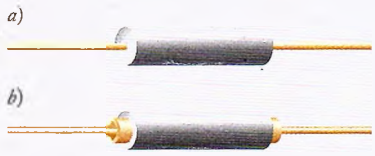


FIGURA 27.24 *a*) Los alambres tocan al cilindro de carbón directamente. *b*) Los alambres terminan en placas de contacto, que tocan al cilindro de carbón.

10. ¿Por qué no se aconseja un aparato que consuma mucha corriente con un cable de extensión?
11. Las instrucciones de instalación para conectar un contacto al cableado de una casa recomiendan enrollar el alambre, al menos tres cuartos de vuelta alrededor del poste terminal (véase la figura 27.25). ¿Por qué?

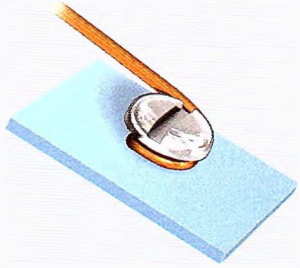


FIGURA 27.25 Poste terminal de un contacto.

12. El coeficiente térmico de resistividad α se define como el aumento fraccionario de resistividad por grado Celsius, $\alpha = (1/\rho)\, d\rho/dT$. De acuerdo con la tabla 27.2 ¿cuál es el valor de α para el cobre?
13. La figura 27.9 muestra un termómetro de resistencia de platino, formado por una bobina de alambre fino de platino en el interior de un tubo de vidrio, que puede ponerse en contacto con un cuerpo. ¿Cómo se mediría la resistencia de ese alambre, para determinar la temperatura del cuerpo?
14. Nunca debe conectarse alambre de aluminio a terminales diseñadas para alambre de cobre. ¿Por qué? (Sugerencia: El aluminio tiene un coeficiente de dilatación térmica bastante mayor que el del cobre.)
15. Se conectan en paralelo dos alambres de cobre de la misma longitud, pero uno tiene el doble de diámetro que el otro. ¿Qué fracción de la corriente total pasa por cada alambre?

PROBLEMAS

27.1 Corriente eléctrica

27.2 Resistencia y la ley de Ohm

1. La corriente eléctrica en la bombilla de la linterna es 0.50 A. ¿Cuánta carga eléctrica pasa por la bombilla en una hora? ¿Cuántos electrones pasan por la bombilla?
2. En un rayo normal, la corriente eléctrica es unos 20 000 A, y dura 1.0×10^{-4} s, más o menos. La dirección de la corriente es hacia arriba, del suelo hacia la nube. ¿Cuál es la carga (magnitud y signo) que deposita ese rayo en el suelo?
3. Un capacitor de 40 μF se carga primero con una batería de 9.0 V. Para invertir el voltaje en el capacitor ¿cuánto tiempo debe pasar una corriente constante de 3.0 A de la placa positiva a la negativa del capacitor?
4. ¿Cuál es la capacitancia de un capacitor que se carga a 1.4 V en 0.50 μs con una corriente constante de 25 mA?
5. Un alambre conductor de 2.0 m de longitud se conecta a las terminales de un acumulador de 12 V. La resistencia del alambre es 3.0 Ω. ¿Cuál es la corriente eléctrica en el alambre? ¿Cuál es su campo eléctrico?
6. Cuando se conecta un alambre delgado de cobre con los polos de una batería de 1.5 V, la corriente es 0.50 A. ¿Cuál es la resistencia del alambre? ¿Cuál es la corriente en el alambre si se conecta a las terminales de una batería de 7.5 V?
7. Una corriente comienza a pasar cuando $t = 0$, y aumenta con el tiempo de acuerdo con $I(t) = At + Bt^2$, siendo $A = 0.50$ C/s^2 y $B = 0.20$ C/s^3. ¿Cuál es la corriente cuando $t = 5.0$ s? ¿Cuál es la carga total que ha pasado en $t = 5.0$ s?

8. Cuando $t = 0$, una corriente comienza a pasar por un circuito sencillo. La carga total que ha pasado en sentido de las manecillas del reloj por el circuito es $Q(t) = 5.0t - 2.0t^2$, estando Q en coulombs y t en segundos. ¿Qué carga total ha pasado en sentido de las manecillas del reloj por el circuito, cuando $t = 1.0$ s? ¿Cuando $t = 2.0$ s? ¿Cuando $t = 3.0$ s? ¿Cuánta corriente pasa en cada uno de esos instantes? ¿Cuál es el significado del signo algebraico del resultado obtenido para cada tiempo?

9. Una corriente comienza a pasar a un capacitor descargado cuando $t = 0$, y disminuye a 0 durante $0 \leq t \leq 2.0$ s, con la dependencia del tiempo $I = A \times (t - 2.0\ \text{s})^2$, donde $A = 0.25\ \text{C/s}^2$. ¿Cuál es la corriente inicial? ¿Y la corriente en 1.0 s? ¿Cuánta carga hay en el capacitor cuando la corriente cesa en $t = 2.0$ s?

10. El tiempo entre colisiones, para electrones en el sodio metálico (símbolo atómico Na) es 8.8×10^{-15} s a temperatura ambiente. Suponiendo que hay un electrón libre por átomo, ¿cuál es la resistividad eléctrica del sodio?

11. En la plata, la densidad del número de electrones libres es $n = 5.8 \times 10^{28}$ por metro cúbico.

    a) Use el valor de resistividad que aparece en la tabla 27.2 para calcular el tiempo promedio entre colisiones de uno de esos electrones.

    b) Suponiendo que el campo eléctrico en un alambre conductor de plata es 8.0 V/m, calcule la rapidez promedio de arrastre de un electrón.

12. La **trayectoria libre media** l de un electrón es la distancia promedio recorrida entre colisiones, $l = v\tau$. Debido a efectos cuánticos, la rapidez v de un electrón en un metal es mucho mayor que la rapidez térmica de una molécula de gas ideal, definida por la ecuación (19.23); para la plata, la rapidez real es 12 veces mayor que la rapidez térmica. Si hay un electrón libre por átomo, ¿cuál es la trayectoria libre media en la plata a 20°C?

13. El alambre de constantán tiene alta resistividad, y se usa con frecuencia en calentadores. ¿Cuál es la resistencia de un tramo de 30 cm de longitud de alambre de constantán, de 0.25 mm de diámetro?

14. Los fotodiodos suministran una corriente proporcional a la potencia de la luz que incide sobre ellos. La corriente mínima que proporciona un fotodiodo de bajo ruido es 4.0×10^{-14} A. Si esa corriente pasa por un resistor de 1.0 MΩ, ¿cuál es la diferencia de voltaje a través del resistor?

15. La resistencia de un foco de 150 W, 115 V, es 88 Ω, cuando está a su temperatura de operación. ¿Qué corriente pasa por ese foco cuando está funcionando? ¿A cuántos electrones por segundo equivale esa corriente?

16. La resistencia del alambre en los devanados de un motor eléctrico de arranque (la *marcha*) de un automóvil es $3.0 \times 10^{-2}\ \Omega$. El motor se conecta a un acumulador de 12 V. ¿Qué corriente pasará por el motor cuando está atorado (no gira)?

17. Un alambre largo, de resistencia R, se corta en ocho piezas. Cuatro de ellas se ponen lado a lado para formar un nuevo alambre de $\frac{1}{8}$ de la longitud original. ¿Cuál es la resistencia del nuevo alambre?

*18. Una espira circular de material superconductor tiene 2.0 cm de radio. Conduce 4.0 A de corriente. ¿Cuál es el momento angular orbital de los electrones en movimiento en el alambre? El origen se encuentra en el centro de la espira.

*19. Un alambre de aluminio tiene 0.10 Ω de resistencia. Si ese alambre se pasa por una prensa para hacerlo más delgado, y del doble de largo ¿cuál será su nueva resistencia?

*20. Se conecta una lámpara de mesa a un contacto eléctrico mediante un cable de cobre de 0.20 cm de diámetro y 2.0 m de longitud. Suponga que la corriente por la lámpara es 1.5 A, y que esa corriente es constante. ¿Cuánto tarda un electrón en ir del contacto hasta la lámpara?

*21. Cuando el motor de arranque de un automóvil trabaja, el cable que lo conecta con el acumulador conduce 80 A de corriente. Ese cable es de cobre, y tiene 0.50 cm de diámetro. ¿Cuál es el campo eléctrico en el cable?

*22. Un cable de cobre, en una línea de transmisión de alto voltaje, tiene 3.0 cm de diámetro y conduce una corriente de 750 A. ¿Cuál es el campo eléctrico en el alambre?

27.3 Resistividad de los materiales

23. El electroimán de un timbre se forma devanando alambre de cobre en torno a un núcleo cilíndrico, como un hilo en un carrete. El diámetro del alambre de cobre es 0.45 mm, el devanado es de 260 vueltas, y el radio promedio de una vuelta es 5.0 mm. ¿Cuál es la resistencia del alambre?

24. A continuación se presenta una lista de algunos tipos de alambre de cobre que se fabrican en Estados Unidos (véase la figura 27.26):

CALIBRE	DIÁMETRO
8	03264 cm
9	0.2906
10	0.2588
11	0.2305
12	0.2053

¿Cuál es la resistencia de un segmento de 100 m de cada tipo?

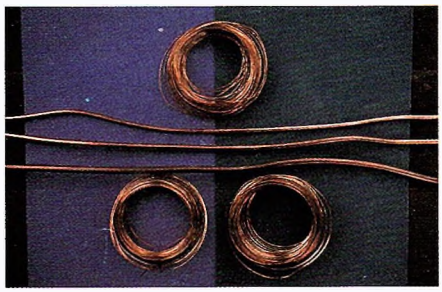


FIGURA 27.26 Alambre de cobre.

25. Para medir la resistividad de un metal, en un experimento se toma un alambre de ese metal, de 0.500 mm de diámetro y 1.10 m de longitud, y se aplica una diferencia de potencial de 12.0 volts en los extremos. Resulta que la corriente es 3.75 A. ¿Cuál es la resistividad?

26. Una línea de transmisión de alto voltaje tiene un cable de aluminio de 3.0 cm de diámetro y 200 km de longitud. ¿Cuál es la resistencia de ese cable?

27. Para el cable de aluminio del problema 26, si su temperatura aumenta de 20°C a 50°C, ¿cuánto aumentará su resistencia?

28. ¿Qué aumento de temperatura hará que la resistencia de un alambre de níquel aumente de 0.50 Ω a 0.60 Ω?

29. ¿Cuál es la densidad de corriente en un alambre de cobre de 0.259 cm de diámetro que conduce una corriente de 30 A? ¿Cuál es el campo eléctrico en el alambre?

30. En un microscopio de barrido de efecto túnel, una pequeña corriente, de un picoampere = 1.0×10^{-12} A, pasa por una región de tamaño atómico, más o menos de 0.30 nm de diámetro. ¿Cuál es la densidad de corriente?

31. La ecuación (27.21), la forma alternativa de la ley de Ohm, también se puede escribir como $j = \sigma E$, donde σ es la **conductividad eléctrica**. ¿Cuál es la conductividad eléctrica del cobre?

32. Con frecuencia, los termómetros comerciales de resistencia de platino se fabrican con una resistencia de 100.0 Ω a 0.0°C. El coeficiente térmico de resistividad es 3.9×10^{-3}/°C. Si la resistencia de ese termómetro es 109.8 Ω, ¿cuál es la temperatura?

33. Una pieza de silicio tiene 12.0 Ω de resistencia, a 20°C. ¿Cuál es la temperatura cuando la resistencia es 10.0 Ω?

*34. Se desea preparar un resistor de 1.0 Ω con una varilla de carbón de 1.0 mm de diámetro. ¿De qué longitud debe ser la varilla?

*35. Un pararrayos de hierro tiene 0.80 cm de diámetro, y 0.50 m de longitud. Cuando le cae un rayo conduce una corriente de 1.0×10^4 A. ¿Cuál es la caída de potencial a lo largo del pararrayos?

*36. En un hogar, el aire acondicionado toma 12 A de corriente.

a) Supóngase que el par de conductores que conecta el aparato con la caja de fusibles son alambres de cobre calibre 10, con 0.259 cm de diámetro, y 25 m de longitud cada uno. ¿Cuál es la caída de potencial a lo largo de cada conductor? Supóngase que la caída entregada al hogar es 115 V, exactamente, en la caja de fusibles. ¿Cuál es el voltaje entregado al aire acondicionado?

b) Algunas casas antiguas están cableadas con alambre de cobre número 12 con 0.205 cm de diámetro. Deberán repetirse los cálculos del inciso *a*) para este alambre.

*37. Aunque el aluminio tiene una resistividad algo mayor que el cobre, tiene la ventaja de que su densidad es mucho menor. ¿Cuál es la masa de un segmento de 100 m de cable de aluminio de 3.0 cm de diámetro? Compárese con la de un cable de cobre de la misma longitud y la misma resistencia. Las densidades del aluminio y el cobre son 2.7×10^3 kg/m^3 y 8.9×10^3 kg/m^3, respectivamente.

*38. De acuerdo con el Código Nacional Eléctrico de Estados Unidos, la corriente máxima permisible en un alambre de cobre número 12 (0.205 cm de diámetro) con aislamiento de hule es 25 A.

a) ¿Cuál es la diferencia de potencial a lo largo de un segmento de 1.0 m del alambre que conduce esa corriente?

b) ¿Cuál es el campo eléctrico en el alambre?

*39. Un alambre de aluminio de 15 m de longitud debe conducir 25 A de corriente con una diferencia de potencial no mayor de 5.0 V en toda su longitud. ¿Cuál es el diámetro mínimo aceptable de ese cable?

*40. De acuerdo con las normas de seguridad establecidas por el Consejo Americano de Botes y Yates, en Estados Unidos, la diferencia de potencial a lo largo de un alambre de cobre que conecta un acumulador de 12 V con un equipo eléctrico no debe ser mayor de 10%, esto es, no debe ser mayor de 1.2 V. Supóngase que un alambre de 9.0 m (medidos siguiendo el circuito) conduce 25 A de corriente. ¿Qué calibre de alambre se requiere para cumplir con la norma anterior? Úsese la tabla de calibres de alambre que se mencionó en el problema 24. Deberá repetirse el cálculo para corrientes de 35 A y de 45 A.

*41. Un capacitor de placas paralelas de 8.0×10^{-2} m^2 de área cada una, y separación 1.0×10^{-4} m está lleno con polietileno. Si la diferencia de potencial entre las placas es 2.0×10^4 V, ¿cuál será la corriente que pasa por el polietileno, de una placa a la otra?

*42. Los devanados de los electroimanes de gran corriente son, con frecuencia, de tubo de cobre. La corriente eléctrica pasa por las paredes del tubo y el agua de enfriamiento pasa por el interior. Supóngase que el tubo de cobre tiene un diámetro exterior de 1.20 cm y diámetro interior 0.80 cm. ¿Cuál es la resistencia de 30 m de ese tubo de cobre? ¿Qué voltaje debe aplicársele si la corriente debe ser 600 A?

*43. Un tramo de 10.0 m de cable coaxial, con un conductor interno macizo de 1.0 mm de diámetro, y una capa conductora externa de 4.0 mm de diámetro interior, tiene polietileno como dieléctrico entre los conductores (véase la figura 26.19). ¿Cuál es la resistencia del cascarón cilíndrico de dieléctrico contra el flujo de corriente de uno a otro conductor? ¿Qué corriente pasa cuando se aplica una diferencia de potencial de 300 V entre los conductores? (Sugerencia: considérese que el dieléctrico es una combinación en serie de cascarones cilíndricos delgados, conectados radialmente.)

27.4 Resistencias en combinación

44. Se conectan en serie tres resistores, de 4.0 Ω, 6.0 Ω y 8.0 Ω respectivamente. ¿Cuál es la resistencia de esa combinación? Si la combinación se conecta con una batería de 12 V, ¿cuál es la corriente? ¿Cuál es la diferencia de potencial a través de cada resistor?

45. Se conectan en paralelo tres resistores, de 5.0 Ω, 7.0 Ω y 9.0 Ω respectivamente. ¿Cuál es la resistencia de esa combinación? Si esa combinación se conecta con una batería de 12 V, ¿cuál es la corriente neta? ¿Cuál es la corriente a través de cada resistor?

46. Un alambre de latón y uno de hierro de diámetros iguales y longitudes iguales se conectan en paralelo. Juntos conducen 6.0 A de corriente. ¿Cuál es la corriente en cada uno?

47. Para los alambres de latón y hierro del problema 46, ¿cuál es la corriente en cada uno a 90°C en lugar de los 20°C que se mencionan en la tabla 27.2?

48. Se conectan en paralelo dos resistores; sus claves de color son café-rojo-naranja, y amarillo-violeta-rojo (véase la figura

27.13). ¿Cuál debe ser la clave de colores de un solo resistor equivalente?

49. Se tienen tres resistores: 2.0 Ω, 3.0 Ω y 4.0 Ω. ¿Qué valores de resistencia se pueden obtener con combinaciones de algunos de ellos o de los tres?

50. Cuando se conectan dos resistores en serie, la resistencia total es 80 Ω. Cuando se conectan en paralelo, la resistencia total es 15 Ω. ¿Cuáles son las resistencias de los dos resistores?

51. Cuando funcionan, las resistencias efectivas de un tostador, un horno de microondas y una sartén eléctrica son 11 Ω, 16 Ω y 12 Ω, respectivamente. Si los tres aparatos se conectan a un contacto de 115 V, ¿cuál es la corriente total?

*52. Un foco ordinario toma 0.87 A de corriente al conectarlo a un contacto de 115 V. ¿Cuál es su resistencia? Cuando se conectan dos de esos focos en serie al contacto de 115 V, la corriente que pasa por ellos es 0.69 A. ¿Cuál es la resistencia de cada foco ahora? ¿Por qué cambió?

*53. Un cable eléctrico de 12.0 m de longitud consta de un alambre de cobre de 0.30 cm de diámetro, rodeado por una capa cilíndrica de aislamiento de hule, de 0.10 cm de espesor. A los extremos de este cable se aplica una diferencia de potencial de 6.0 V.

a) ¿Cuál será la corriente en el cobre?

b) Teniendo en cuenta la resistividad finita del hule (véase la tabla 27.3), ¿cuál será la corriente en el hule?

*54. Un alambre de cobre de 0.50 m de longitud y 0.259 cm de diámetro, fue cortado accidentalmente por una sierra. La región del corte tiene 0.40 cm de longitud, y en esa región el conductor que queda tiene un área transversal igual a sólo la cuarta parte del área original. ¿Cuál es el porcentaje de aumento de la resistencia del alambre que causó ese corte?

*55. Un cable telefónico subterráneo, formado por un par de alambres, tiene un corto en algún lugar de su longitud (véase la figura 27.27). El cable telefónico tiene 5.0 km de longitud, y para descubrir dónde está el corto, un técnico mide primero la resistencia entre las terminales *AB*, después mide la resistencia entre las terminales *CD*. En la primera medición resultan 30 Ω; en la segunda, 70 Ω. ¿Dónde está el corto?

FIGURA 27.27 Un par de conductores con un corto en el punto *P* (los alambres se tocan en *P*).

*56. El aire atmosférico tiene una pequeña conductividad, por la presencia de unos pocos electrones y de iones positivos libres.

a) Cerca de la superficie de la Tierra, el campo eléctrico atmosférico vertical tiene una intensidad aproximada de 100 V/m, y la densidad de corriente atmosférica es 4.0×10^{-12} A/m^2. ¿Cuál es la resistividad?

b) La diferencia de potencial entre la ionosfera (capa superior de la atmósfera) y la superficie de la Tierra es 4.0×10^5 V. ¿Cuál es la resistencia total de la atmósfera? (Sugerencia: Para fines de este problema, supóngase que el campo eléctrico vertical tiene una intensidad constante en toda la atmósfera.)

*57. Un alambre flexible de un cable de extensión para aparatos eléctricos consta de 24 hebras de alambre fino de cobre, cada una de 0.053 cm de diámetro, torcidas entre sí apretadamente. ¿Cuál es la resistencia de un tramo de 1.0 m de esta clase de conductor?

*58. Dos alambres de cobre, de 0.26 cm y 0.21 cm de diámetro, respectivamente, se conectan en paralelo. ¿Cuál es la corriente que pasa por cada uno si la corriente combinada es 18 A?

*59. Los cables superconductores comerciales están formados por filamentos de alambre superconductor adheridos a una matriz de cobre (véase la figura 27.28). Mientras los filamentos sean superconductores, toda la corriente pasa por ellos y nada de corriente pasa por el cobre. Pero si de repente la superconductividad falla debido a un aumento de temperatura, la corriente puede pasar al cobre y con ello se evitan daños a los filamentos del superconductor. ¿Cuál es la resistencia, por metro de longitud, de la matriz de cobre de la figura 27.28? El diámetro de la matriz de cobre es 0.70 mm, y cada uno de los 896 filamentos tiene 0.010 mm de diámetro.

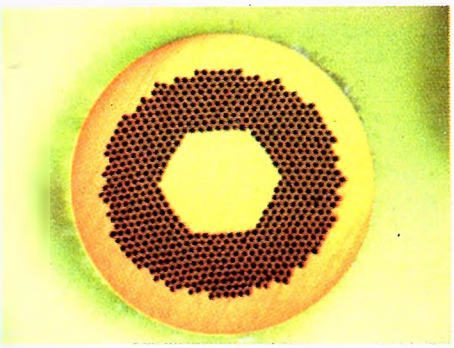


FIGURA 27.28 Corte transversal de un filamento de cable superconductor, formado por 896 filamentos de un superconductor de niobio-titanio adheridos a una matriz de cobre.

*60. ¿Cuál es la resistencia total o equivalente de la combinación de cuatro resistores que muestra la figura 27.29? Cada uno de los resistores tiene 3.0 Ω de resistencia.

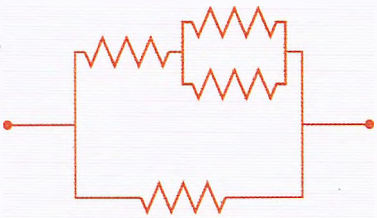


FIGURA 27.29 Cuatro resistores

*61. Se conectan tres resistores, con $R_1 = 2.0\ \Omega$, $R_2 = 4.0\ \Omega$ y $R_3 = 6.0\ \Omega$, como muestra la figura 27.30.

a) ¿Cuál es la resistencia equivalente de la combinación?

b) ¿Cuál es la corriente que pasa por la combinación, si a las terminales se aplica una diferencia de potencial de 8.0 V?

c) ¿Cuál es la caída de potencial y la corriente que pasa por cada resistor?

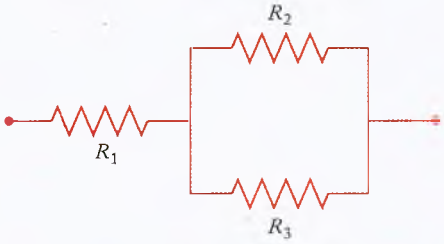


FIGURA 27.30 Tres resistores.

*62. Tres resistores, con $R_1 = 4.0\ \Omega$, $R_2 = 6.0\ \Omega$ y $R_3 = 8.0\ \Omega$, se conectan como muestra la figura 27.31.

a) ¿Cuál es la resistencia equivalente de la combinación?

b) ¿Cuál es la corriente que pasa por la combinación si se aplica una diferencia de potencial de 12.0 V a las terminales?

c) ¿Cuál es la caída de potencial y la corriente a través de cada resistor individual?

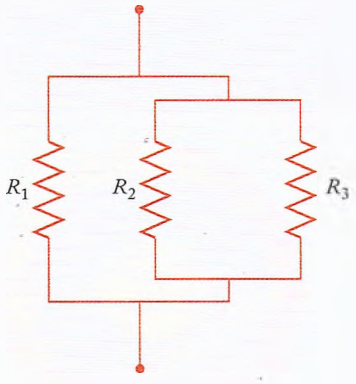


FIGURA 27.31 Tres resistores.

*63. Para la combinación de tres resistores descrita en el problema anterior, se desea que pase una corriente de 6.0 A por el resistor R_2. ¿Qué diferencia de potencial se debe aplicar a las terminales externas?

**64. A lo largo de las aristas de un cubo hay doce resistores, cada uno con resistencia R (véase la figura 27.32). ¿Cuál es la resistencia entre los vértices diagonalmente opuestos de este cubo? (Sugerencia: Se deberá calcular $R_{total} = \Delta V/I_{total}$, donde ΔV es la suma de las tres caídas de voltaje a través de cualquier trayectoria entre los vértices opuestos. Aplíquese simetría para determinar cada corriente en función de I_{total}.)

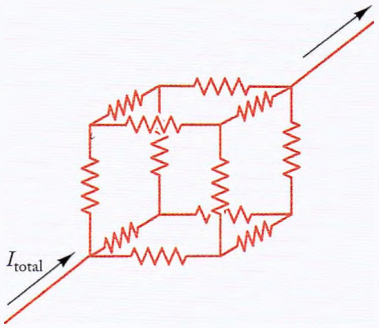


FIGURA 27.32 Un cubo con un resistor en cada arista.

**65. ¿Cuál es la resistencia de una escalera infinita de resistores de 1.0 Ω conectados como muestra la figura 27.33*a*? (Sugerencia: Se puede considerar que la escalera está formada por dos partes conectadas en paralelo, véase la figura 27.33*b*.)

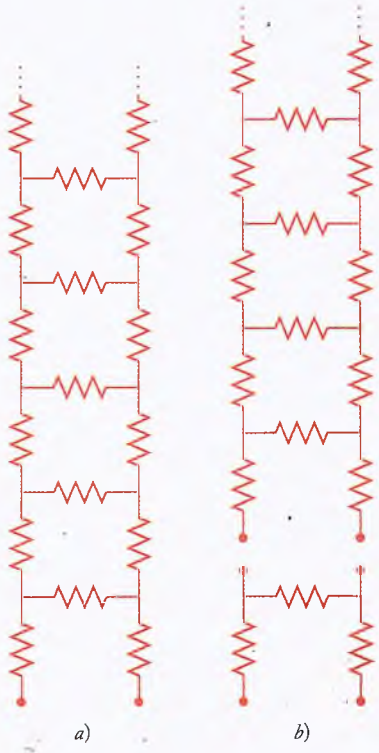


FIGURA 27.33 *a*) Una "escalera" infinita de resistores. Las terminales se marcan con el par de puntos. *b*) Se ha quitado un peldaño de la escalera.

PROBLEMAS DE REPASO

66. Tres resistores, cuyas resistencias son 3.0 Ω, 5.0 Ω y 8.0 Ω, se conectan en paralelo. Si esta combinación se conecta con una batería de 12.0 V, ¿qué corriente pasa por cada resistor? ¿cuál es la corriente que pasa por la combinación?

67. Un acumulador de automóvil bien cargado entrega 40 A durante 1 h hasta que se descarga. ¿Cuánta carga eléctrica pasa por el acumulador durante ese tiempo? ¿Cuántos electrones pasan por el acumulador?

68. Una línea de transmisión en alto voltaje consta de un cable de cobre de 3.0 cm de diámetro y 250 km de longitud. Suponga que el cable conduce una corriente constante de 1 500 A.
    a) ¿Cuál es la resistencia del cable?
    b) ¿Cuál es el campo eléctrico dentro del cable?
69. El filamento de un foco es un trozo de alambre de tungsteno, de 5.0 cm de longitud. Si la diferencia de potencial a través de ese filamento es 115 V, ¿cuál es el campo eléctrico en el alambre?
70. Dos alambres, uno de plata y uno de cobre, tienen iguales longitudes y diámetros. Si deben tener la misma resistencia ¿cuántos grados celsius debe estar más caliente el alambre de plata que el de cobre?
71. La resistividad de cierto material aumenta en 4.45% cuando el material se calienta de 20.0°C a 70.0°C. ¿En qué porcentaje aumentará la resistividad del material a 120°C, respecto a 20°C?
72. El electroimán de un timbre está devanado con 8.2 m de alambre de cobre de 0.45 mm de diámetro. ¿Cuál es la resistencia del alambre? ¿Cuál es la corriente que pasa por el alambre si el electroimán se conecta a una fuente de 12 V?
73. El cable de cobre que conecta el poste positivo de un acumulador de automóvil de 12 V con el motor de arranque, tiene 0.60 m de longitud, y 0.50 cm de diámetro.
    a) ¿Cuál es la resistencia de ese cable?
    b) Cuando falla el motor de arranque, la corriente por el cable puede llegar hasta 600 A. ¿Cuál es la caída de potencial a lo largo del cable en esas condiciones?
74. Diez filamentos iguales de alambre delgado se mantienen lado a lado y forman un conductor grueso de resistencia R. Seis de esos filamentos se separan y se juntan para formar un nuevo conductor con seis veces la longitud del conductor original. ¿Cuál es la resistencia del alambre largo y delgado?
75. ¿Cómo se pueden conectar cuatro resistores de 1.0 Ω para que la resistencia total de la combinación sea 1.0 Ω?
76. La resistencia del filamento en el foco de una linterna es 8.0 Ω (a su temperatura de operación). Las dos pilas de la lámpara, de 1.5 V cada una, se conectan en serie y en consecuencia suministran 3.0 V. ¿Cuál es la corriente que pasa por el filamento? ¿Cuál será la corriente si se conecta la linterna de modo que funcione con una sola pila? Supóngase que la resistencia del filamento no varía (en realidad, con menos corriente, el filamento estará más frío y su resistencia será menor).
77. Cuando se conecta en paralelo con una batería de 12 V, dos resistores conducen corrientes de 0.50 A y 0.75 A, respectivamente. ¿Cuánta corriente conducirán esos resistores si se conectan en serie con la misma batería?
78. Un electrodoméstico se aterriza a una tubería. Este tubo tiene 2.5 cm de diámetro exterior y 2.0 de diámetro interior. Si del electrodoméstico pasan 20 A al tubo de agua ¿qué fracción de esa corriente pasará por el hierro y qué fracción pasará por el agua? Suponga que la resistividad del agua es 0.010 Ω · m.
79. Una soldadora de arco usa cable de cobre calibre 2, de 0.654 cm de diámetro); en el uso, el cable conduce 110 A. ¿Cuál es la densidad de corriente? ¿Cuál es la velocidad de arrastre de los electrones?
80. Dos resistores, de 3.0 Ω y 5.0 Ω, se conectan en serie. La corriente por el resistor de 5.0 Ω es 0.75 A. ¿Cuál es la diferencia de potencial a través de la combinación en serie?
*81. La resistencia de un centímetro cuadrado de epidermis humana seca es 1.0×10^5 Ω, aproximadamente. Suponga que un hombre (tonto) agarra firmemente dos alambres, con sus manos. Los alambres tienen 0.13 cm de radio, y la piel de cada mano está en contacto total con la superficie del alambre en una longitud de 8.0 cm (véase la figura 27.34).
    a) ¿Cuál es la resistencia que ofrece el hombre al paso de la corriente por su cuerpo, de un alambre al otro?. En ese cálculo no se tendrá en cuenta la resistencia de los tejidos humanos internos, porque los fluidos corporales son razonablemente buenos conductores, y su resistencia es pequeña en comparación con la de la piel.
    b) ¿Qué corriente pasará por su cuerpo, si la diferencia de potencial entre los alambres es 12 V? ¿Si es de 115 V? ¿Si es de 240 kV? ¿Qué se puede esperar en cada caso? (Una corriente mayor que 0.001 A puede causar lesiones, y una corriente mayor que 0.02 A puede ser fatal; véase la sección 28.8.)

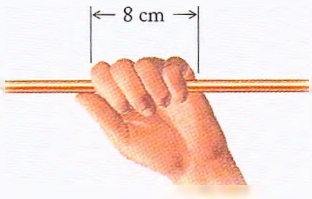


FIGURA 27.34 Contacto entre mano y conductor.

*82. Tres resistores, con $R_1 = 4.0$ Ω, $R_2 = 6.0$ Ω y $R_3 = 2.0$ Ω, se conectan como muestra la figura 27.35. Esta combinación se conecta a una batería de 1.5 V.
    a) ¿Cuál es la resistencia equivalente de esta combinación?
    b) ¿Cuál es la corriente que pasa por la combinación?
    c) ¿Cuál es la caída de potencial y la corriente para cada resistor?

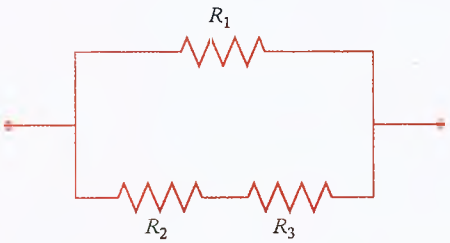


FIGURA 27.35 Tres resistores.

Respuestas a las revisiones

Revisión 27.1

1. Cuando se corta un alambre, los electrones ya no siguen pasando ni se derraman. Cortar un alambre es como cerrar un tubo de agua; como el aire no es conductor, las cargas quedan confinadas en el alambre. Como la corriente es igual en todos los puntos del alambre, al cortarlo se detiene la corriente en todos sus puntos.
2. Sí, la corriente es el flujo por determinado lugar, y no importa si el área transversal en ese punto es pequeña o grande. Naturalmente, cuando el alambre es más grueso, esa corriente se reparte en mayor área transversal.
3. Como la corriente se define en dirección de flujo de carga positiva, una corriente que va hacia arriba debe haber sido impulsada por la fuerza de un campo eléctrico hacia arriba. Como la corriente en un rayo en realidad es un flujo de electrones, el movimiento de los electrones (negativos) es hacia abajo, y eso equivale a un flujo de carga positiva hacia arriba.
4. (B) *a*); *c*). En *a*), las cargas positivas se mueven hacia la izquierda, y la negativa hacia la derecha, y entonces ambas contribuyen a una corriente convencional (flujo de carga positiva) hacia la izquierda. Lo mismo sucede en *b*), pero hay menos cargas, por lo que la corriente en *a*) es mayor. En *c*), cantidades iguales de cargas positivas y negativas se mueven hacia la derecha, por lo que ahí la corriente total es cero.

Revisión 27.2

1. No. Donde el alambre es más delgado, menos electrones deben moverse más rápido para mantener la misma corriente total. También se puede ver en la ecuación (27.11) que donde el área es menor, el campo eléctrico debe ser mayor; por consiguiente, la velocidad de arrastre, que es proporcional al campo eléctrico [ecuación (27.8)], también debe ser mayor.
2. En $R = \rho l/A$ se ve que al triplicar la longitud se triplica la resistencia. También, al duplicar el diámetro aumenta cuatro veces el área, y entonces baja la resistencia en un factor de 4.
3. De acuerdo con la ley de Ohm, para determinada resistencia (determinada pieza de alambre), la corriente y el voltaje son proporcionales. Entonces, la batería de 12 V causa una corriente de 0.2 A y la de 18 V, de 0.3 A.
4. La resistencia de la mitad de la longitud será la mitad de la original, y la ley de Ohm indica que, para el mismo voltaje, la corriente aumentará al doble, a 0.4 A.
5. (D) Decrece, decrece. En ambos casos (colisiones menos frecuentes o más electrones) la carga se puede mover con más facilidad y la resistividad (oposición al flujo de carga) decrece.

Revisión 27.3

1. Ya que los factores geométricos son iguales, la resistencia será proporcional a la resistividad, de acuerdo con la ecuación (27.17). En la tabla 27.2 se ve que la resistividad del nicromo ($100 \times 10^{-8}\ \Omega \cdot \text{m}$) es mayor que la del hierro ($10 \times 10^{-8}\ \Omega \cdot \text{m}$) en un factor de 10.
2. Para longitudes iguales y resistencias iguales, la relación de áreas debe ser igual a la relación de resistividades, de acuerdo con la ecuación (27.17). La relación entre el diámetro del alambre de hierro y el del alambre de plata varía en proporción directa con la raíz cuadrada de la relación de áreas, por lo que es igual a $(\rho_{\text{hierro}}/\rho_{\text{plata}})^{1/2} = (10/1.6)^{1/2} = (100/16)^{1/2} = 10/4 = 2.5$.
3. El porcentaje de aumento es 100 por el aumento fraccionario de $\Delta R/R_0 = \alpha \Delta T$. Para $\Delta T = 100°\text{C}$, los valores de α en la tabla 27.2 indican 0.1% para el constantán, y 60% para el níquel.
4. (D) τ; n. En los metales, la densidad de electrones libres n es constante, en esencia; es el tiempo τ entre colisiones lo que decrece al aumentar la temperatura, debido al mayor movimiento térmico de los átomos en la red. Al aumentar la temperatura de un semiconductor, una disminución similar de τ es superada mucho por un aumento mucho mayor de n, porque el calentamiento agita más electrones que se liberan.

Revisión 27.4

1. Al cortar el alambre en dos longitudes iguales se producen dos resistencias, cada una con la mitad de la resistencia original. Al conectar dos resistores iguales en paralelo otra vez disminuye la resistencia a la mitad, y resulta una nueva resistencia de la cuarta parte de la original, o $\frac{3}{4}\ \Omega$.
2. Una razón que se visualiza con facilidad es que las resistencias en serie son como un alambre largo: mientras más largo sea el alambre, la resistencia será mayor. Las resistencias en paralelo son análogas a un alambre más grueso: mientras más grueso sea el alambre, menor será la resistencia.
3. Dada la diferencia de potencial (de la batería), las longitudes y las áreas son iguales, y el alambre con la menor resistividad tendrá mayor corriente (se usa $I = \Delta V/R$, y $R = \rho l/A$). De acuerdo con la tabla 27.2, la plata tiene una resistividad (ligeramente) menor que la del cobre, por lo que conducirá más corriente.
4. (C) 10 Ω; 0.1 Ω. En serie, las resistencias se suman, y entonces diez resistores de 1 Ω producen una resistencia total de 10 Ω. Los resistores en paralelo se suman de tal modo que la inversa de la resistencia total R es la suma de las inversas de las resistencias; entonces $R = 1/[10 \times 1/(1\ \Omega)] = 0.1\ \Omega$.

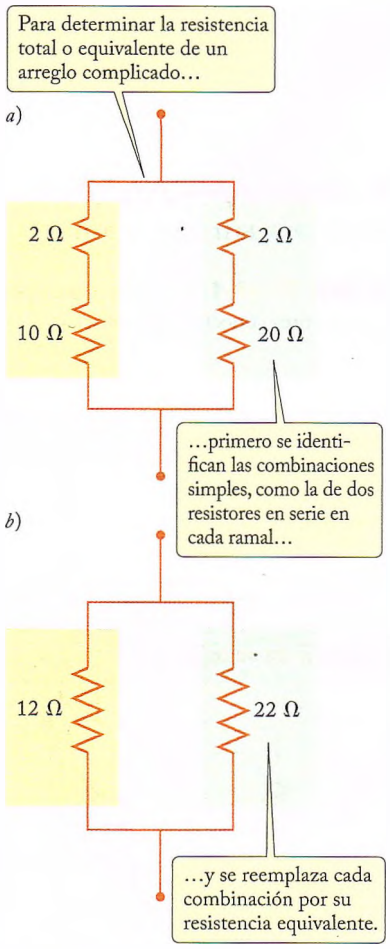


FIGURA 27.20 *a)* En este diagrama eléctrico, las resistencias de los alambres se representan mediante dos resistores pequeños. *b)* Las ramas derecha (verde) e izquierda (naranja) del circuito equivalen a dos resistores de 12 Ω y 22 Ω conectados en paralelo.

bre con un resistor equivalente de magnitud adecuada; aquí se sobreentiende que toda la resistencia de un alambre está concentrada, o agrupada, en un lugar. Se puede suponer, entonces, que los segmentos de recta que conectan esos resistores equivalentes con el resto del circuito tienen resistencias exactamente iguales a cero. Por ejemplo, si cada uno de los dos alambres que conectan a los resistores de la figura 27.19 es largo, y cada uno tiene 2 Ω de resistencia, el diagrama eléctrico que incluye la resistencia de los alambres a las conexiones es como se ve en la figura 27.20. Se observa que en ese diagrama se colocan los resistores de 2 Ω, que representan las resistencias de los alambres, directamente arriba de los resistores R_1 y R_2. También se podían haber colocado esos resistores equivalentes directamente abajo de R_1 y R_2, o la mitad de cada uno arriba y la otra mitad abajo de cada resistor; todos esos arreglos son realmente equivalentes, y conducen a la misma distribución de la corriente entre las dos ramas del circuito. También se observa que no se toma en cuenta la resistencia de los conductores cortos que salen del circuito, arriba y abajo de él; si tuvieran una resistencia importante, habría también que tomarla en cuenta.

EJEMPLO 9 Si, como en el ejemplo anterior, pasa una corriente de 1.8 A por la combinación de resistores y alambres resistivos que muestra el esquema de la figura 27.20*a*, ¿cuál es la diferencia de potencial a través de toda la combinación? ¿Cuál es la corriente en cada resistor?

SOLUCIÓN: Para resolver este problema se seguirán dos pasos. Primero, se determinarán las resistencias de las ramas izquierda y derecha del circuito. La rama izquierda consta de un resistor R_1 de 10 Ω, en serie con 2 Ω, y la rama derecha, de un resistor R_2 de 20 Ω en serie con 2 Ω. Por tanto, la resistencia de la rama izquierda del circuito es $R_1' = R_1 + 2\ \Omega = 12\ \Omega$, y la de la rama derecha es $R_2' = R_2 + 2\ \Omega = 22\ \Omega$.

A continuación se determina la resistencia total del circuito, combinando R_1' y R_2' en paralelo (véase la figura 27.20*b*). Esta combinación en paralelo de las resistencias de las ramas izquierda y derecha da como resultado

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1'} + \frac{1}{R_2'} = \frac{1}{12\ \Omega} + \frac{1}{22\ \Omega} = \frac{34}{264\ \Omega}$$

De aquí se ve que $R = 264\ \Omega/34 = 7.8\ \Omega$, que es la resistencia total o equivalente del circuito. Así, por la ley de Ohm, la diferencia de potencial a través de la combinación es

$$\Delta V = IR = 1.8\ \text{A} \times 7.8\ \Omega = 14\ \text{volts}$$

y las corrientes individuales en las ramas son

$$I_1 = \frac{\Delta V}{R_1'} = \frac{14\ \text{volts}}{12\ \Omega} = 1.2\ \text{A}$$

$$I_2 = \frac{\Delta V}{R_2'} = \frac{14\ \text{volts}}{22\ \Omega} = 0.64\ \text{A}$$

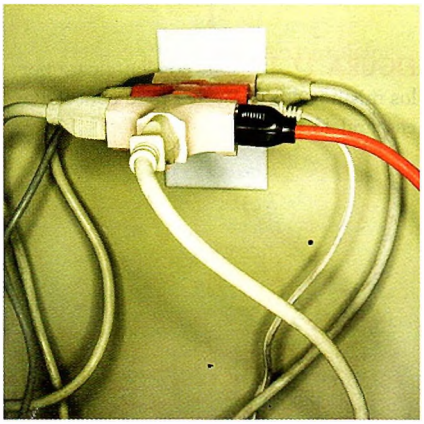


FIGURA 27.21 Varios aparatos eléctricos conectados a los receptáculos en una casa.

Los electrodomésticos ordinarios, conectados en los receptáculos de una casa, se conectan en paralelo (véase la figura 27.21). La diferencia de potencial a través de cada uno de esos aparatos es 115 V, que es la diferencia de potencial suministrada entre los hilos que alimentan electricidad a la casa.* Algunos de estos dispositivos, como los fo-

* La diferencia de potencial suministrada entre hilos de corriente en realidad es una diferencia de potencial que oscila, que periódicamente invierte su signo. Se explicarán los detalles de esos potenciales y corrientes oscilantes, o alternos, en el capítulo 32.