



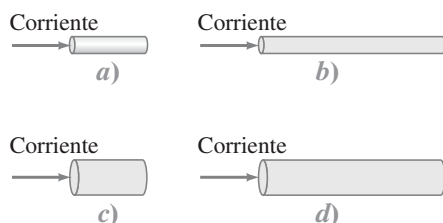
El brillo del delgado filamento de alambre de una bombilla eléctrica se debe a la corriente eléctrica que fluye a través de él. La energía eléctrica se transforma en energía térmica (por medio de las colisiones entre los electrones en movimiento con los átomos del alambre), lo que produce un aumento en la temperatura del alambre hasta el punto de hacerlo brillar. La corriente y la potencia eléctricas en un circuito eléctrico son muy importantes en la vida diaria. En este capítulo estudiaremos los circuitos ca y cd, incluyendo un análisis microscópico de la corriente eléctrica.

Corrientes eléctricas y resistencia

CAPÍTULO 25

PREGUNTA DE INICIO DE CAPÍTULO: ¡Adivine ahora!

Los conductores que se ilustran a continuación están hechos de cobre y se encuentran a la misma temperatura. ¿Qué conductor presentará la mayor resistencia al flujo de carga que entra por el lado izquierdo? ¿Cuál ofrecerá la menor resistencia?



En los cuatro capítulos anteriores analizamos la electricidad estática, es decir, la electricidad que tiene que ver con cargas eléctricas en reposo. En este capítulo comenzamos nuestro estudio de cargas en movimiento; al flujo de carga lo llamaremos corriente eléctrica.

En nuestra vida diaria estamos acostumbrados a manejar corrientes eléctricas en cables y otros conductores. De hecho, la mayoría de los aparatos eléctricos dependen de corrientes eléctricas: la corriente en una bombilla eléctrica, la corriente en un aparato calefactor de una estufa o en un calentador eléctrico. Las corrientes eléctricas existen en conductores como cables y también en dispositivos como el CRT del monitor de un televisor o el de una computadora, cuyos electrones cargados viajan a través del espacio (sección 23-9).

CONTENIDO

- 25-1 La batería eléctrica
- 25-2 Corriente eléctrica
- 25-3 Ley de Ohm: Resistencia y resistores
- 25-4 Resistividad
- 25-5 Potencia eléctrica
- 25-6 Potencia en circuitos domésticos
- 25-7 Corriente alterna
- 25-8 Visión microscópica de la corriente eléctrica: Densidad de corriente y velocidad de deriva
- *25-9 Superconductividad
- *25-10 Conducción eléctrica en el sistema nervioso



FIGURA 25-1 Alessandro Volta. En esta pintura, Volta exhibe su batería a Napoleón en 1801.

En las secciones 21-9 y 22-3 vimos que, en situaciones electrostáticas, el campo eléctrico debe ser cero dentro de un conductor (si no fuera cero, habría movimiento de cargas). Pero cuando las cargas están en *movimiento* dentro de un conductor, generalmente *hay* un campo eléctrico dentro del conductor. De hecho, se necesita un campo eléctrico para poner las cargas en movimiento y para mantenerlas en movimiento en cualquier conductor normal. Es posible controlar el flujo de carga usando campos eléctricos y potencial eléctrico (voltaje), conceptos que ya hemos estudiado. Para mantener una corriente en un alambre se requiere que haya una diferencia de potencial, la cual puede ser suministrada por una batería.

Primero estudiaremos la corriente eléctrica desde el punto de vista macroscópico; esto es, la corriente medida en un laboratorio. Después veremos la corriente desde el punto de vista microscópico (teórico), como el flujo de electrones dentro de un alambre.

Hasta 1800, el desarrollo tecnológico de la electricidad consistió en producir cargas estáticas mediante fricción. Todo cambió ese año cuando Alessandro Volta (1745-1827, figura 25-1) inventó la batería eléctrica y con ella produjo el primer flujo de carga estacionario: una corriente eléctrica constante.

25-1 La batería eléctrica

Los acontecimientos que dieron lugar a la invención de la batería son interesantes. No sólo se trató de un importante avance científico, sino que también originó un famoso debate científico.

En la década de 1780, Luigi Galvani (1737-1798), profesor de la Universidad de Bologna, llevó a cabo una serie de experimentos sobre la contracción del músculo de las extremidades de una rana a través de la electricidad producida por electricidad estática. Encontró que el músculo también se contraía cuando se insertaban distintos metales dentro de la rana. Galvani creía que la fuente de la carga eléctrica estaba en el músculo de la rana o en el nervio mismo, y que el metal sólo transmitía la carga a los puntos adecuados. Cuando publicó su trabajo en 1791, llamó a esta carga “electricidad animal”. Muchos, incluido el mismo Galvani, se preguntaron si se había descubierto la “fuerza viva” que se había buscado por tanto tiempo.

Alessandro Volta, en la Universidad de Pavia (ubicada a 200 km de donde se encontraba Galvani), escéptico de los resultados de su colega, llegó a pensar que la fuente de la electricidad no estaba en el animal, sino en *el contacto entre los diferentes metales*. Volta se dio cuenta de que un conductor húmedo, como el músculo de una rana o la humedad en el punto de contacto entre dos metales distintos, era necesario en el circuito para que éste fuera efectivo. Asimismo, mostró que el músculo en contracción de la rana era un instrumento sensible para detectar la “tensión eléctrica” o la “fuerza electromotriz” (los términos que él usaba para lo que hoy conocemos como potencial); de hecho, era más sensible que los mejores electroskopios disponibles (sección 21-4) desarrollados por él y otros.[†]

La investigación de Volta permitió conocer que ciertas combinaciones de metales producían un efecto mayor que otras; luego, utilizando sus mediciones, elaboró una lista de tales combinaciones en orden de efectividad. (Los químicos aún utilizan esta “serie electroquímica”). De igual manera, encontró que el carbón podía usarse en lugar de alguno de los metales.

Fue entonces que Volta realizó su mayor contribución a la ciencia. Entre un disco de zinc y otro de plata, colocó un pedazo de tela o papel humedecido, sumergido en una solución salina o en ácido diluido, y apiló una “batería” de tales uniones, como se muestra en la figura 25-2. Esta “pila” o “batería” manifestó una diferencia de potencial mucho mayor que las anteriores. De hecho, cuando se juntaron tiras de metal conectadas a los dos extremos de la pila, se produjo una chispa. Volta había diseñado y construido la primera pila eléctrica. Publicó su descubrimiento en 1800.

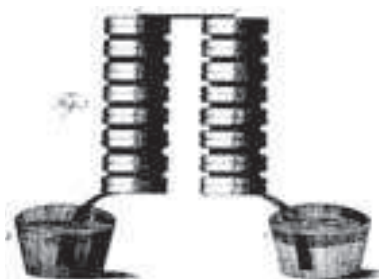


FIGURA 25-2 Una batería voltaica, tomada de la publicación original de Volta.

[†]El electroskopo más sensible de Volta medía aproximadamente 40 V por grado (ángulo de separación entre las hojas). Sin embargo, fue capaz de estimar diferencias de potencial producidas por diferentes metales en contacto: para una unión plata-zinc, obtuvo 0.7 V, muy cercano al valor actual de 0.78 V.

Pilas eléctricas y baterías

Una batería produce electricidad al transformar energía química en energía eléctrica. Actualmente contamos con gran variedad de pilas eléctricas y baterías: desde las baterías de una linterna de mano hasta la batería de almacenamiento de un automóvil. Las baterías más simples contienen dos placas o varillas hechas de metales distintos (una de ellas puede ser de carbón) llamadas **electrodos**. Los electrodos están inmersos en una solución, como un ácido diluido llamado **electrolito**. Un dispositivo como éste se conoce con el nombre de **celda o pila eléctrica**; varias pilas conectadas entre sí constituyen una **batería**, aunque actualmente una pila simple aún se conoce como batería. Las reacciones químicas implicadas en la mayoría de las pilas eléctricas son muy complicadas. Aquí describimos cómo funciona una pila muy simple, poniendo énfasis en los aspectos físicos.

La celda que se ilustra en la figura 25-3 usa ácido sulfúrico diluido como electrolito. Uno de los electrodos está hecho de carbón y el otro de zinc. Las partes de cada electrodo que están afuera de la solución se llaman **terminales**, las cuales se conectan a alambres o circuitos. El ácido tiende a disolver el electrodo de zinc. Cada átomo de zinc deja atrás dos electrones en el electrodo y entra a la solución como un ion positivo. El electrodo de zinc adquiere así una carga negativa. Conforme se carga positivamente el electrolito, arranca electrones del electrodo de carbón. En consecuencia, el electrodo de carbón se carga positivamente. Puesto que hay cargas opuestas en los dos electrodos, se establece una diferencia de potencial entre las dos terminales.

En una pila cuyas terminales no están conectadas, se disuelve sólo una pequeña cantidad del zinc, ya que, mientras el electrodo de zinc se torna más negativo, los nuevos iones positivos de zinc producidos son atraídos de regreso hacia el electrodo. Como resultado, se mantiene una diferencia de potencial (o voltaje) particular entre las dos terminales. Si se permite que la carga fluya entre las terminales, por ejemplo, mediante un alambre (o una bombilla), entonces será posible disolver más zinc. Después de un tiempo, alguno de los electrodos se desgasta y la batería “se muere”.

El voltaje que hay entre las terminales de una batería depende de qué estén hechos los electrodos y de su capacidad relativa para disolverse o ceder electrones.

Cuando se conectan dos o más pilas de manera que la terminal positiva de una se conecta a la terminal negativa de la siguiente, se dice que están conectadas en *serie* y sus voltajes se suman. Así, el voltaje entre los extremos de dos baterías de linterna de 1.5 V conectadas en serie es de 3.0 V; de igual forma, las seis celdas de 2 V de la batería de almacenamiento de un automóvil producen un voltaje de 12 V. La figura 25-4a presenta el diagrama de una “batería seca” común o la “batería de una linterna” usada en radios portátiles o reproductores de CD, linternas, etcétera, mientras que la figura 25-4b muestra dos pilas más pequeñas en serie, conectadas a una bombilla. Una bombilla consiste en un alambre enrollado, delgado (el filamento), dentro de un bulbo de vidrio evacuado, como se observa en la figura 25-5 y en la foto que viene al inicio de este capítulo (página 651). El filamento se calienta mucho (3000 K) y brilla cuando la carga pasa a través de él.

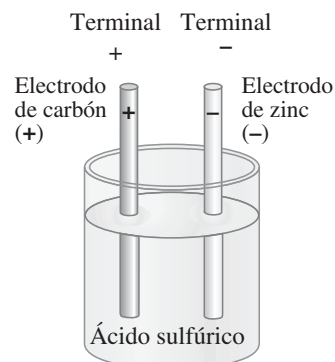


FIGURA 25-3 Celda o pila eléctrica simple.

FIGURA 25-4 a) Diagrama de una pila seca ordinaria (como una pila D o AA). El recipiente cilíndrico de zinc está cubierto en sus extremos; su base plana es la terminal negativa. b) Dos pilas secas (tipo AA) conectadas en serie. Observe que la terminal positiva de una pila está conectada a la terminal negativa de la otra.

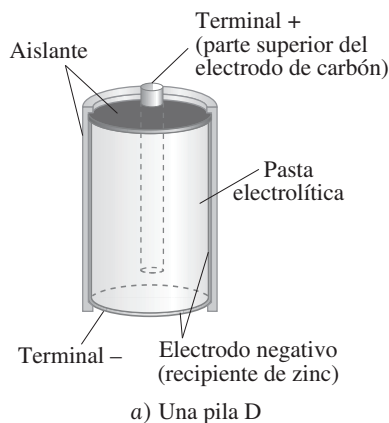
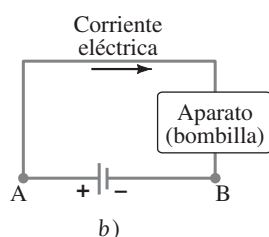


FIGURA 25-5 Una bombilla: el delgado alambre del filamento se calienta tanto que brilla. Este tipo de bombilla se conoce como bombilla o foco incandescente (en contraste con un bulbo fluorescente).





a)



b)

FIGURA 25-6 a) Un circuito eléctrico sencillo. b) Esquema del mismo circuito, que consiste en una batería, alambres conductores (líneas grises gruesas) y una bombilla u otro aparato.



⚠ CUIDADO

Una batería no crea carga; una bombilla eléctrica no destruye ninguna carga

25-2 Corriente eléctrica

El propósito de una batería es producir una diferencia de potencial, la cual puede provocar un movimiento de cargas. Cuando se forma una trayectoria de conducción entre las terminales de una batería, tenemos un **circuito eléctrico** (figura 25-6a). En cualquier diagrama de un circuito, como en la figura 25-6b, usamos el símbolo



[símbolo de una batería]

para representar una batería. El aparato que se conecta a la batería puede ser una bombilla eléctrica, un calentador, un radio o algún otro. Cuando se forma un circuito de esta manera, la carga eléctrica puede fluir a través de los cables del circuito desde una terminal de la batería hasta la otra terminal, siempre y cuando el camino de conducción sea continuo. A cualquier flujo de carga como éste, se le conoce como **corriente eléctrica**.

Con mayor precisión, la corriente eléctrica en un alambre se define como la cantidad de carga neta que pasa a través de la sección transversal completa del alambre en cualquier punto por unidad de tiempo. Así, la corriente eléctrica promedio \bar{I} está dada por:

$$\bar{I} = \frac{\Delta Q}{\Delta t}, \quad (25-1a)$$

donde ΔQ es la cantidad de carga que pasa a través del conductor en cualquier posición durante el intervalo de tiempo Δt . La corriente instantánea se define como el límite

$$I = \frac{dQ}{dt}. \quad (25-1b)$$

La corriente eléctrica se mide en coulombs por segundo; a este cociente se le da el nombre especial de **ampere** (que se abrevia amp o A), en honor al físico francés André Ampère (1775-1836). Así, $1 \text{ A} = 1 \text{ C/s}$. A menudo se emplean unidades más pequeñas de corriente, tales como el miliampere ($1 \text{ mA} = 10^{-3} \text{ A}$) y el microampere ($1 \mu\text{A} = 10^{-6} \text{ A}$).

Una corriente puede fluir en un circuito sólo si hay una trayectoria *continua* de conducción. En este caso, tenemos un **circuito completo**. Si el circuito se interrumpe, por ejemplo, por un alambre roto, le llamamos **circuito abierto** y no hay flujo de corriente. En cualquier circuito sencillo, con una sola trayectoria para la corriente, como se muestra en la figura 25-6b, se tiene una corriente estacionaria en cualquier punto en cualquier instante (por ejemplo, el punto A), que es igual a la que existe en cualquier otro punto (digamos, el punto B). Lo anterior se deduce a partir de la ley de conservación de la carga eléctrica: la carga no desaparece. Una batería no crea (o no destruye) ninguna carga neta, así como una bombilla tampoco absorbe ni destruye carga.

EJEMPLO 25-1 La corriente es un flujo de carga. Se tiene una corriente estacionaria de 2.5 A en un alambre durante 4.0 min . a) ¿Cuál es la carga total que pasó por un punto dado del circuito durante los 4.0 min ? b) ¿A cuántos electrones equivale esto?

PLANTEAMIENTO La corriente es el flujo de carga por unidad de tiempo (ecuación 25-1), así que la cantidad de carga que pasa por un punto es el producto de la corriente por el intervalo. Para calcular el número de electrones en el inciso b), dividimos la carga obtenida entre la carga del electrón.

SOLUCIÓN a) Puesto que la corriente es de 2.5 A , o 2.5 C/s , tenemos que en 4.0 min ($= 240 \text{ s}$) la carga total que pasó por un punto dado del circuito fue, de acuerdo con la ecuación 25-1,

$$\Delta Q = I \Delta t = (2.5 \text{ C/s})(240 \text{ s}) = 600 \text{ C}.$$

b) La carga de un electrón es de $1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$, así que 600 C están formados por

$$\frac{600 \text{ C}}{1.60 \times 10^{-19} \text{ C/electrón}} = 3.8 \times 10^{21} \text{ electrones}.$$

EJERCICIO A Si por un punto de un alambre pasan 1 millón de electrones, ¿cuál es la corriente en amperes?

EJEMPLO CONCEPTUAL 25-2 **Cómo conectar una batería.** ¿Qué es lo que está mal, en cada uno de los esquemas mostrados en la figura 25-7, para encender una bombilla eléctrica usando una batería de linterna y un simple alambre?

RESPUESTA a) No hay una trayectoria cerrada para que la carga fluya alrededor. Las cargas podrían empezar a fluir brevemente desde la batería hacia la bombilla, pero ahí llegan a un “callejón sin salida”, por lo que el flujo cesará de inmediato.

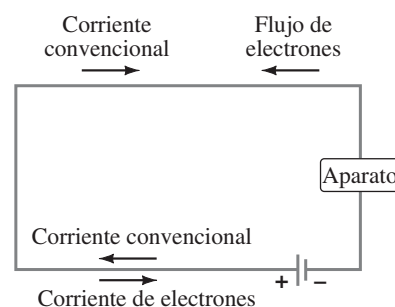
b) Ahora tenemos una trayectoria cerrada, pero el alambre toca sólo una terminal de la batería, así que no hay diferencia de potencial en el circuito que produzca movimiento de cargas.

c) Nada está mal. Éste es un circuito completo: la carga puede fluir desde una terminal de la batería, a través del alambre y la bombilla, hacia la otra terminal. Este esquema encenderá la bombilla.



FIGURA 25-7 Ejemplo 25-2.

FIGURA 25-8 La corriente convencional de + a – es equivalente a un flujo de electrones negativos de – a +.



En muchos circuitos reales, los alambres están conectados a un conductor común que provee continuidad. A este conductor común se le llama **tierra**, generalmente representada con el símbolo \perp o \downarrow , y en realidad está conectado a la tierra en un edificio o en una casa. En un automóvil se le llama “tierra” a una de las terminales de la batería, pero no está conectada a la tierra —está conectada al chasis del automóvil, como si fuera una conexión a una bombilla u otros aparatos. Así que el chasis del automóvil es un conductor en cada circuito, lo que asegura una trayectoria continua para que fluya la carga.

En el capítulo 21 vimos que los conductores contienen muchos electrones libres. Así, si un alambre conductor continuo se conecta a las terminales de una batería, los electrones cargados negativamente fluirán en el alambre. Cuando el alambre se conecta por primera vez, la diferencia de potencial entre las terminales de la batería establece un campo eléctrico dentro del alambre[†] y paralelo a él. Los electrones libres en un extremo del alambre son atraídos hacia la terminal positiva; al mismo tiempo, otros electrones abandonan la terminal negativa de la batería y entran al alambre en el otro extremo. A lo largo del alambre se establece un flujo continuo de electrones que comienza tan pronto como el alambre se conecta a *ambas* terminales. Sin embargo, cuando se establecieron las convenciones de carga positiva y carga negativa hace dos siglos, se consideró que la carga positiva fluía en el alambre. Para casi todos los casos, una carga positiva que fluye en un sentido es equivalente a una carga negativa, que fluye en sentido opuesto,[‡] como se observa en la figura 25-8. Hoy utilizamos todavía la convención histórica de flujo de carga positiva cuando analizamos la dirección de una corriente. En consecuencia, cuando hablamos de la dirección de la corriente en un circuito, queremos indicar la dirección en la que fluirían las cargas positivas. Lo anterior se conoce en ocasiones como la **corriente convencional**. Cuando queramos hablar de la dirección del flujo de los electrones, estableceremos específicamente que se trata de la corriente de los electrones. En los líquidos y gases, las cargas positivas y negativas (iones) pueden moverse.

25-3 Ley de Ohm: Resistencia y resistores

Para producir una corriente eléctrica en un circuito se requiere establecer una diferencia de potencial. Una manera de lograr una diferencia de potencial a través de un alambre es conectar sus extremos a las terminales opuestas de una batería. Fue Georg Simon Ohm (1787-1854) quien estableció en forma experimental que la corriente en un alambre de metal es proporcional a la diferencia de potencial V aplicada a sus extremos:

$$I \propto V.$$

Si conectamos, por ejemplo, un alambre a una batería de 6 V, el flujo de corriente será dos veces mayor que si el alambre estuviera conectado a una batería de 3 V. Se encuentra también que invertir el signo del voltaje no afecta la magnitud de la corriente.

[†] Esto no contradice lo que se aseguró en la sección 21-9: que en el caso *estático* no puede haber un campo eléctrico dentro de un conductor, pues de otra manera las cargas se moverían. De hecho, cuando hay un campo eléctrico dentro de un conductor, las cargas se mueven, por lo que obtenemos una corriente eléctrica.

[‡] Una excepción de esto se analiza en la sección 27-8.

Una analogía útil compara el flujo de corriente eléctrica en un alambre con el flujo de agua en un río, o en una tubería, afectado por la gravedad. Si el río o la tubería corren de manera horizontal, la tasa de flujo es pequeña. Pero si un extremo está más alto que el otro, la tasa de flujo, o la corriente, será mayor. Cuanto mayor sea la diferencia de alturas, más rápida será la corriente. En el capítulo 23 vimos que la diferencia de potencial es análoga, en el caso gravitacional, a la altura de un acantilado. Lo anterior se aplica en el presente caso a la altura a través de la cual se da el flujo. Así como un incremento en la altura puede producir un incremento en el flujo de agua, una mayor diferencia de potencial eléctrico, o voltaje, produce una mayor corriente eléctrica.

La magnitud de una corriente en un alambre depende no sólo del voltaje, sino también de la resistencia que ofrece el alambre al flujo de los electrones. Las paredes de una tubería, o la ribera de un río y las rocas en el camino, ofrecen resistencia a la corriente de agua. De la misma manera, el flujo de los electrones encuentra obstáculos en las interacciones con los átomos del alambre. A mayor resistencia, menos corriente para un voltaje dado V . Definimos entonces la **resistencia** eléctrica de forma que la corriente es inversamente proporcional a la resistencia; esto es,

$$I = \frac{V}{R} \quad (25-2a)$$

donde R es la **resistencia** del alambre o de otros aparatos, V es la diferencia de potencial aplicada a través del alambre o del aparato e I es la corriente que circula por él. La ecuación 25-2a se escribe de manera habitual como

$$V = IR. \quad (25-2b)$$

“LEY” DE OHM

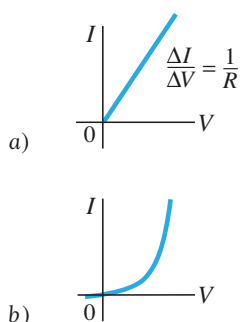
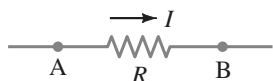


FIGURA 25-9 Gráficas de corriente contra voltaje para a) un material conductor que obedece la ley de Ohm y b) un aparato no óhmico; en este caso, un diodo semiconductor.

Como ya se mencionó, Ohm encontró experimentalmente que en un metal conductor R es una constante independiente de V , resultado que se conoce como la **ley de Ohm**. A la ecuación 25-2b, $V = RI$, se le llama en ocasiones ley de Ohm, pero sólo cuando nos referimos a materiales o aparatos para los cuales R es una constante independiente de V . Sin embargo, R no es una constante para muchas sustancias que no sean metales, como los diodos, los tubos de vacío, los transistores, etcétera. Aun el filamento de una bombilla eléctrica no es un material óhmico: la resistencia medida es baja para pequeñas corrientes, pero mucho más alta a su corriente normal de operación, que la pone a una alta temperatura necesaria para hacerla brillar (3000 K). Así que la “ley” de Ohm no es una ley fundamental, sino más bien una descripción de cierto tipo de materiales: metales conductores, cuya temperatura no cambia mucho. A los materiales o aparatos que no siguen la ley de Ohm ($R = \text{constante}$) se les conoce como materiales no óhmicos. Véase la figura 25-9.

La unidad de resistencia se llama **ohm**, que se abrevia con la letra griega omega mayúscula Ω . Puesto que $R = V/I$, vemos que 1.0Ω equivale a 1.0 V/A .

FIGURA 25-10 Ejemplo 25-3.



EJEMPLO CONCEPTUAL 25-3 Corriente y potencial. Una corriente I entra a un resistor R como se indica en la figura 25-10. a) ¿El potencial es mayor en el punto A o en el punto B? b) ¿La corriente es mayor en el punto A o en el punto B?

RESPUESTA a) La carga positiva siempre fluye de $+$ a $-$, de un potencial alto a un potencial bajo. Piense de nuevo en la analogía gravitacional: una masa se moverá de una región de alto potencial gravitacional a otra de menor potencial. Así que para una corriente positiva I , el punto A está a un potencial mayor que el punto B.

b) Por conservación de carga, cualquier cantidad de carga que fluya hacia el resistor en el punto A será igual a la cantidad de carga que emerge en el punto B. La carga o la corriente no se “gasta” en el resistor, así como un objeto que cae a través de un potencial gravitacional no gana ni pierde masa. En consecuencia, la corriente es la misma en los puntos A y B.

Un decremento en el potencial eléctrico, como del punto A al punto B en el ejemplo 25-3, se conoce generalmente como **caída de potencial** o **caída de voltaje**.

EJEMPLO 25-4 Resistencia de una bombilla de linterna. Una pequeña bombilla de linterna (figura 25-11) toma 300 mA de su batería de 1.5 V. a) ¿Cuál es la resistencia de la bombilla? b) Si la batería se debilita y el voltaje cae a 1.2 V, ¿en cuánto variará la corriente?

PLANTEAMIENTO Podemos aplicar la ley de Ohm a la bombilla, donde el voltaje aplicado a través de ella es el voltaje de la batería.

SOLUCIÓN a) Convertimos 300 mA a 0.30 A y usamos la ecuación 25-2a o b:

$$R = \frac{V}{I} = \frac{1.5 \text{ V}}{0.30 \text{ A}} = 5.0 \Omega.$$

b) Si la resistencia permanece constante, la corriente sería

$$I = \frac{V}{R} = \frac{1.2 \text{ V}}{5.0 \Omega} = 0.24 \text{ A} = 240 \text{ mA},$$

es decir, una disminución de 60 mA.

NOTA Con la corriente menor en el inciso b), la temperatura del filamento de la bombilla sería menor y la bombilla brillaría menos. Además, la resistencia depende de la temperatura (sección 25-4), así que nuestros cálculos son tan sólo una aproximación.

EJERCICIO B ¿Qué resistencia debe conectarse a una batería de 9.0 V para conseguir una corriente de 10-mA? a) 9 Ω , b) 0.9 Ω , c) 900 Ω , d) 1.1 Ω , e) 0.11 Ω .

Todos los aparatos eléctricos, desde calentadores y bombillas hasta amplificadores estéreo, ofrecen resistencia al flujo de la corriente. Los filamentos en las bombillas eléctricas (figura 25-5) y los calentadores eléctricos son tipos especiales de alambre, cuya resistencia origina que se calienten mucho. Por lo general, los alambres conectores tienen una resistencia muy baja en comparación con la resistencia del alambre del filamento o las bobinas de un calentador, así que los alambres conectores por lo general tienen un efecto mínimo en la magnitud de la corriente. En muchos circuitos, en particular en aparatos electrónicos, se utilizan **resistores** para controlar la cantidad de corriente. Los resistores cuentan con resistencias que varían desde menos de un ohm hasta millones de ohms (véase las figuras 25-12 y 25-13). Los tipos principales son: resistores de “alambre enrollado”, formados por una bobina de alambre fino; resistores de “composición”, hechos generalmente de carbón, y carbonos delgados o películas de metal.

Cuando dibujamos el diagrama de un circuito, usamos el símbolo



[símbolo de resistor]

para indicar una resistencia. Sin embargo, los alambres cuya resistencia es despreciable, se dibujan sólo con líneas rectas simples.

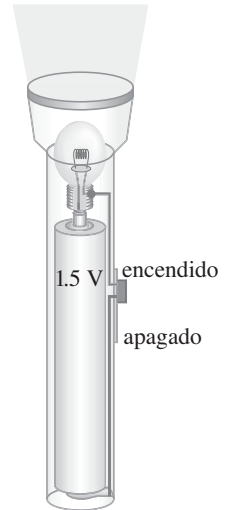


FIGURA 25-11 Linterna (ejemplo 25-4). Observe cómo el circuito se cierra a lo largo de la banda lateral.

FIGURA 25-12 Fotografía de resistores (con franjas), junto con otros aparatos en una tabla de circuito.

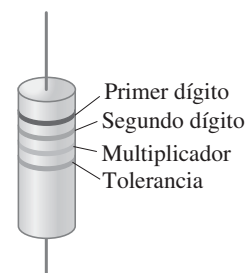
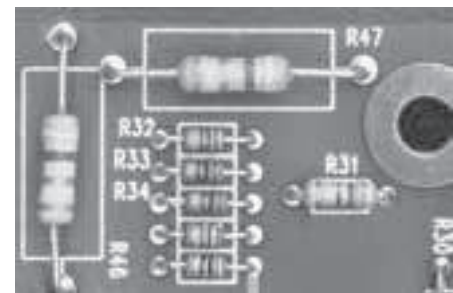


FIGURA 25-13 El valor de la resistencia de un resistor dado está escrito en el exterior o mediante un código de color, como se indica arriba y en la tabla: los primeros dos colores representan los primeros dos dígitos del valor de la resistencia, el tercer color representa la potencia de 10 a la que debe multiplicarse, mientras el cuarto es la tolerancia del fabricante. Por ejemplo, un resistor cuyos cuatro colores son rojo, verde, amarillo y plata tiene una resistencia de $25 \times 10^4 \Omega = 250,000 \Omega = 250 \text{ k}\Omega$, más o menos 10%. Un ejemplo alternativo de un código simple es un número como 104, que significa $R = 1.0 \times 10^4 \Omega$.

Código de color de resistores			
Color	Número	Multiplicador	Tolerancia
Negro	0	1	
Café	1	10^1	1%
Rojo	2	10^2	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	
Oro		10^{-1}	5%
Plata		10^{-2}	10%
Sin color			20%

! CUIDADO
El voltaje se aplica a través de un aparato, mientras que la corriente pasa por el aparato

! CUIDADO
La corriente no se consume

Algunas aclaraciones útiles

Resumimos aquí algunos de los posibles malentendidos y hacemos ciertas aclaraciones. Las baterías no proveen una corriente constante. En realidad, las baterías fueron diseñadas para mantener una diferencia de potencial constante, o prácticamente constante. (Para conocer algunos detalles, véase el siguiente capítulo.) Así que una batería debe considerarse una fuente de voltaje. El voltaje se aplica *a través* del alambre o el aparato.

Las corrientes eléctricas pasan *a lo largo* del alambre o el aparato (conectado a una batería) y su magnitud depende de la resistencia del aparato. La resistencia es una *propiedad* del alambre o del aparato. El voltaje, por otro lado, es externo al alambre o al aparato, y se aplica a través de los dos extremos del alambre o del aparato. La corriente a lo largo del aparato puede ser la “respuesta”: la corriente aumenta si el voltaje se incrementa o si la resistencia disminuye, es decir, $I = V/R$.

En un alambre, la dirección de la corriente siempre es paralela al alambre, sin importar cómo se curve el alambre, al igual que el agua en una tubería. La dirección de la corriente convencional (positiva) es de mayor potencial (+) a menor potencial (–).

La corriente o la carga no aumentan, ni disminuyen ni se “desgastan” cuando pasan por un alambre o un aparato. La cantidad de carga que entra por un extremo es igual a la cantidad de carga que sale por el otro extremo.

25–4 Resistividad

Se encuentra en forma experimental que la resistencia R de un alambre es directamente proporcional a su longitud ℓ e inversamente proporcional a su sección transversal A . Esto es,

$$R = \rho \frac{\ell}{A}, \quad (25-3)$$

donde ρ , la constante de proporcionalidad, es la **resistividad** y depende del material utilizado. Valores típicos de ρ , cuyas unidades son $\Omega \cdot \text{m}$ (véase la ecuación 25-3), se indican para varios materiales en la columna central de la tabla 25-1, que está dividida en categorías de *conductores*, *aislantes* y *semiconductores* (véase la sección 21-3). Los valores dependen en parte de la pureza, el tratamiento térmico, la temperatura y otros factores. Observe que la plata tiene la menor resistividad; por lo tanto, es el mejor conductor (aunque es un material caro). El cobre está cerca y es mucho más barato, razón por la cual la mayoría de los alambres están hechos de cobre. El aluminio, aunque con una resistividad más alta, es mucho menos denso que el cobre; por lo tanto, es más apropiado que el cobre en algunas situaciones —por ejemplo, para líneas de transmisión— porque su resistencia, para el mismo peso, es menor que la del cobre.

TABLA 25–1 Resistividad y coeficientes de temperatura (a 20°C)

Material	Resistividad, ρ ($\Omega \cdot \text{m}$)	Coefficiente de temperatura, α ($^{\circ}\text{C}$) $^{-1}$
<i>Conductores</i>		
Plata	1.59×10^{-8}	0.0061
Cobre	1.68×10^{-8}	0.0068
Oro	2.44×10^{-8}	0.0034
Aluminio	2.65×10^{-8}	0.00429
Tungsteno	5.6×10^{-8}	0.0045
Hierro	9.71×10^{-8}	0.00651
Platino	10.6×10^{-8}	0.003927
Mercurio	98×10^{-8}	0.0009
Nicromo (aleación de Ni, Fe y Cr)	100×10^{-8}	0.0004
<i>Semiconductores</i> [†]		
Carbón (grafito)	$(3 - 60) \times 10^{-5}$	–0.0005
Germanio	$(1 - 500) \times 10^{-3}$	–0.05
Silicio	0.1 – 60	–0.07
<i>Aislantes</i>		
Vidrio	$10^9 - 10^{12}$	
Hule duro	$10^{13} - 10^{15}$	

[†] Los valores dados dependen fuertemente de la presencia de impurezas aun en pequeñas cantidades

La **conductividad** se define como el recíproco de la resistividad

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (25-4)$$

y tiene unidades de $(\Omega \cdot \text{m})^{-1}$.

EJERCICIO C Regrese a la pregunta inicial del capítulo (página 651) y respóndala de nuevo. Trate de explicar por qué quizás usted la respondió de manera diferente la primera vez.

EJERCICIO D Un alambre de cobre tiene una resistencia de 10Ω . ¿Cuál sería su resistencia si se corta a la mitad? a) 20Ω , b) 10Ω , c) 5Ω , d) 1Ω , e) ninguna de las anteriores.

EJEMPLO 25-5 Alambres de altavoces. Suponga que quiere conectar su estéreo a altavoces remotos (figura 25-14). a) Si cada alambre debe ser de 20 m de longitud, ¿cuál es el diámetro que debe usarse para alambres de cobre con una resistencia menor de 0.10Ω por alambre? b) Si la corriente para cada altavoz es de 4.0 A, ¿cuál es la diferencia de potencial, o caída de voltaje, a través de cada alambre?

PLANTEAMIENTO Resolvemos la ecuación 25-3, para obtener el área A , con lo que será posible calcular el radio del alambre usando $A = \pi r^2$. El diámetro es $2r$. En el inciso b) podemos usar la ley de Ohm, $V = IR$.

SOLUCIÓN a) Despejamos el área A en la ecuación 25-3; encontramos el valor ρ para el cobre en la tabla 25-1:

$$A = \rho \frac{\ell}{R} = \frac{(1.68 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m})(20 \text{ m})}{(0.10 \Omega)} = 3.4 \times 10^{-6} \text{ m}^2.$$

El área A de la sección transversal de un alambre circular es $A = \pi r^2$. Por lo tanto, el radio debe ser por lo menos de

$$r = \sqrt{\frac{A}{\pi}} = 1.04 \times 10^{-3} \text{ m} = 1.04 \text{ mm}.$$

El diámetro es el doble del radio; por lo tanto, tiene que ser por lo menos de $2r = 2.1 \text{ mm}$.

b) A partir de $V = IR$, encontramos que la caída de voltaje a través de cada alambre es

$$V = IR = (4.0 \text{ A})(0.10 \Omega) = 0.40 \text{ V}.$$

NOTA La caída de voltaje a través de los alambres reduce el voltaje que llega a los altavoces desde el amplificador del estéreo, lo que disminuye un poco el nivel del sonido.

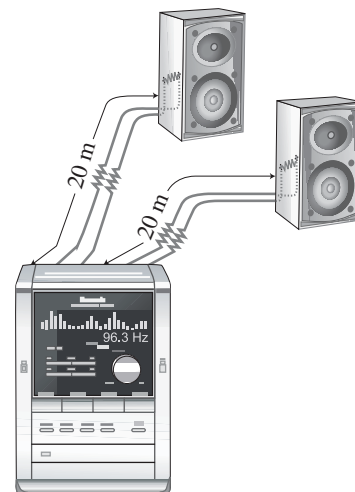


FIGURA 25-14 Ejemplo 25-5.

EJEMPLO CONCEPTUAL 25-6 Cambios en la resistencia por alargamiento. Suponga que un alambre con resistencia R puede estirarse de manera uniforme hasta alcanzar el doble de su longitud inicial. ¿Qué le pasará a su resistencia?

RESPUESTA Si la longitud ℓ se duplica, entonces, el área A de la sección transversal se reduce a la mitad, puesto que el volumen ($V = A\ell$) del alambre permanece constante. A partir de la ecuación 25-3, vemos que la resistencia se incrementará en un factor de cuatro ($2/\frac{1}{2} = 4$).

EJERCICIO E Los alambres de cobre en una casa tienen valores típicos de diámetro de 1.5 mm. ¿Qué tan largo debe ser un alambre para tener una resistencia de 1.0Ω ?

Dependencia con la temperatura de la resistividad

La resistividad de un material depende un poco de la temperatura. Por lo general, la resistencia de los metales se incrementa con la temperatura. Lo anterior no nos sorprende, puesto que a mayores temperaturas los átomos se mueven más rápido y están arreglados en patrones menos ordenados. En consecuencia, esperamos que interfieran más con el flujo de los electrones. Si el cambio de temperatura no es muy grande, la resistividad de los metales generalmente se incrementa de manera lineal con el cambio de temperatura. Esto es,

$$\rho_T = \rho_0[1 + \alpha(T - T_0)] \quad (25-5)$$

donde ρ_0 es la resistividad a una temperatura de referencia T_0 (digamos 0°C o 20°C), ρ_T es la resistividad a temperatura T y α es el *coeficiente térmico de la resistividad*. La tabla 25-1 indica los valores de α . Observe que el coeficiente de temperatura para los semiconductores puede ser negativo. ¿Por qué? Parece que a mayores temperaturas, algunos de los electrones que normalmente no están libres en un semiconductor se liberan y logran contribuir a la corriente. Así, la resistencia de un semiconductor disminuye al aumentar la temperatura.



FIGURA 25-15 Se muestra un resistor térmico junto a una regla en milímetros, como referencia.

EJEMPLO 25-7 Termómetro de resistencia. La variación de la resistencia eléctrica con la temperatura puede utilizarse para realizar mediciones precisas de temperatura. Por lo general se usa platino, pues es un material relativamente libre de efectos corrosivos y tiene un alto punto de fusión. Suponga que a 20.0°C la resistencia de un termómetro de resistencia de platino es de $164.2\ \Omega$. Cuando se coloca en una solución particular, la resistencia es de $187.4\ \Omega$. ¿Cuál es la temperatura de la solución?

PLANTEAMIENTO Ya que la resistencia R es directamente proporcional a la resistividad ρ , podemos combinar las ecuaciones 25-3 y 25-5 para encontrar R como función de la temperatura T y luego despejar T en esa ecuación.

SOLUCIÓN Multiplicamos la ecuación 25-5 por (ℓ/A) para obtener (véase también la ecuación 25-3).

$$R = R_0[1 + \alpha(T - T_0)].$$

Aquí $R_0 = \rho_0 \ell/A$ es la resistencia del alambre a $T_0 = 20.0^\circ\text{C}$. Despejamos T de esta ecuación y encontramos (véase la tabla 25-1 para α)

$$T = T_0 + \frac{R - R_0}{\alpha R_0} = 20.0^\circ\text{C} + \frac{187.4\ \Omega - 164.2\ \Omega}{(3.927 \times 10^{-3}(\text{C}^\circ)^{-1})(164.2\ \Omega)} = 56.0^\circ\text{C}.$$

NOTA Los termómetros de resistencia tienen la ventaja de que pueden usarse a temperaturas muy altas o muy bajas, donde los termómetros de líquido o gas no son útiles.

NOTA Aún más conveniente para algunas aplicaciones es el *termistor* (figura 25-15), que consiste en un óxido de metal o semiconductor cuya resistencia varía notablemente con la temperatura. Es posible fabricar termistores muy pequeños que responden muy rápido a los cambios en la temperatura.

EJERCICIO F ¿Cuántas veces más grande es la resistencia de un filamento de tungsteno de una bombilla incandescente ordinaria a su temperatura de operación de $3000\ \text{K}$ en comparación con su resistencia a temperatura ambiente? a) Menos de 1% mayor, b) aproximadamente 10% mayor, c) cerca de dos veces mayor, d) aproximadamente 10 veces mayor, e) más de 100 veces mayor.

El valor de α en la ecuación 25-5 puede depender de la temperatura, así que es importante revisar la validez del intervalo de temperaturas de cualquier valor (digamos, en un manual de datos físicos). Si el intervalo de temperaturas es amplio, la ecuación 25-5 no es adecuada, por lo que se necesitan términos proporcionales a la temperatura al cuadrado o al cubo, aunque en general son muy pequeños, excepto cuando $T - T_0$ es grande.

25-5 Potencia eléctrica

La energía eléctrica es útil porque puede transformarse fácilmente en otras formas de energía. Los motores transforman energía eléctrica en energía mecánica, como veremos en el capítulo 27.

En aparatos como calentadores eléctricos, estufas, tostadores y secadoras para el cabello, la energía eléctrica se transforma en energía térmica en una resistencia de alambre conocida como el “elemento calefactor”. En una bombilla eléctrica ordinaria, el filamento de alambre delgado (figura 25-5 y fotografía al inicio del capítulo) se calienta tanto que brilla; sólo un pequeño porcentaje de la energía se transforma en luz visible, mientras el resto, más del 90%, se transforma en energía térmica. Los filamentos de las bombillas eléctricas y los elementos calefactores (figura 25-16) en aparatos domésticos comúnmente tienen resistencias desde unos cuantos ohms hasta algunos cientos de ohms.

En tales aparatos, la energía eléctrica se transforma en energía térmica o luz, y en ellos ocurren muchas colisiones entre los electrones en movimiento con los átomos del alambre. En cada colisión, parte de la energía cinética del electrón se transfiere al átomo con el cual colisiona. Como resultado, la energía cinética de los átomos del alambre aumenta; por lo tanto, la temperatura del elemento de alambre también aumenta. El incremento de energía térmica puede transferirse como calor por conducción o convección al aire en un calentador o a los alimentos en una sartén, o transferirse por radiación al pan en un tostador o ser emitida como luz.

Para calcular la potencia transformada por un dispositivo eléctrico, recuerde que la energía transformada cuando un elemento infinitesimal de carga dq se mueve a través de una diferencia de potencial V es $dU = V dq$ (ecuación 23-3). Sea dt el tiempo

FIGURA 25-16 El elemento calefactor del quemador de una estufa eléctrica brilla porque la corriente eléctrica transforma la energía.



requerido para que una cantidad de carga dq se mueva a través de una diferencia de potencial V . Así, la potencia P , que es la tasa a la que se transforma la energía, es

$$P = \frac{dU}{dt} = \frac{dq}{dt} V.$$

La carga que fluye por segundo, dq/dt , es la corriente eléctrica I . Como resultado, tenemos que

$$P = IV. \quad (25-6)$$

Esta relación general nos permite conocer la potencia transformada por cualquier aparato, donde I es la corriente que pasa a través de él y V es la diferencia de potencial a la que está sometido. También proporciona la potencia de salida de una fuente como una batería. La unidad del SI de la potencia eléctrica es la misma que para cualquier otro tipo de potencia, es decir, el **watt** ($1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$).

La tasa de transformación de energía en una resistencia R puede escribirse de otras dos formas, a partir de la relación general $P = IV$ y sustituyendo $V = IR$:

$$P = IV = I(IR) = I^2 R \quad (25-7a)$$

$$P = IV = \left(\frac{V}{R}\right)V = \frac{V^2}{R}. \quad (25-7b)$$

Las ecuaciones 25-7a y b se aplican sólo a resistores, mientras que la ecuación 25-6, $P = IV$, que es más general, se aplica a cualquier dispositivo, incluyendo una resistencia.

EJEMPLO 25-8 Faros de un automóvil. Calcule la resistencia de un faro de automóvil de 40 W diseñado para trabajar a 12 V (figura 25-17).

PLANTEAMIENTO Despejamos R en la ecuación 25-7b.

SOLUCIÓN De acuerdo con la ecuación 25-7b,

$$R = \frac{V^2}{P} = \frac{(12 \text{ V})^2}{(40 \text{ W})} = 3.6 \Omega.$$

NOTA Tal es la resistencia cuando el faro brilla intensamente a 40 W. Cuando el faro está frío, la resistencia es mucho menor, como vimos en la ecuación 25-5. Como la corriente es alta cuando la resistencia es baja, los faros se consumen más cuando están recién encendidos.

Es la energía, y no la potencia, la que usted paga en su recibo de la compañía que le suministra electricidad. Ya que la potencia es la *tasa* a la cual se transforma la energía, la energía total que usa cualquier aparato es su consumo de potencia multiplicado por el tiempo que está encendido. Si la potencia está en watts y el tiempo en segundos, la energía estará en joules, porque $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$. Las compañías eléctricas generalmente especifican la energía con una unidad mucho más grande, el **kilowatt-hora** (kWh). Un $\text{kWh} = (1000 \text{ W})(3600 \text{ s}) = 3.6 \times 10^6 \text{ J}$.

EJEMPLO 25-9 Calentador eléctrico. Un calentador eléctrico usa 15.0 A cuando se conecta a una línea de 120 V. ¿Cuál es la potencia requerida y cuánto cuesta esa potencia al mes (30 días) si el calentador opera durante 3.0 h al día y la compañía eléctrica cobra \$0.092 centavos por kWh?

PLANTEAMIENTO Usamos la ecuación 25-6, $P = IV$, para calcular la potencia. Multiplicamos la potencia (en kW) por el tiempo (h) de uso en un mes y el costo por unidad de energía, \$0.092/kWh, para obtener el costo mensual.

SOLUCIÓN La potencia es

$$P = IV = (15.0 \text{ A})(120 \text{ V}) = 1800 \text{ W}$$

o 1.80 kW. El tiempo (en horas) que se usa el calentador al mes es $(3.0 \text{ h/d})(30 \text{ d}) = 90 \text{ h}$, el cual, a 9.2 centavos/kWh, costaría $(1.80 \text{ kW})(90 \text{ h})(\$0.092/\text{kWh}) = \$15$.

NOTA La corriente doméstica es, de hecho, una corriente alterna (ca), pero nuestra solución sigue siendo válida suponiendo que los valores dados para V e I son los valores propios (rms), como veremos en la sección 25-7.

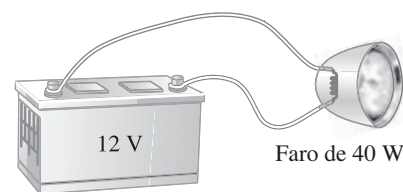


FIGURA 25-17 Ejemplo 25-8.

FÍSICA APLICADA

Por qué los faros de un automóvil se consumen más cuando están recién encendidos

⚠ CUIDADO

Usted no paga la potencia, sino la energía consumida, la cual es potencia \times tiempo



FIGURA 25-18 Ejemplo 25-10.
Un relámpago.

EJEMPLO 25-10 ESTIMACIÓN Relámpagos. Los relámpagos son un ejemplo espectacular de corrientes eléctricas en un fenómeno natural (figura 25-18). Hay gran diversidad en los relámpagos, pero un suceso típico puede transferir 10^9 J de energía a través de una diferencia de potencial de quizá 5×10^7 V durante un intervalo cercano a 0.2 s. Use esta información para determinar a) la cantidad total de carga transferida entre una nube y la tierra, b) la corriente en el relámpago y c) la potencia promedio liberada durante los 0.2 s.

PLANTEAMIENTO Estimamos la carga Q , tomando en cuenta que el cambio de la energía potencial es igual a la diferencia de potencial ΔV multiplicada por el tiempo de carga Q (ecuación 23-3). Igualamos ΔU con la energía transferida, $\Delta U \approx 10^9$ J. Después, la corriente I es Q/t (ecuación 25-1a) y la potencia P es energía/tiempo.

SOLUCIÓN a) De acuerdo con la ecuación 23-3, la energía transformada es $\Delta U = Q \Delta V$. Despejamos Q :

$$Q = \frac{\Delta U}{\Delta V} \approx \frac{10^9 \text{ J}}{5 \times 10^7 \text{ V}} = 20 \text{ coulombs.}$$

b) La corriente durante los 0.2 s es aproximadamente

$$I = \frac{Q}{t} \approx \frac{20 \text{ C}}{0.2 \text{ s}} = 100 \text{ A.}$$

c) La potencia promedio liberada es

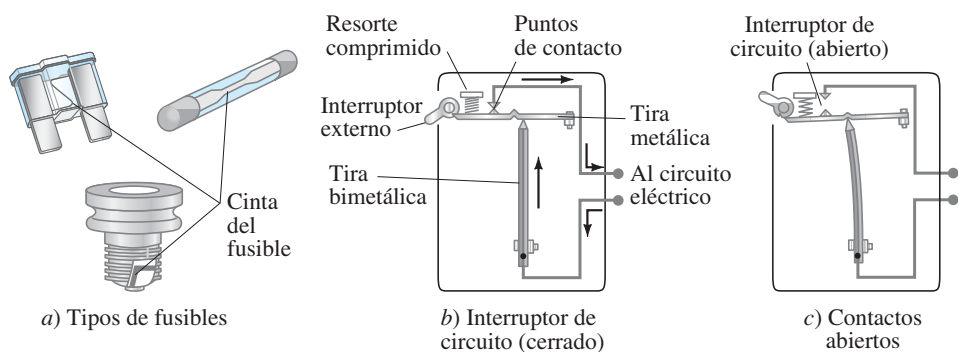
$$P = \frac{\text{energía}}{\text{tiempo}} = \frac{10^9 \text{ J}}{0.2 \text{ s}} = 5 \times 10^9 \text{ W} = 5 \text{ GW.}$$

También podemos usar la ecuación 25-6:

$$P = IV = (100 \text{ A})(5 \times 10^7 \text{ V}) = 5 \text{ GW.}$$

NOTA Puesto que la mayoría de los relámpagos constan de varias etapas, es posible que partes individuales transporten corrientes mucho mayores que los 100 A calculados.

FIGURA 25-19 a) Fusibles. Cuando la corriente excede un cierto valor, la cinta metálica se derrite y el circuito se abre. Luego, el fusible debe remplazarse. b) Un tipo de interruptor de circuito. La corriente pasa a través de una tira bimetalica. Cuando la corriente excede el nivel de seguridad, el calentamiento de la tira bimetalica ocasiona que ésta se doble tanto a la izquierda que la hendidura en la banda de metal que soporta al resorte baja hasta el extremo de la tira bimetalica; c) el circuito se abre entonces en los puntos de contacto (uno está fijo a la tira de metal) y el interruptor externo también se activa. Tan pronto como la tira bimetalica se enfría, puede restaurarse a su posición original usando el interruptor externo. En los capítulos 28 y 29 se examinarán los interruptores de circuito magnético.



a) Tipos de fusibles

b) Interruptor de circuito (cerrado)

c) Contactos abiertos

25-6 Potencia en circuitos domésticos

Los alambres o cables eléctricos que transportan la electricidad a las bombillas u otros aparatos eléctricos tienen cierta resistencia, aunque generalmente es muy pequeña. Sin embargo, si la corriente es muy grande, los alambres pueden calentarse y producir energía térmica a una tasa igual a $I^2 R$, donde R es la resistencia del alambre. Un posible riesgo es que los alambres que portan corriente en la pared de un edificio lleguen a calentarse demasiado al grado de provocar un incendio. Un alambre más grueso tiene menor resistencia (ecuación 25-3) y puede, por lo tanto, transportar más corriente sin calentarse tanto. Cuando un cable transporta más corriente de lo que es seguro, se dice que está “sobrecargado”. Para prevenir la sobrecarga, se instalan *fusibles*, o bien,

disyuntores en los circuitos. Básicamente, éstos son interruptores de circuito (figura 25-19) que abren el circuito cuando la corriente excede un valor determinado. Un fusible o un interruptor de 20 A, por ejemplo, se abre cuando la corriente que pasa a través de él excede los 20 A. Si un circuito repetidamente quema un fusible o abre un interruptor (disyuntor), existen dos posibilidades: hay demasiados aparatos tomando corriente de ese circuito o hay una falla en algún lado, como un “corto”, por ejemplo. Un corto, o “cortocircuito”, significa que se han tocado dos cables que no debían hacerlo (quizá porque se gastó la cubierta aislante), de manera que la resistencia se reduce mucho y la corriente se hace muy grande. Los cortocircuitos deben repararse de inmediato.

Los circuitos domésticos están diseñados para que varios aparatos estén conectados, de manera que cada uno reciba de la compañía eléctrica el voltaje estándar (generalmente 120 V en Estados Unidos) (figura 25-20). Los circuitos con los aparatos arreglados, como en la figura 25-20, se llaman *circuitos en paralelo*, como veremos en el siguiente capítulo. Cuando se quema un fusible o se abre interruptor, es importante revisar la corriente total que se toma de ese circuito, que es la suma de las corrientes en cada uno de los aparatos que están conectados.

EJEMPLO 25-11 ¿Se quemará el fusible? Determine la corriente total tomada por todos los aparatos que se ilustran en el circuito de la figura 25-20.

PLANTEAMIENTO Cada aparato está conectado al mismo voltaje: 120 V. La corriente que cada aparato toma de la fuente se determina a partir de $I = P/V$ (ecuación 25-6).

SOLUCIÓN El circuito de la figura 25-20 toma las siguientes corrientes: la bombilla requiere $I = P/V = 100 \text{ W}/120 \text{ V} = 0.8 \text{ A}$; el calentador usa $1800 \text{ W}/120 \text{ V} = 15.0 \text{ A}$; el estéreo usa un máximo de $350 \text{ W}/120 \text{ V} = 2.9 \text{ A}$; la secadora para el cabello consume $1200 \text{ W}/120 \text{ V} = 10.0 \text{ A}$. La corriente total empleada, si se utilizan todos los aparatos al mismo tiempo, es

$$0.8 \text{ A} + 15.0 \text{ A} + 2.9 \text{ A} + 10.0 \text{ A} = 28.7 \text{ A}.$$

NOTA La secadora para el cabello consume tanta corriente como 18 bombillas de 100 W. Por seguridad, es recomendable que la secadora se utilice en un circuito por separado.

Si el circuito de la figura 25-20 se diseña para un fusible de 20 A, el fusible se quemará —y esperamos que así lo haga— para evitar que alambres sobrecargados se calienten demasiado y generen un incendio. Algo tiene que apagarse para conseguir que este circuito ocupe menos de 20 A. (Las casa y los departamentos generalmente cuentan con varios circuitos, cada uno con su propio fusible o interruptor de circuito; trate de mover alguno de los aparatos a otro circuito.) Si ese circuito fue diseñado con un cable más grueso y un fusible de 30 A, el fusible no debería fundirse (si lo hace, el problema tal vez sea un corto). (El lugar más probable para un corto es en el cable de uno de los aparatos). El tamaño apropiado de un fusible se selecciona de acuerdo con el cable usado para administrar la corriente. Un fusible calibrado correctamente no debe remplazarse *nunca* con uno de mayor amperaje. Un fusible que se quema y un disyuntor que se abre actúan como un interruptor, produciendo un “circuito abierto”. Por circuito abierto queremos decir que no hay una trayectoria de conducción completa, de manera que no puede haber flujo de corriente; es como si se tuviera una resistencia $R = \infty$.

EJEMPLO CONCEPTUAL 25-12 Un cable de extensión peligroso. Considere que su calentador eléctrico portátil de 1800 W está muy lejos de su escritorio para calentar sus pies. Su cable es muy corto, así que lo conecta al cable de una extensión calibrado a 11 A. ¿Por qué es peligroso hacer esto?

RESPUESTA 1800 W a 120 V consumen una corriente de 15 A. Los alambres de la extensión calibrada a 11 A pueden calentarse tanto que derretirían la funda aislante y llegarían a producir fuego.

EJERCICIO G ¿Cuántas bombillas de 60 W a 120 V pueden operar en una línea de 20 A?
a) 2; b) 3; c) 6; d) 20; e) 40.

FÍSICA APLICADA

Fusibles y disyuntores

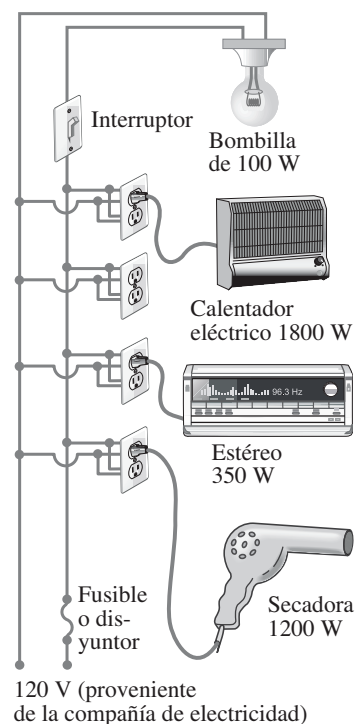


FIGURA 25-20 Conexión de aparatos domésticos.

FÍSICA APLICADA

Fusibles apropiados y cortos

FÍSICA APLICADA

Cables de extensión y peligros potenciales

25-7 Corriente alterna

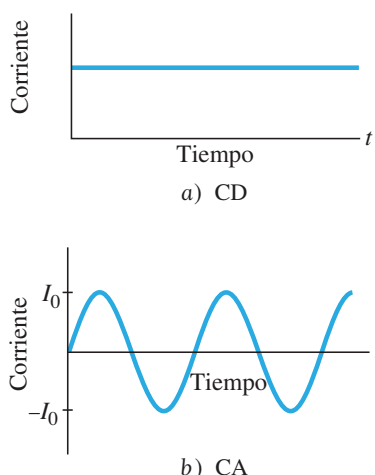


FIGURA 25-21 a) Corriente directa. b) Corriente alterna.

Cuando se conecta una batería a un circuito, la corriente avanza siempre en la misma dirección. Esto se llama **corriente directa** o **cd**. Sin embargo, los generadores eléctricos en las plantas de generación de energía producen **corriente alterna** o **ca**. (A veces se usan abreviaturas en mayúsculas, CD o CA.) Una corriente alterna invierte la dirección muchas veces por segundo y es generalmente sinusoidal, como se muestra en la figura 25-21. Los electrones en un alambre se mueven primero en un sentido y luego en sentido inverso. La corriente que se suministra a las casas y oficinas es ca prácticamente en todo el mundo. Estudiaremos circuitos ca en detalle en el capítulo 30. Sin embargo, como los circuitos ca son tan comunes en la vida diaria, examinaremos aquí algunos de sus aspectos básicos.

El voltaje producido por un generador eléctrico ca es sinusoidal, como veremos. La corriente producida es entonces sinusoidal (figura 25-21b). Podemos escribir el voltaje como función del tiempo de la siguiente manera:

$$V = V_0 \sin 2\pi ft = V_0 \sin \omega t.$$

El potencial V oscila entre $+V_0$ y $-V_0$, y V_0 se conoce como el **voltaje pico**. La frecuencia f es el número de oscilaciones completas realizadas por segundo, y $\omega = 2\pi f$. En la mayor parte de Estados Unidos y Canadá, $f = 60$ Hz (la unidad “hertz”, como vimos en los capítulos 10 y 14, significa ciclos por segundo). Sin embargo, en muchos otros países, se usan 50 Hz.

La ecuación 25-2, $V = IR$, también funciona para ca: si existe un voltaje V a través de una resistencia R , entonces la corriente I a través de la resistencia es

$$I = \frac{V}{R} = \frac{V_0}{R} \sin \omega t = I_0 \sin \omega t. \quad (25-8)$$

La cantidad $I_0 = V_0/R$ es la **corriente pico**. Se considera que la corriente es positiva cuando los electrones fluyen en un sentido, y negativa cuando fluyen en sentido opuesto. A partir de la figura 25-21b, es claro que la corriente alterna es tantas veces positiva como negativa. Así que la corriente promedio es cero. Sin embargo, esto no significa que no se necesita potencia o que no se produce calor en una resistencia. Los electrones se mueven de atrás para adelante y producen calor. De hecho, la potencia transformada en una resistencia R es en cualquier momento es

$$P = I^2 R = I_0^2 R \sin^2 \omega t.$$

Como la corriente aparece al cuadrado, vemos que la potencia siempre es positiva, como se grafica en la figura 25-22. La cantidad $\sin^2 \omega t$ varía entre 0 y 1; no es muy difícil demostrar[†] que su valor promedio es $\frac{1}{2}$, como se indica en la figura 25-22. Así, la **potencia promedio transformada**, \bar{P} , es

$$\bar{P} = \frac{1}{2} I_0^2 R.$$

Puesto que la potencia también puede escribirse como $P = V^2/R = (V_0^2/R) \sin^2 \omega t$, la potencia promedio también se escribiría como

$$\bar{P} = \frac{1}{2} \frac{V_0^2}{R}$$

El valor promedio o valor medio del **cuadrado** de la corriente o el voltaje es lo que importa para calcular la potencia promedio: $\bar{I}^2 = \frac{1}{2} I_0^2$ y $\bar{V}^2 = \frac{1}{2} V_0^2$. La raíz cuadrada de cada una de estas cantidades es la corriente o el voltaje eficaz o **rms** (por las siglas de *root-mean-square*, que significa raíz cuadrática media):

$$I_{\text{rms}} = \sqrt{\bar{I}^2} = \frac{I_0}{\sqrt{2}} = 0.707 I_0, \quad (25-9a)$$

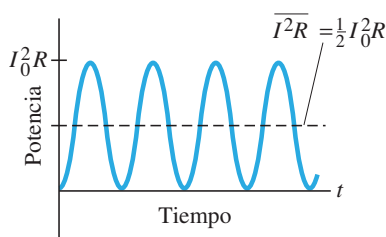
$$V_{\text{rms}} = \sqrt{\bar{V}^2} = \frac{V_0}{\sqrt{2}} = 0.707 V_0. \quad (25-9b)$$

[†]La gráfica de $\cos^2 \omega t$ contra t es idéntica a la gráfica de $\sin^2 \omega t$ de la figura 25-22, excepto que los puntos están desfasados (por $\frac{1}{4}$ de ciclo) sobre el eje del tiempo. Por lo tanto, el valor promedio de \sin^2 y de \cos^2 , promediados sobre uno o más ciclos completos, será el mismo: $\overline{\sin^2 \omega t} = \overline{\cos^2 \omega t}$. A partir de la identidad trigonométrica $\sin 2\theta + \cos 2\theta = 1$, podemos escribir

$$\overline{(\sin^2 \omega t)} + \overline{(\cos^2 \omega t)} = \overline{(\sin^2 \omega t + \cos^2 \omega t)} = \overline{1} = 1.$$

Así que el valor promedio de $\sin^2 \omega t$ es $\frac{1}{2}$.

FIGURA 25-22 Potencia transformada en un resistor en un circuito ca.



En ocasiones, los valores rms de V e I se conocen como *valores efectivos*. Estas relaciones son útiles porque pueden sustituirse directamente en las fórmulas de la potencia (ecuaciones 25-6 y 25-7) para calcular la potencia promedio:

$$\bar{P} = I_{\text{rms}} V_{\text{rms}} \quad (25-10a)$$

$$\bar{P} = \frac{1}{2} I_0^2 R = I_{\text{rms}}^2 R \quad (25-10b)$$

$$\bar{P} = \frac{1}{2} \frac{V_0^2}{R} = \frac{V_{\text{rms}}^2}{R}. \quad (25-10c)$$

Así, una corriente directa cuyos valores de I y V son iguales a los valores rms de I y V de una corriente alterna producirán la misma potencia. Es por esto que generalmente se especifican o se miden los valores rms de la corriente y el voltaje. Por ejemplo, en Estados Unidos y Canadá, el voltaje estándar de la línea[†] es de 120 V de ca. Los 120 V son V_{rms} ; el voltaje pico V_0 es

$$V_0 = \sqrt{2} V_{\text{rms}} = 170 \text{ V}.$$

En una buena parte del mundo (Europa, Asia, Australia) el voltaje rms es de 240 V, así que el voltaje pico es de 340 V.

EJEMPLO 25-13 Secadora para el cabello. a) Calcule la resistencia y el voltaje pico en una secadora para el cabello de 1000 W (figura 25-23) conectada a una línea de 120 V. b) ¿Qué sucede si se conecta a una línea de 240 V en Gran Bretaña?

PLANTEAMIENTO Conocemos \bar{P} y V_{rms} , así que $I_{\text{rms}} = \bar{P}/V_{\text{rms}}$ (ecuaciones 25-10a o 25-6) e $I_0 = \sqrt{2} I_{\text{rms}}$. Por último, calculamos R a partir de $V = IR$.

SOLUCIÓN a) Despejamos la corriente rms de la ecuación 25-10a:

$$I_{\text{rms}} = \frac{\bar{P}}{V_{\text{rms}}} = \frac{1000 \text{ W}}{120 \text{ V}} = 8.33 \text{ A}.$$

Entonces,

$$I_0 = \sqrt{2} I_{\text{rms}} = 11.8 \text{ A}.$$

La resistencia es

$$R = \frac{V_{\text{rms}}}{I_{\text{rms}}} = \frac{120 \text{ V}}{8.33 \text{ A}} = 14.4 \Omega.$$

También podíamos calcular la resistencia usando los valores pico:

$$R = \frac{V_0}{I_0} = \frac{170 \text{ V}}{11.8 \text{ A}} = 14.4 \Omega.$$

b) Cuando se conecta la secadora a una línea de 240 V, fluirá más corriente y la resistencia cambiará con el correspondiente incremento de temperatura (sección 25-4). Pero hagamos una estimación de la potencia transformada con base en la misma resistencia de 14.4 Ω . La potencia promedio sería

$$\bar{P} = \frac{V_{\text{rms}}^2}{R} = \frac{(240 \text{ V})^2}{(14.4 \Omega)} = 4000 \text{ W}.$$

Esto equivale a cuatro veces la potencia nominal de la secadora y seguramente derretirá el elemento calefactor o las bobinas de alambre del motor.

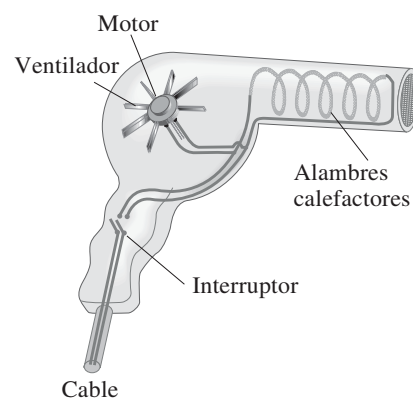


FIGURA 25-23 Una secadora para el cabello. La mayor parte de la corriente se va a los alambres calefactores, los cuales constituyen una resistencia pura; una pequeña parte de la corriente se va al motor para encender el ventilador. Ejemplo 25-13.

EJERCICIO H Cada canal de un aparato estereofónico es capaz de producir una potencia de salida promedio de 100 W en un altavoz de 8 Ω (véase la figura 25-14). ¿Cuáles son el voltaje rms y la corriente rms que llegan al altavoz a) a la potencia máxima de 100 W y b) a 1.0 W cuando se ha bajado el volumen?

[†]El voltaje de la línea puede variar, lo que depende de la carga total en la línea; la frecuencia de 60 Hz o 50 Hz, sin embargo, permanece extremadamente constante.

25-8 Visión microscópica de la corriente eléctrica: Densidad de corriente y velocidad de deriva



FIGURA 25-24 Campo eléctrico \vec{E} en un alambre uniforme de sección transversal de área A que transporta una corriente I . La densidad de corriente es $j = I/A$.

Hasta ahora hemos tratado principalmente con una visión macroscópica de la corriente eléctrica. Sin embargo, vimos que, de acuerdo con la teoría atómica, la corriente eléctrica en alambres de metal es transportada por electrones cargados negativamente y que en las soluciones líquidas la corriente también puede ser transportada por iones positivos o negativos. Analicemos ahora con más detalle esa visión microscópica.

Cuando se aplica una diferencia de potencial a los dos extremos de un alambre de sección transversal uniforme, la dirección del campo eléctrico \vec{E} es paralela a las paredes del alambre (figura 25-24). La existencia del campo \vec{E} no contradice nuestro resultado de que $\vec{E} = 0$ dentro de un conductor de alambre en el caso electrostático, pues no tratamos un caso estático. Las cargas pueden desplazarse con libertad dentro de un conductor y, por lo tanto, pueden moverse bajo la acción del campo eléctrico. Si todas las cargas están en reposo, entonces \vec{E} debe ser cero (caso electrostático).

Ahora definimos una nueva cantidad microscópica, la **densidad de corriente**, \vec{j} . Ésta se define como la *corriente eléctrica por unidad de área de sección transversal* en cualquier punto del espacio. Si la densidad de corriente \vec{j} en un alambre de sección transversal de área A es uniforme en toda la sección transversal, entonces j está relacionada con la corriente eléctrica por

$$j = \frac{I}{A} \quad \text{o} \quad I = jA. \quad (25-11)$$

Si la densidad de corriente no es uniforme, entonces se aplica la siguiente relación general

$$I = \int \vec{j} \cdot d\vec{A}, \quad (25-12)$$

donde $d\vec{A}$ es un elemento de superficie e I es la corriente a través de la superficie sobre la cual se realiza la integración. La dirección de la densidad de corriente en cualquier punto es la dirección en la que se desplazaría una carga positiva localizada en ese punto; esto es, la dirección del vector \vec{j} en cualquier punto generalmente es la misma que la dirección del vector \vec{E} , (figura 25-24). La densidad de corriente existe en cualquier punto del espacio. Por otro lado, la corriente I se refiere al conductor como un todo; por lo tanto, es una cantidad macroscópica.

La dirección de \vec{j} elige para representar la dirección del flujo neto de carga positiva. En un conductor, son los electrones cargados negativamente los que se mueven, así que éstos se desplazan en la dirección de $-\vec{j}$, o $-\vec{E}$ (hacia la izquierda en la figura 25-24). Podemos imaginar a los electrones libres moviéndose de manera aleatoria a altas velocidades, rebotando entre los átomos del alambre (como sucede con las moléculas de un gas, capítulo 18). Cuando existe un campo eléctrico en el alambre (figura 25-25), los electrones experimentan una fuerza e inicialmente comienzan a acelerarse. Pero tarde o temprano alcanzan una velocidad promedio más o menos estable en la dirección del vector \vec{E} , conocida como **velocidad de deriva**, \vec{v}_d (las colisiones con los átomos de alambre impiden que los electrones se aceleren aún más). La velocidad de deriva normalmente es mucho menor que la velocidad aleatoria promedio de los electrones.

Podemos relacionar la velocidad de deriva v_d con la corriente macroscópica I en el alambre. En un tiempo Δt , los electrones viajarán en promedio una distancia $\ell = v_d \Delta t$. Supongamos que el alambre tiene una sección transversal de área A . Entonces, durante el intervalo Δt , los electrones en un volumen $V = A\ell = Av_d \Delta t$ pasarán a través de la sección transversal A del alambre, como se ilustra en la figura 25-26. Si hay n electrones libres (cada uno con carga $-e$) por unidad de volumen ($n = N/V$), entonces la carga total ΔQ que pasa a través del área A en el tiempo Δt es

$$\begin{aligned} \Delta Q &= (\text{número de cargas, } N) \times (\text{carga por partícula}) \\ &= (nV)(-e) = -(nAv_d \Delta t)(e). \end{aligned}$$

Por consiguiente, la corriente I en el alambre es

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = -nev_d A. \quad (25-13)$$

La densidad de corriente, $j = I/A$, es

$$j = -nev_d. \quad (25-14)$$

En notación vectorial, esto se expresa como

$$\vec{j} = -ne\vec{v}_d, \quad (25-15)$$

donde el signo menos indica que la dirección del flujo de corriente (positiva) es opuesta a la velocidad de deriva de los electrones.

FIGURA 25-25 El campo eléctrico \vec{E} en un alambre le da a los electrones con movimiento aleatorio una velocidad de deriva v_d .

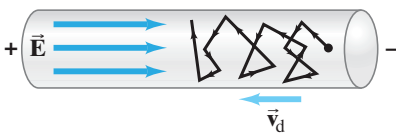
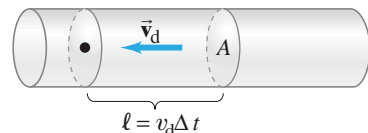


FIGURA 25-26 Los electrones en el volumen $A\ell$ pasarán a través de la sección indicada en un tiempo Δt , donde $\ell = v_d \Delta t$.



Podemos generalizar la ecuación 25-15 a cualquier tipo de flujo de carga, como por ejemplo, el flujo de iones en un electrolito. Si hay varios tipos de iones presentes (los cuales pueden incluir electrones libres), cada uno de densidad n_i (número por unidad de volumen), carga q_i (para electrones $q_i = -e$) y velocidad de deriva \vec{v}_{di} , entonces la densidad de corriente en cualquier punto es

$$\vec{j} = \sum_i n_i q_i \vec{v}_{di}. \quad (25-16)$$

Así, la corriente total I que pasa a través de una área A perpendicular a una \vec{j} uniforme es

$$I = \sum_i n_i q_i v_{di} A.$$

EJEMPLO 25-14 Rapideces de los electrones en un alambre. Un alambre de cobre de 3.2 mm de diámetro lleva una corriente de 5.0 A. Determine a) la densidad de corriente en el alambre y b) la velocidad de deriva de los electrones libres. c) Estime la rapidez rms de los electrones, suponiendo que se comportan como un gas ideal a 20° C. Considere que por cada átomo de Cu hay un electrón libre para moverse (los otros permanecen ligados al átomo).

PLANTEAMIENTO En el caso de a) $j = I/A = I/\pi r^2$. En el caso de b) podemos aplicar la ecuación 25-14 para calcular v_d si podemos determinar el número n de electrones libres por unidad de volumen. Como suponemos que hay un electrón libre por cada átomo, la densidad de electrones libre, n , es la misma que la densidad de los átomos de cobre. La masa atómica del Cu es 63.5 u (véase la tabla periódica en la tercera de forros del libro), así que 63.5 g de Cu contienen un mol o 6.02×10^{23} electrones libres. La densidad de masa del cobre (tabla 13-1) es $\rho_D = 8.9 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, donde $\rho_D = m/V$. (Usamos ρ_D para distinguirla de la ρ de resistividad.) En c) usamos $K = \frac{3}{2} kT$ (ecuación 18-4). (No confunda V de volumen con V de voltaje).

SOLUCIÓN a) La densidad de corriente es (con $r = \frac{1}{2}(3.2 \text{ mm}) = 1.6 \times 10^{-3} \text{ m}$)

$$j = \frac{I}{A} = \frac{I}{\pi r^2} = \frac{5.0 \text{ A}}{\pi(1.6 \times 10^{-3} \text{ m})^2} = 6.2 \times 10^5 \text{ A/m}^2.$$

b) El número de electrones libres por unidad de volumen, $n = N/V$ (donde $V = m/\rho_D$), es

$$n = \frac{N}{V} = \frac{N}{m/\rho_D} = \frac{N(1 \text{ mol})}{m(1 \text{ mol})} \rho_D$$

$$n = \left(\frac{6.02 \times 10^{23} \text{ electrones}}{63.5 \times 10^{-3} \text{ kg}} \right) (8.9 \times 10^3 \text{ kg/m}^3) = 8.4 \times 10^{28} \text{ m}^{-3}.$$

Así, usando la ecuación 25-14, la magnitud de la velocidad de deriva es

$$v_d = \frac{j}{ne} = \frac{6.2 \times 10^5 \text{ A/m}^2}{(8.4 \times 10^{28} \text{ m}^{-3})(1.6 \times 10^{-19} \text{ C})} = 4.6 \times 10^{-5} \text{ m/s} \approx 0.05 \text{ mm/s}.$$

c) Si modelamos los electrones libres como un gas ideal (una aproximación bastante burda), usamos la ecuación 18-5 para estimar la rapidez aleatoria rms de un electrón mientras avanza:

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} = \sqrt{\frac{3(1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K})(293 \text{ K})}{9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}}} = 1.2 \times 10^5 \text{ m/s}.$$

La velocidad de deriva (la velocidad promedio en la dirección de la corriente) es mucho menor que la velocidad térmica rms de los electrones, en un factor de 10^9 .

NOTA El resultado en c) es una subestimación. Cálculos basados en la teoría cuántica, y en experimentos, indican una rapidez rms en cobre cercana a $1.6 \times 10^6 \text{ m/s}$.

La velocidad de deriva de los electrones en un alambre es muy pequeña, apenas 0.05 mm/s (ejemplo 25-14, arriba), lo que significa que un electrón tarda $20 \times 10^3 \text{ s}$, o $5\frac{1}{2} \text{ h}$, para avanzar apenas 1 m. Esto no es, por supuesto, la rapidez con que “viaja la electricidad”: cuando usted enciende el interruptor de la luz —aun a muchos metros de distancia—, ésta se enciende casi instantáneamente. ¿Por qué? Porque el campo eléctrico viaja, en esencia, a la velocidad de la luz ($3 \times 10^8 \text{ m/s}$). Es posible pensar en los electrones en un alambre como si estuvieran en una tubería llena de agua: cuando un poco de agua entra por un extremo de la tubería, casi de inmediato algo de agua sale por el otro extremo.

*Campo eléctrico dentro de un alambre

La ecuación 25-2b, $V = IR$, puede escribirse en términos de cantidades microscópicas como sigue. Escribimos la resistencia R en términos de la resistividad ρ .

$$R = \rho \frac{\ell}{A};$$

y escribimos V e I como

$$I = jA \quad \text{y} \quad V = E\ell.$$

La relación anterior se obtiene a partir de la ecuación 23-4, donde suponemos que el campo eléctrico es uniforme dentro del alambre y ℓ es la longitud del alambre (o una porción del alambre) entre cuyos extremos la diferencia de potencial es V . Así, a partir de $V = IR$, tenemos

$$E\ell = (jA) \left(\rho \frac{\ell}{A} \right) = j\rho\ell$$

así que

$$j = \frac{1}{\rho} E = \sigma E, \quad (25-17)$$

donde $\sigma = 1/\rho$ es la *conductividad* (ecuación 25-4). Para un conductor metálico, ρ y σ no dependen de V (por lo tanto, tampoco dependen de E). En consecuencia, la densidad de corriente \vec{j} es proporcional al campo eléctrico \vec{E} dentro del conductor. Éste es el enunciado “microscópico” de la ley de Ohm. La ecuación 25-17, que puede escribirse en forma vectorial como

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} = \frac{1}{\rho} \vec{E},$$

se considera algunas veces como la definición de conductividad σ y resistividad ρ .

EJEMPLO 25-15 El campo eléctrico dentro de un alambre. ¿Cuál es el campo eléctrico dentro del alambre del ejemplo 25-14?

PLANTEAMIENTO Usamos la ecuación 25-17 y $\rho = 1.68 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ para el cobre.

SOLUCIÓN Del ejemplo 25-14, sabemos que $j = 6.2 \times 10^5 \text{ A/m}^2$, así que

$$E = \rho j = (1.68 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m})(6.2 \times 10^5 \text{ A/m}^2) = 1.0 \times 10^{-2} \text{ V/m}.$$

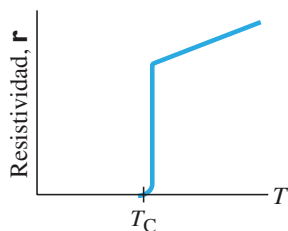
NOTA En comparación, el campo eléctrico entre las placas de un capacitor es con frecuencia mucho mayor; así, en el ejemplo 24-1, E es del orden de 10^4 V/m . De esta forma, vemos que se necesita sólo un modesto campo eléctrico para que fluya la corriente en casos comunes.

*25-9 Superconductividad

A muy bajas temperaturas, por debajo de 0°C , la resistividad (sección 25-4) de ciertos metales y compuestos o aleaciones se vuelve cero de acuerdo con las técnicas más precisas. Se dice que los materiales en este estado son **superconductores**. Esto lo observó por primera vez H. K. Onnes (1853-1926) en 1911 cuando enfrió mercurio por debajo de 4.2 K (-269°C) y encontró que la resistencia del mercurio disminuyó de repente a cero. En general, los superconductores se convierten en tales sólo por debajo de cierta *temperatura de transición* o *temperatura crítica*, T_C , la cual está generalmente muy cerca del cero absoluto. Se ha observado que la corriente en un material superconductor con forma de anillo ha fluido durante años en ausencia de una diferencia de potencial, sin una disminución apreciable. Las mediciones indican que la resistividad ρ de los superconductores son menores que $4 \times 10^{-25} \Omega \cdot \text{m}$, lo cual es 10^{16} veces menos que la resistividad del cobre, lo que se considera cero en la práctica. Véase la figura 25-27.

Antes de 1986, la temperatura más alta a la cual se encontró que un material podía ser superconductor fue 23 K , lo que requirió helio líquido para mantener frío el material. En 1987 se desarrolló un compuesto de itrio, bario, cobre y oxígeno (YBCO) que puede ser superconductor a 90 K . Lo anterior fue un importante avance, dado que el nitrógeno líquido hierve a 77 K (suficientemente frío para mantener al material superconductor), y es más fácil y barato de obtener que el helio líquido necesario para los superconductores convencionales. Se ha reportado superconductividad a temperaturas tan altas como 160 K , aunque para compuestos frágiles.

FIGURA 25-27 Un material superconductor tiene resistividad cero cuando su temperatura está por debajo de su “temperatura crítica”. A T_C , la resistividad cambia a un valor “normal” distinto de cero y se incrementa con la temperatura, como lo hacen la mayoría de los materiales (ecuación 25-5).



En la actualidad, la mayoría de las aplicaciones usan un óxido de bismuto, estroncio, calcio y cobre, conocido como BSCCO. Un reto importante es cómo conseguir un alambre de BSCCO que sea práctico y manejable, dado que éste es muy quebradizo. (Una solución es incrustar pequeños filamentos de material superconductor T_c de alta temperatura en una aleación metálica, la cual sí tiene resistencia, pero es mucho menor que la resistencia de un alambre de cobre convencional).

*25-10 Conducción eléctrica en el sistema nervioso

El flujo de carga eléctrica en el sistema nervioso humano nos permite estar conscientes del mundo que nos rodea. Aunque el funcionamiento detallado aún no se comprende del todo, tenemos una comprensión razonable de cómo se transmiten los mensajes dentro el sistema nervioso: se trata de señales eléctricas que se transmiten a través del elemento básico del sistema nervioso: la *neurona*.

Las neuronas son células vivas con una forma inusual (figura 25-28). Existen varios apéndices pequeños unidos al cuerpo central de la célula que se conocen como *dendritas* y también hay una cola larga llamada el *axón*. Las señales se reciben por las dendritas y se propagan a lo largo del axón. Cuando una señal alcanza las terminales nerviosas, se transmite a la siguiente neurona o a un músculo en una conexión llamada *sinapsis*.

Antes de transmitir una señal eléctrica, una neurona se encuentra en el llamado “estado de reposo”. Al igual que prácticamente todos los seres vivos, las neuronas tienen una carga eléctrica positiva en la superficie exterior de la membrana celular y una carga negativa en la superficie interior. Esta diferencia de carga, o “capa dipolar”, significa que hay una diferencia de potencial a través de la membrana celular. Cuando una neurona no transmite una señal, este “potencial de reposo”, referido normalmente como

$$V_{\text{adentro}} - V_{\text{afuera}},$$

es por lo general de -60 mV a -90 mV, lo que depende del tipo de organismo. Los iones más comunes en una célula son K^+ , Na^+ y Cl^- . Hay grandes diferencias en las concentraciones de estos iones adentro y afuera de una célula, como indican los valores típicos que vienen en la tabla 25-2. También están presentes otros iones, así que los fluidos tanto adentro como afuera del axón son eléctricamente neutros. Dadas las diferencias de concentración, hay una tendencia de los iones a difundirse sobre la membrana (véase la sección 18-7 sobre difusión). Sin embargo, en el estado en reposo, la membrana celular evita cualquier flujo neto de Na^+ (a través de un mecanismo de “bombeo activo” de Na^+ hacia el exterior de la célula). Sin embargo, permite el flujo de iones Cl^- , y un poco menos de iones K^+ ; son estos dos iones los que producen la capa de carga dipolar en la membrana. Puesto que hay una mayor concentración de K^+ adentro de la célula que afuera, hay más iones de K^+ que tienden a difundirse hacia fuera a través de la membrana que los que se difunden hacia dentro. Un ion de K^+ que pasa a través de la membrana es atraído hacia la superficie externa de la membrana y deja tras de sí una carga igual negativa que reside en la superficie interior de la membrana (figura 25-29). Independientemente, los iones de Cl^- tienden a difundirse *hacia* la célula, dado que su concentración exterior es mayor. Tanto la difusión de K^+ y de Cl^- tienden a cargar el interior de la superficie de la membrana negativamente y el exterior de manera positiva. Conforme se acumula carga en la superficie de la membrana, se vuelve cada vez más difícil que se difundan más iones: los iones de K^+ que tratan de moverse hacia fuera, por ejemplo, son repelidos por la carga positiva que ya existe ahí. Se alcanza el equilibrio cuando la tendencia a difundirse a causa de la diferencia de concentración se equilibra exactamente con la diferencia de potencial eléctrico a través de la membrana. A mayor diferencia en la concentración, mayor diferencia de potencial a través de la membrana (-60 mV a -90 mV).

El aspecto más importante de una neurona no es que tenga un potencial de reposo (la mayoría de las células lo tienen), sino que logran responder a estímulos y conducir una señal eléctrica. El estímulo puede ser térmico (como cuando tocamos una estufa caliente) o químico (cuando se degusta algo); puede ser una presión (por ejemplo, sobre la piel o el tímpano) o luz (en el ojo); o puede ser un estímulo eléctrico de una señal que viene del cerebro o de otra neurona. En el laboratorio el estímulo generalmente es eléctrico y se aplica mediante una pequeña sonda en algún punto de una neurona. Si el estímulo excede cierto umbral, un pulso de voltaje viaja por el axón. Este pulso de voltaje puede detectarse en un punto del axón usando un voltímetro o un osciloscopio conectado como en la figura 25-30. Este pulso de voltaje tiene la forma

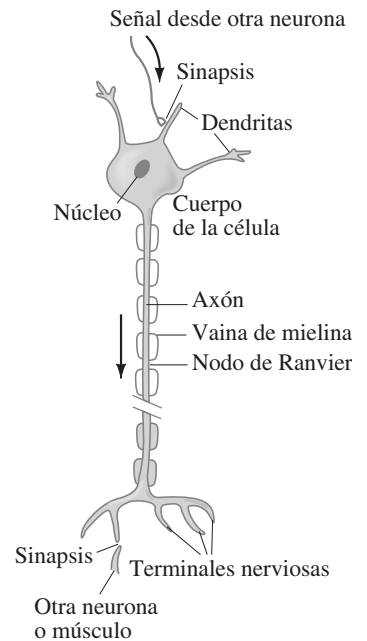


FIGURA 25-28 Esquema simplificado de una neurona.

TABLA 25-2
Concentraciones de iones dentro y fuera de un axón típico

	Concentración dentro del axón (mol/m ³)	Concentración fuera del axón (mol/m ³)
K^+	140	5
Na^+	15	140
Cl^-	9	125

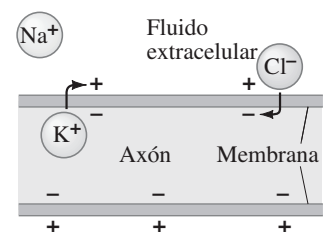
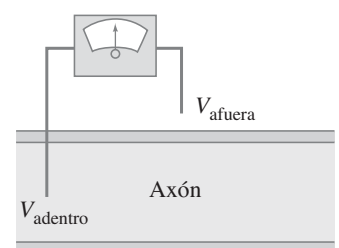


FIGURA 25-29 Cómo se forma una capa dipolar de carga en la membrana de una célula.

FIGURA 25-30 Medición de la diferencia de potencial entre el interior y el exterior de una célula nerviosa.



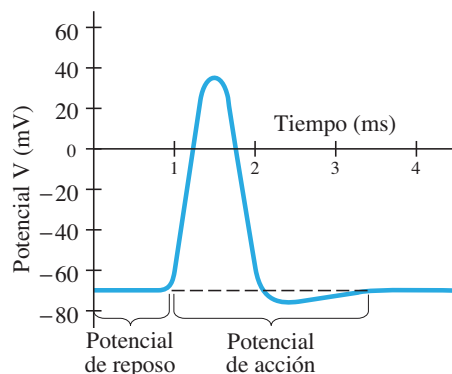
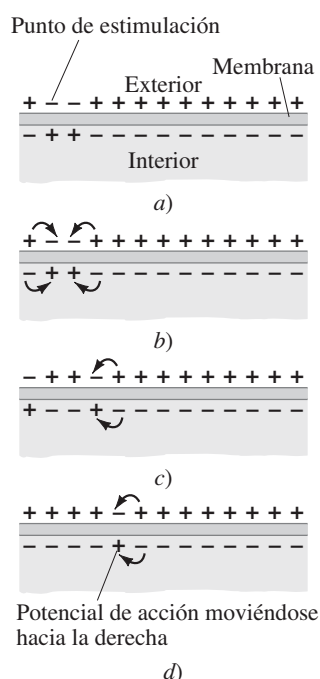


FIGURA 25-31 Potencial de acción.

FIGURA 25-32 Propagación de un potencial de acción a lo largo de la membrana de un axón.



mostrada en la figura 25-31, y se le conoce como **potencial de acción**. Como se observa, el potencial se incrementa desde un potencial de reposo de unos -70 mV y se vuelve positivo hasta 30 mV o 40 mV. El potencial de acción dura cerca de 1 ms y viaja por el axón con una rapidez de 30 m/s a 150 m/s. Cuando se estimula un potencial de acción, se dice que el nervio está “encendido”.

¿Qué origina el potencial de acción? Aparentemente, la membrana de la célula tiene la capacidad de alterar sus propiedades de permeabilidad. En el punto donde ocurre el estímulo, la membrana se vuelve de repente mucho más permeable a los iones de Na^+ que a los de K^+ y Cl^- . Así, los iones de Na^+ se apresuran hacia la célula, y la superficie interna de la pared se carga positivamente, mientras la diferencia de potencial rápidamente se vuelve positiva ($\approx +30$ mV en la figura 25-31). De forma igualmente repentina, la membrana regresa a su estado inicial: se vuelve impermeable a Na^+ y, de hecho, bombea hacia fuera iones de Na^+ . La difusión de iones de Cl^- y K^+ predomina de nuevo y se recupera el potencial de reposo original (-70 mV en la figura 25-31).

¿Qué provoca que el potencial de acción viaje a lo largo del axón? El potencial de acción se presenta en el punto de estimulación, como se indica en la figura 25-32a. Momentáneamente la membrana es positiva en el interior y negativa en el exterior en ese punto. Las cargas cercanas son atraídas hacia esta región, como se muestra en la figura 25-32b. El potencial en esas regiones adyacentes, por lo tanto, decrece, produciendo ahí un potencial de acción. En consecuencia, conforme la membrana regresa a su estado normal en el punto original, experimenta un potencial de acción, así que el potencial de acción se mueve a lo largo del axón (figuras 25-32c y d).

Usted podría preguntarse si el número de iones que pasan a través de la membrana alterarían significativamente las concentraciones. La respuesta es no; podemos mostrar por qué no, y para ello trataremos al axón como un capacitor en el siguiente ejemplo.

EJEMPLO 25-16 ESTIMACIÓN

Capacitancia de un axón.

a) Haga una estimación del orden de magnitud de la capacitancia de un axón de 10 cm de longitud y 10 μm de radio. El grosor de la membrana es aproximadamente de 10^{-8} m, en tanto que la constante dieléctrica es cercana a 3 . **b)** ¿En qué factor cambia la concentración de iones de Na^+ (número de iones por unidad de volumen) en la célula como resultado de un potencial de acción?

PLANTEAMIENTO Modelamos la membrana de un axón como un capacitor cilíndrico de placas paralelas, con cargas opuestas en cada lado. La separación de las “placas” es el espesor de la membrana, $d \approx 10^{-8}$ m. Calculamos primero el área del cilindro y luego podemos usar la ecuación 24-8, $C = K \epsilon_0 A/d$, para encontrar la capacitancia. En **b)**, usamos el cambio de voltaje durante un potencial de acción para encontrar la cantidad de carga que se desplaza a través de la membrana.

SOLUCIÓN **a)** El área A es el área de un cilindro de radio r y longitud ℓ :

$$A = 2\pi r\ell \approx (6.28)(10^{-5} \text{ m})(0.1 \text{ m}) \approx 6 \times 10^{-6} \text{ m}^2.$$

A partir de la ecuación 24-8, tenemos

$$C = K\epsilon_0 \frac{A}{d} \approx (3)(8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2) \frac{6 \times 10^{-6} \text{ m}^2}{10^{-8} \text{ m}} \approx 10^{-8} \text{ F}.$$

b) Puesto que el voltaje cambia de -70 mV hasta $+30$ mV aproximadamente, el cambio total es de 100 mV. Por lo tanto, la cantidad de carga que se desplaza es

$$Q = CV \approx (10^{-8} \text{ F})(0.1 \text{ V}) = 10^{-9} \text{ C}.$$

Cada ion porta una carga $e = 1.6 \times 10^{-19}$ C, así que el número de iones que fluyen en un potencial de acción es $Q/e = (10^{-9} \text{ C})/(1.6 \times 10^{-19} \text{ C}) \approx 10^{10}$. El volumen de nuestro axón cilíndrico es

$$V = \pi r^2 \ell \approx (3)(10^{-5} \text{ m})^2(0.1 \text{ m}) = 3 \times 10^{-11} \text{ m}^3,$$

y la concentración de iones Na^+ dentro de la célula (véase la tabla 25-2) es de $15 \text{ mol/m}^3 = 15 \times 6.02 \times 10^{23} \text{ iones/m}^3 \approx 10^{25} \text{ iones/m}^3$. Así, la célula contiene $(10^{25} \text{ iones/m}^3) \times (3 \times 10^{-11} \text{ m}^3) \approx 3 \times 10^{14} \text{ iones de Na}^+$. Por lo tanto, un potencial de acción cambiará la concentración de iones de Na^+ en aproximadamente $10^{10}/(3 \times 10^{14}) = \frac{1}{3} \times 10^{-4}$, es decir, 1 parte en 30,000. Este pequeño cambio no sería mensurable.

Así, aun 1000 potenciales de acción no alterarán la concentración de manera significativa. Por lo tanto, la bomba de sodio no tiene que extraer iones de Na^+ tan rápido después de un potencial de acción, pero puede operar con lentitud en el tiempo para mantener la concentración relativamente constante.

Resumen

Una **batería** eléctrica sirve como una fuente de diferencia de potencial prácticamente constante transformando energía química en energía eléctrica. Una batería simple consta de dos electrodos, hechos de distintos metales, que están inmersos en una solución o pasta conocida como electrolito.

La **corriente eléctrica**, I , es igual a la tasa a la cual fluye la carga eléctrica y se mide en **amperes** (A): 1 A equivale al flujo de 1 C/s en un punto dado.

La dirección de la **corriente convencional** es aquella del flujo de carga positiva. En un alambre, son en realidad los electrones cargados negativamente los que se desplazan, así que fluyen en dirección opuesta a la corriente convencional. Un flujo de carga positiva en un sentido es casi siempre equivalente a un flujo de carga negativa en el sentido opuesto. La corriente convencional positiva siempre fluye de una región de alto potencial a otra región de menor potencial.

La **resistencia** R de un aparato se define por la relación

$$V = IR, \quad (25-2)$$

donde I es la corriente en el aparato cuando existe una diferencia de potencial V aplicada a través de él. Para materiales como los metales, R es una constante independiente de V (así que $I \propto V$); este resultado se conoce como la **ley de Ohm**. De este modo, la corriente que proviene de una batería de voltaje V depende de la resistencia R del circuito al cual está conectada.

El voltaje se aplica *a través* de un aparato o entre los extremos de un alambre. La corriente pasa *a lo largo* del alambre o del aparato. La resistencia es una propiedad *del* alambre o del aparato.

La unidad de resistencia es el **ohm** (Ω); $1 \Omega = 1 \text{ V/A}$. Véase la tabla 25-3.

TABLA 25-3 Resumen de unidades

Corriente	1 A = 1 C/s
Diferencia de potencial	1 V = 1 J/C
Potencia	1 W = 1 J/s
Resistencia	1 Ω = 1 V/A

La resistencia R de un alambre es inversamente proporcional a su área de sección transversal de A , así como directamente proporcional a su longitud ℓ y a una propiedad intrínseca del material llamada resistividad:

$$R = \frac{\rho \ell}{A}. \quad (25-3)$$

La **resistividad**, ρ , se incrementa con la temperatura para los metales, aunque para materiales semiconductores puede disminuir.

La tasa a la cual se transforma energía en una resistencia R de energía eléctrica a otras formas de energía (como luz o calor) es igual al producto de la corriente por el voltaje. Esto es, la **potencia** transformada, medida en watts, está dada por

$$P = IV, \quad (25-6)$$

que en el caso de resistores puede escribirse como

$$P = I^2 R = \frac{V^2}{R}. \quad (25-7)$$

La unidad del SI para la potencia es el **watt** ($1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$).

La energía eléctrica total transformada en cualquier aparato es igual al producto de la potencia y del tiempo durante el cual el aparato estuvo operando. En unidades del SI, la energía está dada en joules ($1 \text{ J} = 1 \text{ W} \cdot \text{s}$), pero las compañías eléctricas usan una unidad mayor, el **kilowatt-hora** ($1 \text{ kWh} = 3.6 \times 10^6 \text{ J}$).

La corriente eléctrica puede ser **corriente directa** (cd), en cuyo caso la corriente es estable siempre en una dirección, o **corriente alterna** (ca), en cuyo caso la corriente invierte su dirección a una frecuencia particular f , generalmente de 60 Hz. En general, las corrientes alternas son sinusoidales en el tiempo,

$$I = I_0 \sin \omega t, \quad (25-8)$$

donde $\omega = 2\pi f$, y son producidas por un voltaje alternante.

Los valores **rms** de las corrientes alternas sinusoidales y los voltajes alternos están dados por

$$I_{\text{rms}} = \frac{I_0}{\sqrt{2}} \quad \text{y} \quad V_{\text{rms}} = \frac{V_0}{\sqrt{2}}, \quad (25-9)$$

respectivamente, donde I_0 y V_0 son los valores **pico**. La relación para la potencia, $P = IV = I^2 R = V^2/R$, se cumple para la potencia promedio cuando se usan los valores rms de V y de I .

La **densidad de corriente** \vec{j} es la corriente por unidad de área de sección transversal. Desde un punto de vista microscópico, la densidad de corriente se relaciona con el número de portadores de carga por unidad de volumen, n , su carga, q , y su **velocidad de deriva**, \vec{v}_d , a través de la relación

$$\vec{j} = nq\vec{v}_d. \quad (25-16)$$

El campo eléctrico dentro de un alambre está relacionado con la densidad de corriente \vec{j} por $\vec{j} = \sigma \vec{E}$ donde $\sigma = 1/\rho$ es la **conductividad**.

[*A muy bajas temperaturas, algunos materiales se convierten en **superconductores**, lo cual significa que la resistencia eléctrica se vuelve prácticamente cero].

[*El sistema nervioso humano funciona a través de conducción eléctrica: cuando un nervio se “dispara”, viaja una señal eléctrica como un pulso de voltaje conocido como **potencial de acción**].

Preguntas

- ¿Qué cantidad se mide con una batería con especificaciones dadas en ampere-hora (A · h)?
- Cuando se conecta una pila eléctrica a un circuito, los electrones fluyen a partir de la terminal negativa del circuito. Sin embargo, dentro de la pila, los electrones fluyen *hacia* la terminal negativa. Explique este hecho.
- Cuando se enciende una linterna de mano, ¿qué es lo que se gasta: la corriente de la batería, el voltaje de la batería, la energía de la batería, la potencia de la batería o la resistencia de la batería? Explique.
- Se dice que una de las terminales de la batería de un automóvil está conectada a “tierra”. Puesto que en realidad no está conectada a la tierra, ¿qué es lo que significa tal expresión?
- Cuando usted abre una llave de agua, el agua normalmente fluye de inmediato. No tiene que esperar para que el agua fluya desde la válvula del agua hasta el chorro. ¿Por qué no? ¿Ocurre algo similar cuando conecta un alambre a las terminales de una batería?
- ¿Pueden un alambre de cobre y otro de aluminio de la misma longitud tener la misma resistencia? Explique.
- La ecuación $P = V^2/R$ indica que la potencia disipada en una resistencia disminuye si la resistencia aumenta, mientras que la ecuación $P = I^2 R$ implica lo contrario. ¿Existe alguna contradicción en esto? Explique.
- ¿Qué pasa cuando se funde una bombilla eléctrica?

9. Si se aumenta la resistencia de un pequeño calentador de inmersión (usado para calentar agua para té o sopa, figura 25-33), ¿se aceleraría o se retardaría el proceso de calentamiento? Explique.



FIGURA 25-33
Pregunta 9.

10. Si un sólido rectangular de carbón tiene lados con longitudes a , $2a$ y $3a$, ¿cómo conectaría los cables provenientes de una batería para obtener *a*) la menor resistencia y *b*) la mayor resistencia?
11. Explique por qué las bombillas eléctricas se funden casi siempre justo después de encenderse y no después de un rato de estar encendidas.
12. ¿Qué consume más corriente, una bombilla de 100 W o un bulbo de 75 W? ¿Cuál tiene la mayor resistencia?
13. La potencia eléctrica se transfiere por largas distancias a voltajes muy altos. Explique por qué los altos voltajes reducen las pérdidas de potencia en las líneas de transmisión.

14. Un fusible de 15 A se quema repetidamente. ¿Por qué es peligroso sustituir este fusible con otro de 25-A?
15. Cuando las luces eléctricas operan a bajas frecuencias de ca (por ejemplo, 5 Hz), éstas titilan apreciablemente. ¿Por qué?
16. Cuando se trabaja con ca, los mismos electrones pasan a través de su lámpara de lectura una y otra vez. Explique por qué la luz se mantiene encendida en vez de apagarse después del primer paso de los electrones.
17. El elemento calefactor en un tostador está hecho de alambre de nicromo. Justo después de que se enciende el tostador, ¿la corriente (I_{rms}) en el alambre aumenta, disminuye o se mantiene estable? Explique.
18. ¿La corriente se agota en una resistencia? Explique.
19. Compare las velocidades de deriva y las corrientes eléctricas en dos alambres que tienen la misma geometría y densidad de átomos, pero el número de electrones libres por átomo en el material de un alambre es el doble que en el otro.
20. Se conecta un voltaje V a través de un alambre de longitud ℓ y radio r . ¿Cómo cambia la velocidad de deriva de los electrones si *a*) se duplica ℓ , *b*) se duplica r , *c*) se duplica V ?
21. ¿Por qué es más peligroso encender un aparato eléctrico cuando usted está de pie en el exterior y descalzo que cuando está de pie en el interior usando zapatos con suelas anchas?

Problemas

25-2 y 25-3 Corriente eléctrica, resistencia y ley de Ohm

(Nota: La carga de un electrón es de 1.60×10^{-19} C)

- (I) En un alambre fluye una corriente de 1.30 A. ¿Cuántos electrones por segundo pasan por un punto dado del alambre?
- (I) Una estación de servicio carga una batería usando una corriente de 6.7 A durante 5.0 h. ¿Cuánta carga pasa a través de la batería?
- (I) ¿Cuál es la corriente en amperes si fluyen 1200 iones de Na^+ a través de la membrana de una célula en $3.5 \mu\text{s}$? La carga en un ion de sodio es la misma que la del electrón, pero positiva.
- (I) ¿Cuál es la resistencia de un tostador si 120 V producen una corriente de 4.2 A?
- (II) Una secadora eléctrica de ropa tiene un elemento calefactor con una resistencia de 8.6Ω . *a*) ¿Cuál es la corriente en el elemento calefactor cuando se conecta a 240 V? *b*) ¿Cuánta carga pasa a través del elemento calefactor en 50 min? (Considere corriente directa).
- (II) Una secadora para el cabello usa 9.5 A cuando se conecta a una línea de 120 V. *a*) ¿Cuál es su resistencia? *b*) ¿Cuánta carga pasa a través de la secadora en 15 min? (Considere corriente directa).
- (II) Se conecta una batería de 4.5 V a un bulbo con una resistencia de 1.6Ω , ¿Cuántos electrones salen de la batería por minuto?
- (II) Un ave se posa sobre una línea de transmisión de corriente eléctrica cd que conduce 3100 A (figura 25-34). La línea tiene una resistencia de $2.5 \times 10^{-5} \Omega$ por metro, mientras las patas del ave están separadas 4.0 cm. ¿Cuál es la diferencia de potencial entre las patas del ave?



FIGURA 25-34
Problema 8.

9. (II) Una batería de 12 V produce una corriente de 0.60 A sobre un resistor. *a*) ¿Cuál es el valor de la resistencia? *b*) ¿Cuántos joules de energía pierde la batería por minuto?
10. (II) Un aparato eléctrico toma 6.50 A a 240 V. *a*) Si el voltaje disminuye en un 15%, ¿cuál será la corriente, suponiendo que todo lo demás permanece constante? *b*) Si la resistencia del aparato se reduce en un 15%, ¿qué corriente circularía a 240 V?

25-4 Resistividad

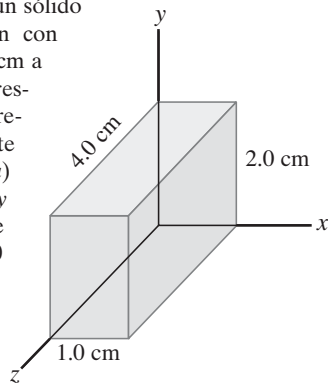
- (I) ¿Cuál es el diámetro de un alambre de tungsteno de 1.00 m de longitud cuya resistencia es de 0.32Ω ?
- (I) ¿Cuál es la resistencia de un alambre de cobre de 4.5 m de longitud y 1.5 mm de diámetro?
- (II) Calcule la razón entre la resistencia de un alambre de aluminio de 10.0 m de largo y 2.0 mm de diámetro y la resistencia de un alambre de cobre de 20.0 m de longitud y 1.8 mm de diámetro.
- (II) ¿Puede un alambre de cobre de 2.2 mm de diámetro tener la misma resistencia que un alambre de tungsteno de la misma longitud? Use argumentos numéricos para responder.
- (II) Se aplica una serie de diferencias de potencial V a un alambre (11 cm de longitud y 0.32 mm de diámetro) y la medida de las corrientes resultantes I es la siguiente:

V (V)	0.100	0.200	0.300	0.400	0.500
I (mA)	72	144	216	288	360

(*a*) Si este cable cumple con la ley de Ohm, al graficar I contra V se obtendrá una línea recta. Explique por qué esto es así y determine las predicciones teóricas para la pendiente de la línea recta y la intersección en y . *b*) Grafique I en función de V . Con base en esa gráfica, ¿puede usted concluir si el alambre cumple con la ley de Ohm (es decir, obtuvo una línea recta con la ordenada al origen que esperaba)? Si es así, determine la resistencia R del alambre. *c*) Calcule la resistividad del alambre y utilice la tabla 25-1 para identificar el material sólido del que está compuesto.

16. (II) ¿En cuánto tendría que aumentar la temperatura de un alambre de cobre (inicialmente a 20°C) para aumentar su resistencia en un 15%?
17. (II) Un cierto alambre de cobre tiene una resistencia de $10.0\ \Omega$. ¿En qué punto debe cortarse el alambre de manera que la resistencia de un segmento sea 4.0 veces la resistencia del otro segmento? ¿Cuál es la resistencia de cada segmento?
18. (II) Determine a qué temperatura el aluminio tendrá la misma resistividad que el tungsteno a 20°C .
19. (II) Una bombilla eléctrica de $100\ \Omega$ tiene una resistencia de $12\ \Omega$ aproximadamente cuando está fría (20°C) y de $140\ \Omega$ cuando está encendida (caliente). Determine la temperatura del filamento cuando está caliente suponiendo un coeficiente térmico de resistividad promedio de $\alpha = 0.0045\ (^{\circ}\text{C})^{-1}$.
20. (II) Calcule la caída de voltaje a través de un tramo de 26 m de un alambre de cobre casero número 14 (usado en circuitos de 15 A). El diámetro del alambre es de 1.628 mm y transporta una corriente de 12 A.
21. (II) Dos alambres de aluminio tienen la misma resistencia. Si uno es dos veces más largo que el otro, ¿cuál es la razón del diámetro del alambre largo con respecto al diámetro del alambre corto?
22. (II) La figura 25-35 muestra un sólido rectangular hecho de carbón con lados de 1.0 cm, 2.0 cm y 4.0 cm a lo largo de los ejes x , y y z , respectivamente. Determine la resistencia cuando la corriente pasa a través del sólido en *a*) la dirección x , *b*) la dirección y y *c*) la dirección z . Considere que la resistividad es $\rho = 3.0 \times 10^{-5}\ \Omega \cdot \text{m}$.

FIGURA 25-35
Problema 22.



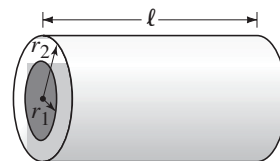
23. (II) Se conecta un alambre de aluminio de determinada longitud a una fuente de poder precisa de 10.00 V, luego se mide con precisión una corriente de 0.4212 A a 20.0°C . Ahora se coloca al alambre en otro entorno de temperatura desconocida y se mide una corriente de 0.3818 A. ¿Cuál es la temperatura desconocida?
24. (II) Pueden medirse pequeños cambios en la longitud de un objeto usando un **sensor de medición de esfuerzos**, el cual se forma con un alambre de longitud original ℓ_0 , área de sección transversal A_0 y resistencia R_0 . Se fija rígidamente el sensor a la superficie del objeto, alineando su longitud en la dirección en la cual se medirán los cambios en la longitud. Conforme el objeto se deforma, la longitud del alambre sensor cambia en $\Delta\ell$, y se mide el cambio ΔR en la resistencia del sensor. Suponiendo que el alambre sólido se deforma hasta una longitud ℓ , y que su densidad y su volumen permanecen constantes (lo cual es sólo una aproximación), demuestre que el esfuerzo ($= \Delta\ell/\ell_0$) del alambre sensor, y por lo tanto el esfuerzo del objeto al cual está unido, es $\Delta R/2R_0$.
25. (II) Un cierto tramo de alambre se corta a la mitad y los dos alambres resultantes se envuelven uno junto a otro para formar un alambre del doble de ancho. ¿Cómo se compara la resistencia de esta nueva combinación con la resistencia del alambre original?
26. (III) Para algunas aplicaciones, es importante que el valor de la resistencia no cambie con la temperatura. Por ejemplo, suponga que usted elaboró un resistor de $3.70\ \text{k}\Omega$ a partir de una resistencia de carbón y de un resistor de alambre enrollado de nicromo, conectados entre sí, de manera que la resistencia total es la suma de sus resistencias por separado. ¿Cuál es el valor que debe tener cada una de las resistencias (a 0°C) para que la resistencia de la combinación no cambie con la temperatura?

27. (III) Determine una expresión para la resistencia total de un cascarón esférico hecho de un material cuya conductividad es σ , con radio interior r_1 y radio exterior r_2 . Considere que la corriente fluye radialmente hacia fuera.
28. (III) El filamento de una bombilla eléctrica tiene una resistencia de $12\ \Omega$ a 20°C y de $140\ \Omega$ cuando está caliente (como en el problema 19). *a*) Calcule la temperatura del filamento cuando está caliente, considerando los cambios en longitud y área del filamento debidos a la expansión térmica (considere que el material es tungsteno con un coeficiente de expansión térmica de $\approx 5.5 \times 10^{-6}\ ^{\circ}\text{C}^{-1}$). *b*) Para ese intervalo de temperatura, ¿cuál es el cambio porcentual en la resistencia debido a la expansión térmica y cuál es el cambio porcentual en la resistencia debido sólo al cambio en ρ ? Use la ecuación 25-5.
29. (III) Un alambre de 10.0 m de longitud está formado por 5.0 m de cobre seguidos de 5.0 m de aluminio, ambos con un diámetro de 1.4 mm. Se aplica una diferencia de potencial de 85 mV a través del alambre completo. *a*) ¿Cuál es la resistencia total (suma) de los dos alambres? *b*) ¿Cuál es la corriente en el alambre? *c*) ¿Cuáles son los voltajes a través de la parte de aluminio y a través de la parte de cobre?
30. (III) Un resistor cilíndrico hueco con radio interior r_1 , radio exterior r_2 y longitud ℓ está hecho de un material con resistividad ρ (figura 25-36). *a*) Muestre que la resistencia está dada por

$$R = \frac{\rho}{2\pi\ell} \ln \frac{r_2}{r_1}$$

para corriente que fluye radialmente hacia fuera. [Sugerencia: Divida el resistor en cascarones cilíndricos concéntricos e integre.] *b*) Evalúe la resistencia R para el caso de un resistor hecho de carbón con radio interior de 1.0 mm, radio exterior de 1.8 mm y longitud de 2.4 cm. (Considere $\rho = 15 \times 10^{-5}\ \Omega \cdot \text{m}$). *c*) ¿Cuál es la resistencia en el inciso *b*) cuando la corriente fluye paralela al eje del cilindro?

FIGURA 25-36
Problema 30.



25-5 y 25-6 Potencia eléctrica

31. (I) ¿Cuál es la potencia máxima que consume un reproductor de CD portátil de 3.0 V que toma un máximo de 270 mA de corriente?
32. (I) El elemento calefactor de un horno eléctrico está diseñado para producir 3.3 kW de calor cuando se conecta a una fuente de 240 V. ¿Cuál debe ser la resistencia del elemento?
33. (I) ¿Cuál es el voltaje máximo que puede aplicarse a través de un resistor de $3.3\ \text{k}\Omega$ especificado a $\frac{1}{4}$ de watt?
34. (I) *a*) Determine la resistencia y la corriente en una bombilla de 75 W conectada a su fuente correcta de voltaje de 110 V. *b*) Elabore el cálculo para una bombilla de 440 W
35. (II) Una planta de energía eléctrica produce electricidad a una potencia fija P , pero el operador de la planta puede elegir a qué voltaje V se genera. La electricidad se conduce mediante una corriente I a través de líneas de transmisión (con resistencia R) desde la planta hasta el usuario, donde se suministra con una potencia P' . *a*) Demuestre que la reducción en la potencia $\Delta P = P - P'$ debida a pérdidas en la transmisión está dada por $\Delta P = P^2 R / V^2$. *b*) Con la finalidad de reducir las pérdidas de energía durante la transmisión, ¿el operador de la planta debería elegir voltajes V tan altos o tan bajos como sea posible?
36. (II) Una secadora para el cabello de 120 V tiene dos niveles de operación: a 850 W y a 1250 W. *a*) ¿A qué nivel espera usted que la resistencia sea mayor? Después de razonar su respuesta, calcule la resistencia *b*) en el nivel bajo y *c*) en el nivel alto.

37. (II) El calentador de 115 V de una pecera está diseñado para 95 W. Calcule *a*) la corriente a través del calentador cuando está trabajando y *b*) su resistencia.
38. (II) Usted compra una bombilla de 75 W en Europa, donde la electricidad que se provee a las casas es de 240 V. Si usa la bombilla en Estados Unidos a 120 V (suponga que la resistencia no cambia), ¿qué tan brillante será con respecto a la bombilla de 75 W y 120 V? [Sugerencia: Suponga que el brillo es aproximadamente proporcional a la potencia consumida].
39. (II) ¿Cuántos kWh de energía usa un tostador de 550 W en la mañana si está en operación durante un total de 6.0 min? Si cada kWh cuesta 9.0 centavos de dólar, estime cuánto añade esto a su recibo de energía eléctrica mensual si tuesta pan cuatro veces a la semana.
40. (II) A un costo de \$0.095/kWh, ¿cuánto cuesta dejar la luz de 25 W del porche encendida todo el día y toda la noche durante un año?
41. (II) ¿Cuál es la cantidad de energía total almacenada en una batería de automóvil de 12 V y 75 A · h cuando está completamente cargada?
42. (II) La figura 25-37 muestra una linterna ordinaria que usa dos baterías D de 1.5 V conectadas en serie como en la figura 25-4b. La bombilla utiliza 380 mA cuando está encendida. Calcule la resistencia de la bombilla y la potencia disipada. *b*) ¿En qué factor se incrementaría la potencia si se usan cuatro baterías D en serie con la misma bombilla? (Ignore los efectos de calentamiento en el filamento.) ¿Por qué no debería intentar hacer esto?

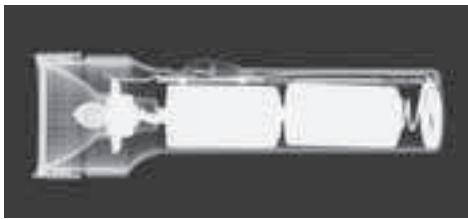


FIGURA 25-37 Problema 42.

43. (II) ¿Cuántas bombillas de 75 W, conectadas a 120 V como en la figura 25-20, pueden usarse sin quemar un fusible de 15 A?
44. (II) Un cable de extensión hecho con dos alambres de 0.129 cm de diámetro (alambre de cobre número 16) y 2.7 m de longitud está conectado a un calentador eléctrico que extrae 15.0 A de una línea de 120 V. ¿Cuál es la potencia disipada en el cable?
45. (II) Una estación de energía suministra 750 kW de potencia a 12,000 V a una fábrica a través de alambres con una resistencia total de 3.0 Ω. ¿Cuánta potencia menos se desperdiciaría si la electricidad se suministrara a 50,000 V y no a 12,000 V?
46. (III) Puede usarse un pequeño calentador de inmersión en un automóvil para calentar una taza de agua para café o té. Si el calentador puede calentar 120 mL de agua de 25°C a 95°C en 8.0 min, *a*) ¿cuánta corriente aproximadamente extrae el calentador de la batería de 12 V del automóvil? *b*) ¿Cuál es su resistencia? Considere que el constructor asegura una eficiencia del 75%.
47. (III) La corriente en un electroimán conectado a una línea de 240 V es de 17.5 A. ¿A qué tasa debe fluir agua para enfriar sobre las bobinas si la temperatura del agua no debe incrementarse en más de 6.50°C?
48. (III) Un alambre redondo de tungsteno de 1.0 m de largo debe alcanzar una temperatura de 3100 K cuando por él fluye una corriente de 15.0 A. ¿Qué diámetro debe tener el alambre? Considere que el alambre pierde energía sólo por radiación (emisividad $\epsilon = 1.0$, sección 19-10) y que la temperatura del entorno es de 20°C.

25-7 Corriente alterna

49. (I) Calcule la corriente pico en un resistor de 2.7 kΩ conectado a una fuente ca de 220 rms.
50. (I) Una fuente de voltaje ca, cuyo valor pico es de 180 V, está conectada a través de un resistor de 380 Ω. ¿Cuánto valen las corrientes pico y rms en el resistor?
51. (II) Estime la resistencia en los circuitos de 120 V_{rms} de su casa vistos por la compañía eléctrica, cuando *a*) todos los aparatos eléctricos están desconectados y *b*) sólo hay dos bombillas de 75 W conectadas.
52. (II) El valor pico de una corriente alterna en un aparato de 1500 W es de 5.4 A. ¿A qué voltaje rms está conectado el aparato?
53. (II) Un arco para soldadura de 1800 W está conectado a una línea ca de 660 V_{rms}. Calcule *a*) el voltaje pico y *b*) la corriente pico.
54. (II) *a*) ¿Cuál es la máxima potencia instantánea disipada por una bomba de 2.5 hp conectada a una fuente de poder de 240 V_{rms}? *b*) ¿Cuál es la corriente máxima que pasa a través de la bomba?
55. (II) Un anillo calefactor conectado a una línea ca de 240 V_{rms} tiene una resistencia de 44 Ω. *a*) ¿Cuál es la potencia promedio utilizada? *b*) ¿Cuáles son los valores máximo y mínimo de la potencia instantánea?
56. (II) El voltaje rms de un voltaje dependiente del tiempo $V(t)$, que es periódico con tiempo T , está definido por $V_{\text{rms}} = \left[\frac{1}{T} \int_0^T V^2 dt \right]^{1/2}$. Use esta definición para determinar V_{rms} (en términos del voltaje pico V_0) para *a*) un voltaje sinusoidal, es decir, $V(t) = V_0 \sin(2\pi t/T)$ para $0 \leq t \leq T$; y *b*) un voltaje de onda cuadrada positivo, es decir,

$$V(t) = \begin{cases} V_0 & 0 \leq t \leq \frac{T}{2} \\ 0 & \frac{T}{2} \leq t \leq T \end{cases}$$

25-8 Visión microscópica de la corriente eléctrica

57. (II) Un alambre de cobre de 0.65 mm de diámetro conduce una pequeña corriente de 2.3 μA. Estime *a*) la velocidad de deriva de los electrones, *b*) la densidad de corriente y *c*) el campo eléctrico en el alambre.
58. (II) Un alambre de 5.80 m de largo y 2.00 mm de diámetro conduce una corriente de 750 mA cuando se aplican 22.0 mV a sus extremos. Si la velocidad de deriva es de 1.7×10^{-5} m/s, determine *a*) la resistencia R del alambre, *b*) la resistividad ρ , *c*) la densidad de corriente j , *d*) el campo eléctrico dentro del alambre y *e*) el número n de electrones libres por unidad de volumen.
59. (II) En un punto alto de la atmósfera de la Tierra se encuentran en movimiento iones de He^{2+} con una concentración de $2.8 \times 10^{12}/\text{m}^3$ hacia el norte con una rapidez de 2.0×10^6 m/s. También, iones de O_2^- con una concentración de $7.0 \times 10^{11}/\text{m}^3$ se desplazan hacia el sur con una rapidez de 6.2×10^6 m/s. Determine la magnitud y la dirección de la densidad de corriente \vec{j} en ese punto.

*25-10 Conducción en nervios

- *60. (I) ¿Cuál es la magnitud del campo eléctrico a través de la membrana del axón de 1.0×10^{-8} m de espesor si el potencial de reposo es de -70 mV?
- *61. (II) Se estimula una neurona con un pulso eléctrico. El potencial de acción se detecta en un punto situado 3.40 cm más adelante del axón 0.0052 segundos después. Cuando se detecta el potencial de acción a 7.20 cm del punto de estimulación, han pasado 0.0063 s. ¿Cuál es la rapidez del pulso eléctrico a lo largo del axón? (¿Por qué se necesitan dos mediciones y no sólo una?)
- *62. (III) Durante un potencial de acción, iones de Na^+ se desplazan hacia la célula a una tasa aproximada de 3×10^{-7} mol/m²·s. ¿Cuál es la potencia que debe producir el sistema de “bombeo activo de Na^+ ” para producir ese flujo en contra de una diferencia de potencial de +30 mV? Considere que el axón tiene 10 cm de largo y 20 μm de diámetro.

Problemas generales

63. Una persona deja encendidas accidentalmente las luces del automóvil. Si cada uno de los faros consume 40 W y cada una de las luces traseras requiere 6 W, para un total de 92 W, ¿cuánto durará una batería nueva de 12 V con una especificación de 85 A·h? Considere que los 12 V aparecen completos a través de cada bombilla.
64. ¿Cuántos coulombs hay en 1.00 ampere-hora?
65. Usted desea diseñar una manta eléctrica portátil que opere con baterías de 1.5 V. Si usa alambre de cobre de 0.50 mm de diámetro como elemento calefactor, ¿qué tan largo debe ser el alambre si quiere generar 15 W de potencia de calentamiento? ¿Qué pasa si usted conecta accidentalmente la manta a una batería de 9.0 V?
66. ¿Cuál es la potencia promedio que extrae un motor de 1.0 hp a 120 V? (1 hp = 746 W).
67. La conductividad G de un objeto se define como el recíproco de la resistencia R ; esto es $G = 1/R$. La unidad de la conductividad es el *mho* (= ohm^{-1}), también conocida como *siemens* (S). ¿Cuál es la conductividad (en siemens) de un objeto que consume 480 mA de corriente a 3.0 V?
68. El elemento calefactor de un calentador de 1500 W y 110 V tiene 3.5 m de longitud. ¿Cuál debe ser su diámetro si está hecho de hierro?
69. a) Un hogar particular usa un calentador de 1.8 kW por 2.0 h/día (encendido), cuatro bombillas de 100 W por 6.0 h/día, una estufa eléctrica de 3.0 kW durante 1.0 h/día y otros aparatos con 2.0 kWh/día. Si el costo de la electricidad es de \$0.105 por kWh, ¿de cuánto será su recibo mensual (30 días)? b) ¿Cuánto carbón (el cual produce 7500 kcal/kg) debe quemarse en una planta generadora de electricidad con una eficiencia del 35% para proveer las necesidades anuales de esta casa?
70. Una ciudad pequeña requiere cerca de 15 MW de energía eléctrica. Suponga que en vez de usar líneas de alto voltaje para proveer la energía eléctrica, ésta se suministrara a 120 V. Considere una línea de dos alambres de cobre de 0.50 cm de diámetro y estime el costo de la energía perdida en forma de calor por hora por metro. Considere que el costo de la electricidad es de 9.0 centavos de dólar por kWh.
71. Una secadora para el cabello de 1400 W está diseñada para operar a 117 V. a) ¿Cuál sería el cambio porcentual en la potencia de salida si el voltaje cae a 105 V? Considere que la resistencia no cambia. b) ¿Cómo afectaría su respuesta el cambio real de la resistividad con la temperatura?
72. El cableado en una casa debe tener un grosor suficiente para que no se caliente tanto como para generar un incendio. ¿Cuál es el diámetro que debe tener un alambre de cobre si habrá de conducir una corriente máxima de 35 A y producir no más de 1.5 W de calor por metro de longitud?
73. Determine la resistencia del filamento de tungsteno en una bombilla incandescente de 75 W a 120 V, a) a su temperatura de operación cercana a 3000 K y b) a temperatura ambiente.
74. Suponga que una corriente está dada por la ecuación $I = 1.80 \sin 210 t$, donde I está en amperes y t en segundos. a) ¿Cuál es la frecuencia? b) ¿Cuál es el valor rms de la corriente? c) Si ésta es la corriente a través de una resistencia de 24.0 Ω , determine la ecuación que describe al voltaje como función del tiempo.
75. Un horno de microondas que trabaja al 65% de eficiencia envía 950 W de energía por segundo hacia el interior. Considere una fuente de voltaje de 120 V y determine a) la potencia que toma de la fuente y b) la corriente que ocupa.
76. Se estira uniformemente un alambre de 1.00 Ω hasta 1.20 veces su longitud original. ¿Cuál es la nueva resistencia?
77. Se aplican 220 V a dos conductores diferentes hechos del mismo material. Un conductor es dos veces más largo y dos veces más ancho que el otro. ¿Cuál es la razón entre la potencia transformada por el primer alambre con respecto a la del segundo?
78. Se usa un calentador eléctrico para calentar un cuarto con un volumen de 54 m³. Se hace ingresar aire dentro del cuarto a 5°C y se reemplaza por completo dos veces cada hora. La pérdida de calor a través de las paredes es aproximadamente de 850 kcal/h. Si el aire debe mantenerse a 20°C, ¿cuál es la mínima potencia en watts que debe tener el calentador? (El calor específico del aire es de cerca de 0.17 kcal/kg · °C).
79. Se conecta un horno de 2800 W a una fuente de 240 V. a) ¿Cuál es la resistencia del horno? b) ¿Cuánto tiempo tardará en calentar 120 mL de agua de 15°C a 100°C suponiendo una eficiencia del 75%? c) ¿Cuánto costará esto a 11 centavos/kWh?
80. Un vehículo eléctrico propuesto usa baterías almacenadas como su fuente de energía. Su masa es de 1560 kg y es alimentado con 24 baterías, cada una de 12 V y 95 A·h. Suponga que el auto se maneja sobre una pista plana a una rapidez promedio de 45 km/h y que la fuerza promedio de fricción es de 240 N. Considere una eficiencia del 100% e ignore la energía usada para acelerar. No se consume energía cuando el vehículo se detiene, puesto que el motor no necesita marchar en ralentí (es decir, sin acelerar). a) Determine los caballos de potencia requeridos para operar el vehículo. b) ¿Después de cuántos kilómetros aproximadamente deben reemplazarse las baterías?
81. Un resistor de 12.5 Ω está hecho a partir de una bobina de alambre de cobre con una masa total de 15.5 g. ¿Cuál es el diámetro del alambre y cuál es su longitud?
82. El calentador de una pecera está diseñado para 95 W cuando se conecta a 120 V. El elemento calefactor es una bobina de alambre de nicromo. Cuando se desenrolla, el alambre tiene una longitud total de 3.8 m. ¿Cuál es el diámetro del alambre?
83. Un foco de 100 W a 120 V tienen una resistencia de 12 Ω cuando está frío (20°C) y 140 Ω cuando está encendido (caliente). Calcule la potencia consumida a) en el instante en que se enciende y b) después de un rato de estar encendido.
84. En un automóvil el sistema de voltaje varía de cerca de 12 V cuando el auto está apagado a cerca de 13.8 V cuando está encendido y el sistema de carga está en operación, una diferencia del 15%. ¿En qué porcentaje cambia la potencia suministrada a los faros cuando el voltaje cambia de 12 V a 13.8 V? Considere que la resistencia de los faros permanece constante.
85. El acelerador Tevatron en Fermilab (Illinois) está diseñado para transportar un haz de protones de 11 mA viajando casi a la velocidad de la luz (3.0×10^8 m/s) alrededor de un anillo de 6300 m de circunferencia. ¿Cuántos protones hay en el haz?
86. La bombilla A está diseñada para operar a 120 V y a 40 W para aplicaciones caseras. La bombilla B está diseñada a 12 V y 40 W para aplicaciones automotrices. a) ¿Cuál es la corriente a través de cada bombilla? b) ¿Cuál es la resistencia de cada bombilla? c) En una hora, ¿cuánta carga pasa a través de cada bombilla? d) En una hora, ¿cuánta energía usa cada bombilla? e) ¿Qué bombilla requiere alambres de mayor diámetro para conectarla a la fuente de poder?
87. Un aparato de aire acondicionado usa 14 A a 220 V de ca. El cable conector es un alambre de cobre con un diámetro de 1.628 mm. a) ¿Cuánta potencia consume el aparato de aire acondicionado? b) Si la longitud total del alambre es de 15 m, ¿cuánta potencia se disipa en el alambre? c) Si en su lugar se usa alambre del número 12, con un diámetro de 2.053 mm, ¿cuánta potencia se disiparía en el cableado? d) Considerando que el aparato de aire acondicionado trabaja durante 12 h al día, ¿cuánto dinero se ahorraría al mes (30 días) si se usa alambre del número 12? Considere que el costo de la electricidad es de 12 centavos por kWh.

88. Se usa alambre de cobre de 0.259 cm de diámetro para conectar un conjunto de aparatos a 120 V, los cuales consumen una potencia total de 1750 W. a) ¿Cuánta potencia se desperdicia en 25.0 m de este cable? b) ¿Cuál sería su respuesta si se usa alambre de 0.412 cm de diámetro?
89. La electricidad provista por baterías es mucho más cara que la electricidad suministrada por una toma de corriente en la pared. Estime el costo de 1 kWh de a) una pila alcalina D (costo \$1.70) y b) una pila alcalina AA (costo \$1.25). Estas baterías pueden suministrar una corriente continua de 25 mA durante 820 h y 120 h, respectivamente a 1.5 V. Compare con la corriente doméstica normal a 120 V de ca a \$0.10/kWh.
90. ¿Qué tan lejos se desplaza un electrón a lo largo de los alambres de un tostador de 550 W durante un ciclo de corriente alterna? El cable de alimentación tiene alambres de cobre de 1.7 mm de diámetro y se conecta a una terminal estándar de 60 Hz y 120 V de ca. [Sugerencia: Considere que la corriente máxima en un ciclo está relacionada con la velocidad de deriva máxima. La velocidad máxima en una oscilación está relacionada con el desplazamiento máximo (véase el capítulo 14)].
91. Una tubería de cobre tiene un diámetro interior de 3.00 cm y un diámetro exterior de 5.00 cm (figura 25-38). ¿Cuál es la resistencia de una tubería de este tipo que mide 10.0 m de longitud?

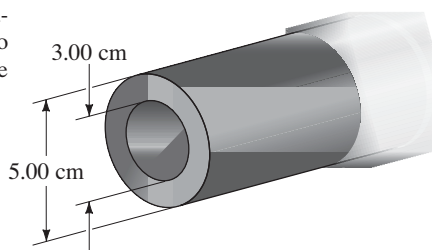


FIGURA 25-38
Problema 91.

92. La figura 25-39 muestra un alambre cuyo diámetro varía uniformemente desde a hasta b como se indica. Considere una corriente $I = 2.0$ A que entra por el punto a . Si $a = 2.5$ mm y $b = 4.0$ mm, ¿cuál es la densidad de corriente (considerada uniforme) en cada extremo?

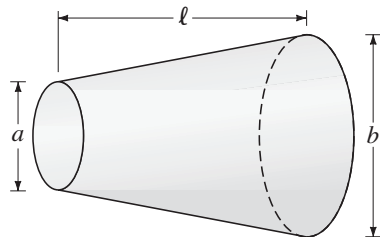


FIGURA 25-39
Problemas 92 y 93.

93. La sección transversal de un alambre se incrementa de manera uniforme, como se indica en la figura 25-39, de manera que el alambre tiene la forma de un cono truncado. En un extremo, el diámetro es a y en el otro extremo el diámetro es b . La longitud total a lo largo del eje es ℓ . Si el material tiene resistividad ρ , determine la resistencia R entre los dos extremos en términos de a , b , ℓ y ρ . Considere que la corriente fluye de manera uniforme a través de cada sección transversal y que la inclinación es pequeña, es decir, $(b - a) \ll \ell$.
94. Un filamento de tungsteno utilizado en la bombilla de una linterna opera a 0.20 A y 3.2 V. Si su resistencia a 20°C es de 1.5 Ω , ¿cuál es la temperatura del filamento cuando la linterna está encendida?

95. En un tanque de almacenamiento puede monitorearse el nivel de helio líquido (temperatura ≤ 4 K) usando un alambre de niobio-titanio (NbTi) alineado verticalmente, cuya longitud ℓ abarca la altura del tanque. En este dispositivo de monitoreo de altura, un circuito electrónico mantiene una corriente eléctrica constante I en todo momento en el alambre de NbTi, y un voltímetro monitorea la diferencia de voltaje V entre los extremos del alambre. Puesto que la temperatura de transición superconductora del NbTi es de 10 K, la porción del alambre inmersa en el helio líquido está en el estado superconductor, mientras que la porción arriba del líquido (en vapor de helio a una temperatura mayor a 10 K) está en el estado normal. Defina $f = x/\ell$ como la fracción del tanque lleno con helio líquido (figura 25-40) y V_0 como el valor de V cuando el tanque está vacío ($f = 0$). Determine la relación entre f y V (en términos de V_0).

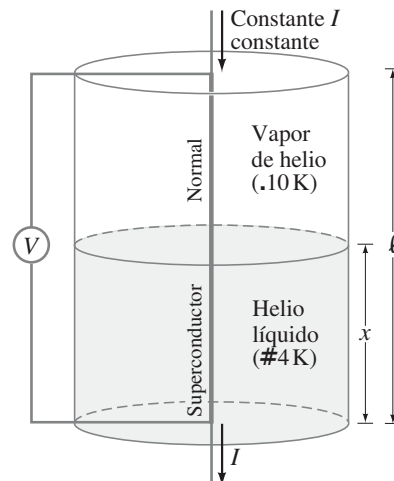


FIGURA 25-40
Problema 95.

* Problemas numéricos/por computadora

- *96. (II) La resistencia R de un termistor particular como función de la temperatura T se muestra en la siguiente tabla.

T (°C)	R (Ω)	T (°C)	R (Ω)
20	126,740	36	60,743
22	115,190	38	55,658
24	104,800	40	51,048
26	95,447	42	46,863
28	87,022	44	43,602
30	79,422	46	39,605
32	72,560	48	36,458
34	66,356	50	33,591

Determine qué tipo de ecuación (lineal, cuadrática, exponencial, o alguna otra) tiene el mejor ajuste para describir la variación de R con T . La resistencia del termistor es de 57,641 Ω cuando está dentro de una sustancia con temperatura desconocida. Con base en su ecuación anterior, ¿cuál es la temperatura desconocida?

Respuestas a los ejercicios

- A:** 1.6×10^{-13} A.
B: c).
C: b), c).
D: c).

- E:** 110 m.
F: d).
G: e).
H: a) 28 V, 3.5 A; (b) 2.8 V, 0.35 A.