

11

Corriente eléctrica



© Jack Aiello/Shutterstock

Vivimos en un mundo eléctrico. Es difícil imaginar un mundo sin electricidad. ¿Cómo produce el movimiento de los electrones la luz que nos permite trabajar y jugar en interiores y en la noche?

(Consulte la respuesta a esta pregunta en la página 216.)

Esta escena nocturna es un ejemplo del uso artístico de la iluminación.

Los fenómenos nuevos a menudo entran a nuestra visión del mundo de manera accidental, como resultado de alguien con una mente abierta que hace una observación o efectúa un experimento. Al principio, estos fenómenos suelen ser sólo curiosidades, nuevos desafíos para nuestra comprensión del mundo. Muchos de ellos nos ofrecen maneras nuevas de hacer cosas y, en algún momento, hallar un uso extenso cuando los comprendemos mejor. Sin embargo, en algunos casos, nace una tecnología nueva completa. Las propiedades eléctricas que estudiamos en el capítulo 10 fueron de ese tipo de curiosidades. En los primeros días de la investigación de estos fenómenos, la electricidad se utilizaba poco, excepto para construir aparatos con los cuales sorprender a los amigos. En los 200 años anteriores, la electricidad se ha convertido en una presencia tecnológica principal en nuestra sociedad. En la actualidad, Estados Unidos, con 5% de la población mundial, emplea cerca de una cuarta parte de la electricidad generada en el mundo. Esto significa que el ciudadano estadounidense normal utiliza cinco veces la electricidad que el ciudadano del mundo promedio, incluyendo los de los países desarrollados. Cuando se compara la utilización de electricidad de los ciudadanos estadounidenses con los de los países del tercer mundo, el uso per cápita es mucho más grande.

Un avance importante en la comprensión de la electricidad llegó con el desarrollo de las baterías. Las baterías hacen que las cargas eléctricas fluyan de manera continua, como una corriente, y no como ráfagas cortas. Este descubrimiento terminó por conducir a los circuitos eléctricos modernos que han tenido un impacto obvio en nuestras vidas. Las corrientes eléctricas pueden producir calor y luz, hacer funcionar motores y radios, accionar sistemas de sonido y computadoras, y muchas otras cosas. La lista es casi interminable.

Un descubrimiento accidental

Cerca del final del siglo XVIII, el anatomista italiano Luigi Galvani anunció que el anca amputada de una rana se contrajo cuando la tocó. Se sabía bien a partir de experiencias directas con la electricidad estática que las contracciones en las personas podrían ser el resultado de cargas eléctricas. ¡Pero esta era sólo una pierna! Galvani estaba convencido de haber descubierto la fuerza vital secreta que creía que existía dentro de todos los animales. Galvani encontró que ocurría una contracción cuando tocaba el anca de la rana con un objeto metálico, pero no cuando la tocaba con un aislante. Además, el metal tenía que ser diferente del gancho metálico que sostenía el otro extremo de la pierna. Se necesitaban dos metales diferentes para producir la contracción.

Otro científico italiano, Alessandro Volta, se enteró de estos resultados y efectuó muchos experimentos con electroscopios muy sensibles, en busca de evidencia de que la carga eléctrica reside en el tejido animal. Terminó por convencerse que la electricidad no estaba en el anca de la rana, sino era el resultado de tocarla con los dos metales.

Volta probó muchos metales diferentes y descubrió que se producía una diferencia de potencial eléctrico cada que se unían dos metales distintos. Algunas combinaciones de metales producían diferencias de potencial más grandes que otras. Una de sus demostraciones fue colocar su lengua entre pedazos de plata y zinc sostenidos juntos en un extremo. El flujo de la electricidad hizo que su lengua cosquilleara. Usted puede sentir una sensación similar cuando un pedazo de metal o una hoja metálica toca una obturación metálica en sus dientes. Una explicación más detallada de este proceso nos llevaría más allá del alcance de este libro, pero basta comprender que algunos procesos químicos mueven cargas de un metal a otro, lo cual crea una diferencia de potencial.



© Charles D. Winters

Una versión moderna de la demostración de Volta, en la que barras de zinc y cobre insertadas en una toronja producen una diferencia de potencial. (La cereza es sólo para propósitos decorativos.)

FÍSICA | HÁGALO USTED MISMO

Prepare una batería al fijar un sujetador de papeles y un pedazo de alambre de cobre a un limón. Puede sentir el voltaje al colocar las puntas de los alambres en su lengua.

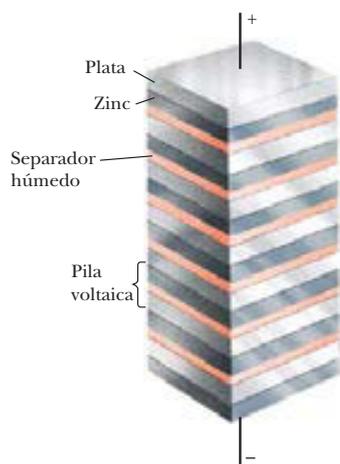


Figura 11-1 Un esquema de la batería de Volta, formada por placas de zinc y plata con papel húmedo entre ellas.

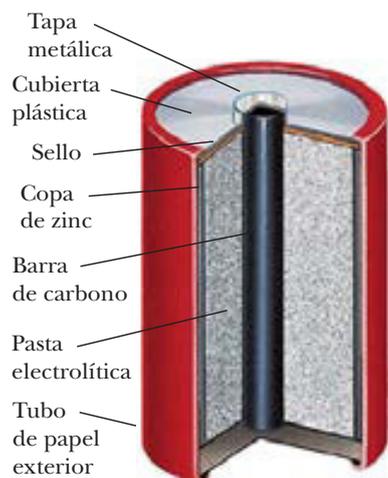


Figura 11-2 Esquema de una pila seca tipo linterna común.

Baterías

Volta utilizó su descubrimiento de que dos metales distintos producen una diferencia de potencial eléctrico para hacer la primera batería. Hizo una sola pila al poner un pedazo de papel que había humedecido en una solución salina entre pedazos de plata y zinc. Después apiló estas secciones tal como se presenta en la figura 11-1. Al hacer esto, fue capaz de producir una diferencia de potencial más grande. La diferencia de potencial de todas las pilas juntas era igual a la suma de las diferencias de potencial producidas por las pilas individuales.

La diferencia de potencial de una pila depende de la elección de los metales. Los que suelen utilizarse en las baterías tienen diferencias de potencial de $1\frac{1}{2}$ a 2 volts. La colocación de placas de plomo y óxido de plomo (conocidas como electrodos) en ácido sulfúrico diluido (el electrolito) hace una pila de 2 volts sencilla. La conexión de seis de estas pilas produce una batería de automóvil de 12 volts. El electrodo positivo de una pila se conecta al electrodo negativo de la siguiente. Los conectores que sobresalen de la primera y la última pilas (las terminales) se suelen marcar con un signo + o -, para indicar el exceso de sus cargas.

Pregunta ¿Cuántas pilas de $1\frac{1}{2}$ volts se requieren para hacer una batería de 9 volts?

Respuesta Como se suman los voltajes de las pilas, se necesitan seis pilas.

Las baterías que se pueden recargar se llaman *baterías de almacenamiento*. Esta recarga se suele lograr con un cargador eléctrico con las terminales negativas del cargador y la batería conectadas entre sí y las terminales positivas conectadas entre sí. El cargador obliga a que la corriente retroceda hasta la batería, invirtiendo las reacciones químicas y refrescando la batería. Esta energía eléctrica se almacena como energía química en la batería para su uso posterior.

Las baterías tipo linterna no recargables (también llamadas *pilas secas*) se construyen con una barra de carbono en el centro, como en la figura 11-2. El carbono es un conductor y reemplaza uno de los metales. Una pasta húmeda que contiene el electrolito rodea la barra. El otro electrodo es la copa de zinc que rodea la pasta. Después la pila se cubre con un material aislante. Estas pilas de $1\frac{1}{2}$ volts a menudo se emplean de punta a punta (ambas apuntando en la misma dirección) para proporcionar los 3 volts utilizados en muchas linternas.

El voltaje producido por una pila individual depende de los materiales utilizados, y no de su tamaño. El tamaño determina la cantidad total de químicos utilizados y, por lo tanto, la cantidad total de carga que se puede transferir. Hemos visto que el voltaje se incrementa al colocar las pilas de punta a punta en fila, una distribución llamada **en serie**. Las pilas (o baterías) también se colocan lado a lado, o **en paralelo**, como se presenta en la figura 11-3. Todas las pilas deben apuntar en la misma dirección. Esta distribución en paralelo no aumenta el voltaje, pero incrementa el tamaño efectivo de la batería. Una mayor cantidad de químicos significa que las baterías durarán más antes de agotarse.

Pregunta ¿Cuándo necesita usted conectar baterías en paralelo?

Respuesta Esto es muy útil cuando las baterías son difíciles de cambiar, como en los radiotransmisores remotos o en las cimas de las montañas.

La electricidad del hogar tiene varias diferencias de la electricidad producida por baterías. La electricidad en el hogar se suministra en un voltaje mucho más alto, que suele ser 110 volts. Esta electricidad es producida por enormes generadores eléctricos en presas o plantas eléctricas que consumen carbono, petróleo, gas, o combustible nuclear. (En el capítulo siguiente analizaremos los generadores.) En los circuitos de una casa, el flujo de la carga (la corriente) cambia de dirección 120 veces por segundo. Esto se denomina *corriente alterna* (ca) de 60 ciclos, y es lo

opuesto de la *corriente directa* (cd) proporcionada por las baterías que fluyen en una sola dirección.

Debido a que casi todos los usos de la electricidad que analizaremos en este capítulo sólo dependen del flujo de la carga, y no de su dirección, simplificaremos nuestros análisis al referirnos a las baterías de linterna. Otra ventaja de utilizar baterías es que tienen voltajes bajos, de modo que puede experimentar con algunas de las ideas mencionadas aquí sin temor de electrocución. Por otra parte, la **electricidad del hogar** es peligrosa y **no debe utilizarse en experimentos**.

Rutas de conducción

La invención de las baterías dio a los experimentadores un modo de producir un flujo de carga continua: una **corriente**. Aunque las propiedades de las cargas eléctricas que interactúan no cambian desde el capítulo anterior, se observan efectos nuevos cuando las cargas se mueven por rutas de conducción de manera continua. El modo más sencillo de conocerlas es experimentar con una simple batería de linterna, un poco de cable, y algunos bombillos de linterna. Las propiedades básicas de la electricidad del hogar son simples extensiones de estas ideas.

Imagine que tiene una batería, un cable y un bombillo. A partir de sus experiencias anteriores, ¿puede predecir una distribución que encienda el bombillo? Una respuesta común es conectar el bombillo a la batería, igual que en la figura 11-4. El bombillo no enciende. No importa cuál extremo de la batería utilice o cuál parte del bombillo toque. Las cargas no fluyen de un extremo de la batería al bombillo y lo encienden. Suponga que sostiene el alambre en un extremo de la batería y la punta metálica del bombillo en el otro extremo. En algún momento tendrá éxito poner en contacto el extremo libre del cable con diferentes partes del bombillo. La figura 11-5 presenta dos de las cuatro distribuciones posibles para encender el bombillo.

La comparación de los métodos con los que enciende el bombillo con los modos que no enciende, indica que debemos utilizar dos partes de cada objeto: los dos extremos del cable, los dos extremos de la batería y las dos partes metálicas del bombillo. Las dos partes del bombillo son la punta metálica y el metal que rodea la base (en muchos bombillos, éste está roscado). Cada que los seis extremos se conectan en pares, y forman un circuito continuo (sin importar cómo lo hagan), el bombillo se enciende.

La trayectoria de conducción continua (conocida como **circuito completo**) permite que fluyan las cargas eléctricas de una punta de la batería a la otra. Si se va encender el bombillo, la trayectoria de conducción debe atravesarlo. Puede verificar esto al examinar un bombillo sin vidrio esmerilado, como en la figura 11-6. La parte del bombillo que destella es un cable delgado (llamado *filamento*) que está apoyado por dos cables más gruesos que salen de la base. El bombillo tendría que



Figura 11-4 Un intento fallido para encender un bombillo.

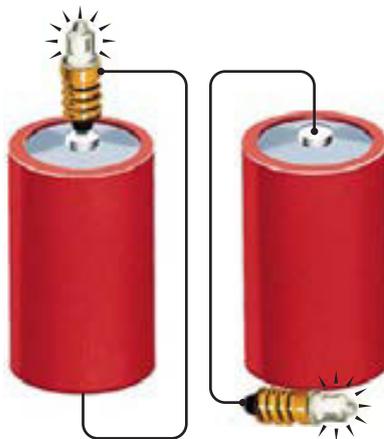


Figura 11-5 Modos exitosos de encender un bombillo.

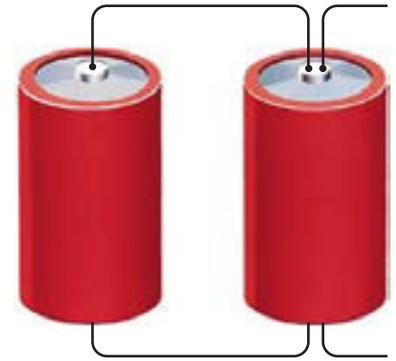


Figura 11-3 Dos pilas en paralelo tienen el mismo voltaje que una pila única, pero duran el doble.



Figura 11-6 Dibujo esquemático que muestra la trayectoria de conducción continua a través de un bombillo.

seccionarse para ver que uno de estos cables de apoyo está conectado a la punta metálica y el otro al lado metálico del bombillo. El resto del bombillo está hecho de materiales aislantes, de modo que haya una sola trayectoria de conducción a través del filamento dentro del bombillo.

Pregunta ¿El bombillo todavía encendería si colocara la batería en la dirección opuesta, en las distribuciones presentadas en la figura 11-5?

Respuesta Cualquier extremo de la batería funciona, porque invertir la batería no cambia la trayectoria de conducción.

FÍSICA | HÁGALO USTED MISMO

Conecte un bombillo de linterna a una batería de linterna, y deje una separación en el circuito. Pruebe diversos materiales para ver si son conductores al insertarlos en la separación, igual que en la figura 11-7.

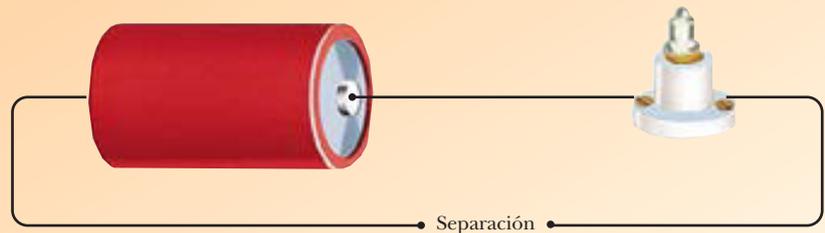


Figura 11-7 Cuando se pone un material conductor entre los cables en la separación, el bombillo se enciende.

La combinación del concepto de un circuito completo con la idea de la conservación de una carga lleva a la conclusión de que la electricidad sale por una punta de la batería y regresa por la otra. La carga que sale por un extremo de la batería regresa al otro extremo. La carga no se pierde ni se agota en el trayecto.

Pregunta ¿De qué modo la información sobre las trayectorias de conducción explica por qué no se enciende el bombillo de la figura 11-4?

Respuesta Debido a que no hay una trayectoria de conducción para que las cargas regresen al otro extremo de la batería, no existe un circuito completo.

Un modelo con agua

El flujo de una carga en un circuito completo es similar al flujo del agua en un sistema de tubos cerrados. La batería es similar a una bomba, los cables a los tubos, y el bombillo (algo que transforma la energía del flujo a otra forma) a un rueda con remos que gira cuando fluye el agua (figura 11-8). En un sistema de tubos cerrados, el agua que sale de la bomba regresa al lado del tubo de admisión de la bomba.

El modelo con agua es útil para aclarar la diferencia entre corriente, carga y voltaje. La corriente es una medida de la cantidad de carga que fluye por una sección determinada del circuito en un tiempo unitario. Si medimos una carga ΔQ que pasa el punto en un intervalo de tiempo Δt , la corriente I en el circuito es

$$\text{corriente} = \frac{\text{carga}}{\text{tiempo}} \rightarrow$$

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

Esta expresión es similar a la velocidad con la que el agua fluye por un tubo. El flujo del agua se mide en unidades como litros por segundo. La corriente eléctrica se mide en **coulombs** por segundo, una unidad conocida como ampere (A). Las



Figura 11-8 El flujo de una carga es similar al flujo del agua por un sistema cerrado.

baterías de linterna suelen proporcionar menos de 1 ampere de corriente, los circuitos caseros normales suelen limitarse a un máximo de 20 amperes, y una batería de automóvil proporciona más de 100 amperes cuando enciende el automóvil. (La definición precisa del ampere se dará en el capítulo siguiente.)

El voltaje entre dos puntos en un circuito es una medida del cambio en el potencial eléctrico entre estos dos puntos. Es decir, el voltaje es una medida del trabajo efectuado al mover una carga eléctrica unitaria entre los dos puntos. El trabajo es igual a la distancia que mueve la carga sobre el circuito, multiplicada por la fuerza sobre la carga eléctrica unitaria producida por el campo eléctrico que existe en el circuito. También puede considerar el voltaje como similar a la presión en nuestro modelo con agua.

Aunque el modelo con agua es útil, es importante comprender sus limitaciones. El circuito eléctrico siempre está “lleno” con cargas; no necesita llenarse como una manguera de jardín. Una interrupción en un circuito eléctrico hace que la electricidad deje de fluir; no se derrama en el extremo del cable como sucedería con el agua en un conducto roto. Un circuito eléctrico no es similar a un sistema de riego utilizado en un prado. Una válvula bloquea el flujo del agua, mientras que un interruptor pone una separación en la trayectoria de conducción para detener el flujo de la electricidad.

Otra diferencia es que, en un conductor, uno o ambos tipos de carga están en libertad de moverse. En los plasmas y en los líquidos y gases ionizados, ambas cargas se pueden mover. No fue hasta 1879 que los experimentos determinaron que sólo algunos electrones cargados negativamente se pueden mover en los metales. Para casi todos los efectos macroscópicos, las cargas positivas que se mueven en una dirección equivalen a las cargas negativas que se mueven en la dirección opuesta. Por ejemplo, considere dos esferas metálicas neutras. Si usted mueve 1 coulomb de una carga positiva de la esfera A a la esfera B, B tiene un exceso de 1 coulomb de carga positiva. La esfera A tiene una deficiencia de 1 coulomb de carga positiva o, lo que es lo mismo, un exceso de 1 coulomb de carga negativa. Las cargas netas en las dos esferas son idénticas para mover 1 coulomb de carga negativa de B a A. Debido a esta equivalencia, al igual que a los orígenes históricos del tema, al analizar el efecto macroscópico de una corriente, adoptamos la convención de suponer que la dirección de la corriente eléctrica es igual que el flujo de las cargas positivas.

Resistencia

Si se deja un bombillo conectado a una batería, la batería se agota en menos de un día. (El tiempo real depende del bombillo y la batería específicos utilizados.) El bombillo tiene el mismo resplandor casi todo este tiempo, pero cerca del final se atenúa y se apaga. Sin embargo, si conecta sólo un cable por los extremos de la batería, ésta se agota en menos de 1 hora, y el cable se calienta tanto que no es posible tocarlo. Debido a que la batería se agota mucho más rápido y es obvio que algo ocurre en el cable, deducimos que la corriente es más grande por el cable que por la trayectoria de conducción con el bombillo. El bombillo ofrece más **resistencia** al flujo de la electricidad. Es importante observar que la cantidad de corriente que

✓ MATEMÁTICAS

✓ El suplemento *Problem Solving* (Solución de problemas) ofrece una presentación extendida.

Tabla 11-1 | La resistencia de diferentes cables de 100 metros de longitud con un diámetro de 1 milímetro

Metal	Resistencia (Ω)
Plata	2.02
Cobre	2.16
Oro	3.11
Aluminio	3.59
Tungsteno	7.13
Hierro	12.7
Cromoníquel	191



© Charles D. Winters

En los circuitos eléctricos se emplean resistores.

proporciona una batería depende de lo que está conectado a ella. Un aumento en la resistencia en el circuito disminuye la corriente que pasa por la batería, y una disminución de la resistencia en el circuito aumenta la corriente que pasa por la batería.

Esta noción de una resistencia también tiene sentido de acuerdo con el modelo con agua. Cada minuto, fluye más agua por los tubos amplios que por los angostos. El filamento del bombillo es una sección muy delgada de cable y debe ofrecer más resistencia. Nuestra analogía también nos dice que los tubos extensos ofrecen más resistencia que los tubos cortos. Por lo tanto, esperaríamos que la resistencia de los cables aumentara con la longitud y disminuyera con el diámetro. El otro factor —que no es tan obvio desde nuestro modelo con agua— es que la resistencia depende del tipo de material utilizado para los cables. Estas ideas se verifican mediante experimentos con cables de diferentes tamaños y materiales. La tabla 11-1 compara las resistencias de cables con la misma longitud y diámetro, pero hechos de metales distintos.

La resistencia es el resultado de la interacción de la ruta de conducción con el flujo de la carga. Los electrones en un cable sienten una fuerza neta producida por la repulsión de la terminal negativa y la atracción de la terminal positiva y se aceleran; los electrones experimentan fuerzas producidas por el campo eléctrico que existe en el cable. Sin embargo, los electrones no van muy lejos antes de chocar con los átomos, lo cual provoca que pierdan velocidad y se desvíen en direcciones aleatorias. Aunque es bastante alta la velocidad promedio de los electrones debido a su movimiento interno, todos estos choques evitan que se muevan muy rápido sobre el cable; una velocidad promedio común sobre el cable está en el orden de milímetros por segundo. Esta impedancia al flujo de la carga determina la resistencia del cable.

Cuando los electrones se desplazan por un cable, experimentan choques que transfieren energía cinética a los átomos y que hacen que aumente la temperatura del cable. Si se transfiere energía suficiente, el cable se calienta lo suficiente para resplandecer. Las bobinas y los elementos calefactores en las estufas, hornos, tostadoras, calefactores de piso, y luces hacen esto. Se emplean resistores para controlar los voltajes y las corrientes en los circuitos utilizados en aparatos tales como radios y rizadores.

Una resistencia R se define como el voltaje V que atraviesa un objeto dividido entre la corriente I de un lado a otro del objeto:

$$\text{resistencia} = \frac{\text{voltaje}}{\text{corriente}} \rightarrow$$

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

La resistencia es el número de volts que atraviesan un objeto requerido para impulsar 1 ampere de corriente de un lado a otro del objeto, y por lo tanto se mide en volts por ampere, una unidad conocida como **ohm** (Ω , la omega griega en mayúscula). Esta definición siempre es válida, pero es más útil cuando la resistencia es constante o relativamente constante. En este caso, esta relación se conoce como la **ley de Ohm**. Las resistencias de pedazos de metales, carbono, y otras sustancias son aproximadamente constantes si se mantienen a una temperatura constante. La resistencia del filamento en un bombillo aumenta cuando el filamento se calienta.

✓ MATEMÁTICAS

SOLUCIÓN | Ley de Ohm

La ley de Ohm nos proporciona una relación entre la resistencia de, la diferencia de potencial (voltaje) a través de, y la corriente de un lado a otro de un elemento de un circuito. Por ejemplo, suponga que tenemos una batería de 12 V y queremos producir una corriente de 1 A en un circuito específico. ¿Qué resistencia debe tener el circuito?

$$R = \frac{V}{I} = \frac{12 \text{ V}}{1 \text{ A}} = 12 \Omega$$

continúa en la página siguiente

Pregunta Si un bombillo atrae una corriente de 0.5 A cuando se conecta a un circuito de 110 V, ¿cuál es la resistencia de su filamento?

Respuesta $R = V/I = (110 \text{ V})/(0.5 \text{ A}) = 220 \Omega$.

La ley de Ohm se puede reorganizar para encontrar cualquiera de las tres cantidades cuando se conocen las otras dos. Suponga que un elemento calefactor tiene una resistencia de 8Ω cuando está caliente. ¿Qué corriente atraerá cuando se conecte a 110 V?

$$I = \frac{V}{R} = \frac{110 \text{ V}}{8 \Omega} = 13.8 \text{ A}$$

Pregunta Si el bombillo de una linterna de 3 V tiene una resistencia de 9Ω , ¿cuánta corriente atraerá el bombillo?

Respuesta $I = V/R = (3 \text{ V})/(9 \Omega) = \frac{1}{3} \text{ A}$.

El peligro de la electricidad

La electricidad es peligrosa porque nuestros cuerpos son máquinas eléctricas. Nuestros músculos se tensan cuando “se encienden” las neuronas. Normalmente una cadena compleja de reacciones químicas activa esta reacción, pero también puede ocurrir cuando fluyen cargas eléctricas por el músculo. ¡Este proceso es el origen de las contracciones! Esta situación se puede volver peligrosa cuando el músculo es parte del sistema cardiaco o respiratorio. En estos casos, la corriente también puede afectar las señales del ritmo, e interrumpir los procesos naturales. En algunas personas, corrientes tan reducidas como 50 miliamperes pueden interrumpir la respiración.

Con frecuencia, las personas sienten que el peligro con la electricidad es el voltaje. Aunque los voltajes altos son peligrosos, lo que es letal es la corriente de un lado a otro de un cuerpo. La ley de Ohm nos dice que la corriente es igual al voltaje dividido entre la resistencia de la trayectoria. En este caso, el cuerpo es parte de la trayectoria. Si las condiciones son tales que la resistencia total es baja, incluso un voltaje bajo puede provocar una corriente peligrosamente alta. La resistencia de la piel seca es lo bastante alta para que usted ponga un dedo sobre las terminales de una batería de 9 volts sin sentir nada. Sin embargo, si toca las terminales de la batería de 9 volts con su lengua, usted siente una corriente. La humedad de la lengua reduce la resistencia.

Una manera de evitar que las corrientes altas atraviesen su cuerpo, en especial su corazón, es conservar una mano en su bolsillo. También es bueno utilizar calzado con suelas de hule.

Un modelo para la corriente eléctrica



Podemos utilizar bombillos de linterna para crear un modelo simple de circuitos eléctricos más complicados. Cada bombillo funciona como un indicador visual de la corriente que lo atraviesa. Los bombillos no resplandecen en absoluto hasta que la corriente supera cierto valor; después de eso, el resplandor aumenta con la corriente. Aunque la relación entre la corriente y el resplandor del bombillo es complicada, es razonable suponer que si un bombillo resplandece más que un bombillo idéntico, debe tener más corriente. Se dice que “más flujo significa más resplandor”.

Primero creamos una norma a la cual podemos hacer referencia; el resplandor de un bombillo único conectado a una batería única representará una corriente normal. Supondremos que todas las baterías y bombillos son idénticos.

Se conectan dos bombillos a una batería de modo que haya una sola trayectoria de la batería a través de un bombillo, a través del segundo bombillo, y de

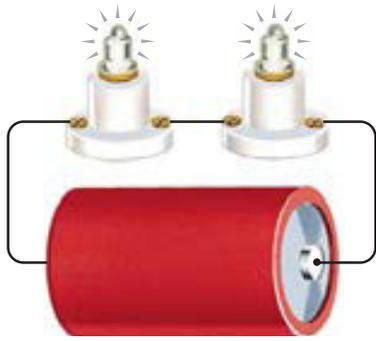


Figura 11-9 Los bombillos conectados en serie resplandecen iguales, pero más atenuados que en un circuito normal.

regreso al otro extremo de la batería. En esta disposición (figura 11-9), se dice que los dos bombillos están en serie entre sí. Observamos que los dos bombillos tienen el mismo resplandor y que están más atenuados que el bombillo único del circuito normal. Esta disminución en el resplandor indica que existe menos corriente en el circuito en serie que en nuestro circuito normal. La observación de que la duración de la batería en este circuito en serie es más prolongada que la duración de la batería en el circuito normal, apoya esta conclusión. Además, la resistencia de los dos bombillos en serie es mayor que la de un bombillo único. (Es tentador afirmar que el circuito en serie tiene el doble de resistencia, porque hay dos bombillos. Sin embargo, la resistencia de los bombillos cambia con el resplandor, por lo que la resistencia no se duplica.)

De especial interés es la observación de que los dos bombillos tienen el mismo resplandor. Esto nos indica que la corriente que atraviesa cada bombillo es igual; cualquier carga que fluye por el primer bombillo, fluye por el segundo. La carga eléctrica no se ha agotado ni perdido sobre la trayectoria, de acuerdo con la conservación de la carga. Regresa a la batería la misma cantidad de carga que salió de ella. Lo que provoca que el filamento se caliente y resplandezca es el flujo de la carga por un bombillo. Si fluye la misma cantidad de carga por cada bombillo cada segundo, los dos filamentos idénticos alcanzarán la misma temperatura y resplandor con la misma intensidad.

Razonamiento defectuoso



Alan conecta un solo bombillo a una batería y observa que resplandece bastante. Después incorpora un segundo bombillo en serie con el primero y encuentra que ambos bombillos ahora están más atenuados y tienen la misma intensidad. Llega a la conclusión siguiente: "El bombillo único recibe toda la corriente de la batería. Los dos bombillos deben *compartir* la corriente, cada uno obtiene la mitad. Es natural que estén más atenuados."

Alan cree que comprende lo que sucede, pero en su razonamiento ha incorporado un error serio. **¿Puede usted encontrarlo?**

Respuesta La palabra *compartir* tiene dos significados. Podemos compartir un libro o compartir una pizza. Si compartimos un libro, usted lo lee primero, y después yo. Si compartimos una pizza, primero la dividimos en dos pedazos y luego cada uno toma un pedazo. Alan cree que la corriente que atraviesa la batería siempre tiene la misma magnitud y que los dos bombillos "comparten" esta corriente como lo haríamos con una pizza. De hecho, los bombillos *comparten* la corriente como lo haríamos con un libro; primero la corriente atraviesa un bombillo (y calienta su filamento) y luego atraviesa el otro (y calienta su filamento). Los dos bombillos están más atenuados que un bombillo único porque la mayor resistencia en el circuito reduce la corriente que atraviesa la batería.

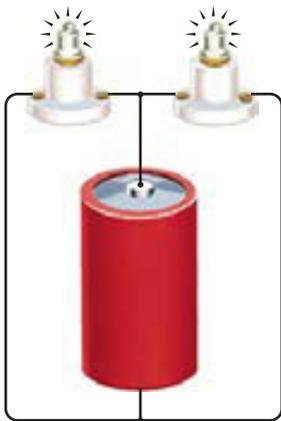


Figura 11-10 Los bombillos conectados en paralelo resplandecen al mismo nivel y tienen el mismo resplandor que en un circuito normal.

Otra consecuencia del resplandor igual es que los bombillos no pueden usarse para determinar una dirección para el flujo de la electricidad. Todo se explica igual de bien si se supone un flujo de cargas negativas en una dirección (la situación real en los cables), un flujo de cargas positivas en la otra dirección, o que ambas cargas fluyen al mismo tiempo en direcciones opuestas (como ocurre con los fluidos). De hecho, debido a que lo único que importa es el movimiento de las cargas, también funcionaría una carga que avanza y retrocede. En la electricidad del hogar, las cargas negativas avanzan y retroceden con una frecuencia de 60 hertz.

Es posible conectar dos bombillos de modo que cada uno tenga su propia trayectoria desde una punta de la batería a la otra, como se presenta en la figura 11-10. En esta distribución, se dice que los dos bombillos están conectados en paralelo. En contraste con los bombillos en serie, la corriente en un bombillo no pasa por el otro, lo que comprobamos al desconectar cualquier bombillo y observar que el otro no resulta afectado. Los dos bombillos en paralelo resplandecen con la misma intensi-

dad, y cada uno resplandece como en un circuito normal. Debido a que cada bombillo tiene su propia trayectoria, la batería en este circuito suministra el doble de corriente que la batería en el circuito normal. Esto se puede comprobar en un experimento; en esta distribución, la batería se agota en la mitad de su duración normal.

La incorporación del bombillo adicional en paralelo ha aumentado la corriente que atraviesa la batería, lo que indica que la resistencia del circuito debe haber disminuido. Aunque se puede considerar correctamente que un bombillo es una resistencia para el flujo de la carga, la inclusión de un bombillo adicional en un circuito puede aumentar o disminuir la resistencia total del circuito, dependiendo de cómo se incorpora el bombillo. Cuando el bombillo nuevo se incluye en serie (y agrega una resistencia nueva en una línea existente) aumenta la resistencia del circuito y disminuye la corriente que atraviesa la batería. Cuando el bombillo nuevo se incorpora en paralelo (en una trayectoria nueva que no existía antes) la resistencia del circuito se reduce y aumenta la corriente que atraviesa la batería. Aun cuando la trayectoria nueva contiene una resistencia (el bombillo nuevo), representa una oportunidad nueva para un flujo que no existía antes.

Considere la analogía siguiente. Cuando termina una película con gran audiencia, las personas se dan empujones para salir del cine por la puerta principal. La anchura finita de la puerta representa la resistencia al flujo de personas. Si también se abre la puerta trasera, aumenta el flujo de personas que salen del edificio, aunque la puerta trasera sea muy estrecha. Es una nueva oportunidad para un flujo. Cualquier trayectoria que se agrega en paralelo reducirá la resistencia total de un circuito, sin tomar en cuenta cuánta resistencia contenga la trayectoria nueva.

Tres o más bombillos se pueden conectar en serie o en paralelo, o en una combinación de ambos esquemas. El resplandor relativo de estos bombillos se predice con las ideas que hemos analizado. Por ejemplo, considere la combinación de bombillos de la figura 11-11. El bombillo A resplandecerá más porque toda la corriente debe atravesarlo, pero no resplandecerá tanto como uno normal. Los bombillos B y C estarán atenuados, porque la corriente se divide: una parte atraviesa el bombillo B y la otra el bombillo C. La corriente que fluye hacia el nodo J debe ser igual a la corriente que sale del nodo. Esto es justo una consecuencia de la conservación de la carga. Debido a que los bombillos son idénticos, las resistencias de las dos trayectorias son iguales, y la corriente se dividirá en forma equitativa; los bombillos B y C tendrán el mismo nivel de resplandor.

En general, cuando la carga llega al nodo entre dos bifurcaciones paralelas de resistencia desigual, fluirá más carga a través de la bifurcación más fácil. Decimos que “la corriente prefiere la trayectoria de menor resistencia”. Esto no significa que toda la corriente siga la trayectoria más fácil; una parte de la corriente toma la trayectoria más difícil. Si la trayectoria en paralelo 1 tiene el doble de la resistencia que la trayectoria 2, la trayectoria 1 tendrá la mitad de la corriente de la trayectoria 2.

El físico alemán Gustav Kirchhoff formalizó dos reglas para analizar las corrientes en los circuitos. La **regla de los nodos de Kirchhoff** afirma que

La suma de las corrientes que entran a un nodo en un circuito es igual a la suma de las que salen de ese nodo.

Como hemos visto, ésta es una consecuencia de la conservación de la carga. En la sección siguiente analizaremos otra regla de Kirchhoff.

Si una de las trayectorias en un circuito es un cable conductor sin un bombillo, como se observa en la figura 11-12, la trayectoria tiene muy poca resistencia y prácticamente toda la corriente sigue esta trayectoria. Esto se conoce como un **cortocircuito**. Cuando hay un cortocircuito, fluye tan poca corriente por cualquier bombillo en paralelo hasta el corto, que los bombillos se apagan.

En general, las trayectorias en paralelo no son independientes entre sí. La realización de un cambio en una trayectoria en paralelo suele afectar la corriente en la otra trayectoria. La única excepción a esta regla es el caso con el que comenzamos en la figura 11-10, en donde cada trayectoria tenía conexiones directas a ambos

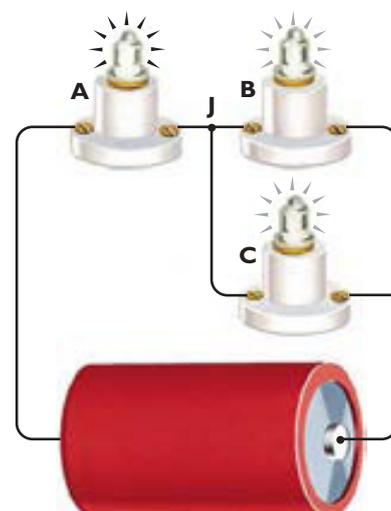


Figura 11-11 Los bombillos B y C están en paralelo y el par está en serie con el bombillo A.



Figura 11-12 Cuando el cable de la izquierda se conecta de un extremo de la batería al otro, se produce un cortocircuito y la luz se apaga.

◀ regla de los nodos de Kirchhoff

lados de una batería ideal. Se dice que estas trayectorias están “paralelas a través de la batería” y cada trayectoria actúa como si tuviera su propia batería (por razones que analizaremos más adelante).

Razonamiento defectuoso



Tres estudiantes analizan lo que ocurrirá al resplandor del bombillo B en la figura 11-11 cuando el bombillo C se quite de su portalámparas:

Terry: “La corriente se divide después de pasar por A. Cuando se quita C, toda la corriente debe pasar por B, de modo que B resplandecerá más.”

Judy: “La eliminación del bombillo C quita una trayectoria de conducción del circuito, lo cual aumenta la resistencia del circuito. La corriente que atraviesa la batería disminuirá y B se atenuará.”

Kay: “Ambas tienen algo de razón. La corriente que atraviesa A disminuirá, pero B ahora obtendrá toda la corriente, en lugar de compartirla con C. Es como elegir entre una parte de una pizza grande o todo de una pequeña. Necesitamos más información para tomar una decisión.”

¿Con cuál estudiante (de ser el caso) coincide usted?

Respuesta Kay reconoce correctamente el acertijo. Sabemos que la corriente que atraviesa la batería (y, por lo tanto, el bombillo A) debe disminuir cuando se quite el bombillo C, pero no sabemos cuánto disminuirá. El modelo que hemos desarrollado hasta este momento no nos permite hacer una predicción; necesitamos agregar algo a nuestro modelo.

Un modelo para el voltaje

Si sale de su casa y escala una montaña cercana, adquiere cierta cantidad de energía gravitacional potencial. Cuando regresa a su casa, pierde esta misma cantidad de energía gravitacional potencial, sin tomar en cuenta cuál ruta haya elegido para descender de la montaña. Ocurre lo mismo con los circuitos eléctricos. Una batería de 12 volts produce 12 joules de energía eléctrica potencial por cada coulomb de carga que la atraviesa. Cuando ese coulomb de carga viaja por el circuito y regresa a la batería, debe perder 12 joules de energía eléctrica potencial, sin tomar en cuenta cuál trayectoria siga. Esta energía eléctrica potencial se proporciona a los elementos resistivos en el circuito (como bombillos) y se convierte en calor y luz. Esta aplicación básica de la conservación de la energía se llama la **regla del bucle de Kirchhoff**:

regla del bucle de Kirchhoff ►

Sobre cualquier trayectoria de la terminal positiva a la terminal negativa de una batería, la caída del voltaje a través de los elementos resistivos encontrados, debe ser la suma del voltaje de la batería.

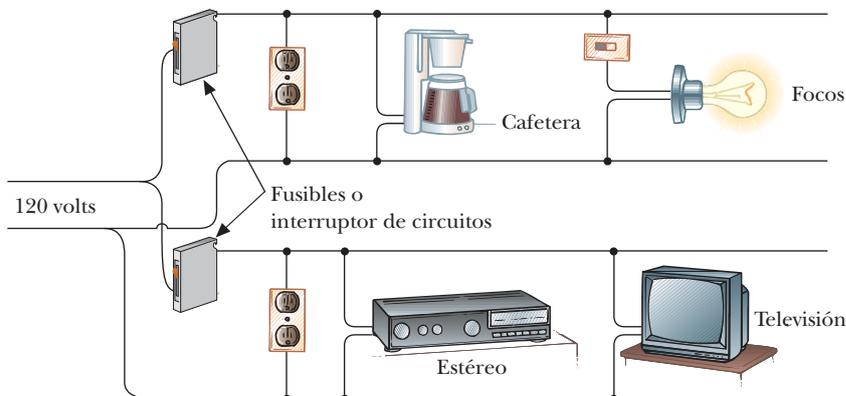
Esto significa que un bombillo único conectado a una batería tendrá una caída de voltaje igual al voltaje de la batería. A partir de la experiencia, también sabemos que un bombillo resplandecerá más cuando se conecta a una batería de 12 volts que cuando se conecta a una batería de 6 volts. Esto sugiere que el resplandor del bombillo sirve como un indicador de la caída del voltaje a través del bombillo. Si un bombillo resplandece más que otro, una caída de voltaje debe atravesarlo (suponiendo de nuevo que ambos bombillos son idénticos). Esta idea importante, acoplada con el teorema del bucle de Kirchhoff, nos permite responder muchas preguntas relacionadas con nuestro actual modelo para la corriente eléctrica.

Regresemos al acertijo presentado en el Razonamiento defectuoso más reciente. Nuestro modelo para la corriente eléctrica nos permite predecir que el bombillo A de la figura 11-11 se atenuará cuando el bombillo C se quite de su portalámparas.

Como explica Judy, el retiro del bombillo C elimina una trayectoria de conducción del circuito, lo cual aumenta la resistencia del circuito. La corriente que atraviesa la batería debe disminuir, y debido a que toda la corriente pasa por el bombillo A, este debe atenuarse. Sin embargo, el modelo actual no es capaz de predecir lo que ocurre al bombillo B. La corriente total en el circuito ha disminuido, pero la parte de esa corriente para el bombillo B ha aumentado (de 50 a 100%). ¿Cuál efecto tiene éxito? Nuestro modelo para el voltaje eléctrico responde la pregunta sin ambigüedad. La suma de los voltajes que pasan por el bombillo A y el voltaje que pasa por el bombillo B debe ser igual al voltaje de la batería, según la regla del bucle de Kirchhoff. Si el bombillo A se atenúa cuando se retira el bombillo C, el voltaje a través del bombillo A debe disminuir. Debido a que la caída del voltaje a través de los bombillos A y B debe ser igual al voltaje de la batería, el voltaje que pasa por el bombillo B debe aumentar la misma cantidad y, por lo tanto, el bombillo B resplandece más.

Ahora estamos en posición de comprender la independencia de las bifurcaciones que están en paralelo a través de una batería ideal; por qué cada bifurcación en paralelo actúa como si tuviera su propia batería. Las caídas de voltaje a través de cada bifurcación deben ser iguales al voltaje de la batería, según la regla del bucle de Kirchhoff, sin tomar en cuenta cuáles cambios se hacen en las otras bifurcaciones. Una batería de 6 volts ideal es aquella que es capaz de mantener una diferencia de potencial de 6 volts a través de sus terminales, sin tomar en cuenta cuánta corriente atrae el circuito. En la práctica, las baterías reales tienen problemas para repartir corrientes grandes, debido a las limitaciones de los procesos químicos dentro de la batería. Esta limitación se manifiesta en forma de una caída en el voltaje de la batería cuando aumenta la corriente. La adición de un segundo bombillo en paralelo a nuestro bombillo normal en realidad atenúa ligeramente el primer bombillo, si usted emplea una batería alcalina. El efecto no será perceptible con una batería recargable de níquel-cadmio. Se dice que esta batería es más ideal, y se pueden conectar muchas bifurcaciones a través de una batería de níquel-cadmio antes que aparezca el efecto. Esto supone que cada una de esas bifurcaciones contiene una resistencia y atrae una pequeña cantidad de corriente. Si una bifurcación en paralelo sólo contiene un cable conductor, exigirá más corriente de la que puede proporcionar la batería, y el voltaje de la batería cae dramáticamente, lo cual hace que se apaguen los bombillos de las otras bifurcaciones. Esto se llama “poner en corto la batería”, y es similar a lo que ocurre en un cálido día de verano cuando Los Ángeles padece un “apagón” provocado por la enorme demanda de corriente para hacer funcionar los acondicionadores de aire.

Los circuitos en las casas se conectan en paralelo para que los aparatos eléctricos se puedan encender y apagar sin afectar a los demás. Cuando se enciende un nuevo aparato, la compañía de electricidad suministra más corriente. Sin embargo, cada circuito en paralelo se conecta en serie con un interruptor de circuitos, como se presenta en la figura 11-13, para deliberadamente incorporar una “conexión débil” en el circuito. Si se conectan demasiados aparatos en un circuito, atraerán más corriente de la que los cables pueden transportar de manera segura. Por ejemplo, los cables pueden calentarse en un punto débil y comenzar un incendio. El interruptor de circuitos detiene la corriente y apaga todo.



© George Sample

Un interruptor de circuitos evita que los circuitos de una casa atraigan demasiada corriente y provoquen un incendio.

Figura 11-13 Los aparatos se conectan en paralelo a los circuitos de una casa. Se evita que un circuito atraiga demasiada corriente mediante un interruptor de circuitos conectado en serie.

El costo real de la electricidad

El costo real de la electricidad varía mucho, dependiendo de la fuente. Estamos muy familiarizados con la compra de energía eléctrica a una compañía local para usarla en nuestros hogares. Pero, ¿cuál es el costo de esta energía eléctrica? Si examina su factura por electricidad se entera que le cobran entre 8 y 25¢ de dólar por kilowatt-hora. Utilicemos un valor representativo de 10¢ por kilowatt-hora. Como sabemos que 1 kilowatt-hora es igual a 3.6 millones de joules, podemos dividir estas cifras para saber que podemos utilizar unos 36 millones de joules por cada dólar gastado.

También adquirimos electricidad empacada en diversas baterías. De esta manera, pagamos por las propiedades de las baterías que atraen al fabricante de los aparatos eléctricos. Esto puede incluir el tamaño, el voltaje, la duración o la capacidad de las baterías para mantener la corriente mientras se agotan. Para descubrir cuánto pagamos por la energía eléctrica, necesitamos conocer los precios y la energía eléctrica total que proporcionan las baterías durante sus vidas. Como se indica en el texto, la energía se obtiene al multiplicar la carga total entre la clasificación del voltaje de la batería. La carga total se obtiene al multiplicar la clasificación de la corriente por la duración de la batería.

Una batería de linterna común —por lo general, una pila tipo D de carbono-zinc— cuesta alrededor de 75¢ de dólar y tiene una clasificación de 1.5 volts. Su duración depende del modo en que se utiliza. Las pilas tipo D para linternas normalmente se utilizan durante intervalos breves durante un tiempo prolongado. Bajo estas condiciones, la batería puede proporcionar 375 miliamperes durante cerca de 400 minutos, lo cual genera una carga total de 9000 coulombs y una energía total de 13 500 joules. Por lo tanto, obtiene 18 000 joules por dólar, 2000 veces el costo de la electricidad en el hogar. Las baterías alcalinas fueron un importante mejoramiento en el desempeño sobre sus compañeras de carbono-zinc, principalmente en aplicaciones que requieren corrientes continuas bastante grandes, como los radioestéreos portátiles. En las baterías alcalinas suelen durar cerca de 50-75% más que una

batería común, pero bajo ciertas condiciones pueden durar mucho más. Sin embargo, sus costos también son más altos. ¿Las baterías alcalinas son una buena compra? Sólo si el incremento en su costo es menor que el incremento correspondiente en su duración.

El descubrimiento de baterías de mercurio, plata, y litio, permitió a los fabricantes incorporar más energía en volúmenes más pequeños. Estos dispositivos tienen una corriente mucho más estable durante su duración, de modo que son especialmente útiles para aparatos como relojes de pulsera y las fotoceldas de las cámaras, las cuales requieren un valor específico para la corriente. Una batería de reloj produce 1.3 volts y 10 millonésimas de ampere durante un año, y genera una energía total de 410 joules. Si estas baterías se venden en alrededor de 2 dólares, tienen una razón energía-costado de 205 joules por dólar, o ¡175 000 veces el costo de la electricidad en el hogar!



© Gerald F. Wheeler

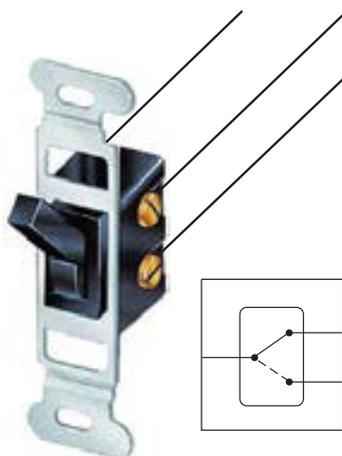


Figura 11-14 Un esquema de un interruptor de tres vías. El cable de la izquierda se conecta a cualquiera de los cables de la derecha al mover el interruptor.

FÍSICA | HÁGALO USTED MISMO

Obtenga dos interruptores de tres vías utilizados para conectar las luces de un pasillo. (Los interruptores funcionan como el de la figura 11-14.) Conéctelos a una batería de linterna y a un bombillo para que cualquier cable pueda encender o apagar la luz, independientemente del otro. Compruebe que no haya cortocircuitos cuando se apague la luz.

Algunas luces de árboles de Navidad modernas se conectan en paralelo. Si un bombillo se funde, es el único que se apaga. Las antiguas se conectaban en serie; cuando se apagaba un bombillo, los demás también lo hacían. Esto era bastante inconveniente, porque cuando se fundía un bombillo, era necesario probar todos, hasta encontrar el defectuoso. El estilo más reciente de las luces de árbol de Navidad tienen los bombillos conectados en serie, pero cuando uno se quema, se forma un cortocircuito a través del quemado, lo cual permite que los demás permanezcan encendidos.

Con el paso de los años, se ha desarrollado una convención para dibujar los elementos de un circuito. Igual que todos los símbolos, los símbolos eléctricos cap-

turan la esencia funcional del elemento y omiten las características no esenciales. Por ejemplo, un bombillo no tiene una característica direccional, pero una batería, sí. Sus símbolos reflejan esta diferencia. La figura 11-15 presenta los símbolos comunes, junto con un diagrama como los que hemos utilizado.

Los circuitos también se dibujan con esquinas más pronunciadas que las que existen en los circuitos reales. Ésta es sólo una técnica que ha servido para la comunicación entre los experimentadores.

Energía eléctrica

Cuando compra electricidad, adquiere energía. Esta energía eléctrica se convierte en calor, luz, o movimiento. Entonces, ¿por qué hablamos de potencia? Como analizamos en el capítulo 6, la **potencia** es la cantidad de energía utilizada en una unidad de tiempo. Pero necesitamos tener cuidado aquí; la conservación de la energía nos dice que ésta no puede crearse ni destruirse. De manera formal, la potencia es la cantidad de energía transformada de una forma a otra, dividida entre el tiempo transcurrido. En la electricidad, la energía que adquieren los electrones desde el campo eléctrico se convierte a formas como energía cinética, calorífica, de sonido, y lumínica. Casi todos los aparatos eléctricos en nuestros hogares se miden por su uso de la potencia. La potencia se mide en **watts** (W). Muchos bombillos para casa se clasifican en 60, 75, o 100 watts. Los calefactores eléctricos y las secadoras de pelo pueden utilizar 1500 watts.

FÍSICA | HÁGALO USTED MISMO

Vigile el uso de la energía eléctrica en su casa al efectuar lecturas periódicas de su medidor. ¿Cuánta electricidad utiliza su hogar en un día normal?

Trate de apagar todos los aparatos eléctricos en su casa. Puede vigilar su avance al observar la rapidez con que gira el disco de su medidor eléctrico. Si tiene una secadora de ropa eléctrica, enciéndala y vea cuán rápido gira el disco.

SOLUCIÓN | Energía eléctrica



Obtenemos una expresión para la energía eléctrica al utilizar la definición que desarrollamos en el capítulo 10 y la definición para la corriente. Como la energía es la carga multiplicada por el voltaje, tenemos

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{\Delta QV}{\Delta t} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} V$$

Esta ecuación nos dice que la potencia es igual a la corriente por el voltaje:

$$P = IV$$

Por lo tanto, un aparato eléctrico que toma una corriente de 10 A a un voltaje de 110 volts, utiliza energía a una velocidad de

$$P = IV = (10 \text{ A})(110 \text{ V}) = 1100 \text{ W}$$

Pregunta ¿Cuánta energía se requiere para accionar un radio reloj que emplea 0.05 A del circuito de la casa?

Respuesta $P = IV = (0.05 \text{ A})(110 \text{ V}) = 5.5 \text{ W}$

continúa en la página siguiente

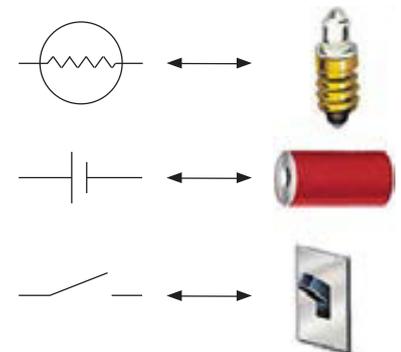


Figura 11-15 Los símbolos comunes utilizados en los diagramas de los circuitos eléctricos. (De arriba abajo: resistor, batería, interruptor.)



Este medidor eléctrico determina la energía utilizada en una casa o un negocio. Este medidor indica 65 401 kilowatts-hora.

◀ potencia = corriente × voltaje

Al reorganizar la expresión para la potencia, puede determinar la corriente que atraviesa un bombillo de 100 W:

$$I = \frac{P}{V} = \frac{100 \text{ W}}{110 \text{ V}} = 0.91 \text{ A}$$

Obtenemos una expresión alterna para la potencia eléctrica al utilizar la relación de que el voltaje es igual a la corriente multiplicada por la resistencia

$$P = IV = I(IR) = I^2R$$

En esta forma es más obvio por qué resplandece un bombillo en un circuito, aunque los cables de conexión, no. La corriente que atraviesa el circuito es igual en todas partes, pero la sección que tiene la resistencia más alta recibe la mayor parte de la energía térmica por unidad de tiempo. Debido a que el filamento está hecho de un cable muy fino de material de alta resistencia, tiene la resistencia más alta; su temperatura aumenta, y resplandece. Los cables de conexión también se calientan, pero no lo suficiente para resplandecer o ni siquiera para sentirse calientes.

potencia = corriente al cuadrado \times
 resistencia \blacktriangleright

El medidor eléctrico conectado entre su casa y la compañía que distribuye electricidad registra la energía que usted usa, de manera similar a como el odómetro de su vehículo registra los kilómetros que conduce. La energía eléctrica se suele facturar entre 8 y 25¢ de dólar por kilowatt-hora. Un hogar común con un horno eléctrico y una secadora de ropa eléctrica (pero sin calefactor eléctrico) emplea unos 900 kilowatts-hora por mes.

Hay veces en que las pérdidas de energía en los cables de conexión se vuelven importantes. El envío de energía eléctrica por distancias grandes a través de cables desde una planta eléctrica puede provocar pérdidas de energía significa-



SOLUCIÓN | Costo de la energía eléctrica

Un aparato que funciona con una energía constante emplea una cantidad de energía igual a la energía multiplicada por el tiempo; entre más tiempo lo utilizemos, más energía consume. Por ejemplo, un bombillo de 60 W que funciona durante 10 h utiliza

$$\Delta E = P\Delta t = (60 \text{ W})(10 \text{ h}) = 600 \text{ Wh} = 0.6 \text{ kWh}$$

de energía eléctrica. Es importante no perder de vista que un kilowatt-hora (kWh) es una unidad de energía, no de potencia. Debido a que 1 kW es igual a 1000 J/s y 1 h equivale a 3600 s, 1 kWh son 3.6 millones de joules.

Ahora podemos calcular el costo mensual de la energía eléctrica para esta casa común que utiliza 900 kWh por mes. Supongamos que la energía eléctrica cuesta 10¢ por kWh:

$$\text{costo} = (900 \text{ kWh})(\$0.10/\text{kWh}) = \$90$$

Pregunta A este precio, ¿cuánto costaría hacer funcionar un calefactor de 1500 W de manera continua durante una noche de 8 h?

Respuesta $E = Pt = (1500 \text{ W})(8 \text{ h}) = 12\,000 \text{ Wh} = 12 \text{ kWh}$. Costo = $(12 \text{ kWh})(10¢/\text{kWh}) = \1.20 .

tivas. Se pueden hacer dos cosas para reducir estas pérdidas. En primer lugar, los cables deben tener la menor resistencia posible, lo cual significa que se emplean cables de diámetro grande y materiales de resistencia baja. En segundo lugar, los transformadores (que se analizan en el capítulo 12) permiten que la compañía de electricidad envíe la misma energía a través del cable al aumentar el voltaje y, al mismo tiempo, reducir la corriente. Una corriente más baja significa menos pérdida térmica en las líneas de transmisión. Algunas consideraciones económicas y de ingeniería determinan el grado en que se utiliza cada uno de estos métodos para reducir la pérdida de energía. La electricidad se transmite entre las compañías de electricidad y las poblaciones a voltajes muy altos (hasta 765 000 volts). Los transformadores reducen el voltaje para su distribución en las poblaciones y después lo reducen una vez más a los 110 volts más seguros que se utilizan en los hogares.

Resumen

Volta empleó la diferencia de potencial eléctrico entre dos metales distintos para construir la primera batería. Las baterías hacen que las cargas fluyan de manera continua como una corriente, y que produzcan calor y luz y accionen motores y otros aparatos.

El voltaje producido por una pila individual depende de los materiales utilizados, pero no de su tamaño. El tamaño determina la cantidad de químicos que contiene la pila y, por lo tanto, la cantidad total de la carga que se puede transferir. Los voltajes, de las pilas en serie se suman. Las pilas colocadas en paralelo no aumentan el voltaje, sino el tamaño efectivo de la batería.

La electricidad en los hogares suele suministrarse a 110 volts y una corriente alterna de 60 hertz. La electricidad de una batería es una corriente directa y normalmente está en un voltaje mucho menor.

La resistencia de los cables aumenta al mismo tiempo que la longitud, disminuye cuando se incrementa un área transversal, y depende del tipo de material. La resistencia R es la razón del voltaje V que atraviesa un objeto entre la corriente I que va de un lado a otro del objeto, $R = V/I$. La resistencia se mide en volts por amperes, u ohms (Ω).

Las cargas eléctricas sólo pueden fluir de manera continua cuando existe una trayectoria de conducción, o circuito, hecha de materiales conductores. El voltaje y la resistencia total del circuito, $V = IR$, determinan la corriente. El voltaje entre dos puntos en un circuito es igual al cambio en el potencial eléctrico entre estos dos puntos, el cual es el trabajo efectuado al mover una unidad de carga positiva por el circuito. La mayor parte de la carga fluye por la trayectoria que tiene la menor resistencia. La conservación de la carga requiere que la electricidad salga por un extremo de la batería y regrese por el otro. La carga no se pierde ni se agota sobre la trayectoria.

La conservación de la energía exige que una carga que adquiere cualquier energía eléctrica potencial mientras atraviesa la batería debe perder esa energía mientras pasa por el circuito. La caída del voltaje a través de los elementos resistivos sobre cualquier trayectoria entre las terminales de una batería debe ser igual a la suma del voltaje de la batería.

Uno o ambos tipos de carga pueden estar en libertad de moverse en un conductor. En los plasmas y los líquidos y los gases ionizados, ambas cargas se pueden mover, aunque sólo algunos de los electrones cargados negativamente se muevan en los metales. Para casi todos los efectos macroscópicos, las cargas positivas que se mueven en una dirección equivalen a las cargas negativas que se desplazan en la dirección opuesta.

Una compañía de electricidad vende energía, no potencia. La potencia es la velocidad a la que se usa la energía y sirve para clasificar casi todos los aparatos eléctricos de nuestros hogares. La energía se mide en watts (W) o kilowatts (kW), en tanto que el uso de la energía eléctrica en el hogar se mide en kilowatts-hora (kWh).

Capítulo 11



Revisión

Cuando los electrones atraviesan un conductor, chocan con los átomos del conductor, aumentan la energía cinética de los átomos y, por lo tanto, la temperatura del conductor. El aumento en la temperatura depende de las propiedades térmicas del material y de su resistencia eléctrica. Los filamentos de los bombillos están hechos de cables muy delgados de materiales de alta resistencia para mejorar el calentamiento. Si el aumento en la temperatura es lo bastante grande, el cable resplandece, y emite luz.

TÉRMINOS IMPORTANTES

ampere: La unidad de corriente eléctrica en el Sistema Internacional, 1 coulomb por segundo.

circuito completo: Una trayectoria de conducción continua desde un extremo de una batería (u otras fuentes de potencial eléctrico) hasta el otro extremo de la batería.

corriente: Un flujo de carga eléctrica. Se mide en amperes.

cortocircuito: Una trayectoria en un circuito eléctrico que tiene muy poca resistencia.

coulomb: La unidad de carga eléctrica en el Sistema Internacional. La cantidad de carga que atraviesa un punto específico en un conductor que transfiere una corriente de 1 ampere.

en paralelo: Dos elementos de un circuito se conectan en paralelo cuando la corriente puede fluir a través de uno u otro, pero no de ambos. Los elementos conectados en paralelo entre sí se conectan directamente entre sí en ambas terminales.

en serie: Una distribución de las resistencias (o las baterías) en una sola trayectoria de conducción, para que la corriente fluya por cada elemento.

ley de Ohm: La resistencia de un objeto es igual al voltaje que lo atraviesa dividido entre la corriente de un lado a otro.

ohm: La unidad de resistencia eléctrica en el Sistema Internacional. Una corriente de 1 ampere fluirá por una resistencia de 1 ohm bajo 1 volt de diferencia de potencial.

potencia: La velocidad con la que la energía se convierte de una forma a otra. En los circuitos eléctricos, esta energía es igual a la corriente por el voltaje. Se mide en joules por segundo, o watts.

regla de los nodos de Kirchhoff: La suma de las corrientes que entran a cualquier nodo en un circuito debe ser igual a la suma de las corrientes que salen de ese nodo.

regla del bucle de Kirchhoff: Sobre cualquier trayectoria desde la terminal positiva hasta la terminal negativa de una batería, las caídas de voltaje a través de los elementos resistivos que se encuentran, deben ser iguales al voltaje de la batería.

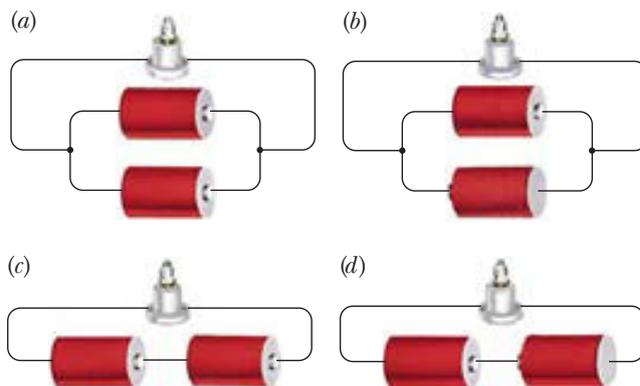
resistencia: La impedancia del flujo de una corriente eléctrica. La resistencia es igual al voltaje que atraviesa el objeto dividido por la corriente de un lado al otro. Se mide en volts por amperes, u ohms.

watt: La unidad de potencia en el Sistema Internacional, 1 joule por segundo.

PREGUNTAS CONCEPTUALES

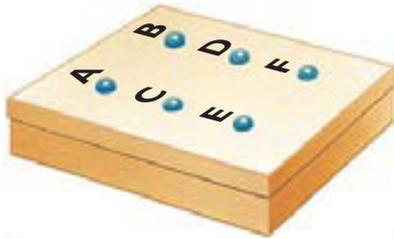
1. ¿El tamaño de una pila afecta su voltaje, su duración, o la corriente que produce?
2. Cuando apila tres baterías de linterna en la misma dirección, obtiene un voltaje de $3 \times 1\frac{1}{2}$ volts = $4\frac{1}{2}$ volts. ¿Cuál voltaje obtiene si una de las baterías se voltea en la dirección opuesta?
3. Tiene dos baterías de 9 volts. ¿Cuál voltaje obtendría si las conectara en serie?
4. Si tiene cuatro pilas de 1.5 volts, ¿cuál voltaje obtendría si las conectara en paralelo?
5. ¿Cuáles son las diferencias y las semejanzas de la electricidad proporcionada por una batería de linterna y una batería de automóvil?
6. ¿Cuáles son las diferencias y las semejanzas de la electricidad proporcionada por una batería de automóvil y la compañía de electricidad de su ciudad?
7. ¿Cuáles bombillos de la figura resplandecen más? ¿Cuáles están más atenuados, pero todavía resplandecen? ¿Por qué?
8. ¿Cuáles bombillos de la figura no encienden? Explique.

9. ¿Cuáles disposiciones de baterías de la figura se agotarán más rápido? ¿Cuál durará más? ¿Por qué?
10. ¿Cuáles disposiciones de baterías de la figura iluminarán el bombillo durante más tiempo? Explique.



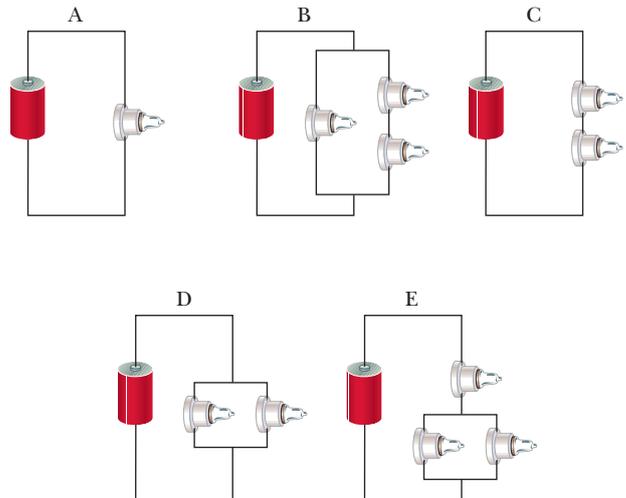
Preguntas 7-10 Bombillos idénticos están conectados a diferentes combinaciones de baterías idénticas.

11. Existen cuatro modos distintos de conectar una batería, un bombillo y un cable, de modo que el bombillo se encienda. Dos de ellos se presentan en la figura 11-5. ¿Cuáles son los otros dos?
12. Redacte una breve declaración que describa cómo conectaría una batería, un bombillo y un cable único de modo que el bombillo se encienda. Su declaración debe incluir las cuatro maneras, sin preferir una.
13. ¿Cuál es la diferencia en un circuito, de haberla, entre un bombillo que se funde y el retiro del bombillo de su portalámparas?
14. Suponga que tiende cables de un altavoz del estéreo en la sala a su recámara, pero olvida marcar los cables. ¿Qué puede hacer para saber cuáles cables debe conectar a cuál altavoz?
- ▲ 15. Recibe una caja misteriosa con seis cabezas de pernos en la parte superior, iguales a las de la figura. Conecta una batería y un bombillo a través de cada par de cabezas de pernos y encuentra que el bombillo enciende para los pares siguientes: AB, CF, CE y EF, pero no para cualquiera de las otras combinaciones. Dibuje diagramas que muestren todos los modos en que se puede conectar la caja.



- ▲ 16. Un amigo examina una caja similar a la de la pregunta 15 y encuentra que el bombillo sólo enciende para las combinaciones siguientes: AB, CD y DE. ¿Pueden ser correctas las observaciones de su amigo? Explique.
17. ¿Cuál es la diferencia entre un volt y un amperio?
18. ¿Las baterías de automóvil se suelen clasificar en amperes-horas. ¿Qué significa esto?
19. En el modelo para el agua de la electricidad, ¿cuáles son los análogos de una batería, un interruptor, un cable y un bombillo?
20. En el modelo para el agua de la electricidad, ¿cuáles son los análogos de la carga, la corriente y el voltaje?
21. ¿Cuáles de los siguientes afectan la resistencia de un cable: el diámetro, el tipo de metal, la longitud, o la temperatura? Explique.
22. Algunas herramientas eléctricas funcionan de manera deficiente cuando se conectan a cables extensores muy largos. ¿Por qué? ¿Qué puede hacer para mejorar la situación?
23. Si la resistencia conectada a una batería se reduce a la mitad, ¿qué le sucede a la corriente que atraviesa la batería?
24. Un resistor tiene una corriente de 2 amperes cuando se conecta a una sola batería. Si se conecta una segunda batería idéntica en serie con la primera, ¿cuál corriente atraviesa el resistor? ¿Cuál es la corriente si las baterías se conectan en paralelo?
25. ¿Cómo explica la teoría atómica de la materia la observación de que la resistencia de los cables metálicos aumenta con la temperatura?
26. ¿Por qué es peligroso emplear una secadora al tomar un baño?

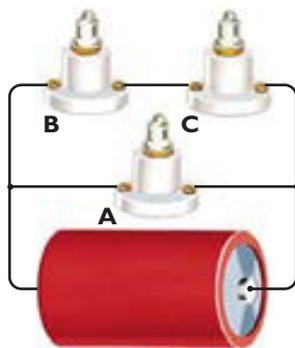
27. Si el único voltaje que tiene es 110 volts, ¿cómo pueden encender algunos bombillos de 5 volts sin fundirlos?
28. En Inglaterra, el voltaje suministrado a los hogares es 240 volts. ¿Qué podría ocurrir si utilizara un bombillo estadounidense en Inglaterra?
29. En un circuito con un solo bombillo, se determina que la corriente que atraviesa el bombillo es de 2 volts. ¿La corriente que atraviesa la batería es mayor, igual, o menor que 2 amperes? Explique.
30. Dos bombillos en serie se conectan a una batería. Se encuentra que la corriente que atraviesa el primer bombillo es 1 amperio. ¿Cuál es la corriente que atraviesa la batería?
31. Si se agrega un segundo bombillo a un circuito con un solo bombillo, ¿la resistencia del circuito aumenta, disminuye, o permanece igual? ¿La corriente que atraviesa la batería aumenta, disminuye, o permanece igual? ¿Por qué?
32. Cuando se añade un bombillo en paralelo a un circuito con un solo bombillo, ¿la resistencia del circuito aumenta, disminuye, o permanece igual? ¿La corriente aumenta, disminuye, o permanece igual? ¿Por qué?
33. Si una fila de cinco bombillos en serie se incorpora en paralelo a un solo bombillo conectado a una batería, encuentra que el resplandor del bombillo original no cambia. ¿La corriente que atraviesa la batería aumentó, disminuyó, o permaneció igual? ¿La resistencia del circuito aumentó, disminuyó, o permaneció igual? Explique.
34. ¿Cuál circuito ofrece mayor resistencia a la batería, dos bombillos en serie, o dos bombillos en paralelo? ¿Por qué?
35. Para los circuitos de la figura, ¿la corriente que atraviesa la batería en el circuito A es mayor, igual o menor que la corriente que atraviesa la batería en el circuito E? Explique su razonamiento.



Preguntas 35-38 Baterías idénticas están conectadas a diversas combinaciones de bombillos idénticos.

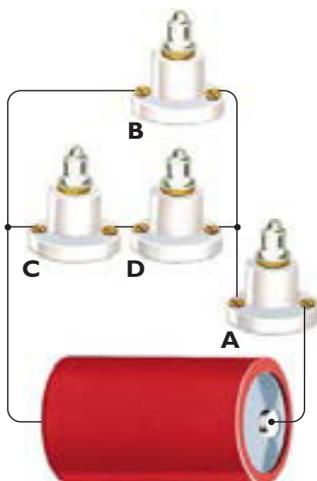
36. Para los circuitos de la figura, ¿la corriente que atraviesa la batería en el circuito A es mayor, igual, o menor que la corriente que atraviesa la batería en el circuito B? Explique su razonamiento.
37. Para los circuitos de la figura, ¿la corriente que atraviesa la batería en el circuito C es mayor, igual, o menor que la corriente que atraviesa la batería en el circuito E? Explique su razonamiento.

38. Para los circuitos de la figura, ¿la corriente que atraviesa la batería en el circuito D es mayor, igual, o menor que la corriente que atraviesa la batería en el circuito E? Explique su razonamiento.
39. ¿Cómo conectaría dos baterías y dos bombillos para obtener el máximo de luz?
40. ¿Cómo conectaría dos baterías y dos bombillos para producir luz durante más tiempo?
41. En la figura, ¿cuáles bombillos resplandecen más y cuáles están más atenuados? Explique.



Preguntas 41-46

42. ¿La resistencia del circuito de la figura aumentaría, disminuiría o permanecería igual si el bombillo A se quitara de su portalámparas? ¿Y si en lugar de eso se quitara el bombillo C? Explique.
43. ¿Qué le ocurre al resplandor de los bombillos B y C de la figura cuando el bombillo A se funde? Explique.
44. ¿Qué le ocurre al resplandor de los bombillos A y C de la figura cuando el bombillo B se quita de su portalámparas? Explique.
45. Si pone un cable a través de las dos terminales del bombillo A, ¿qué le ocurre al resplandor de cada bombillo de la figura? ¿Por qué?
46. ¿Qué le sucede al resplandor de cada bombillo de la figura cuando conecta un cable a través de las terminales del bombillo B?
47. ¿Cómo se compara el resplandor del bombillo C con el resplandor del bombillo D de la figura? Explique su razonamiento.



Preguntas 47-52

48. ¿Cómo se compara el resplandor del bombillo D con el resplandor del bombillo B de la figura? Explique su razonamiento.
49. ¿Qué le ocurre al resplandor de los bombillos B, C y D de la figura cuando se funde el bombillo A? Explique.
50. ¿Qué le ocurre al resplandor de los bombillos A, B y C de la figura cuando el bombillo D se quita de su portalámparas? Explique.
51. Si pone un cable a través de las dos terminales del bombillo A, ¿qué le ocurre al resplandor de cada bombillo de la figura? ¿Por qué?
52. ¿Qué le sucede al resplandor de cada bombillo de la figura cuando conecta un cable a través de las terminales del bombillo B?
- ▲ 53. Una caja tiene tres bombillos idénticos montados en su parte superior, con los cables ocultos en el interior. Al principio, el bombillo A tiene el máximo resplandor, y los bombillos B y C tienen bastante resplandor. Si desenrosca el A, los bombillos B y C se apagan. Si desenrosca el B, el A se atenúa y el C resplandece más, de modo que el A y el C resplandecen igual. Si desenrosca el C, el A se atenúa y el B resplandece más, de modo que el A y el B resplandecen igual. Si desenrosca el B y el C, el A se apaga. ¿Cómo están conectados los bombillos?
- ▲ 54. Una caja tiene tres bombillos idénticos montados en su parte superior, con los cables ocultos en el interior. Al principio, el bombillo A tiene el máximo resplandor, y los bombillos B y C resplandecen igual. Si desenrosca el A, los bombillos B y C permanecen igual. Si desenrosca el B, el A permanece igual y el C se apaga. Si desenrosca el C, el A permanece igual y el B se apaga. Si desenrosca el B y el C, el A permanece igual. ¿Cómo están conectados los bombillos?
55. ¿Los faros de los automóviles y los camiones están conectados en serie o en paralelo? Explique.
56. ¿Por qué no debe reemplazar en su automóvil un fusible de 5 amperes con un fusible de 10 amperes?
57. ¿Qué le sucede a la energía suministrada a una batería si se duplica la resistencia conectada a la batería? Explique.
58. Un resistor único disipa 4 watts de energía cuando se conecta directamente a través de una batería. Si se agrega en serie un segundo resistor idéntico al primero, ¿cuánta energía disipará el resistor?
59. Un resistor único disipa 4 watts de energía cuando se conecta a una sola batería. Si se conecta una segunda batería idéntica, en paralelo con la primera, ¿cuánta energía disipará el resistor?
60. Un resistor único disipa 4 watts de energía cuando se conecta a una sola batería. Si se conecta una segunda batería idéntica en serie con la primera, ¿cuánta energía disipará el resistor?
61. Dos bombillos tienen clasificaciones de 60 watts y 120 watts. ¿Cuál bombillo traslada la corriente más alta? Explique.
- ▲ 62. Dos bombillos tienen clasificaciones de 60 watts y 120 watts. ¿Cuál bombillo tiene la resistencia más alta? Explique.

EJERCICIOS

1. ¿Cuál es la resistencia de un bombillo que atrae 0.8 A cuando se conecta en un tomacorriente de 110 V?
2. Conecta una aspiradora a un tomacorriente de 110 V con nada más en el circuito. Si activa el interruptor de corriente del circuito de 15 A, ¿cuál es la máxima resistencia posible del motor de la aspiradora?
3. Las bobinas de un calefactor tienen una resistencia de $12\ \Omega$ cuando están calientes. ¿Cuánta corriente atrae el calefactor cuando se conecta en un tomacorriente de 110 V?
4. Usted conecta su nueva secadora de pelo de $8\ \Omega$ a un tomacorriente de 110 V y activa el interruptor del circuito de 10 A. Si conecta la secadora en una línea con un interruptor de 15 A, ¿se activará el interruptor? Suponga que no hay nada más conectado en ninguno de los circuitos
5. Si un bombillo tiene una resistencia de $8\ \Omega$ y una corriente de 0.5 A, ¿en cuál voltaje opera?
6. Un bombillo tiene una resistencia de $250\ \Omega$. ¿Cuál voltaje se requiere para que el bombillo atraiga una corriente de 0.5 A?
7. Dos baterías de $1\frac{1}{2}\text{ V}$ se conectan en serie a un resistor de $6\ \Omega$. ¿Cuánta corriente fluye por cada batería?
8. Dos baterías de $1\frac{1}{2}\text{ V}$ se conectan en paralelo a un resistor de $6\ \Omega$. ¿Cuánta corriente fluye por cada batería?
9. Dos resistores de $3\ \Omega$ se conectan en serie a una batería de 12 V. ¿Cuál resistor único, si se conecta sólo a la batería (llamado la *resistencia equivalente*), atraería esta misma corriente? ¿Cuánta corriente atraviesa la batería?
10. Un resistor de $2\ \Omega$ y uno de $4\ \Omega$ se conectan en serie a una batería de 12 V. ¿Cuánta corriente atraviesa cada resistor? Utilice la ley de Ohm para mostrar que la caída del voltaje a través de los resistores individuales suma 12 V.
11. Dos resistores de $4\ \Omega$ se conectan en paralelo a una batería de 12 V. Utilice el hecho de que el voltaje que atraviesa cada resistor es de 12 V para determinar la corriente total que atraviesa la batería. ¿Cuál resistor único, si se conecta a la batería sola (llamado la *resistencia equivalente*), atraería esta misma corriente?
12. Un resistor de $2\ \Omega$ se conecta en paralelo a un resistor de $12\ \Omega$ y la combinación se conecta a una batería de 12 V. ¿Cuánta corriente suministra la batería?
13. ¿Cuál es la energía utilizada por una tostadora que atrae una corriente de 7 A cuando se conecta a una línea de 110 V?
14. Un elemento calefactor se clasifica en 1500 W. ¿Cuánta corriente atrae cuando se conecta a una línea de 110 V?
15. Si un reloj atrae una corriente máxima de 5 mA de una línea de 110 V, ¿cuál es su consumo de energía máximo?
16. Una VCR tiene una clasificación de energía máxima de 24 W cuando se conecta a un tomacorriente de 110 V. ¿Cuál es la corriente máxima que requiere?
17. Un resistor de $4\ \Omega$ se conecta a una batería de 12 V. ¿Cuánta corriente atraviesa la batería? ¿Cuánta energía disipa el resistor?
18. Un resistor de $3\ \Omega$ atrae una corriente de 4 A cuando se conecta a una batería de un voltaje desconocido. ¿Cuál es el voltaje de la batería? ¿Cuánta energía disipa el resistor?
19. ¿Cuál es la clasificación de energía de una bobina calefactora con una resistencia de $11\ \Omega$ que atrae una corriente de 20 A?
20. Una cafetera tiene una resistencia de $10\ \Omega$ y atrae una corriente de 11 A. ¿Cuánta energía utiliza?
- ▲ 21. ¿Cuál es la resistencia de un bombillo de 60 W en un circuito de 110 V?
- ▲ 22. ¿Cuál es la resistencia de la bobina en un calefactor de 1400 W?
23. Si una secadora de pelo se clasifica en 1200 W, ¿cuánta energía se utiliza para accionarla durante 8 minutos?
24. Si se deja encendido un bombillo de 60 W en un pasillo aislado, ¿cuánta energía utiliza cada mes?
25. Si la electricidad cuesta 15¢/kWh, ¿cuánto cuesta encender un bombillo de 100 W durante un día?
26. Un calefactor de 1400 W para un sauna requiere 40 minutos para calentarlo a 190°F . ¿Cuánto cuesta esto si la electricidad se vende a 15¢/kWh?