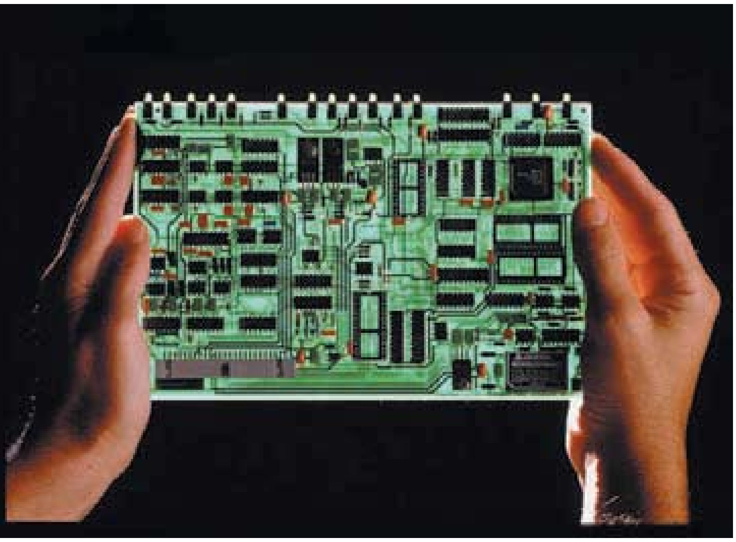
CIRCUITOS DE CORRIENTE DIRECTA

26



?En un circuito complejo como el de esta tarjeta de circuito, ¿es posible conectar varios resistores con diferentes resistencias de manera que todos tengan la misma diferencia de potencial? De ser así, ¿la corriente será la misma a través de todos los resistores?

METAS DE APRENDIZAJE

Al estudiar este capítulo, usted aprenderá:

- A analizar circuitos con resistores múltiples conectados en serie o en paralelo.
- Las reglas aplicables a cualquier circuito con más de una espira.
- A utilizar amperímetros, voltímetros, óhmetros o potenciómetros en un circuito.
- A analizar circuitos que incluyan tanto un resistor como un capacitor.
- Cómo se distribuye la energía en eléctrica en el hogar.

Si mira el interior de su televisor, computadora o equipo estereofónico, o bajo el capó de un automóvil, encontrará circuitos mucho más complejos que los que se estudiaron en el capítulo 25. Ya sea que estén conectados mediante alambres o integrados en un chip, es frecuente que estos circuitos incluyan varias fuentes, resistores y otros elementos, como capacitores, transformadores y motores, interconectados en una *red*.

En este capítulo estudiaremos métodos generales para analizar esas redes, incluso cómo calcular voltajes, corrientes y propiedades de elementos de circuito. Aprenderemos a determinar la resistencia equivalente para varios resistores conectados en serie o en paralelo. Para redes más generales necesitamos dos reglas llamadas *reglas de Kirchhoff*. Una se basa en el principio de conservación de la carga aplicado a una unión o confluencia de dos o más vías; la otra se deriva de la conservación de la energía para una carga que se desplaza por una espira cerrada. Se estudiarán instrumentos para medir varias cantidades eléctricas. También se analizará un circuito que contiene resistencia y capacitancia, en el que la corriente varía con el tiempo.

Nuestro objetivo principal en este capítulo se centra en los circuitos de **corriente directa** (cd), en los que el sentido de la corriente no cambia con el tiempo. Las linternas y los sistemas eléctricos de automóviles son ejemplos de circuitos de corriente directa. La energía eléctrica doméstica se suministra en forma de **corriente alterna** (ca), en la que la corriente oscila hacia delante y atrás. Los mismos principios para analizar redes se aplican a ambas clases de circuitos. El capítulo concluye con una mirada a los sistemas de cableado doméstico. En el capítulo 31 se estudiarán con detalle los circuitos de corriente alterna.

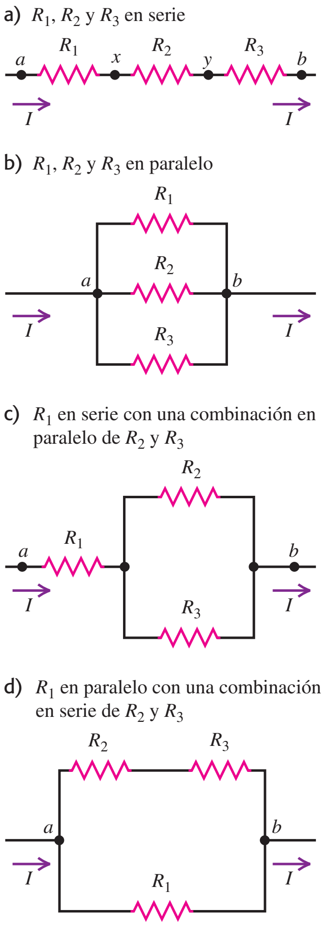
26.1 Resistores en serie y en paralelo

Los resistores se encuentran en toda clase de circuitos, desde secadoras para el cabello y calentadores espaciales hasta circuitos que limitan o dividen la corriente, o reducen o dividen un voltaje. Es frecuente que tales circuitos contengan varios resistores, por lo que es apropiado considerarlos como *combinaciones* de resistores. Un ejemplo sencillo es una guirnalda de bombillas eléctricas de las que se usan en la decoración

ActivPhysics ONLINE

12.1 Circuitos de CD en serie (cualitativos)

26.1 Cuatro diferentes formas de conectar tres resistores.



navideña; cada bombilla actúa como resistor, y desde la perspectiva del análisis de circuitos una guirnalda de bombillas tan sólo es una combinación de resistores.

Suponga que se tienen tres resistores con resistencias R_1, R_2 y R_3. La figura 26.1 muestra cuatro formas diferentes en que éstos se pueden conectar entre los puntos a y b. Cuando se conectan en secuencia varios elementos de circuito, como resistores, baterías y motores —como en la figura 26.1a— con una sola trayectoria de corriente entre los puntos, se dice que están conectados **en serie**. En la sección 24.2 se estudiaron los *capacitores* en serie; vimos que, en virtud del principio de conservación de la carga, todos tenían la misma carga si al principio se hallaban descargados. Es frecuente que al estudiar circuitos estemos más interesados en la *corriente*, que es el flujo de carga por unidad de tiempo.

Se dice que los resistores de la figura 26.1b están conectados **en paralelo** entre los puntos a y b. Cada resistor ofrece una trayectoria alternativa entre los puntos. Para los elementos de circuito conectados en paralelo, la *diferencia de potencial* es la misma a través de cada elemento. En la sección 24.2 se estudiaron los capacitores en paralelo.

En la figura 26.1c, los resistores R_2 y R_3 están en paralelo, y esta combinación está en serie con R_1. En la figura 26.1d, R_2 y R_3 están en serie, y esta combinación está en paralelo con R_1.

Para cualquier combinación de resistores siempre es posible encontrar un resistor *único* que podría remplazar la combinación y dar como resultado la misma corriente y diferencia de potencial totales. Por ejemplo, una guirnalda de bombillas navideñas podría remplazarse por una sola bombilla elegida de manera apropiada para que tomara la misma corriente y tuviera la misma diferencia de potencial entre sus terminales que la guirnalda original. La resistencia de este resistor único se llama **resistencia equivalente** de la combinación. Si se remplazara cualquiera de las redes de la figura 26.1 por su resistencia equivalente R_{eq}, se podría escribir

$$V_{ab} = IR_{eq} \quad \text{o bien,} \quad R_{eq} = \frac{V_{ab}}{I}$$

donde V_{ab} es la diferencia de potencial entre las terminales a y b de la red, e I es la corriente en el punto a o b. Para calcular una resistencia equivalente, se supone una diferencia de potencial V_{ab} a través de la red real, se calcula la corriente I correspondiente y se obtiene la razón V_{ab}/I.

Resistores en serie

Es posible determinar ecuaciones generales para la resistencia equivalente de una combinación de resistores en serie o en paralelo. Si los resistores están en *serie*, como en la figura 26.1a, la corriente I debe ser la misma en todos ellos. (Como se vio en la sección 25.4, la corriente *no* "se gasta" cuando pasa a través de un circuito.) Al aplicar $V = IR$ a cada resistor, se obtiene

$$V_{ax} = IR_1 \qquad V_{xy} = IR_2 \qquad V_{yb} = IR_3$$

Las diferencias de potencial a través de cada resistor no necesitan ser las mismas (excepto para el caso especial en que las tres resistencias son iguales). La diferencia de potencial V_{ab} a través de toda la combinación es la suma de estas diferencias de potencial individuales:

$$V_{ab} = V_{ax} + V_{xy} + V_{yb} = I(R_1 + R_2 + R_3)$$

por lo que

$$\frac{V_{ab}}{I} = R_1 + R_2 + R_3$$

La razón V_{ab}/I es, por definición, la resistencia equivalente R_{eq}. Por lo tanto,

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3$$

Es fácil generalizar esto a cualquier número de resistores:

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 + \cdots \qquad \text{(resistores en serie)} \qquad (26.1)$$

La resistencia equivalente de *cualquier número* de resistores en serie es igual a la suma de sus resistencias individuales.

La resistencia equivalente es *mayor que* cualquiera de las resistencias individuales.

Comparemos este resultado con la ecuación (24.5) para *capacitores* en serie. Los resistores en serie se suman directamente porque el voltaje a través de cada uno es directamente proporcional a su resistencia y a la corriente común. Los capacitores en serie se suman en forma recíproca porque el voltaje es directamente proporcional a la carga común, pero *inversamente* proporcional a la capacitancia individual.

Resistores en paralelo

Si los resistores están en *paralelo*, como en la figura 26.1b, la corriente a través de cada resistor no necesita ser la misma. Pero la diferencia de potencial entre las terminales de cada resistor debe ser la misma e igual a V_{ab} (figura 26.2). (Recuerde que la diferencia de potencial entre dos puntos cualesquiera no depende de la trayectoria tomada entre los puntos.) Denotemos las corrientes en los tres resistores con I_1, I_2 e I_3. Luego, de $I = V/R$,

$$I_1 = \frac{V_{ab}}{R_1} \qquad I_2 = \frac{V_{ab}}{R_2} \qquad I_3 = \frac{V_{ab}}{R_3}$$

En general, la corriente es diferente a través de cada resistor. Como la carga no se acumula o escapa del punto a, la corriente total I debe ser la suma de las tres corrientes en los resistores:

$$I = I_1 + I_2 + I_3 = V_{ab}\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}\right) \quad \text{o bien,}$$

$$\frac{I}{V_{ab}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

Pero por definición de resistencia equivalente, R_{eq}, $I/V_{ab} = 1/R_{eq}$, por lo que

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

De nuevo, es fácil generalizar a *cualquier número* de resistores en paralelo:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \cdots \qquad \text{(resistores en paralelo)} \qquad (26.2)$$

Para *cualquier número* de resistores en paralelo, el *recíproco* de la resistencia equivalente es igual a la *suma de los recíprocos* de sus resistencias individuales.

La resistencia equivalente siempre es *menor que* cualquier resistencia individual.

Se puede comparar este resultado con la ecuación (24.7) para *capacitores* en paralelo. Los resistores en paralelo se suman recíprocamente porque la corriente en cada uno es proporcional al voltaje común a través de ellos, e *inversamente* proporcional a la resistencia de cada uno. Los capacitores en paralelo se suman directamente porque la carga en cada uno es proporcional al voltaje común a través de ellos y *directamente* proporcional a la capacitancia de cada uno.

Para el caso especial de *dos* resistores en paralelo,

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} \quad \text{y}$$

$$R_{eq} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \qquad \text{(dos resistores en paralelo)} \qquad (26.3)$$

?

26.2 Los faros de un automóvil están conectados en paralelo. De ahí que cada uno esté expuesto a toda la diferencia de potencial suministrada por el sistema eléctrico del vehículo, lo que da el máximo brillo. Otra ventaja es que si un faro se funde, el otro sigue funcionando (véase el ejemplo 26.2).

ActivPhysics ONLINE

12.2 Circuitos de CD en paralelo

Como $V_{ab} = I_1R_1 = I_2R_2$, se deduce que

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1} \quad \text{(dos resistores en paralelo)} \tag{26.4}$$

Esto demuestra que las corrientes conducidas por dos resistores en paralelo son *inversamente proporcionales* a sus resistencias. Por la trayectoria de menor resistencia circula más corriente.

Estrategia para resolver problemas 26.1 Resistores en serie y en paralelo

IDENTIFICAR *los conceptos relevantes:* Muchas redes de resistores están constituidas por resistores en serie, en paralelo o una combinación de ambos. El concepto clave es que una red de ese tipo se puede sustituir por un solo resistor equivalente.

PLANTEAR *el problema* de acuerdo con los siguientes pasos:

1. Elabore un dibujo de la red de resistores.
2. Determine si los resistores están conectados en serie o en paralelo. Observe que es frecuente considerar redes como las de las figuras 26.1c y 26.1d, como combinaciones de arreglos en serie y en paralelo.
3. Determine cuáles son las variables que se buscan. Éstas podrían incluir la resistencia equivalente de la red, la diferencia de potencial a través de cada resistor, o la corriente que cruza cada resistor.

EJECUTAR *la solución* como sigue:

1. Utilice la ecuación (26.1) o (26.2) para encontrar la resistencia equivalente para una combinación en serie o en paralelo, respectivamente.
2. Si la red es más compleja, trate de reducirla a combinaciones en serie y en paralelo. Por ejemplo, en la figura 26.1c primero se remplaza la combinación en paralelo de R_2 y R_3 con su resistencia equivalente; esto forma una combinación en serie con R_1. En la figura 26.1d, la combinación de R_2 y R_3 en serie forma una combinación en paralelo con R_1.
3. Cuando se calculen diferencias de potencial, recuerde que cuando los resistores están conectados en serie, la diferencia de potencial total a través de la combinación es igual a la suma de las diferencias de potencial individuales. Cuando los resistores están conectados en paralelo, la diferencia de potencial es la misma para cada resistor, e igual a la diferencia de potencial a través de la combinación en paralelo.
4. Recuerde los enunciados análogos para la corriente. Cuando los resistores se conectan en serie, la corriente es la misma a través de cada resistor e igual a la que pasa a través de la combinación en serie. Cuando los resistores se conectan en paralelo, la corriente total a través de la combinación es igual a la suma de corrientes a través de los resistores individuales.

EVALUAR *la respuesta:* Compruebe si los resultados son congruentes. Si los resistores están conectados en serie, la resistencia equivalente debe ser mayor que la de cualquier resistor individual; si están en paralelo, la resistencia equivalente debe ser menor que la de cualquier resistor individual.

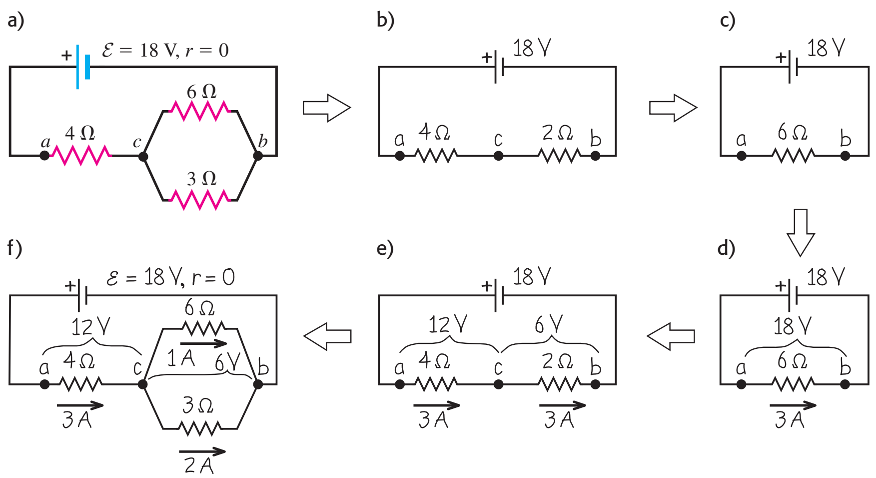
Ejemplo 26.1 Resistencia equivalente

Calcule la resistencia equivalente de la red que se ilustra en la figura 26.3a, y obtenga la corriente en cada resistor. La fuente de fem tiene resistencia interna insignificante.

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: Esta red de tres resistores es una *combinación* de resistencias en serie y en paralelo, como la de la figura 26.1c. Los resis-

26.3 Etapas para reducir una combinación de resistores a un solo resistor equivalente y calcular la corriente en cada resistor.



tores de 6 Ω y 3 Ω están en paralelo, y su combinación está en serie con el resistor de 4 Ω.

PLANTEAR: Primero se determina la resistencia equivalente R_{eq} de esta red en su conjunto. Dado este valor, se calcula la corriente en la fem, que es la misma que la corriente en el resistor de 4 Ω. Esta misma corriente se divide entre los resistores de 6 Ω y 3 Ω; se determina cuánta corriente va hacia cada resistor utilizando el principio de que la diferencia de potencial debe ser la misma a través de estos dos resistores (porque están conectados en paralelo).

EJECUTAR: Las figuras 26.3b y 26.3c muestran los pasos sucesivos para reducir la red a una sola resistencia equivalente. De acuerdo con la ecuación (26.2), los resistores de 6 Ω y 3 Ω en paralelo de la figura 26.3a equivalen al resistor único de 2 Ω de la figura 26.3b:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{6\ \Omega} + \frac{1}{3\ \Omega} = \frac{1}{2\ \Omega}$$

[El mismo resultado se obtiene mediante la ecuación (26.3).] De la ecuación (26.1), la combinación en serie de este resistor de 2 Ω con el resistor de 4 Ω es equivalente al resistor único de 6 Ω de la figura 26.3c.

Para encontrar la corriente en cada resistor de la red original, se invierten los pasos con los que se redujo la red. En el circuito que se muestra en la figura 26.3d (idéntico al de la figura 26.3c), la corriente es $I = V_{ab}/R = (18\ \text{V})/(6\ \Omega) = 3\ \text{A}$. Así que la corriente en los resistores de 4 Ω y 2 Ω de la figura 26.3e (idéntica a la figura 26.3b) también es de 3 A. Por lo tanto, la diferencia de potencial V_{cb} a través del resistor de 2 Ω es $V_{cb} = IR = (3\ \text{A})(2\ \Omega) = 6\ \text{V}$. Esta diferencia de potencial también debe ser de 6 V en la figura 26.3f (idéntica a la figura 26.3a). Con $I = V_{cb}/R$, las corrientes en los resistores de 6 Ω y 3 Ω de la figura 26.3f son $(6\ \text{V})/(6\ \Omega) = 1\ \text{A}$ y $(6\ \text{V})/(3\ \Omega) = 2\ \text{A}$, respectivamente.

EVALUAR: Observe que para los dos resistores en paralelo entre los puntos c y b de la figura 26.3f, hay el doble de corriente a través del resistor de 3 Ω que a través del resistor de 6 Ω, es decir, pasa más corriente por la trayectoria de menos resistencia, de acuerdo con la ecuación (26.4). También note que la corriente total a través de estos dos resistores es de 3 A, la misma que pasa a través del resistor de 4 Ω entre los puntos a y c.

Ejemplo 26.2 Combinaciones en serie contra combinaciones en paralelo

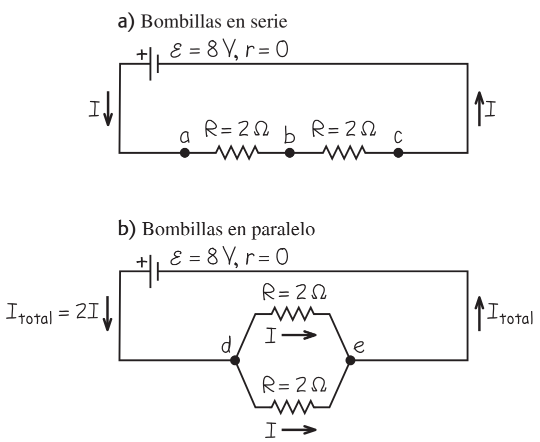
Dos bombillas idénticas se conectan a una fuente con $\mathcal{E} = 8$ V y resistencia interna despreciable. Cada bombilla tiene una resistencia $R = 2\ \Omega$. Calcule la corriente a través de cada bombilla, la diferencia de potencial a través de ésta y la potencia que se le entrega, y haga lo mismo para toda la red si las bombillas están conectadas *a*) en serie y *b*) en paralelo. *c*) Suponga que una de las bombillas se funde, es decir, su filamento se rompe y la corriente ya no puede fluir a través de él. ¿Qué pasa con la otra bombilla, para el caso de conexión en serie? ¿Y en el de conexión en paralelo?

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: Las bombillas son resistores conectados en serie y en paralelo.

PLANTEAR: Las figuras 26.4a y 26.4b muestran los diagramas de los circuitos en serie y en paralelo, respectivamente. Una vez que se ha calculado la corriente a través de cada bombilla, se obtiene la potencia entregada a cada una por medio de la ecuación (25.18), $P = I^2R = V^2/R$.

26.4 Diagramas para este problema.



EJECUTAR: *a*) De acuerdo con la ecuación (26.1), la resistencia equivalente de las dos bombillas entre los puntos a y c en la figura 26.4a es la suma de sus resistencias individuales.

$$R_{eq} = 2R = 2(2\ \Omega) = 4\ \Omega$$

La corriente es la misma a través de cada bombilla en serie:

$$I = \frac{V_{ac}}{R_{eq}} = \frac{8\ \text{V}}{4\ \Omega} = 2\ \text{A}$$

Como las bombillas tienen la misma resistencia, la diferencia de potencial es la misma a través de cada una:

$$V_{ab} = V_{bc} = IR = (2\ \text{A})(2\ \Omega) = 4\ \text{V}$$

Ésta es la mitad del voltaje terminal de 8 V de la fuente. De acuerdo con la ecuación (25.18), la potencia entregada a cada bombilla es

$$P = I^2R = (2\ \text{A})^2(2\ \Omega) = 8\ \text{W} \qquad \text{o bien,}$$

$$P = \frac{V_{ab}{}^2}{R} = \frac{V_{bc}{}^2}{R} = \frac{(4\ \text{V})^2}{2\ \Omega} = 8\ \text{W}$$

La energía total entregada a las dos bombillas es $P_{total} = 2P = 16$ W. De manera alternativa, la potencia total se puede calcular utilizando la resistencia equivalente $R_{eq} = 4\ \Omega$, a través de la cual la corriente es $I = 2$ A y la diferencia de potencial es $V_{ac} = 8$ V:

$$P_{total} = I^2R_{eq} = (2\ \text{A})^2(4\ \Omega) = 16\ \text{W} \qquad \text{o bien,}$$

$$P_{total} = \frac{V_{ac}{}^2}{R_{eq}} = \frac{(8\ \text{V})^2}{4\ \Omega} = 16\ \text{W}$$

b) Si las bombillas están en paralelo, como en la figura 26.4b, la diferencia de potencial V_{de} a través de cada bombilla es la misma e igual

continúa

a 8 V, el voltaje terminal de la fuente, por lo que la corriente a través de cada bombilla es

$$I = \frac{V_{de}}{R} = \frac{8\ \text{V}}{2\ \Omega} = 4\ \text{A}$$

y la potencia entregada a cada bombilla es

$$P = I^2R = (4\ \text{A})^2(2\ \Omega) = 32\ \text{W} \qquad \text{o bien,}$$

$$P = \frac{V_{de}^2}{R} = \frac{(8\ \text{V})^2}{2\ \Omega} = 32\ \text{W}$$

Tanto la diferencia de potencial como la corriente a través de cada bombilla son el doble de grandes que en el caso de la conexión en serie. Por lo tanto, la potencia entregada a cada bombilla es *cuatro* veces mayor, y cada bombilla brilla más que en el caso en serie. Si la meta es producir la máxima cantidad de luz por cada bombilla, el arreglo en paralelo es superior a la conexión en serie.

La potencia total entregada a la red en paralelo es $P_{\text{total}} = 2P = 64$ W, cuatro veces mayor que para el caso en serie. El incremento en la potencia en comparación con la conexión en serie no se obtiene "gratis", ya que la energía se extrae cuatro veces más rápido de la fuente en la conexión en paralelo que en la conexión en serie. Si la fuente es una batería, se agotará cuatro veces más rápido.

También se puede encontrar la potencia total mediante la resistencia equivalente R_{eq} dada en la ecuación (26.2):

$$\frac{1}{R_{\text{eq}}} = 2\left(\frac{1}{2\ \Omega}\right) = 1\ \Omega^{-1} \qquad \text{o bien,} \qquad R_{\text{eq}} = 1\ \Omega$$

La corriente total a través del resistor equivalente es $I_{\text{total}} = 2I = 2(4\ \text{A}) = 8$ A, y la diferencia de potencial a través del resistor equivalente es de 8 V. Así, la potencia total es

$$P_{\text{total}} = I^2R_{\text{eq}} = (8\ \text{A})^2(1\ \Omega) = 64\ \text{W} \qquad \text{o bien,}$$

$$P_{\text{total}} = \frac{V_{de}^2}{R} = \frac{(8\ \text{V})^2}{1\ \Omega} = 64\ \text{W}$$

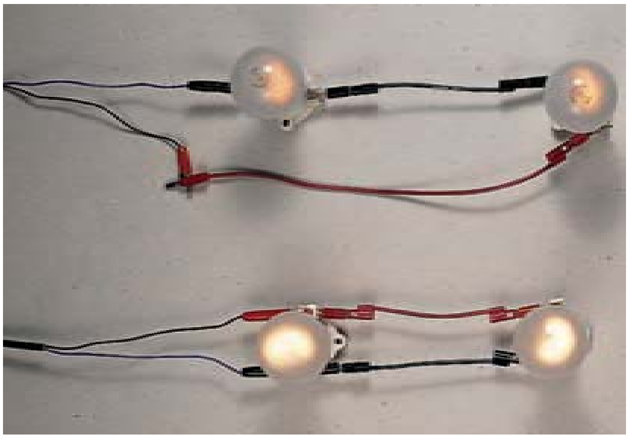
La diferencia de potencial a través de la resistencia equivalente es la misma para ambos casos, en serie y en paralelo, pero para este último caso el valor de R_{eq} es menor, por lo que $P_{\text{total}} = V^2/R_{\text{eq}}$ es mayor.

c) En el caso en serie, fluye la misma corriente a través de las dos bombillas. Si una de éstas se fundiera no habría corriente en todo el circuito, y ninguna bombilla brillaría.

En el caso en paralelo, la diferencia de potencial a través de cualquier bombilla permanecería igual a 8 V, aun si una de las bombillas se fundiera. De ahí que la corriente a través de la bombilla en funcionamiento sería igual a 4 A, y la potencia entregada a esa bombilla seguiría igual a 32 W, como antes de que la bombilla se fundiera. Ésta es otra ventaja de un arreglo en paralelo de bombillas: si una de ellas falla, las demás no se ven afectadas. Este principio se utiliza en los sistemas de distribución domésticos, que se estudiarán en la sección 26.5.

EVALUAR: Nuestro cálculo no es completamente exacto porque la resistencia $V = RI$ de bombillas reales *no* es una constante independiente de la diferencia de potencial V a través de la bombilla. (La resistencia del filamento aumenta con la temperatura de funcionamiento creciente y, por lo tanto, con V en aumento.) Pero es verdad que las bombillas conectadas en serie a través de una fuente, brillan menos que cuando se conectan en paralelo con la misma fuente (figura 26.5).

26.5 Cuando se conectan a la misma fuente, dos bombillas en serie (imagen superior) consumen menos potencia y brillan menos que si se conectan en paralelo (imagen inferior).



Evalúe su comprensión de la sección 26.1 Suponga que los tres resistores que se ilustran en la figura 26.1 tienen la misma resistencia, por lo que $R_1 = R_2 = R_3 = R$. Clasifique los cuatro arreglos que se muestran en los incisos *a*) a *d*) de la figura 26.1, en orden decreciente de su resistencia equivalente.

26.2 Reglas de Kirchhoff

Muchas redes de resistores prácticas no se pueden reducir a combinaciones sencillas en serie y en paralelo. La figura 26.6a ilustra una fuente de potencia de cd con fem $\mathcal{E}_1$ que carga una batería con fem menor $\mathcal{E}_2$ y que alimenta corriente a una bombilla con resistencia R. La figura 26.6b es un circuito "puente", que se utiliza en muchos tipos diferentes de medición y sistemas de control. (Una aplicación importante de un circuito "puente" se describe en el problema 26.79.) No se necesitan principios nuevos para calcular las corrientes en esa clase de redes, pero existen algunas técnicas que ayudan a manejar en forma sistemática los problemas que plantean. A continuación se describen los métodos desarrollados por el físico alemán Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887).

En primer lugar, hay dos términos que usaremos con frecuencia. Una **unión** en un circuito es el punto en que se unen tres o más conductores. Las uniones también reciben el nombre de *nodos* o *puntos de derivación*. Una **espira** es cualquier trayectoria cerrada de conducción. En la figura 26.6a los puntos a y b son uniones, pero los puntos c y d no lo son; en la figura 26.6b, los puntos a, b, c y d son uniones, pero los puntos e y f no lo son. Las líneas en color azul de las figuras 26.6a y 26.6b ilustran algunas espiras posibles en estos circuitos.

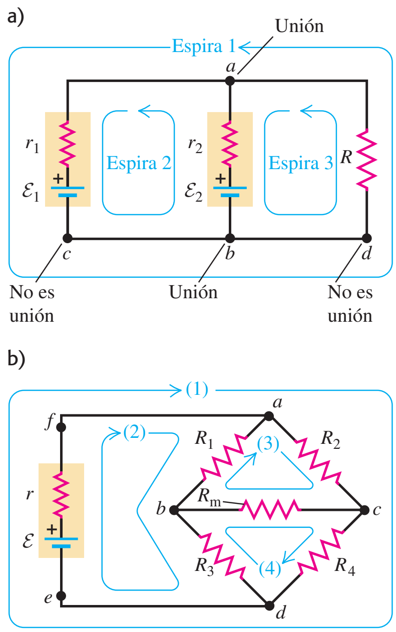
Las reglas de Kirchhoff consisten en los dos siguientes enunciados:

Regla de Kirchhoff de las uniones: *la suma algebraica de las corrientes en cualquier unión es igual a cero*. Es decir,

$$\sum I = 0 \qquad \text{(regla de las uniones, válida en cualquier unión)} \qquad (26.5)$$

Regla de Kirchhoff de las espiras: *la suma algebraica de las diferencias de potencial en cualquier espira,* incluso las asociadas con las fem y las de elementos con resistencia, *debe ser igual a cero*. Es decir,

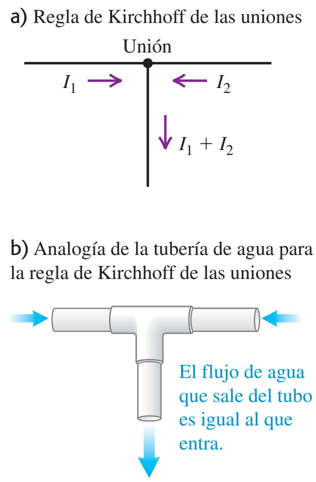
$$\sum V = 0 \qquad \text{(regla de las espiras, válida para cualquier espira cerrada)} \qquad (26.6)$$



26.6 Dos redes que no pueden reducirse a combinaciones simples de resistores en serie o en paralelo.

La regla de las uniones se basa en la *conservación de la carga eléctrica*. En una unión no se puede acumular carga eléctrica, por lo que la carga total que entra a ella por unidad de tiempo debe ser igual a la carga total que sale por unidad de tiempo (véase la figura 26.7a). La carga por unidad de tiempo es corriente, por lo que si consideramos como positivas las corrientes que entran a una unión y negativas las que salen, la suma algebraica de las corrientes en la unión debe ser igual a cero. Es como un ramal T en una tubería de agua (figura 26.7b); si entra 1 litro por minuto en un tubo, no pueden salir 3 litros por minuto de los otros dos tubos. Hemos de confesar que se usó la regla de las uniones (sin decirlo) en la sección 26.1 con la finalidad de obtener la ecuación (26.2) para los resistores en paralelo.

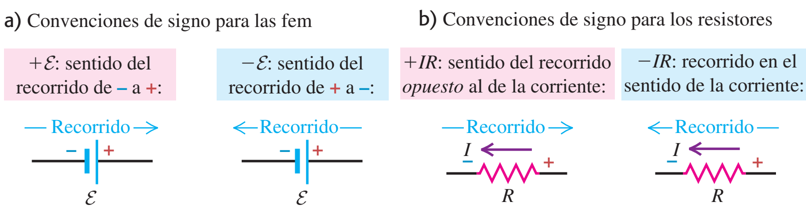
La regla de las espiras es el enunciado de que la fuerza electrostática es *conservativa*. Suponga que recorre una espira y mide las diferencias de potencial entre los extremos de elementos sucesivos del circuito. Al regresar al punto de partida, debería de encontrar que la *suma algebraica* de esas diferencias es igual a cero; de lo contrario, no se podría afirmar que el potencial en ese punto tiene un valor definido.



26.7 a) La regla de Kirchhoff de las uniones dice que la cantidad de corriente que llega a una unión es igual a la que sale. b) Analogía con una tubería de agua.

Convenciones de signo para la regla de la espiras

Para aplicar la regla de las espiras, se necesitan algunas convenciones de signos. La Estrategia para resolver problemas 26.2 describe en detalle cómo utilizarlas, pero a continuación se da una descripción rápida. Primero suponga un sentido de la corriente en cada ramal del circuito e indíquelo en el diagrama correspondiente. En seguida, a partir de cualquier punto del circuito, realice un recorrido imaginario de la espira sumando las fem y los IR conforme los encuentre. Cuando se pasa a través de una fuente en la dirección de $-$ a $+$, la fem se considera *positiva*; cuando se va de $+$ a $-$, la fem se considera *negativa* (figura 26.8a). Cuando se va a través de un resistor en el *mismo* sentido que el que se supuso para la corriente, el término IR es *negativo* porque la corriente avanza en el sentido del potencial decreciente. Cuando se pasa a través de un resistor en el sentido *opuesto* a la corriente que se supuso, el término IR es *positivo* porque representa un aumento de potencial (figura 26.8b).



26.8 Uso de las convenciones de signos cuando se aplica la regla de Kirchhoff de las espiras. En cada parte de la figura "Recorrido" es el sentido en que imaginamos ir alrededor de la espira, que no necesariamente es el sentido de la corriente.

Las dos reglas de Kirchhoff son todo lo que se necesita para resolver una amplia variedad de problemas de redes. Por lo general, algunas de las fem, corrientes y resistencias son conocidas y otras no. Siempre se debe obtener de las reglas de Kirchhoff cierto número de ecuaciones independientes igual al número de incógnitas, de manera que sea posible resolverlas simultáneamente. A menudo, la parte más difícil de la solución suele ser, no la comprensión de los principios básicos, ¡sino seguir la pista de los signos algebraicos!

Estrategia para resolver problemas 26.2 Reglas de Kirchhoff

IDENTIFICAR *los conceptos relevantes:* Las reglas de Kirchhoff son herramientas importantes para analizar cualquier circuito más complicado que una sola espira.

PLANTEAR *el problema* de acuerdo con los siguientes pasos:

1. Elabore un diagrama *grande* del circuito, de manera que haya espacio para escribir leyendas. Identifique todas las cantidades, conocidas y desconocidas, incluidos el sentido supuesto para cada corriente y fem desconocidas. Es frecuente que no se conozca de antemano el sentido real de una corriente o fem, pero esto no importa. Si el sentido real de una cantidad particular es opuesto al que se supuso, el resultado tendrá signo negativo. Si las reglas de Kirchhoff se utilizan correctamente, darán tanto los sentidos como las magnitudes de las corrientes y fem desconocidas.
2. Al escribir las leyendas para las corrientes, por lo general es mejor usar de inmediato la regla de las uniones para expresar las corrientes en términos del menor número posible de cantidades. Por ejemplo, la figura 26.9a muestra un circuito con las leyendas correctas, y la figura 26.9b representa el mismo circuito con otras leyendas después de aplicar la reglas de las uniones al punto a para eliminar I_3.
3. Determine cuáles cantidades son las variables que se buscan.

EJECUTAR *la solución* como sigue:

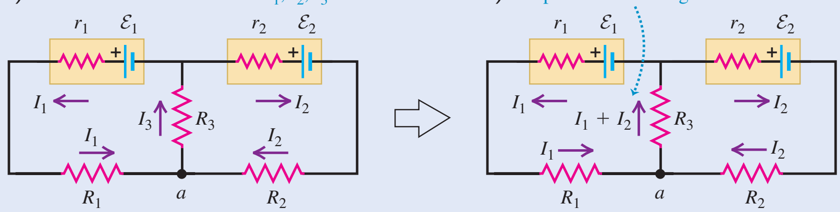
1. Elija cualquier espira cerrada en la red y designe un sentido (horario o antihorario) para recorrer la espira cuando se aplique la regla de las espiras. El sentido no tiene que ser el mismo que el que se supuso para la corriente.
2. Recorra la espira en el sentido elegido, sumando las diferencias de potencial a medida que se atraviesen. Recuerde que una diferencia de potencial positiva corresponde a un incremento en el potencial, y una negativa indica una disminución en el potencial. Una fem se considera positiva si se atraviesa de $(-)$ a $(+)$, y negativa si se va de $(+)$ a $(-)$. Un término IR es negativo si se pasa por el resistor en el mismo sentido de la corriente supuesta, y positivo si se atraviesa en sentido opuesto. La figura 26.8 resume estas convenciones de signo.
3. Iguale a cero la suma del paso 2.
4. Si es necesario elija otra espira para obtener una relación diferente entre las incógnitas, y continúe así hasta que tenga tantas ecuaciones independientes como incógnitas, o hasta que cada elemento de circuito haya quedado incluido en al menos una de las espiras elegidas.
5. Resuelva simultáneamente las ecuaciones para determinar las incógnitas. Este paso implica álgebra, no física, pero a veces es muy complejo. Tenga cuidado con las manipulaciones algebraicas, pues un error de signo resulta fatal para toda la solución.
6. Este mismo sistema de registro se usa para encontrar el potencial V_{ab} de cualquier punto a con respecto a cualquier otro punto b. Comience en b y sume los cambios de potencial que encuentre al ir de b a a, usando las mismas reglas de los signos del paso 2. La suma algebraica de estos cambios es $V_{ab} = V_a - V_b$.

EVALUAR *la respuesta:* Compruebe todos los pasos algebraicos. Una estrategia útil es considerar una espira distinta de las utilizadas para resolver el problema; si la suma de las caídas de potencial alrededor de la espira no es igual a cero se cometió un error en alguno de los cálculos. Como siempre, pregúntese si las respuestas tienen sentido.

26.9 Al aplicar la regla de las uniones al punto a, se reduce el número de corrientes desconocidas, de tres a dos.

a) Tres corrientes desconocidas: I_1, I_2, I_3.

b) La aplicación de la regla de las uniones al punto a elimina I_3.



Ejemplo 26.3 Circuito de una sola espira

El circuito mostrado en la figura 26.10a contiene dos baterías, cada una con una fem y una resistencia interna, y dos resistores. Calcule *a*) la corriente en el circuito, *b*) la diferencia de potencial V_{ab} y *c*) la salida de potencia de la fem de cada batería.

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: Este circuito de una sola espira no tiene uniones, por lo que no se necesita la regla de Kirchhoff de las uniones para determinar el valor de las variables buscadas.

PLANTEAR: Para aplicar la regla de las espiras a la única espira que hay, primero se supone el sentido de la corriente; supongamos un sentido antihorario, como se ilustra en la figura 26.10a.

EJECUTAR: *a*) Se comienza en a y se va en sentido contrahorario, se suman los incrementos y disminuciones de potencial y se iguala la suma a cero, como en la ecuación (26.6). La ecuación resultante es

$$-I(4\ \Omega) - 4\ \text{V} - I(7\ \Omega) + 12\ \text{V} - I(2\ \Omega) - I(3\ \Omega) = 0$$

Al reducir los términos que contienen a I y despejar esta variable, se obtiene:

$$8\ \text{V} = I(16\ \Omega) \qquad \text{e} \qquad I = 0.5\ \text{A}$$

El resultado para I es positivo, lo que demuestra que el sentido elegido para la corriente es correcto. Como ejercicio, suponga para I el sentido opuesto; debería obtener $I = -0.5$ A, lo que indica que la corriente real es opuesta a esa suposición.

b) Para encontrar V_{ab}, el potencial de a con respecto a b, se comienza en b y se suman los cambios de potencial a medida que se avanza hacia a. Hay dos trayectorias posibles de b a a; primero se toma la inferior y se obtiene:

$$V_{ab} = (0.5\ \text{A})(7\ \Omega) + 4\ \text{V} + (0.5\ \text{A})(4\ \Omega) = 9.5\ \text{V}$$

El punto a tiene un potencial 9.5 V más alto que el b. Todos los términos de esta suma, incluidos los IR, son positivos porque cada uno representa un *incremento* de potencial conforme se pasa de b a a. Si en vez de lo anterior se utiliza la trayectoria superior, la ecuación resultante es:

$$V_{ab} = 12\ \text{V} - (0.5\ \text{A})(2\ \Omega) - (0.5\ \text{A})(3\ \Omega) = 9.5\ \text{V}$$

Aquí, los términos IR son negativos porque nuestra trayectoria va en el sentido de la corriente, con disminuciones de potencial a través de los resistores. El resultado es el mismo que con la trayectoria inferior, como debe ser para que el cambio total de potencial alrededor de la espira completa sea igual a cero. En cada caso, los aumentos de potencial se toman como positivos, y las caídas como negativas.

c) La salida de potencia de la fem de la batería de 12 V es

$$P = \mathcal{E}I = (12\ \text{V})(0.5\ \text{A}) = 6\ \text{W}$$

Y la salida de potencia de la fem de la batería de 4 V es

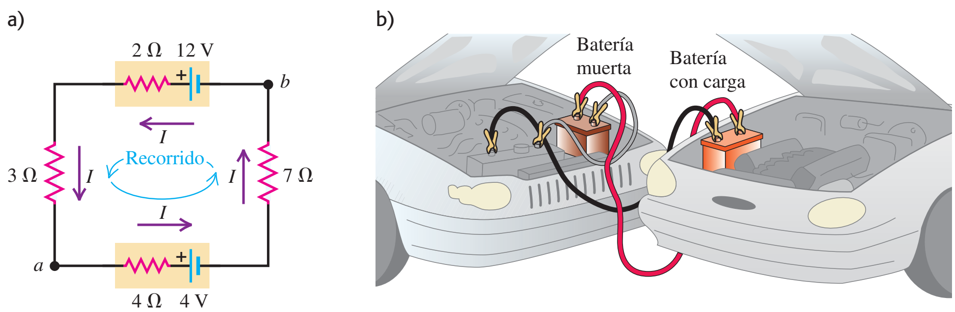
$$P = \mathcal{E}I = (-4\ \text{V})(0.5\ \text{A}) = -2\ \text{W}$$

El signo negativo de $\mathcal{E}$ para la batería de 4 V se debe a que la corriente en realidad va del lado de mayor potencial de la batería al de menor potencial. El valor negativo de P significa que en la batería se está *almacenando* energía, y que se está *recargando* mediante la batería de 12 V.

EVALUAR: Al aplicar la expresión $P = I^2R$ a cada uno de los cuatro resistores de la figura 26.10a, usted debe ser capaz de demostrar que la potencia total disipada en los cuatro resistores es igual a 4 W. De los 6 W que provee la fem de la batería de 12 V, 2 W van al almacenamiento de energía en la batería de 4 V, y 4 W se disipan en las resistencias.

El circuito de la figura 26.10a es muy parecido al que se utiliza cuando se emplea un acumulador de automóvil de 12 V para recargar la batería sin carga de otro vehículo (figura 26.10b). Los resistores de 3 Ω y 7 Ω de la figura 26.10a representan las resistencias de los cables para pasar corriente y de la trayectoria de conducción a través del automóvil con la batería descargada. (Los valores de las resistencias de los automóviles y cables reales para pasar corriente son distintos de los que se utilizan en este ejemplo.)

26.10 **a)** En este ejemplo la espira se recorre en el mismo sentido que el que se supuso para la corriente, por lo que todos los términos IR son negativos. El potencial disminuye a medida que se pasa de $+$ a $-$ a través de la fem inferior, pero se incrementa al ir de $-$ a $+$ a través de la fem superior. **b)** Ejemplo de la vida real de un circuito de esta clase.



Ejemplo 26.4 Carga de una batería

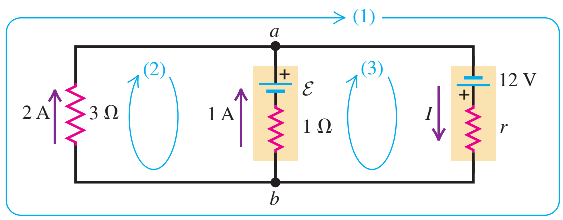
En el circuito que se ilustra en la figura 26.11, una fuente de energía eléctrica de 12 V con resistencia interna desconocida r está conectada a una batería recargable descargada con fem $\mathcal{E}$ desconocida y resistencia interna de 1 Ω, y a una bombilla indicadora con resistencia de 3 Ω que transporta una corriente de 2 A. La corriente a través de la batería descargada es igual a 1 A en el sentido que se indica. Calcule la corriente desconocida I, la resistencia interna r y la fem $\mathcal{E}$.

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: Este circuito tiene más de una espira, por lo que se debe aplicar tanto la regla de las uniones como la regla de las espiras.

PLANTEAR: El sentido de la corriente a través de la fuente de poder de 12 V se supone como se ilustra. Hay tres variables que se buscan, por lo que se necesitan tres ecuaciones.

26.11 En este circuito, una fuente de energía eléctrica carga una batería que se quedó sin carga y enciende una bombilla. Se ha hecho una suposición acerca de la polaridad de la fem $\mathcal{E}$ de la batería agotada. ¿Es correcta esa suposición?



EJECUTAR: Primero se aplica la regla de las uniones, ecuación (26.5), al punto a. Se obtiene

$$-I + 1\ \text{A} + 2\ \text{A} = 0 \qquad \text{por lo que} \qquad I = 3\ \text{A}$$

continúa

Para determinar r se aplica la regla de las espiras, ecuación (26.6), a la espira exterior marcada con (1); se obtiene:

$$12\text{ V} - (3\text{ A})r - (2\text{ A})(3\ \Omega) = 0 \qquad \text{por lo que} \qquad r = 2\ \Omega$$

Los términos que contienen las resistencias r y $3\ \Omega$ son negativos porque nuestra espira atraviesa esos elementos en el mismo sentido que la corriente, por lo que encuentra *caídas* de potencial. Si se hubiera elegido recorrer la espira (1) en sentido opuesto, cada término habría tenido el signo contrario, y el resultado para r habría sido el mismo.

Para determinar $\mathcal{E}$ se aplica la regla de las espiras a la espira (2):

$$-\mathcal{E} + (1\text{ A})(1\ \Omega) - (2\text{ A})(3\ \Omega) = 0 \qquad \text{por lo que} \qquad \mathcal{E} = -5\text{ V}$$

El término para el resistor de $1\ \Omega$ es positivo porque al atravesarlo en sentido opuesto al de la corriente se encuentra una *subida* de potencial. El valor negativo para $\mathcal{E}$ demuestra que la polaridad real de esta fem es opuesta a la que se supuso en la figura 26.11; la terminal positiva de esta fuente está en realidad en el lado derecho. Igual que en el ejemplo 26.3, la batería se está recargando.

EVALUAR: Podemos comprobar nuestro resultado de $\mathcal{E}$ utilizando la espira (3) para obtener la ecuación

$$12\text{ V} - (3\text{ A})(2\ \Omega) - (1\text{ A})(1\ \Omega) + \mathcal{E} = 0$$

de donde se obtiene $\mathcal{E} = -5\text{V}$.

Como comprobación adicional de congruencia, note que $V_{ba} = V_b - V_a$ es igual al voltaje a través de la resistencia de $3\ \Omega$, que es $(2\text{ A})(3\ \Omega) = 6\text{ V}$. Al ir de a a b por el ramal superior, se encuentran diferencias de potencial $+12\text{ V} - (3\text{ A})(2\ \Omega) = +6\text{ V}$, y al ir por el ramal intermedio, se obtiene $-(-5\text{ V}) + (1\text{ A})(1\ \Omega) = +6\text{ V}$. Las tres formas de obtener V_{ba} dan los mismos resultados. Asegúrese de que comprende todos los signos en estos cálculos.

Ejemplo 26.5 Potencia en un circuito de carga de una batería

En el circuito del ejemplo 26.4 (representado en la figura 26.11), calcule la potencia entregada por la fuente de 12 V y por la batería que se recarga, y encuentre la potencia disipada en cada resistor.

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: Se usan los resultados de la sección 25.5, donde se obtuvo que la potencia entregada *desde* una fem a un circuito es $\mathcal{E}I$ y la entregada *a* un resistor desde un circuito es $V_{ab}I = I^2R$.

PLANTEAR: Del ejemplo 26.4, se conocen los valores de cada fem, corriente y resistencia.

EJECUTAR: La salida de potencia desde la fem de la fuente de energía eléctrica es

$$P_{\text{fuente}} = \mathcal{E}_{\text{fuente}} I_{\text{fuente}} = (12\text{ V})(3\text{ A}) = 36\text{ W}$$

La potencia disipada en la resistencia interna de la fuente r es

$$P_{r\text{-fuente}} = I_{\text{fuente}}{}^2 r_{\text{fuente}} = (3\text{ A})^2(2\ \Omega) = 18\text{ W}$$

por lo que la salida de potencia *neta* de la fuente de energía eléctrica es $P_{\text{neta}} = 36\text{ W} - 18\text{ W} = 18\text{ W}$. De manera alternativa, del ejemplo 26.4, el voltaje terminal de la batería es $V_{ba} = 6\text{V}$, por lo que la potencia de salida neta es

$$P_{\text{neta}} = V_{ba} I_{\text{fuente}} = (6\text{ V})(3\text{ A}) = 18\text{ W}$$

La potencia de salida de la fem $\mathcal{E}$ de la batería que se carga es

$$P_{\text{fem}} = \mathcal{E} I_{\text{batería}} = (-5\text{ V})(1\text{ A}) = -5\text{ W}$$

Ésta es negativa porque la corriente de 1 A corre a través de la batería, del lado del mayor potencial al del menor potencial. (Como se mencionó en el ejemplo 26.4, la polaridad que se supuso para esta batería en la figura 26.11 era incorrecta.) En la batería se almacena energía a medida que se carga. Se disipa más potencia en la resistencia interna de la batería; esta potencia es

$$P_{r\text{-batería}} = I^2{}_{\text{batería}} r_{\text{batería}} = (1\text{ A})^2(1\ \Omega) = 1\text{ W}$$

Por lo tanto, la potencia de alimentación total a la batería es $1\text{ W} + |-5\text{ W}| = 6\text{ W}$. De éstos, 5 W representan energía útil almacenada en la batería; el resto se desperdicia en su resistencia interna.

La potencia disipada en la bombilla es

$$P_{\text{bombilla}} = I_{\text{bombilla}}{}^2 R_{\text{bombilla}} = (2\text{ A})^2(3\ \Omega) = 12\text{ W}$$

EVALUAR: Como comprobación, observe que se explica toda la potencia de la fuente. De los 18 W de potencia neta de la fuente de energía eléctrica, 5 W se destinan a la recarga de la batería, 1 W se disipa en la resistencia interna de la batería, y 12 W se disipan en la bombilla.

Ejemplo 26.6 Una red compleja

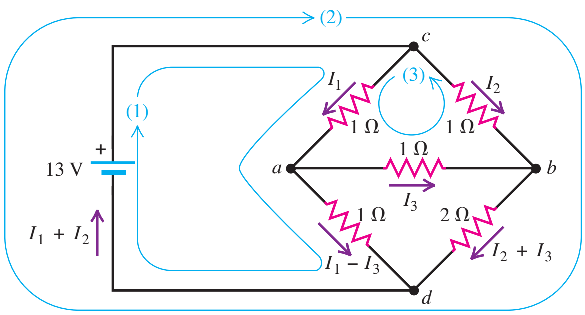
La figura 26.12 muestra un circuito "puente" del tipo descrito al principio de esta sección (véase la figura 26.6b). Calcule la corriente en cada resistor y la resistencia equivalente de la red de cinco resistores.

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: Esta red no se puede representar en términos de combinaciones en serie y en paralelo. De ahí que se deben utilizar las reglas de Kirchhoff para encontrar los valores de las variables buscadas.

PLANTEAR: Hay que calcular cinco diferentes corrientes, pero aplicando la regla de las uniones a los nodos a y b, es posible representarlas en términos de tres corrientes desconocidas, como se aprecia en la figura. La corriente en la batería es $I_1 + I_2$.

26.12 Circuito con varios resistores.



EJECUTAR: Se aplica la regla de las espiras a las tres espiras que se indican, con lo que se obtienen las siguientes tres ecuaciones:

$$13\text{ V} - I_1(1\,\Omega) - (I_1 - I_3)(1\,\Omega) = 0 \qquad (1)$$
$$-I_2(1\,\Omega) - (I_2 + I_3)(2\,\Omega) + 13\text{ V} = 0 \qquad (2)$$
$$-I_1(1\,\Omega) - I_3(1\,\Omega) + I_2(1\,\Omega) = 0 \qquad (3)$$

Éste es un conjunto de tres ecuaciones simultáneas para las tres corrientes desconocidas. Se pueden resolver con varios métodos; un procedimiento muy directo es despejar I_2 en la tercera ecuación, con lo que se obtiene $I_2 = I_1 + I_3$, y luego se sustituye esta expresión en la segunda para eliminar I_2. Al hacer esto quedan dos ecuaciones:

$$13\text{ V} = I_1(2\,\Omega) - I_3(1\,\Omega) \qquad (1')$$
$$13\text{ V} = I_1(3\,\Omega) + I_3(5\,\Omega) \qquad (2')$$

Ahora se elimina I_3 multiplicando la ecuación (1′) por 5 y sumando las dos ecuaciones, para obtener

$$78\text{ V} = I_1(13\,\Omega) \qquad I_1 = 6\text{ A}$$

Este resultado se sustituye en la ecuación (1′) para obtener $I_3 = -1$ A; finalmente, de la ecuación (3) se obtiene $I_2 = 5$ A. El valor negativo de I_3 indica que su sentido es opuesto a nuestra suposición inicial.

La corriente total a través de la red es $I_1 + I_2 = 11$ A y la caída de potencial a través de ella es igual a la fem de la batería, es decir, 13 V. La resistencia equivalente de la red es

$$R_{eq} = \frac{13\text{ V}}{11\text{ A}} = 1.2\,\Omega$$

EVALUAR: Los resultados de $I_1 = 6$ A, $I_2 = 5$ A e $I_3 = -1$ A se revisan sustituyendo estos valores en las tres ecuaciones (1), (2) y (3). ¿Qué es lo que observa?

Ejemplo 26.7 Diferencia de potencial dentro de una red compleja

En el circuito del ejemplo 26.6 (figura 26.12), calcule la diferencia de potencial V_{ab}.

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: La variable buscada es $V_{ab} = V_a - V_b$, que es el potencial en el punto *a* con respecto al punto *b*.

PLANTEAR: Para encontrar V_{ab}, se comienza en el punto *b* y se sigue una trayectoria hacia *a*, sumando las subidas y bajadas de potencial a medida que se avanza. Podemos seguir cualquiera de varias trayectorias posibles de *b* a *a*; el valor de V_{ab} debe ser independiente de la trayectoria que se elija, lo que brinda una forma natural de comprobar nuestro resultado.

EJECUTAR: La trayectoria más sencilla de seguir es a través del resistor central de 1 Ω. Hemos encontrado que $I_3 = -1$ A, lo que demuestra que el sentido real de la corriente en este ramal es de derecha a izquierda. Así, al ir de *b* a *a* hay una *caída* de potencial con magnitud $IR = (1\text{ A})(1\,\Omega) = 1$ V, y $V_{ab} = -1$ V. Es decir, el potencial en el punto *a* es 1 V menor que en el punto *b*.

EVALUAR: Para comprobar el resultado, se prueba una trayectoria de *b* a *a* que pase por los dos resistores inferiores. Las corrientes a través de ellos son:

$$I_2 + I_3 = 5\text{ A} + (-1\text{ A}) = 4\text{ A} \quad \text{e}$$
$$I_1 - I_3 = 6\text{ A} - (-1\text{ A}) = 7\text{ A}$$

por lo que

$$V_{ab} = -(4\text{ A})(2\,\Omega) + (7\text{ A})(1\,\Omega) = -1\text{ V}$$

Se sugiere al lector que pruebe otras trayectorias de *b* a *a* para verificar que también dan este resultado.

Evalúe su comprensión de la sección 26.2 En el ejemplo 26.6, reste la ecuación (1) de la (2). ¿Para cuál espira de la figura 26.12 corresponde esta ecuación? ¿Habría simplificado esta ecuación la solución del ejemplo 26.6?

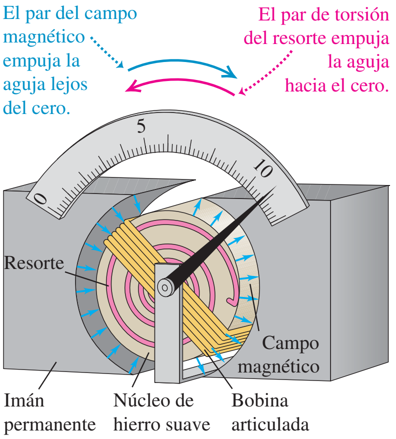
26.3 Instrumentos de medición eléctrica

En los dos últimos capítulos hemos hablado de la diferencia de potencial, corriente y resistencia, ahora es tiempo de decir algo acerca de cómo *medir* estas cantidades. Existen muchos dispositivos comunes, que incluyen tableros de automóviles, cargadores de baterías e instrumentos eléctricos de bajo costo, que miden la diferencia de potencial (voltaje), corriente o resistencia mediante un **galvanómetro de d'Arsonval** (figura 26.13). En la siguiente exposición será frecuente que lo llamemos simplemente *medidor*. En el campo magnético de un imán permanente se coloca una bobina de pivote de alambre delgado (figura 26.14). Unido a la bobina está un resorte, similar a la espiral del volante de un reloj. En la posición de equilibrio, sin corriente en la bobina, la aguja está en el cero. Cuando hay una corriente en la bobina, el campo magnético ejerce un par de torsión sobre la bobina que es proporcional a la corriente. (En el capítulo 27 se verá en detalle esta interacción magnética.) A medida que la bobina gira, el resorte ejerce un par de torsión restaurador que es proporcional al desplazamiento angular.

Así, la desviación angular de la bobina y la ajuga es directamente proporcional a la corriente en la bobina, y el dispositivo se puede calibrar para que mida corriente. La desviación máxima, lo común es de 90°, se denomina *desviación de escala completa*. Las características eléctricas esenciales del medidor son la corriente I_{fs} (por las siglas

26.13 Este amperímetro (arriba) y el voltímetro (abajo) son galvanómetros de d'Arsonval. La diferencia tiene que ver con sus conexiones internas (véase la figura 26.15).

26.14 Galvanómetro de d'Arsonval con una bobina de pivote o articulada a la que está adherida una aguja; un imán permanente suministra un campo magnético de magnitud uniforme, y el resorte proporciona un par de torsión restaurador que se opone al par de torsión del campo magnético.



ActivPhysics
12.4 Uso de amperímetros y voltímetros

de *full scale* o escala completa) que se requiere para la desviación de escala completa (lo común es del orden de 10 μA a 10 mA) y la resistencia R_c (por la inicial de *coil*, bobina) de la bobina (lo normal es del orden de 10 a 1000 Ω).

La desviación del medidor es proporcional a la corriente en la bobina. Si ésta obedece la ley de Ohm, la corriente es proporcional a la *diferencia de potencial* entre las terminales de la bobina, y la desviación también es proporcional a esta diferencia de potencial. Por ejemplo, considere un medidor cuya bobina tenga una resistencia $R_c = 20.0\ \Omega$ y que se desvía la escala completa cuando la corriente en la bobina es $I_{fs} = 1.00$ mA. La diferencia de potencial correspondiente para la desviación de escala completa es

$$V = I_{fs}R_c = (1.00 \times 10^{-3}\ \text{A})(20.0\ \Omega) = 0.0200\ \text{V}$$

Amperímetros

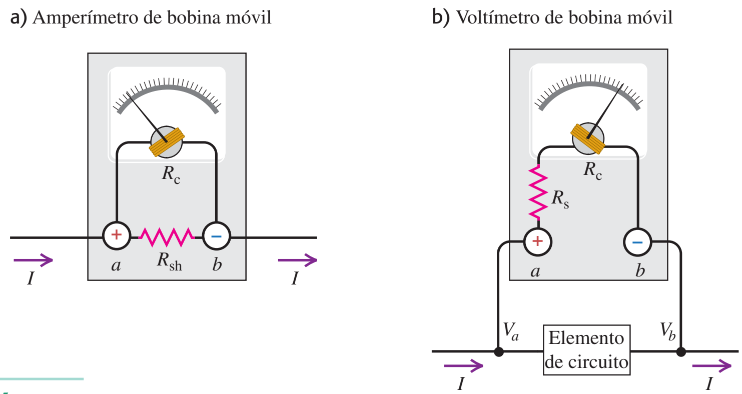
Un instrumento medidor de corriente por lo general se conoce como **amperímetro** (o miliamperímetro, microamperímetro, etcétera, según su escala). Un *amperímetro siempre mide la corriente que pasa a través de él*. Un *amperímetro* ideal, como el que se estudió en la sección 25.4, tendría una resistencia *igual a cero*, por lo que si se incluyera en un ramal de un circuito no se afectaría a la corriente que circula por el ramal. Los amperímetros reales siempre tienen una resistencia finita, pero es deseable que sea tan pequeña como sea posible.

Un medidor puede adaptarse para medir corrientes mayores que su lectura de escala completa si se conecta a él un resistor en paralelo (figura 26.15a) que desvíe parte de la corriente de la bobina del medidor. El resistor en paralelo se llama **resistor de derivación** o simplemente *derivación*, y se denota como R_{sh} (por las iniciales de *shunt*, que en inglés significa derivación).

Suponga que se desea convertir un medidor con corriente de escala completa I_{fs} y resistencia de bobina R_c en un amperímetro con lectura de escala completa I_a. Para determinar la resistencia de derivación R_{sh} que se necesita, observe que, con la desviación de escala completa, la corriente total a través de la combinación en paralelo es I_a, la corriente a través de la bobina del medidor es I_{fs}, y la corriente que pasa a través de la derivación es la diferencia $I_a - I_{fs}$. La diferencia de potencial V_{ab} es la misma para ambas trayectorias; por lo tanto,

$$I_{fs}R_c = (I_a - I_{fs})R_{sh} \qquad \text{(para un amperímetro)} \qquad (26.7)$$

26.15 Uso del mismo medidor para medir a) corriente y b) voltaje.



Ejemplo 26.8 Diseño de un amperímetro

¿Qué resistencia de derivación se requiere para hacer que el medidor de 1.00 mA y 20.0 Ω descrito antes sea un amperímetro con una escala de 0 a 50.0 mA?

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: Como el medidor se emplea como amperímetro, sus conexiones internas se ilustran en la figura 26.15a. La variable buscada es la resistencia de derivación R_{sh}.

PLANTEAR: Se desea que el amperímetro sea capaz de manejar una corriente máxima $I_s = 50.0\ \text{mA} = 50.0 \times 10^{-3}$ A. La resistencia de la bobina es $R_c = 20.0\ \Omega$, y el medidor presenta una desviación de escala completa cuando la corriente a través de la bobina es $I_{fs} = 1.00 \times 10^{-3}$ A. La resistencia de derivación se calcula con la ecuación (26.7).

EJECUTAR: Se despeja R_{sh} en la ecuación (26.7) para obtener

$$R_{sh} = \frac{I_{fs}R_c}{I_a - I_{fs}} = \frac{(1.00 \times 10^{-3}\ \text{A})(20.0\ \Omega)}{50.0 \times 10^{-3}\ \text{A} - 1.00 \times 10^{-3}\ \text{A}}$$
$$= 0.408\ \Omega$$

EVALUAR: Es útil considerar como un todo la resistencia equivalente R_{eq} del amperímetro. De la ecuación (26.2),

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_{sh}} = \frac{1}{20.0\ \Omega} + \frac{1}{0.408\ \Omega}$$

$$R_{eq} = 0.400\ \Omega$$

La resistencia de derivación es tan pequeña en comparación con la resistencia del medidor, que la resistencia equivalente está muy cerca de ser igual a la de derivación. El resultado es un instrumento de baja resistencia con la escala deseada de 0 a 50.0 mA. Con desviación de escala completa, $I = I_a = 50.0$ mA, la corriente a través del galvanómetro es de 1.00 mA, la corriente a través del resistor de derivación es de 49.0 mA, y $V_{ab} = 0.0200$ V. Si la corriente I fuera *menor* que 50.0 mA, la corriente en la bobina y la desviación serían proporcionalmente menores, pero la resistencia R_{eq} seguiría siendo de 0.400 Ω.

Voltímetros

Este mismo medidor básico también se puede utilizar para medir la diferencia de potencial o *voltaje*. El dispositivo que mide el voltaje se llama **voltímetro** (o milivoltímetro, entre otros nombres, según sea su escala de medición). Un voltímetro siempre mide la diferencia de potencial entre dos puntos a los que deben conectarse sus terminales. (El ejemplo 25.7 de la sección 25.4 describió lo que puede pasar si un voltímetro se conecta de manera incorrecta.) Como se vio en la sección 25.4, un voltímetro ideal tendría resistencia *infinita*, por lo que si se lo conectara entre dos puntos de un circuito no se alteraría ninguna de las corrientes. Los voltímetros reales siempre tienen resistencia finita, pero un voltímetro debería tener resistencia suficientemente grande como para que al conectar el aparato a un circuito, las otras corrientes no cambien de manera apreciable.

Para el medidor descrito en el ejemplo 26.8, el voltaje a través de la bobina del medidor con desviación de escala completa es de sólo $I_{fs}R_c = (1.00 \times 10^{-3}\ \text{A})(20.0\ \Omega) = 0.0200$ V. Esta escala se puede extender si se conecta un resistor R_s *en serie* con la bobina (figura 26.15b). Entonces, sólo una fracción de la diferencia de potencial total parece cruzar la bobina, y el resto parece atravesar R_s. Para un voltímetro con lectura de escala completa V_V se necesita un resistor en serie R_s en la figura 26.15b, de manera que

$$V_V = I_{fs}(R_c + R_s) \qquad \text{(para un voltímetro)} \tag{26.8}$$

Ejemplo 26.9 Diseño de un voltímetro

¿Cómo se puede convertir un galvanómetro con $R_c = 20.0\ \Omega$ e $I_{fs} = 1.00$ mA en un voltímetro con una escala máxima de 10.0 V?

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: Como este medidor se va a usar como voltímetro, sus conexiones internas se ilustran en la figura 26.15b. La variable que se busca es la resistencia en serie R_s.

PLANTEAR: El voltaje máximo permisible a través del voltímetro es $V_V = 10.0$ V. Queremos que esto suceda cuando la corriente a través de la bobina (de resistencia $R_c = 20.0\ \Omega$) es $I_{fs} = 1.00 \times 10^{-3}$ A. La resistencia en serie R_s se obtiene con la ecuación (26.8).

EJECUTAR: De acuerdo con la ecuación (26.8),

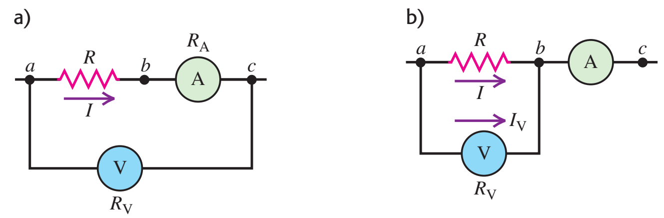
$$R_s = \frac{V_V}{I_{fs}} - R_c = \frac{10.0\ \text{V}}{0.00100\ \text{A}} - 20.0\ \Omega = 9980\ \Omega$$

EVALUAR: Con desviación de escala completa, $V_{ab} = 10.0$ V, el voltaje a través del medidor es de 0.0200 V, el voltaje que cruza R_s es de 9.98 V, y la corriente que pasa por el voltímetro es de 0.00100 A. En este caso, la mayor parte del voltaje aparece entre los extremos del resistor en serie. La resistencia equivalente del medidor es $R_{eq} = 20.0\ \Omega + 9980\ \Omega = 10{,}000\ \Omega$. Un medidor como éste se describe como "un medidor de 1000 ohms por volt", en referencia a la razón entre la resistencia y la desviación de escala completa. En operación normal, la corriente que cruza el elemento de circuito que se mide (I en la figura 26.15b) es mucho mayor que 0.00100 A, y la resistencia entre los puntos a y b en el circuito es mucho menor que 10,000 Ω. Así, el voltímetro sólo retira una pequeña fracción de la corriente y casi no interfiere con el circuito sujeto a medición.

Amperímetros y voltímetros en combinación

Es posible utilizar un voltímetro y un amperímetro juntos para medir la *resistencia* y la *potencia*. La resistencia R de un resistor es igual a la diferencia de potencial V_{ab} entre sus terminales, dividida entre la corriente I; es decir, $R = V_{ab}/I$. La potencia de alimentación P a cualquier elemento de circuito es el producto de la diferencia de potencial que lo cruza y la corriente que pasa por él: $P = V_{ab}I$. En principio, la forma más directa de medir R o P es con la medición simultánea de V_{ab} e I.

Con amperímetros y voltímetros prácticos esto no es tan sencillo como parece. En la figura 26.16a, el amperímetro A lee la corriente I en el resistor R. El voltímetro V, sin embargo, lee la *suma* de la diferencia de potencial V_{ab} a través del resistor y la diferencia de potencial V_{bc} a través del amperímetro. Si se transfiere la terminal del voltímetro de c a b, como en la figura 26.16b, entonces el voltímetro lee correctamente la diferencia de potencial V_{ab}, pero ahora el amperímetro lee la *suma* de la corriente I en el resistor y la corriente I_V en el voltímetro. De cualquier forma, se tiene que corregir la lectura de uno u otro instrumento a menos que las correcciones sean tan pequeñas que se puedan ignorar.



26.16 Método del amperímetro-voltímetro para medir la resistencia.

Ejemplo 26.10 Medición de la resistencia I

Suponga que queremos medir una resistencia desconocida R utilizando el circuito de la figura 26.16a. Las resistencias del medidor son $R_V = 10{,}000\ \Omega$ (para el voltímetro) y $R_A = 2.00\ \Omega$ (para el amperímetro). Si el voltímetro da una lectura de 12.0 V y el amperímetro otra de 0.100 A, ¿cuáles son la resistencia R y la potencia disipada en el resistor?

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: El amperímetro da una lectura de la corriente $I = 0.100$ A a través del resistor, y el voltímetro da la lectura de la diferencia de potencial entre los puntos a y c. Si el amperímetro fuera *ideal* (es decir, si $R_A = 0$), habría una diferencia de potencial igual a cero entre b y c, y la lectura del voltímetro $V = 12.0$ V sería igual a la diferencia de potencial V_{ab} a través del resistor, y la resistencia simplemente sería igual a $R = V/I = (12.0\ \text{V})/(0.100\ \text{A}) = 120\ \Omega$. Sin embargo, el amperímetro *no* es ideal (su resistencia es $R_A = 2.00\ \Omega$), por lo que la lectura del voltímetro V en realidad es la suma de las diferencias de potencial V_{bc} (a través del amperímetro) más V_{ab} (a través del resistor).

PLANTEAR: Para obtener el voltaje V_{bc} a través del amperímetro a partir de su corriente y resistencia conocidas, se utiliza la ley de Ohm. Después se despejan V_{ab} y la resistencia R. Así, se estará en posibilidad de calcular la potencia P que alimenta al resistor.

EJECUTAR: De acuerdo con la ley de Ohm, $V_{bc} = IR_A = (0.100\ \text{A})(2.00\ \Omega) = 0.200$ V y $V_{ab} = IR$. La suma de éstas es $V = 12.0$ V, por lo que la diferencia de potencial a través del resistor es $V_{ab} = V - V_{bc} = (12.0\ \text{V}) - (0.200\ \text{V}) = 11.8$ V. Por lo tanto, la resistencia es

$$R = \frac{V_{ab}}{I} = \frac{11.8\ \text{V}}{0.100\ \text{A}} = 118\ \Omega$$

La potencia disipada en este resistor es

$$P = V_{ab}I = (11.8\ \text{V})(0.100\ \text{A}) = 1.18\ \text{W}$$

EVALUAR: Se puede confirmar este resultado de la potencia si se utiliza la fórmula alternativa $P = I^2R$. ¿Obtiene usted la misma respuesta?

Ejemplo 26.11 Medición de la resistencia II

Suponga que los medidores del ejemplo 26.10 están conectados a un resistor diferente en el circuito que se ilustra en la figura 26.16b, y que las lecturas obtenidas en ellos son las mismas que las del ejemplo 26.10. ¿Cuáles son los valores de esta nueva resistencia R y de la potencia disipada en el resistor?

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: En el ejemplo 26.10 el amperímetro leía la corriente real a través del resistor, pero la lectura del voltímetro no era la misma que la diferencia de potencial a través del resistor. Ahora la situación es la contraria: la lectura del voltímetro $V = 12.0$ V indica la diferencia de potencial real V_{ab} a través del resistor, pero la lectura del amperímetro $I_A = 0.100$ A *no* es igual a la corriente I a través del resistor?

PLANTEAR: La aplicación de la regla de las uniones en b en la figura 26.16b indica que $I_A = I + I_V$, donde I_V es la corriente a través del voltímetro, y se calcula a partir de los valores dados de V y la resistencia del voltímetro R_V, y ese valor se utiliza para determinar la corriente I en el resistor. Después, se determina la resistencia R a partir de I y la lectura del voltímetro, y se calcula la potencia como en el ejemplo 26.10.

EJECUTAR: Se tiene $I_V = V/R_V = (12.0\ \text{V})/(10{,}000\ \Omega) = 1.20$ mA. La corriente real I en el resistor es $I = I_A - I_V = 0.100\ \text{A} - 0.0012\ \text{A} = 0.0988$ A, y la resistencia es

$$R = \frac{V_{ab}}{I} = \frac{12.0\ \text{V}}{0.0988\ \text{A}} = 121\ \Omega$$

La potencia disipada en el resistor es

$$P = V_{ab}I = (12.0\ \text{V})(0.0988\ \text{A}) = 1.19\ \text{W}$$

EVALUAR: Nuestros resultados para R y P no son demasiado distintos de los resultados del ejemplo 26.10, en que los medidores estaban conectados en forma diferente. Eso es porque el amperímetro y el voltímetro son casi ideales: en comparación con la resistencia R en estudio, la resistencia del amperímetro R_A es muy pequeña, y la del voltímetro R_V es muy grande. No obstante, los resultados de los dos ejemplos *son* diferentes, lo que demuestra que al interpretar las lecturas de amperímetros y voltímetros, se debe tomar en cuenta el modo en que se utilizan.

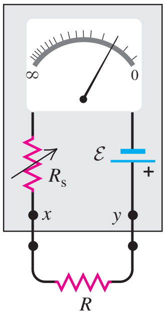
Óhmetros

Un método alternativo para medir la resistencia es utilizar un medidor de d'Arsonval en la configuración conocida como **óhmetro**, que consiste en un medidor, un resistor y una fuente (con frecuencia, una batería de linterna) conectados en serie (figura 26.17). La resistencia R que se va a medir se conecta entre las terminales x y y.

La resistencia en serie R_s es variable; se ajusta de manera que cuando las terminales x y y están en cortocircuito (es decir, cuando $R = 0$), el medidor muestre una desviación de escala completa. Cuando no hay nada conectado a las terminales x y y, de manera que el circuito entre tales puntos está *abierto* (es decir, cuando $R \to \infty$), no hay corriente y, por consiguiente, tampoco hay desviación. Para cualquier valor intermedio de R, la desviación del medidor depende del valor de R, y su escala se puede calibrar para leer en forma directa la resistencia R. Corrientes mayores corresponden a resistencias más pequeñas, por lo que esta escala lee hacia atrás en comparación con la escala que muestra la corriente.

En las situaciones en las que se requiere mucha precisión, los instrumentos con medidores de d'Arsonval se sustituyen por instrumentos electrónicos que dan lecturas digitales directas. Éstos son más precisos, estables y confiables mecánicamente que los medidores de d'Arsonval. Los voltímetros digitales se fabrican con resistencia interna muy elevada, del orden de 100 MΩ. La figura 26.18 muestra un *multímetro* digital, un instrumento capaz de medir voltaje, corriente o resistencia en un intervalo muy amplio.

26.17 Circuito del óhmetro. El resistor R_s tiene una resistencia variable, como indica la flecha a través del símbolo del resistor. Para emplear el óhmetro, primero se conecta x directamente con y y se ajusta R_s hasta que la lectura del instrumento sea de cero. Después se conectan x y y a través del resistor R y se lee la escala.



El potenciómetro

El *potenciómetro* es un instrumento que se utiliza para medir la fem de una fuente sin extraer corriente de ésta; también tiene otras aplicaciones útiles. En esencia, un potenciómetro compensa una diferencia de potencial desconocida contra una diferencia de potencial ajustable y mensurable.

El principio del potenciómetro se ilustra en la figura 26.19a. Un alambre de resistencia ab con resistencia total R_{ab} está conectado permanentemente a las terminales de una fuente de fem conocida $\mathcal{E}_1$. Se conecta un contacto deslizante c a través del galvanómetro G a una segunda fuente cuya fem $\mathcal{E}_2$ habrá de medirse. A medida que el contacto c se desliza a lo largo del alambre de resistencia, varía la resistencia R_{cb} entre los puntos c y b; si el alambre de resistencia es uniforme, R_{cb} es proporcional a la longitud del alambre entre los puntos c y b. Para determinar el valor de $\mathcal{E}_2$, se desliza el contacto c hasta que se encuentra una posición en la que el galvanómetro no muestra desviación; esto corresponde a una corriente nula a través de $\mathcal{E}_2$. Con $I_2 = 0$, la regla de Kirchhoff de las espiras da

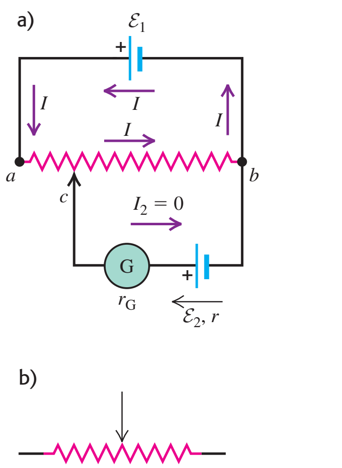
$$\mathcal{E}_2 = IR_{cb}$$

Con $I_2 = 0$, la corriente I producida por la fem $\mathcal{E}_1$ tiene el mismo valor sin importar cuál sea el valor de la fem $\mathcal{E}_2$. El dispositivo se calibra sustituyendo $\mathcal{E}_2$ por una fuente de fem conocida; después, es posible encontrar cualquier fem $\mathcal{E}_2$ desconocida midiendo la longitud del alambre cb con la cual $I_2 = 0$ (véase el ejercicio 26.35). Note que para que esto funcione, V_{ab} debe ser mayor que $\mathcal{E}_2$.

El término *potenciómetro* también se utiliza para cualquier resistor variable, por lo general con un elemento de resistencia circular y un contacto deslizable controlado mediante un eje giratorio y una perilla. En la figura 26.19b se ilustra el símbolo para un potenciómetro.

26.18 Este multímetro digital puede usarse como voltímetro (escala en color rojo), amperímetro (escala amarilla) y óhmetro (escala verde).

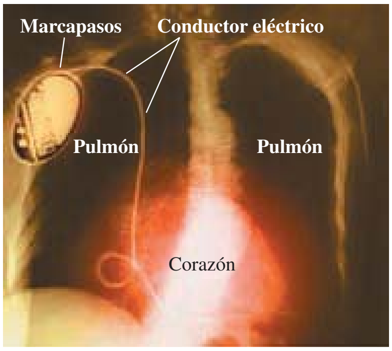
26.19 a) Circuito del potenciómetro. b) Símbolo que en un circuito representa un potenciómetro (resistor variable).



Evalúe su comprensión de la sección 26.3 Se desea medir la corriente y la diferencia de potencial a través del resistor de 2 Ω que se ilustra en la figura 26.12 (ejemplo 26.6 en la sección 26.2). *a*) Para hacer eso, ¿cómo se deben conectar un amperímetro y un voltímetro? i) El amperímetro y el voltímetro se conectan en serie con el resistor de 2 Ω; ii) el amperímetro se conecta en serie con el resistor de 2 Ω y el voltímetro se conecta entre los puntos b y d; iii) el amperímetro se conecta entre los puntos b y d y el voltímetro en serie con el resistor de 2 Ω; iv) el amperímetro y el voltímetro se conectan entre los puntos b y d. *b*) ¿Cuáles son los valores de resistencia que deben tener estos instrumentos? i) Las resistencias del amperímetro y el voltímetro deben ser mucho mayores que 2 Ω; ii) la resistencia del amperímetro debe ser mucho mayor que 2 Ω y la del voltímetro mucho menor que 2 Ω; iii) la resistencia del amperímetro debe ser mucho menor que 2 Ω y la del voltímetro mucho mayor que 2 Ω; iv) las resistencias de ambos instrumentos deben ser mucho menores que 2 Ω.

26.4 Circuitos *R-C*

26.20 Esta imagen a colores obtenida con rayos X muestra un marcapasos implantado quirúrgicamente en un paciente con un problema en el nodo sinoatrial, la parte del corazón que genera la señal eléctrica para generar los latidos. Para compensarlo, el marcapasos (localizado cerca de la clavícula) envía pulsos eléctricos a lo largo del conductor para mantener los latidos a intervalos regulares.



En los circuitos que hemos analizado hasta este momento hemos supuesto que todas las fem y resistencias son *constantes* (independientes del tiempo), por lo que los potenciales, las corrientes y las potencias también son independientes del tiempo. Pero en el simple acto de cargar o descargar un capacitor se encuentra una situación en la que las corrientes, los voltajes y las potencias *sí* cambian con el tiempo.

Muchos dispositivos importantes incorporan circuitos en los que un capacitor se carga y descarga alternativamente. Éstos incluyen marcapasos cardiacos (figura 26.20), semáforos intermitentes, luces de emergencia de los automóviles y unidades de flash electrónico. Comprender lo que pasa en esa clase de circuitos tiene gran importancia práctica.

Carga de un capacitor

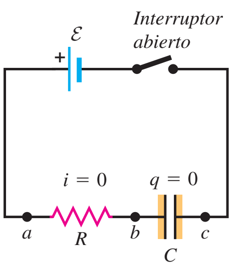
La figura 26.21 muestra un circuito simple para cargar un capacitor. Un circuito como éste, que tiene un resistor y un capacitor conectados en serie, se llama **circuito *R-C***. Se ha idealizado la batería (o fuente de energía eléctrica) para que tenga una fem $\mathcal{E}$ constante y una resistencia eléctrica igual a cero ($r = 0$), y se desprecia la resistencia de todos los conductores de conexión.

Se comienza con el capacitor descargado (figura 26.21a); después, en cierto momento inicial, $t = 0$, se cierra el interruptor, lo que completa el circuito y permite que la corriente alrededor de la espira comience a cargar el capacitor (figura 26.21b). Para todos los efectos prácticos, la corriente comienza en el mismo instante en todas las partes conductoras del circuito, y en todo momento la corriente es la misma en todas ellas.

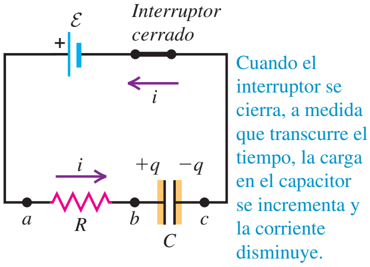
CUIDADO **Las letras minúsculas significan que hay variación con el tiempo** Hasta este momento hemos trabajado con diferencias de potencial (voltajes), corrientes y cargas constantes, y hemos utilizado letras *mayúsculas* V, I y Q, respectivamente, para denotar esas cantidades. Para diferenciar entre cantidades que varían con el tiempo y aquellas que son contantes, usaremos letras *minúsculas*, v, i y q para voltajes, corrientes y cargas, respectivamente, que varían con el tiempo. Se sugiere al lector que en su trabajo siga esta convención.

26.21 Carga de un capacitor. a) Antes de que se cierre el circuito, la carga q es igual a cero. b) Cuando el interruptor se cierra (en $t = 0$), la corriente pasa de cero a $\mathcal{E}/R$. A medida que transcurre el tiempo, q se acerca a Q_f, y la corriente i se acerca a cero.

a) Capacitor descargado al inicio



b) Carga del capacitor



Como el capacitor de la figura 26.21 al principio está descargado, la diferencia de potencial v_{bc} a través suyo es igual a cero en $t = 0$. En ese momento, según la regla de Kirchhoff de las espiras, el voltaje v_{ab} a través del resistor R es igual a la fem de la batería $\mathcal{E}$. La corriente inicial ($t = 0$) a través del resistor, que llamaremos I_0, está dada por la ley de Ohm: $I_0 = v_{ab}/R = \mathcal{E}/R$.

A medida que el capacitor se carga, su voltaje v_{bc} aumenta y la diferencia de potencial v_{ab} a través del resistor disminuye, lo que corresponde a una baja de la corriente. La suma de estos dos voltajes es constante e igual a $\mathcal{E}$. Después de un periodo largo, el capacitor está cargado por completo, la corriente baja a cero y la diferencia de potencial v_{ab} a través del resistor se vuelve cero. En ese momento aparece la totalidad de la fem $\mathcal{E}$ de la batería a través del capacitor y $v_{bc} = \mathcal{E}$.

Sea q la carga en el capacitor e i la corriente en el circuito al cabo de cierto tiempo t después de haberse cerrado el interruptor. Asignamos el sentido positivo a la corriente en correspondencia al flujo de carga positiva hacia la placa izquierda del capacitor, como se aprecia en la figura 26.21b. Las diferencias de potencial instantáneas v_{ab} y v_{bc} son

$$v_{ab} = iR \qquad v_{bc} = \frac{q}{C}$$

Con la regla de Kirchhoff de las espiras, se obtiene

$$\mathcal{E} - iR - \frac{q}{C} = 0 \tag{26.9}$$

El potencial cae en una cantidad iR conforme se va de a a b, y en q/C al pasar de b a c. Al despejar i en la ecuación (26.9), se encuentra que:

$$i = \frac{\mathcal{E}}{R} - \frac{q}{RC} \tag{26.10}$$

En el momento $t = 0$, cuando el interruptor se encuentra cerrado, el capacitor está descargado y $q = 0$. Al sustituir $q = 0$ en la ecuación (26.10), se encuentra que la corriente *inicial* I_0 está dada por $I_0 = \mathcal{E}/R$, como ya se había dicho. Si el capacitor no estuviera en el circuito, el último término de la ecuación (26.10) no estaría presente, por lo que la corriente sería *constante* e igual a $\mathcal{E}/R$.

Conforme la carga se incrementa, el término q/RC se hace más grande y la carga del capacitor tiende a su valor final, al que llamaremos Q_f. La corriente disminuye y finalmente se vuelve cero. Cuando $i = 0$, la ecuación (26.10) da

$$\frac{\mathcal{E}}{R} = \frac{Q_f}{RC} \qquad Q_f = C\mathcal{E} \tag{26.11}$$

Observe que la carga final Q_f no depende de R.

En la figura 26.22, la corriente y la carga del capacitor se ilustran como funciones del tiempo. En el instante en que el interruptor se cierra ($t = 0$), la corriente pasa de cero a su valor inicial $I_0 = \mathcal{E}/R$; después de eso, tiende gradualmente a cero. La carga del capacitor comienza en cero y poco a poco se acerca al valor final dado por la ecuación (26.11), $Q_f = C\mathcal{E}$.

Es posible obtener expresiones generales para la carga q y la corriente i como funciones del tiempo. Con la elección del sentido positivo para la corriente (figura 26.21b), i es igual a la tasa a la que la carga positiva llega a la placa izquierda (positiva) del capacitor, por lo que $i = dq/dt$. Al sustituir esta expresión en la ecuación (26.10), se tiene

$$\frac{dq}{dt} = \frac{\mathcal{E}}{R} - \frac{q}{RC} = -\frac{1}{RC}(q - C\mathcal{E})$$

Al reordenar, se obtiene

$$\frac{dq}{q - C\mathcal{E}} = -\frac{dt}{RC}$$

y luego se integran ambos lados. Podemos cambiar las variables de integración a q' y t' con la finalidad de utilizar q y t para los límites superiores. Los límites inferiores son $q' = 0$ y $t' = 0$:

$$\int_0^q \frac{dq'}{q' - C\mathcal{E}} = -\int_0^t \frac{dt'}{RC}$$

Se efectúa la integración y se obtiene:

$$\ln\left(\frac{q - C\mathcal{E}}{-C\mathcal{E}}\right) = -\frac{t}{RC}$$

Se aplica la función exponencial (es decir, se toma el logaritmo inverso) y se despeja q, para obtener:

$$\frac{q - C\mathcal{E}}{-C\mathcal{E}} = e^{-t/RC}$$

$$q = C\mathcal{E}\left(1 - e^{-t/RC}\right) = Q_f\left(1 - e^{-t/RC}\right) \quad \text{(circuito } R\text{-}C\text{, con capacitor en carga)} \tag{26.12}$$

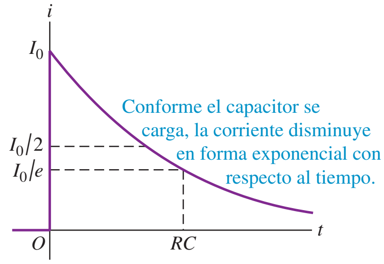
La corriente instantánea i tan sólo es la derivada con respecto al tiempo de la ecuación (26.12):

$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{\mathcal{E}}{R}e^{-t/RC} = I_0 e^{-t/RC} \quad \text{(circuito } R\text{-}C\text{, capacitor en carga)} \tag{26.13}$$

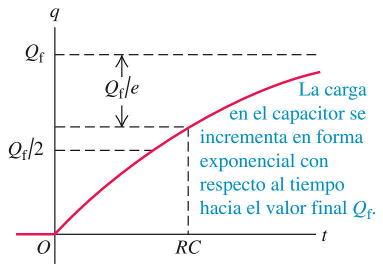
La carga y la corriente son ambas funciones *exponenciales* del tiempo. La figura 26.22a es la gráfica de la ecuación (26.13), y la figura 26.22b es la gráfica de la ecuación (26.12).

26.22 Corriente i y carga del capacitor q como funciones del tiempo para el circuito de la figura 26.21. Al principio, la corriente inicial es I_0 y la carga del capacitor vale cero. La corriente tiende a cero en forma asintótica, y la carga del capacitor se aproxima en forma asintótica a su valor final Q_f.

a) Gráfica de la corriente contra el tiempo para un capacitor en proceso de carga

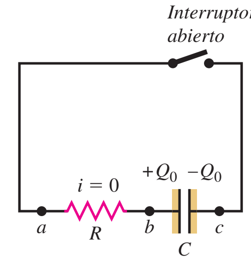


b) Gráfica de la carga de un capacitor contra el tiempo para un capacitor en proceso de carga

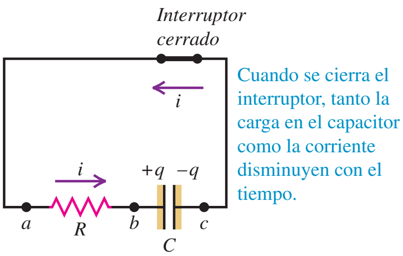


26.23 Descarga de un capacitor. a) Antes de que el interruptor esté cerrado en el momento $t = 0$, la carga del capacitor es Q_0 y la corriente es igual a cero. b) En el momento t, una vez que el interruptor se ha cerrado, la carga del capacitor es q y la corriente es i. El sentido real de la corriente es opuesto al sentido que se ilustra; i es negativa. Después de un tiempo prolongado, tanto q como i tienden a cero.

a) Capacitor inicialmente cargado

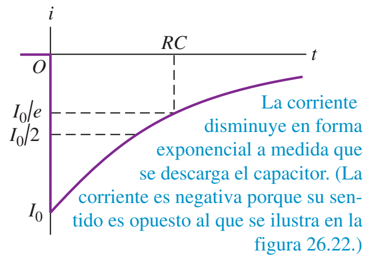


b) Descarga del capacitor

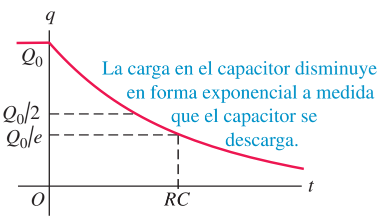


26.24 La corriente i y la carga q del capacitor como funciones del tiempo para el circuito de la figura 26.23. La corriente inicial es I_0 y la carga inicial del capacitor es Q_0. Tanto i como q tienden a cero de manera asintótica.

a) Gráfica de la corriente contra el tiempo para un capacitor en descarga



b) Gráfica de la carga del capacitor contra el tiempo para un capacitor en descarga



Constante de tiempo

Una vez que el tiempo es igual a RC, la corriente en el circuito R-C ha disminuido a $1/e$ (alrededor de 0.368) de su valor inicial. En ese momento la carga del capacitor ha alcanzado el $(1 - 1/e) = 0.632$ de su valor final $Q_f = C\mathcal{E}$. Por lo tanto, el producto RC es una medida de la rapidez con que se carga el capacitor. El término RC recibe el nombre de **constante de tiempo**, o **tiempo de relajación**, del circuito, y se denota por τ:

$$\tau = RC \qquad \text{(constante de tiempo para un circuito } R\text{-}C) \tag{26.14}$$

Cuando τ es pequeña, el capacitor se carga con rapidez; cuando es grande, el proceso de carga toma más tiempo. Si la resistencia es pequeña, es fácil que fluya la corriente y el capacitor se carga rápido. Si R está en ohms y C en farads, τ está en segundos.

En la figura 26.22a, el eje horizontal es una *asíntota* de la curva. En sentido estricto, i nunca llegará exactamente a cero. Pero cuanto más tiempo transcurra, más se acercará a ese valor. Después de que pasa un tiempo igual a $10RC$, la corriente ha bajado a 0.000045 de su valor inicial. De manera similar, la curva de la figura 26.22b se acerca a la asíntota, la recta horizontal punteada Q_f. La carga q nunca toma ese valor exacto, pero después de un tiempo igual a 10 RC, la diferencia entre q y Q_t sólo es de 0.000045 veces el valor de Q. Se invita al lector a comprobar que el producto RC está expresado en unidades de tiempo.

Descarga de un capacitor

Ahora suponga que después de que el capacitor de la figura 26.21b ha adquirido una carga Q_0, se retira la batería del circuito R-C y se conectan los puntos a y c a un interruptor abierto (figura 26.23a). Después se cierra el interruptor y en el mismo instante se reajusta el cronómetro a $t = 0$; en ese momento, $q = Q_0$. Luego, el capacitor se *descarga* a través del resistor y su carga disminuye finalmente a cero.

Otra vez, i y q representan la corriente y la carga como función del tiempo en cierto instante después de que se hizo la conexión. En la figura 26.23b se hace la misma elección del sentido positivo para la corriente que en la figura 26.21b. Entonces, la regla de Kirchhoff de las espiras da la ecuación (26.10) pero con $\mathcal{E} = 0$; es decir,

$$i = \frac{dq}{dt} = -\frac{q}{RC} \tag{26.15}$$

La corriente i ahora es negativa; esto se debe a que la carga positiva q está saliendo de la placa izquierda del capacitor de la figura 26.23b, por lo que la corriente va en sentido opuesto al que se ilustra en la figura. En el momento $t = 0$, cuando $q = Q_0$, la corriente inicial es $I_0 = -Q_0/RC$.

Para encontrar q como función del tiempo se reordena la ecuación (26.15), de nuevo se cambian los nombres de las variables a q' y t', y se procede a integrar. Esta vez los límites para q' son de Q_0 a q. Se obtiene

$$\int_{Q_0}^{q} \frac{dq'}{q'} = -\frac{1}{RC}\int_0^t dt'$$

$$\ln\frac{q}{Q_0} = -\frac{t}{RC}$$

$$q = Q_0 e^{-t/RC} \qquad \text{(circuito } R\text{-}C\text{, capacitor en descarga)} \tag{26.16}$$

La corriente instantánea i es la derivada de ésta con respecto al tiempo:

$$i = \frac{dq}{dt} = -\frac{Q_0}{RC}e^{-t/RC} = I_0 e^{-t/RC} \qquad \text{(circuito } R\text{-}C\text{, capacitor en descarga)} \tag{26.17}$$

En la figura 26.24 están graficadas la corriente y la carga; ambas cantidades tienden a cero en forma exponencial con respecto al tiempo. Al comparar los resultados con las ecuaciones (26.12) y (26.13), se observa que las expresiones para la corriente son idénticas, aparte del signo de I_0. En la ecuación (26.16), la carga del capacitor tiende a cero de manera asintótica, en tanto que en la ecuación (26.12) es la *diferencia* entre q y Q la que tiende a cero en forma asintótica.

Hay consideraciones sobre la energía que amplían nuestra comprensión del comportamiento de un circuito *R-C*. Mientras el capacitor se carga, la tasa instantánea a la que la batería entrega energía al circuito es $P = \mathcal{E}i$. La tasa instantánea a la que la energía eléctrica se disipa en el resistor es i^2R, y la tasa a que la energía se almacena en el capacitor es $i\,v_{bc} = iq/C$. Al multiplicar la ecuación (26.9) por i se obtiene:

$$\mathcal{E}i = i^2R + \frac{iq}{C} \tag{26.18}$$

Esto significa que de la potencia $\mathcal{E}i$ suministrada por la batería, una parte (i^2R) se disipa en el resistor y otra parte (iq/C) se almacena en el capacitor.

La energía *total* suministrada por la batería durante la carga del capacitor es igual a la fem de la batería $\mathcal{E}$ multiplicada por el total de la carga Q_f, o $\mathcal{E}Q_f$. La energía total almacenada en el capacitor, según la ecuación (24.9), es $Q_f\mathcal{E}/2$. Así, *exactamente la mitad* de la energía suministrada por la batería se almacena en el capacitor, y la otra mitad se disipa en el resistor. Es un poco sorprendente que esta división por la mitad de la energía no dependa de C, R o $\mathcal{E}$. Este resultado también se puede verificar en detalle tomando la integral con respecto al tiempo de cada una de las cantidades de potencia en la ecuación (26.18). Se deja ese cálculo para entretenimiento del lector (véase el problema 26.87).

ActivPhysics ONLINE

12.6 Capacitancia
12.7 Capacitores en serie y en paralelo
12.8 Constantes de tiempo de circuitos

Ejemplo 26.12 Carga de un capacitor

Un resistor con resistencia 10 MΩ está conectado en serie con un capacitor cuya capacitancia es 1.0 μF y una batería con fem de 12.0 V. Antes de cerrar el interruptor en el momento $t = 0$, el capacitor se descarga. *a*) ¿Cuál es la constante de tiempo? *b*) ¿Qué fracción de la carga final hay en las placas en el momento $t = 46$ s? *c*) ¿Qué fracción de la corriente inicial permanece en $t = 46$ s?

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: Ésta es la misma situación que se ilustra en la figura 26.21, con $R = 10\ \text{M}\Omega$, $C = 1.0\ \mu\text{F}$ y $\mathcal{E} = 12.0$ V. La carga y la corriente varían con el tiempo, según se ilustra en la figura 26.22. Las variables que se buscan son *a*) la constante de tiempo, *b*) la carga q en $t = 46$ s dividida entre la carga final Q_f y *c*) la corriente i en $t = 46$ s dividida entre la corriente inicial i_0.

PLANTEAR: La carga para un capacitor que se está cargando está dada por la ecuación (26.12), y la corriente por la ecuación (26.13). La ecuación (26.14) da la constante de tiempo.

EJECUTAR: *a*) De acuerdo con la ecuación (26.14), la constante de tiempo es

$$\tau = RC = (10 \times 10^6\ \Omega)(1.0 \times 10^{-6}\ \text{F}) = 10\ \text{s}$$

b) A partir de la ecuación (26.12),

$$\frac{q}{Q_f} = 1 - e^{-t/RC} = 1 - e^{-(46\ \text{s})/(10\ \text{s})} = 0.99$$

El capacitor está cargado al 99% después de un tiempo igual a 4.6 RC, o 4.6 constantes de tiempo.

c) De acuerdo con la ecuación (26.13),

$$\frac{i}{I_0} = e^{-4.6} = 0.010$$

Después de 4.6 constantes de tiempo, la corriente ha disminuido al 1.0% de su valor inicial.

EVALUAR: La constante de tiempo es relativamente grande porque la resistencia es muy grande. El circuito cargará con más rapidez si se utiliza una resistencia más pequeña.

Ejemplo 26.13 Descarga de un capacitor

El resistor y el capacitor descritos en el ejemplo 26.12 se reconectan como se ilustra en la figura 26.23. Originalmente, se da al capacitor una carga de 5.0 μF y luego se descarga al cerrar el interruptor en $t = 0$. *a*) ¿En qué momento la carga será igual a 0.50 μC? *b*) ¿Cuál es la corriente en ese momento?

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: Ahora el capacitor se descarga, por lo que la carga q y corriente i varían con el tiempo como se ilustra en la figura 26.24. Las variables que se buscan son *a*) el valor de t en el que $q = 0.50\ \mu$C y *b*) el valor de i en ese momento.

PLANTEAR: La carga está dada por la ecuación (26.16), y la corriente por la ecuación (26.17).

EJECUTAR: *a*) Al despejar el momento t en la ecuación (26.16) , se obtiene:

$$t = -RC \ln \frac{q}{Q_0}$$
$$= -(10 \times 10^6\ \Omega)(1.0 \times 10^{-6}\ \text{F}) \ln \frac{0.50\ \mu\text{C}}{5.0\ \mu\text{C}} = 23\ \text{s}$$

continúa

Esto es 2.3 veces la constante de tiempo $\tau = RC = 10$ s.

b) De la ecuación (26.17), con $Q_0 = 5.0\ \mu\text{C} = 5.0 \times 10^{-6}$ C,

$$i = -\frac{Q_0}{RC}e^{-t/RC} = -\frac{5.0 \times 10^{-6}\ \text{C}}{10\ \text{s}}e^{-2.3} = -5.0 \times 10^{-8}\ \text{A}$$

Cuando el capacitor se está descargando, la corriente tiene el signo opuesto del que tiene cuando el capacitor se está cargando.

EVALUAR: Hubiéramos podido evitar el trabajo de calcular $e^{-t/RC}$ advirtiendo que, en el tiempo en cuestión, $q = 0.10\ Q_0$; según la ecuación (26.16) esto significa que $e^{-t/RC} = 0.10$.

Evalúe su comprensión de la sección 26.4 La energía almacenada en un capacitor es igual a $q^2/2C$. Cuando se descarga un capacitor, ¿qué fracción de la energía inicial permanece después de transcurrido un tiempo igual a una constante de tiempo? i) $1/e$; ii) $1/e^2$; iii) $1 - 1/e$, iv) $(1 - 1/e)^2$; v) la respuesta depende de cuánta energía haya almacenada inicialmente.

26.5 Sistemas de distribución de energía

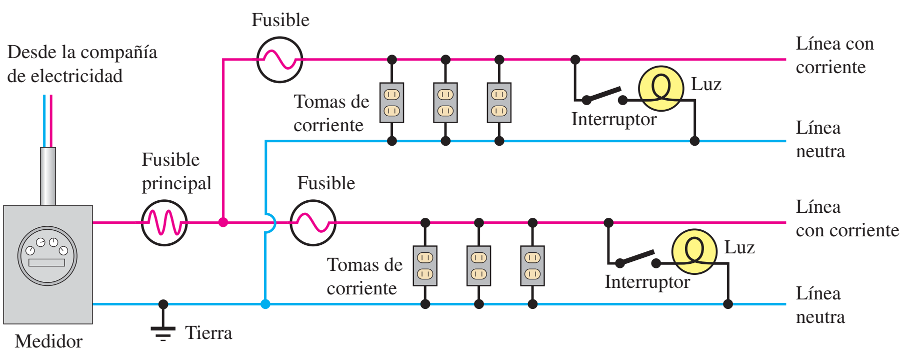
Este capítulo termina con un análisis breve de los sistemas prácticos de distribución de energía eléctrica en hogares y automóviles. Los automóviles emplean corriente directa (cd), en tanto que casi todos los sistemas domésticos, comerciales e industriales usan corriente alterna (ca) por la facilidad para elevar y reducir el voltaje mediante transformadores. La mayoría de los conceptos básicos de cableado se aplican a ambos tipos de sistemas. En el capítulo 31 hablaremos con más detalle de los circuitos de corriente alterna.

Las lámparas, los motores y otros aparatos que operan en el interior de una casa siempre están conectados en *paralelo* a la fuente de energía eléctrica (los cables provenientes de la compañía que suministra la electricidad a los hogares, o los cables de la batería y el alternador de un automóvil). Si los aparatos estuvieran conectados en serie, al apagarse uno se apagarían todos los demás (véase el ejemplo 26.2 de la sección 26.1). La figura 26.25 ilustra la idea básica del cableado de una casa. Un lado de la "línea", como se le llama al par de conductores, se designa como el lado *neutro*; siempre está conectado a "tierra" en el tablero de servicio. Para las viviendas, la *tierra* es un electrodo real insertado en el terreno (que por lo general es un buen conductor) o, en ocasiones, está conectado a la tubería hidráulica de la casa. Los electricistas hablan de los lados "con corriente" y "neutro" de la línea. La mayoría de los sistemas de cableado modernos domésticos tienen *dos* líneas con corriente de polaridad opuesta con respecto a la neutra. Más adelante regresaremos a este detalle.

En Estados Unidos y Canadá, el voltaje doméstico es nominalmente de 120 V, y en Europa con frecuencia es de 240 V. (En el caso de la corriente alterna, que varía en forma sinusoidal con respecto al tiempo, estos números representan el voltaje *medio cuadrático*, o voltaje eficaz, que es $1/\sqrt{2}$ del voltaje máximo. Esto se estudiará con más detalle en la sección 31.1.) La cantidad de corriente I establecida por un aparato dado está determinada por su potencia de alimentación P, dada por la ecuación (25.17): $P = VI$. De ahí que $I = P/V$. Por ejemplo, la corriente en una bombilla de 100 W es

$$I = \frac{P}{V} = \frac{100\ \text{W}}{120\ \text{V}} = 0.83\ \text{A}$$

26.25 Diagrama de las partes de un sistema de cableado de una casa. Sólo se ilustran dos circuitos del ramal; un sistema real podría tener de cuatro a 30 circuitos de ramal. Las bombillas y los aparatos se conectan en las tomas de corriente. No aparecen los alambres de conexión a tierra, que normalmente no conducen corriente.



La potencia de alimentación a esta bombilla en realidad está determinada por su resistencia R. Con base en la ecuación (25.18), que dice que $P = VI = I^2R = V^2/R$ para un resistor, la resistencia de la bombilla a su temperatura de operación es

$$R = \frac{V}{I} = \frac{120\ \text{V}}{0.83\ \text{A}} = 144\ \Omega \qquad \text{o bien,} \qquad R = \frac{V^2}{P} = \frac{(120\ \text{V})^2}{100\ \text{W}} = 144\ \Omega$$

De manera similar, una *waflera* de 1500 W toma una corriente de (1500 W)/(120 V) = 12.5 A, y tiene una resistencia, a su temperatura de operación, de 9.6 Ω. Puesto que la temperatura depende de la resistividad, las resistencias de estos aparatos son considerablemente menores cuando se encuentran fríos. Si se mide con un óhmetro la resistencia de una bombilla de 100 W (cuya pequeña corriente ocasiona muy poco aumento de la temperatura), es probable que se obtenga un valor cercano a 10 Ω. Cuando se enciende una bombilla, esa baja resistencia ocasiona una oleada inicial de corriente hasta que el filamento se calienta. Por eso, una bombilla que está cerca de fundirse casi siempre lo hace en el momento de encenderse.

Sobrecargas en el circuito y cortocircuitos

La corriente máxima disponible desde un circuito individual está limitada por la resistencia de los alambres. Como se dijo en la sección 25.5, la pérdida de potencia I^2R en los alambres eleva la temperatura de éstos, y en casos extremos esto puede provocar un incendio o fundir los alambres. Es común que los cables para las bombillas y tomas de corriente empleen alambres de calibre 12, que tienen un diámetro de 2.05 mm y pueden conducir en forma segura una corriente máxima de 20 A (sin sobrecalentarse). Se emplean calibres mayores, como el 8 (3.26 mm) o 6 (4.11 mm), para aparatos que toman mucha corriente, como estufas eléctricas y secadoras de ropa, y el calibre 2 (6.54 mm) o más grueso se utiliza para los cables principales de entrada a la vivienda.

Los fusibles y los interruptores de circuito, también llamados disyuntores o *breakers*, brindan protección contra sobrecargas y calentamiento excesivo. Un *fusible* contiene un enlace de aleación de plomo y estaño que se funde a temperatura muy baja; el enlace se funde y rompe el circuito cuando se rebasa su corriente nominal (figura 26.26a). Un *interruptor de circuito* es un dispositivo electromecánico que realiza la misma función por medio de una tira electromagnética o bimetálica para "disparar" el interruptor e interrumpir el circuito cuando la corriente excede un valor específico (figura 26.26b). Los interruptores de circuito tienen la ventaja de que se pueden reconectar después de haberse disparado, mientras que un fusible fundido debe sustituirse. Sin embargo, a veces es más confiable la operación de los fusibles que la de los interruptores de circuito.

Si el sistema tiene fusibles y se conectan a una misma toma demasiados aparatos que toman mucha corriente, el fusible se quemará. *Nunca* sustituya un fusible por otro de mayor capacidad, pues se arriesga a que los cables se calienten en exceso y provoquen un incendio. La única solución segura es distribuir los equipos en varios circuitos. Es frecuente que las cocinas modernas tengan tres o cuatro circuitos separados de 20 A.

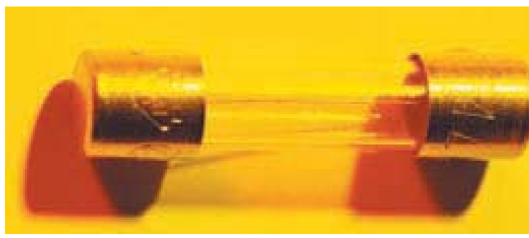
El contacto entre los lados con corriente y neutral de la línea provoca un *cortocircuito*. Esa situación, que puede originarse por un aislamiento defectuoso o por algún tipo de desperfecto mecánico, ofrece una trayectoria de muy baja resistencia a la corriente y permite que fluya una corriente muy grande que rápidamente fundiría los alambres y quemaría su aislamiento si un fusible o un interruptor de circuito no interrumpiera la corriente (véase el ejemplo 25.11 en la sección 25.5). Una situación igualmente peligrosa es un cable roto que interrumpa la trayectoria de la corriente, lo que crearía un *circuito abierto*. Esto es peligroso ya que en el punto de contacto intermitente se producen chispas.

En las prácticas aceptadas de cableado, un fusible o interruptor *sólo* se coloca en el lado con corriente de la línea, nunca en el neutral, pues de otro modo si ocurriera un cortocircuito debido a un mal aislamiento u otro desperfecto, el fusible del lado de tierra podría quemarse. El lado con corriente seguiría en operación y representaría un peligro de descarga eléctrica si se toca el conductor vivo y un objeto conectado a tierra, como un tubo de agua. Por razones similares, el interruptor de pared de un elemento de iluminación siempre está en el lado cargado de la línea, nunca en el neutro.

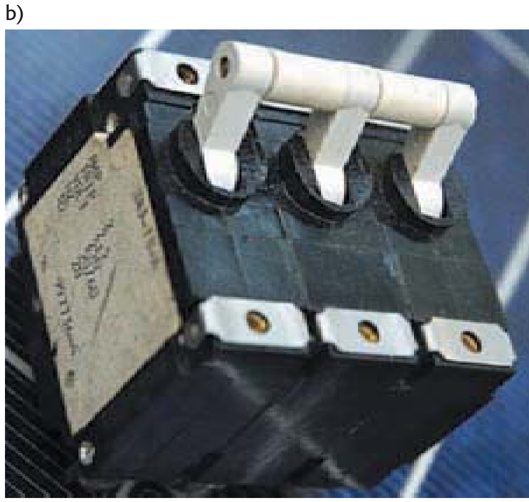
Se tiene protección adicional contra los accidentes provocados por descargas, si se emplea un tercer conductor llamado *alambre de conexión a tierra*, que se incluye en

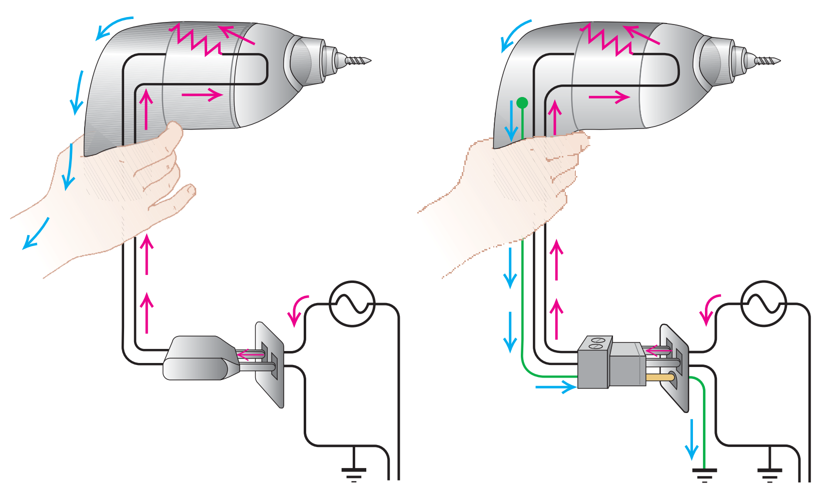
26.26 a) Un exceso de corriente fundiría el alambre delgado hecho de una aleación de plomo y estaño que corre a lo largo de un fusible, en el interior de la carcasa transparente. b) El interruptor de este disyuntor se disparará si se excede la corriente máxima permisible.

a)



b)





26.27 a) Si un taladro que funciona mal se conecta a un enchufe de pared con una clavija de dos puntas, el operador podría recibir una descarga. b) Cuando el taladro defectuoso se conecta con una clavija de tres puntas, el operador no recibiría descarga porque la carga eléctrica fluiría a través del alambre de conexión a tierra (en color verde) hacia la tercera punta para luego pasar al terreno y no al cuerpo de la persona. Si la corriente a tierra es apreciable, el fusible se quema.

todos los sistemas de cableado actuales. Este conductor corresponde a la punta larga y redonda o con forma de U de la clavija de tres puntas de un aparato o de una herramienta eléctrica. Se conecta al lado neutro de la línea en el tablero de servicio. Normalmente, el alambre de conexión a tierra no conduce corriente, sino que conecta a tierra la carcasa o el bastidor metálico del dispositivo. Si un conductor del lado con corriente de la línea hace contacto de manera accidental con el bastidor o la carcasa, el conductor de conexión a tierra provee una trayectoria para la corriente y el fusible se quema. Sin el alambre de conexión a tierra, el bastidor estaría "cargado", es decir, a un potencial de 120 V más alto con respecto a la tierra. En esas condiciones, si una persona toca el bastidor y un tubo de agua (o incluso el piso húmedo de un sótano) al mismo tiempo, podría recibir una descarga peligrosa (figura 26.27). En ciertas situaciones, en especial cuando las tomas se localizan en el exterior o cerca de un grifo o de tuberías de agua, se utiliza un tipo especial de interruptor de circuito llamado *interruptor de falla de tierra* (FGI o GFCI, por las siglas de *ground-fault interrupter*). Este dispositivo detecta la diferencia en la corriente entre los conductores con corriente y neutro (que normalmente es igual a cero), y se dispara cuando esta diferencia supera un valor muy pequeño, comúnmente de 5 mA.

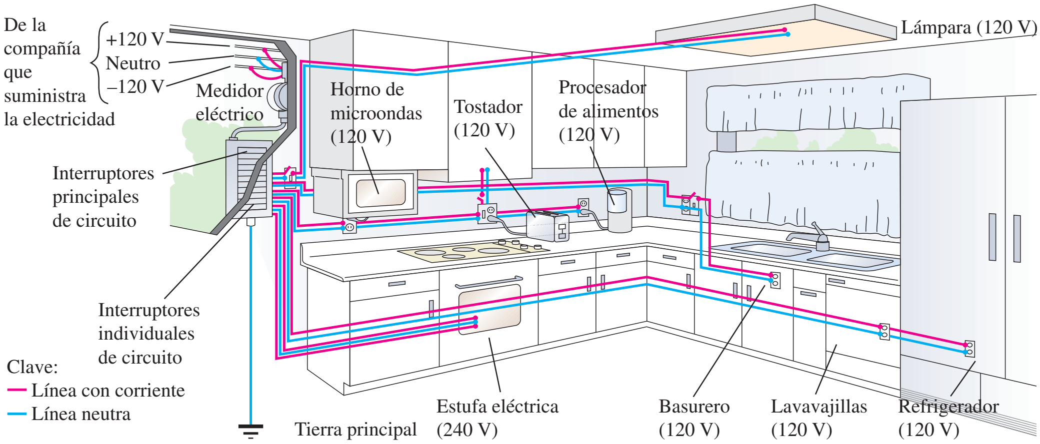
Cableado de viviendas y automóviles

La mayoría de los sistemas modernos de cableado doméstico en realidad utilizan una versión un poco distinta del que se acaba de describir. La compañía que suministra la electricidad proporciona *tres* conductores (figura 26.28). Uno es neutro y los otros dos están a 120 V con respecto al neutro pero con polaridad opuesta, lo que da un voltaje de 240 V entre ellos. La compañía llama a esto una *línea de tres hilos*, en contraste con la línea de 120 V de dos hilos (más uno de conexión a tierra) ya descrita. Con una línea de tres hilos es posible conectar lámparas y aparatos de 120 V entre el conductor neutro y cualquiera de los conductores con carga, y los dispositivos de alta potencia que requieran 240 V, como estufas eléctricas y secadoras de ropa, se conectan entre los dos alambres con carga.

Para ayudar a evitar los errores de cableado, los sistemas domésticos utilizan un código estandarizado de colores en el que el lado con corriente de una línea tiene aislamiento negro (negro y rojo para los dos lados de una línea de 240 V), el lado neutro tiene aislamiento blanco y el conductor de conexión a tierra está desnudo o tiene aislamiento verde. Pero en los aparatos y equipos electrónicos, los lados de las líneas a tierra y neutro por lo general son negros. ¡Cuidado! (Nuestras ilustraciones no siguen este código, sino que usan el rojo para la línea con carga y azul para la neutra.)

Todo el análisis anterior se aplica directamente al cableado de los automóviles. El voltaje es de aproximadamente 13 V (corriente directa); la potencia la suministran la batería y el alternador, que carga la batería cuando el motor está en marcha. El lado

26.28 Diagrama de un sistema de cableado común de 120-240 V en una cocina. No se ilustran los alambres de conexión a tierra. Para cada línea, el lado con corriente es de color rojo, y el lado neutro se muestra en azul. (En los sistemas reales de cableado doméstico se emplea un código de colores distinto.)



neutro de cada circuito se conecta a la carrocería y al bastidor del vehículo. Para este voltaje tan bajo no se requiere un conductor adicional de conexión a tierra como medida de seguridad. La disposición de los fusibles o interruptores de circuito es la misma, en principio, que en el cableado doméstico. A causa del bajo voltaje (menos energía por carga), se requiere más corriente (mayor número de cargas por segundo) para obtener la misma potencia; un faro de 100 W requiere una corriente de alrededor de (100 W)/(13 V) = 8 A.

Aunque en el análisis anterior hablamos de *potencia*, lo que compramos a la compañía de electricidad en realidad es *energía*. La potencia es energía transferida por unidad de tiempo; esto significa que la energía es la potencia media multiplicada por tiempo. La unidad habitual de la energía que vende la empresa es el kilowatt-hora $(1\ \text{kW}\cdot\text{h})$:

$$1\ \text{kW}\cdot\text{h} = (10^3\ \text{W})(3600\ \text{s}) = 3.6\times10^6\ \text{W}\cdot\text{s} = 3.6\times10^6\ \text{J}$$

Lo normal es que un kilowatt-hora cueste de 2 a 10 centavos de dólar, en función de la localidad y cantidad de energía consumida. Para operar continuamente una waflera de 1500 W (1.5 kW) durante 1 hora se requieren 1.5 kW · h de energía; a 10 centavos por kilowatt-hora, el costo de la energía es de 15 centavos de dólar. El costo de operar una lámpara o un aparato durante un tiempo específico se calcula del mismo modo si se conoce la tarifa eléctrica. Sin embargo, muchos utensilios de cocina (incluidas las wafleras) se encienden y se apagan para mantener una temperatura constante, por lo que el consumo medio de potencia suele ser menor que la potencia nominal indicada en el aparato.

Ejemplo 26.14 Circuito en la cocina

En el mismo circuito de 20 A y 120 V se conectan un tostador de 1800 W, un sartén eléctrico de 1.3 kW y una lámpara de 100 W. *a*) ¿Cuánta corriente toma cada aparato y cuál es su resistencia correspondiente? *b*) ¿Esta combinación hará que se queme el fusible?

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: Cuando se conectan en el mismo circuito, los tres aparatos están en paralelo. El voltaje a través de cada uno es $V = 120$ V.

PLANTEAR: Se calcula la corriente I en cada equipo por medio de la relación $P = VI$, donde P es la potencia de alimentación del dispositivo. Para obtener la resistencia R de cada uno se usa la expresión $P = V^2/R$.

EJECUTAR: *a*) Para simplificar los cálculos de la corriente y resistencia se observa que $I = P/V$ y $R = V^2/P$. Entonces,

$$I_{\text{tostador}} = \frac{1800\ \text{W}}{120\ \text{V}} = 15\ \text{A} \qquad R_{\text{tostador}} = \frac{(120\ \text{V})^2}{1800\ \text{W}} = 8\ \Omega$$

$$I_{\text{sartén}} = \frac{1300\ \text{W}}{120\ \text{V}} = 11\ \text{A} \qquad R_{\text{sartén}} = \frac{(120\ \text{V})^2}{1300\ \text{W}} = 11\ \Omega$$

$$I_{\text{lámpara}} = \frac{100\ \text{W}}{120\ \text{V}} = 0.83\ \text{A} \qquad R_{\text{lámpara}} = \frac{(120\ \text{V})^2}{100\ \text{W}} = 144\ \Omega$$

Para un voltaje constante, el dispositivo con la *menor* resistencia (el tostador en este caso) toma la mayor cantidad de corriente y recibe la mayor potencia.

continúa

b) La corriente total a través de la línea es la suma de las corrientes tomadas por los tres aparatos:

$$I = I_{\text{tostador}} + I_{\text{sartén}} + I_{\text{lámpara}} = 15\text{ A} + 11\text{ A} + 0.83\text{ A} = 27\text{ A}$$

Esto rebasa la capacidad nominal de 20 A en la línea, por lo que el fusible se quemará.

EVALUAR: También se podría calcular la corriente si primero se obtiene la resistencia equivalente de los tres aparatos en paralelo:

$$\begin{aligned}\frac{1}{R_{\text{eq}}} &= \frac{1}{R_{\text{tostador}}} + \frac{1}{R_{\text{sartén}}} + \frac{1}{R_{\text{lámpara}}}\\ &= \frac{1}{8\ \Omega} + \frac{1}{11\ \Omega} + \frac{1}{144\ \Omega} = 0.22\ \Omega^{-1}\\ R_{\text{eq}} &= 4.5\ \Omega\end{aligned}$$

Entonces, el total de corriente es $I = V/R_{\text{eq}} = (120\text{ V})/(4.5\ \Omega) = 27\text{ A}$, como antes. Un tercer modo de determinar el valor de I es usar la expresión $I = P/V$ y simplemente dividir la potencia total entregada a los tres aparatos entre el voltaje.

$$\begin{aligned}I &= \frac{P_{\text{tostador}} + P_{\text{sartén}} + P_{\text{lámpara}}}{V} = \frac{1800\text{ W} + 1300\text{ W} + 100\text{ W}}{120\text{ V}}\\ &= 27\text{ A}\end{aligned}$$

Demandas de corriente como ésta se encuentran a diario en las cocinas; por esa razón, las cocinas modernas tienen más de un circuito de 20 A. En la práctica real, el tostador y el sartén eléctrico deberían conectarse en circuitos distintos, de manera que la corriente en cada uno estaría con seguridad por debajo de la capacidad nominal de 20 A.

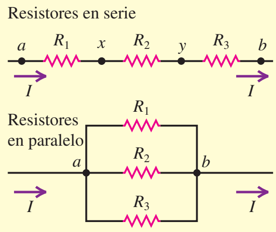
Evalúe su comprensión de la sección 26.5 Para impedir que se queme el fusible del ejemplo 26.14, un técnico electricista lo sustituye por otro de 40 A. ¿Es razonable hacer esto?

CAPÍTULO 26 RESUMEN

Resistores en serie y en paralelo: Cuando se conectan en serie varios resistores $R_1, R_2, R_3, \ldots$, la resistencia equivalente R_{eq} es la suma de las resistencias individuales. En una conexión en serie fluye la misma *corriente* a través de todos los resistores. Cuando se conectan en paralelo varios resistores, el recíproco de la resistencia equivalente R_{eq} es la suma del recíproco de las resistencias individuales. Todos los resistores en una conexión en paralelo tienen la misma *diferencia de potencial* entre sus terminales. (Véanse los ejemplos 26.1 y 26.2.)

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 + \cdots \quad (26.1)$$
(resistores en serie)

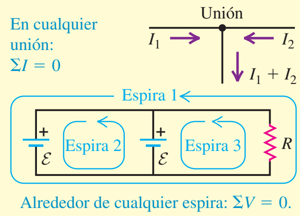
$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \cdots \quad (26.2)$$
(resistores en paralelo)



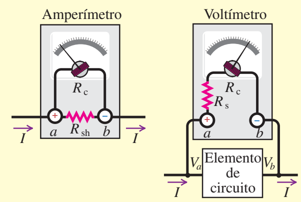
Reglas de Kirchhoff: La regla de Kirchhoff de las uniones se basa en la conservación de la carga. Establece que la suma algebraica de las corrientes en una unión debe ser igual a cero. La regla de Kirchhoff de las espiras se basa en la conservación de la energía y la naturaleza conservativa de los campos electrostáticos. Dice que la suma algebraica de las diferencias de potencial alrededor de una espira debe ser igual a cero. Al aplicar las reglas de Kirchhoff es esencial tener cuidado con los signos. (Véanse los ejemplos 26.3 a 26.7.)

$$\sum I = 0 \quad \text{(regla de las uniones)} \quad (26.5)$$

$$\sum V = 0 \quad \text{(regla de las espiras)} \quad (26.6)$$



Instrumentos de medición eléctrica: En un galvanómetro de d'Arsonval, la desviación es proporcional a la corriente en la bobina. Para tener una escala de corriente más amplia se agrega un resistor de derivación, de manera que parte de la corriente se desvíe de la bobina del medidor. Un instrumento de este tipo se llama amperímetro. Si la bobina y cualquier resistencia adicional en serie obedecen la ley de Ohm, el instrumento también se puede calibrar para que lea diferencias de potencial o voltaje, en cuyo caso recibe el nombre de voltímetro. Un buen amperímetro tiene resistencia muy baja; un buen voltímetro tiene resistencia muy alta. (Véanse los ejemplos 26.8 a 26.11.)



Circuitos *R-C*: Cuando un capacitor se carga mediante una batería en serie con un resistor, la corriente y la carga en el capacitor no son constantes. La carga tiende a su valor final de manera asintótica, y la corriente tiende a cero del mismo modo. La carga y la corriente en el circuito están dadas por las ecuaciones (26.12) y (26.13). Después del tiempo $\tau = RC$, la carga se ha acercado a menos de $1/e$ de su valor final. Este tiempo se llama constante de tiempo o tiempo de relajación del circuito. Cuando se descarga el capacitor, la carga y la corriente están dadas como función del tiempo por las ecuaciones (26.16) y (26.17). La constante de tiempo es la misma en la carga y en la descarga. (Véanse los ejemplos 26.12 y 26.13.)

Capacitor en carga:

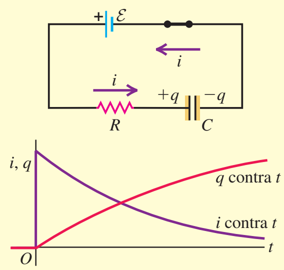
$$q = C\mathcal{E}\left(1 - e^{-t/RC}\right) = Q_f\left(1 - e^{-t/RC}\right) \quad (26.12)$$

$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{\mathcal{E}}{R}e^{-t/RC} = I_0 e^{-t/RC} \quad (26.13)$$

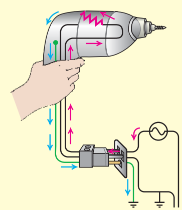
Capacitor en descarga:

$$q = Q_0 e^{-t/RC} \quad (26.16)$$

$$i = \frac{dq}{dt} = -\frac{Q_0}{RC}e^{-t/RC} = I_0 e^{-t/RC} \quad (26.17)$$



Cableado de una casa: En los sistemas de cableado doméstico, los distintos aparatos eléctricos están conectados en paralelo a través de la línea de energía, que consiste en un par de conductores, uno "con corriente" y otro "neutro". Además, por seguridad se incluye un alambre "a tierra". La corriente máxima permisible en un circuito está determinada por el tamaño de los alambres y la temperatura máxima que pueden tolerar. Los fusibles e interruptores de circuito dan seguridad contra un exceso de corriente y el incendio que podría resultar. (Véase el ejemplo 26.14.)



Términos clave

corriente directa, *881*
corriente alterna, *881*
en serie, *882*
en paralelo, *882*
resistencia equivalente, *882*
unión, *887*
espira, *887*
regla de Kirchhoff de las uniones, *887*
regla de Kirchhoff de las espiras, *887*
galvanómetro de d'Arsonval, *891*
amperímetro, *892*
resistor de derivación, *892*
voltímetro, *893*
óhmetro, *895*
circuito *R-C*, *896*
constante de tiempo (tiempo de relajación), *898*

Respuesta a la pregunta de inicio de capítulo ?

La diferencia de potencial es la misma a través de resistores conectados en paralelo. Sin embargo, si las resistencias R son diferentes, hay una corriente distinta I a través de cada resistor: $I = V/R$.

Respuestas a las preguntas de Evalúe su comprensión

26.1 Respuesta: *a*), *c*), *d*), *b*) He aquí por qué: los tres resistores en la figura 26.1 están conectados en serie, por lo que $R_{eq} = R + R + R = 3R$. En la figura 26.1b, los tres resistores están en paralelo, de manera que $1/R_{eq} = 1/R + 1/R + 1/R = 3/R$ y $R_{eq} = 3R$. En la figura 26.1c los resistores segundo y tercero están en paralelo, por lo que su resistencia equivalente R_{23} está dada por $1/R_{23} = 1/R + 1/R = 2/R$; por lo tanto, $R_{23} = R/2$. Esta combinación está en serie con el primer resistor, por lo que los tres resistores juntos tienen resistencia equivalente $R_{eq} = R + R/2 = 3R/2$. En la figura 26.1d, los resistores segundo y tercero están en serie, de manera que su resistencia equivalente es $R_{23} = R + R = 2R$. Esta combinación está en paralelo con el primer resistor, por lo que la resistencia equivalente de la combinación de los tres resistores está dada por $1/R_{eq} = 1/R + 1/2R = 3/2R$. De ahí que $R_{eq} = 2R/3$.

26.2 Respuesta: espira *cbdac* La ecuación (2) menos la (1) da $-I_2(1\ \Omega) - (I_2 + I_3)(2\ \Omega) + (I_1 - I_3)(1\ \Omega) + I_1(1\ \Omega) = 0$. Esta ecuación se puede obtener si se aplica la regla de las espiras alrededor de la trayectoria de c a b a d a a y a c en la figura 26.12. Ésta no es una ecuación nueva, por lo que no habría ayudado en la solución del ejemplo 26.6.

26.3 Respuestas: *a*) ii), *b*) iii) Un amperímetro siempre debe colocarse en serie con el elemento de interés en el circuito, y un voltímetro siempre debe estar en paralelo. Idealmente, el amperímetro tendría una resistencia de cero y el voltímetro tendría una resistencia infinita con la finalidad de que su presencia no tuviera efecto ni en la corriente ni el voltaje a través del resistor. Ninguna de estas idealizaciones es posible, pero la resistencia del amperímetro debe ser mucho menor de 2 Ω y la resistencia del voltímetro debe ser mucho mayor de 2 Ω.

26.4 Respuesta: ii) Después de una constante de tiempo, $t = RC$, y la carga inicial Q_0 ha disminuido a $Q_0 e^{-t/RC} = Q_0 e^{-RC/RC} = Q_0 e^{-1} = Q_0/e$. De ahí que la energía almacenada haya decrecido de $Q_0^2/2C$ a $(Q_0/e)^2/2C = Q_0^2/2Ce^2$, una fracción $1/e^2 = 0.135$ de su valor inicial. Este resultado no depende del valor inicial de la energía.

26.5 Respuesta: no Esto es algo muy peligroso de hacer. El fusible permitiría que hubiera corrientes de hasta 40 A, lo doble del valor nominal del cableado. La cantidad de potencia $P = I^2R$ disipada en una sección de cable podría ser en ese caso de hasta cuatro veces el valor nominal, por lo que los alambres se calentarían mucho y provocarían un incendio.

PROBLEMAS

Para las tareas asignadas por el profesor, visite **www.masteringphysics.com**

Preguntas para análisis

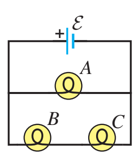
P26.1. ¿En cuál bombilla de 120 V el filamento tiene mayor resistencia: en una de 60 W o en una de 120 W? Si las dos bombillas se conectan en serie a una línea de 120 V, ¿a través de cuál bombilla habrá una mayor caída de voltaje? ¿Y si se conectan en paralelo? Explique su razonamiento.

P26.2. Dos bombillas de 120 V, una de 25 W y otra de 200 W, se conectaron en serie a través de una línea de 240 V. En ese momento parecía una buena idea, pero una bombilla se fundió casi de inmediato. ¿Cuál fue y por qué?

P26.3. Se conecta un número de bombillas idénticas a una batería de linterna. *a*) ¿Qué pasa con el brillo de cada bombilla a medida que se agregan más y más de ellas al circuito, si se conectan i) en serie, y ii) en paralelo? *b*) ¿La batería durará más si las bombillas están en serie o en paralelo? Explique su razonamiento.

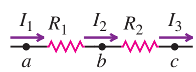
P26.4. En el circuito que se ilustra en la figura 26.29 se conectan tres bombillas idénticas a una batería de linterna. ¿Cómo se compara la luminosidad de las bombillas? ¿Cuál es la más luminosa? ¿A través de cuál bombilla pasa la mayor corriente? ¿Cuál bombilla tiene la mayor diferencia de potencial entre sus terminales? ¿Qué pasa si la bombilla A se desenrosca de su entrada? ¿Y si lo mismo se hace con la bombilla B? ¿Y con la C? Explique su razonamiento.

Figura 26.29 Pregunta P26.4.



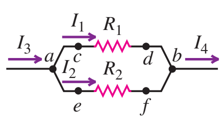
P26.5. Si dos resistores R_1 y R_2 ($R_2 > R_1$) están conectados en serie como se ilustra en la figura 26.30, ¿cuál de los siguientes enunciados es verdadero? Dé una justificación para su respuesta. *a*) $I_1 = I_2 = I_3$. *b*) La corriente es mayor en R_1 que en R_2. *c*) El consumo de potencia eléctrica es el mismo para ambos resistores. *d*) El consumo de potencia eléctrica es mayor en R_2 que en R_1. *e*) La caída de potencial es la misma a través de ambos resistores. *f*) El potencial en el punto a es el mismo que en el punto c. *g*) El potencial en el punto b es menor que en el punto c. *h*) El potencial en el punto c es menor que en el punto b.

Figura 26.30 Pregunta P26.5.



P26.6. Si dos resistores R_1 y R_2 ($R_2 > R_1$) se conectan en paralelo como se ilustra en la figura 26.31, ¿cuál de los siguientes enunciados debe ser verdad? En cada caso justifique su respuesta. *a*) $I_1 = I_2$. *b*) $I_3 = I_4$. *c*) La corriente es mayor en R_1 que en R_2. *d*) La tasa de consumo de energía eléctrica es la misma para ambos resistores. *e*) La tasa de consumo de energía eléctrica es mayor en R_2 que en R_1. *f*) $V_{cd} = V_{ef} = V_{ab}$. *g*) El punto c está a un potencial mayor que el punto d. *h*) El punto f está a un potencial mayor que el punto e. *i*) El punto c está a un potencial mayor que el punto e.

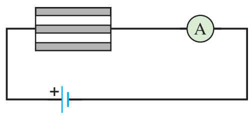
Figura 26.31 Pregunta P26.6.



P26.7. ¿Por qué baja la intensidad de la luz de los faros de un automóvil cuando éste se enciende?

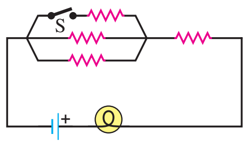
P26.8. Un resistor consiste en tres tiras de metal idénticas conectadas como se ilustra en la figura 26.32. Si se corta una de ellas, ¿la lectura del amperímetro registra un incremento, una disminución o permanece sin cambio? ¿Por qué?

Figura **26.32** Pregunta P26.8.



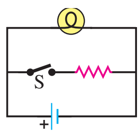
P26.9. Se conecta una bombilla en el circuito que se ilustra en la figura 26.33. Si se cierra el interruptor S, ¿la luminosidad de la bombilla aumenta, disminuye o permanece igual? Explique por qué.

Figura **26.33** Pregunta P26.9.



P26.10. Una batería real con resistencia interna que no es despreciable se conecta a través de una bombilla, como se indica en la figura 26.34. Cuando se cierra el interruptor S, ¿qué pasa con la luminosidad del foco? ¿Por qué?

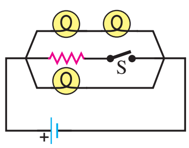
Figura **26.34** Pregunta P26.10.



P26.11. Si la batería de la pregunta para análisis P26.10 es ideal sin resistencia interna, ¿qué ocurrirá con la luminosidad de la bombilla cuando se cierre S? ¿Por qué?

P26.12. Para el circuito que se ilustra en la figura 26.35, ¿qué le sucede a la brillantez de las bombillas cuando se cierra el interruptor S si la batería *a*) no tiene resistencia interna y *b*) tiene resistencia interna que no es despreciable? Explique por qué.

Figura **26.35** Pregunta P26.12



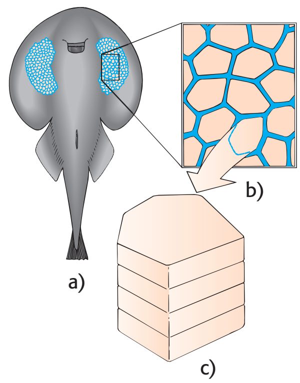
P26.13. ¿Es posible conectar juntos resistores en forma que no se puedan reducir a alguna combinación de conexiones en serie y en paralelo? Si es así, dé ejemplos, y si no, diga por qué.

P26.14. El sentido de la corriente en una batería se invierte si se conecta a una segunda batería de mayor fem con las terminales positivas de las dos baterías juntas. Cuando el sentido de la corriente de una batería se invierte, ¿su fem también lo hace? ¿Por qué?

P26.15. En un flash de dos celdas, las baterías por lo general están conectadas en serie. ¿Por qué no se conectan en paralelo? ¿Qué posible ventaja habría si se conectaran varias baterías idénticas en paralelo?

P26.16. Las rayas eléctricas (peces del género *Torpedo*) disparan descargas eléctricas para aturdir a sus presas y disuadir a sus depredadores. (En la antigua Roma, los médicos practicaban una forma primitiva de terapia de electrochoques colocando rayas sobre sus pacientes para curar jaquecas y gota.) La figura 26.36a muestra una *Torpedo* vista desde abajo. El voltaje se produce en celdas delgadas, parecidas a obleas, llamadas *electrocitos*, cada una de las cuales actúa como batería con fem de alrededor de 10^{-4} V. En la parte inferior de la raya (figura 26.36b) están apilados lado a lado los electrocitos; en ese arreglo, la cara positiva de cada electrocito toca la cara negativa del siguiente electrocito (figura 26.36c). ¿Cuál es la ventaja de que los electrocitos estén apilados así? ¿Y de que esas pilas estén una al lado de otras?

Figura **26.36** Pregunta P26.16.



P26.17. La fem de una batería de linterna se mantiene aproximadamente constante con el tiempo, pero su resistencia interna se incrementa con el tiempo y el uso. ¿Qué clase de instrumento se emplearía para probar qué tan nueva es una batería?

P26.18. ¿Es posible tener un circuito en el que la diferencia de potencial a través de las terminales de una batería en el circuito sea igual a cero? Si así fuera, dé un ejemplo. Si no, explique por qué.

P26.19. Verifique que la constante de tiempo *RC* tiene unidades de tiempo.

P26.20. Para resistencias muy grandes es fácil construir circuitos *R-C* que tengan constantes de tiempo de varios segundos o minutos. ¿Cómo se utilizaría este hecho para medir resistencias muy grandes, del tipo que son demasiado grandes como para medirlas con métodos más convencionales?

P26.21. Cuando un capacitor, una batería y un resistor se conectan en serie, ¿el resistor afecta la carga máxima que se almacena en el capacitor? ¿Por qué? ¿Qué finalidad tiene el resistor?

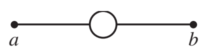
P26.22. Cuanto más grande es el diámetro del alambre utilizado en los sistemas de cableado domésticos, mayor es la corriente máxima que puede transportar con seguridad. ¿Por qué? ¿La corriente máxima permisible depende de la longitud del alambre? ¿Depende del material del que esté hecho el alambre? Explique su razonamiento.

Ejercicios

Sección 26.1 Resistores en serie y en paralelo

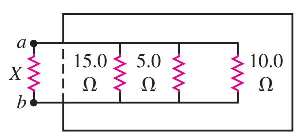
26.1. Un alambre uniforme de resistencia *R* se corta en tres piezas de igual longitud. Una de ellas se dobla en círculo y se conecta entre las otras dos (figura 26.37). ¿Cuál es la resistencia entre los extremos opuestos *a* y *b*?

Figura **26.37** Ejercicio 26.1.



26.2. Una parte de máquina tiene un resistor *X* que sobresale a través de una abertura lateral. Este resistor está conectado a otros tres resistores, como se ilustra en la figura 26.38. Un óhmetro conectado a través de *a* y *b* da una lectura de 2.00 Ω. ¿Cuál es la resistencia de *X*?

Figura **26.38** Ejercicio 26.2.

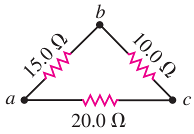


26.3. *a*) Demuestre que cuando dos resistores se conectan en paralelo, la resistencia equivalente de la combinación siempre es menor que la del resistor más pequeño. *b*) Generalice el resultado del inciso *a*) para *N* resistores.

26.4. Un resistor de 32 Ω y otro de 20 Ω están conectados en paralelo, y la combinación se conecta a través de una línea de 240 V de cd. *a*) ¿Cuál es la resistencia de la combinación en paralelo? *b*) ¿Cuál es la corriente total a través de la combinación en paralelo? *c*) ¿Cuál es la corriente que pasa a través de cada resistor?

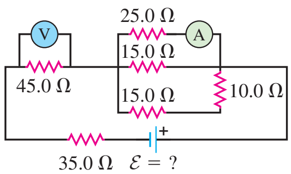
26.5. En la figura 26.39 se muestra un arreglo triangular de resistores. ¿Qué corriente tomaría este arreglo desde una batería de 35.0 V con resistencia interna despreciable, si se conecta a través de *a*) *ab*; *b*) *bc*; *c*) *ac*? *d*) Si la batería tiene una resistencia interna de 3.00 Ω, ¿qué corriente tomaría el arreglo si la batería se conectara a través de *bc*?

Figura 26.39 Ejercicio 26.5.



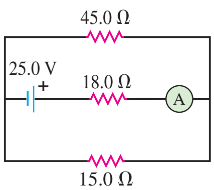
26.6. Para el circuito que se presenta en la figura 26.40, los dos medidores son ideales, la batería no tiene resistencia interna apreciable y el amperímetro da una lectura de 1.25 A. *a*) ¿Cuál es la lectura del voltímetro? *b*) ¿Cuál es la fem $\mathcal{E}$ de la batería?

Figura 26.40 Ejercicio 26.6.



26.7. Para el circuito que se ilustra en la figura 26.41, determine la lectura del amperímetro ideal si la batería tiene una resistencia interna de 3.26 Ω.

Figura 26.41 Ejercicio 26.7.



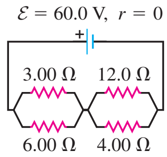
26.8. Tres resistores con resistencias de 1.60 Ω, 2.40 Ω y 4.80 Ω están conectados en paralelo a una batería de 28.0 V que tiene resistencia interna despreciable. Calcule *a*) la resistencia equivalente de la combinación; *b*) la corriente en cada resistor; *c*) la corriente total a través de la batería; *d*) el voltaje a través de cada resistor; *e*) la potencia disipada en cada resistor. *f*) ¿Cuál resistor disipa la mayor cantidad de potencia: el de mayor resistencia o el de menor resistencia? Explique por qué debería ser así.

26.9. Ahora, los tres resistores del ejercicio 26.8 están conectados en serie a la misma batería. Responda las mismas preguntas para esta situación.

26.10. Potencia nominal de un resistor. La *potencia nominal* de un resistor es la potencia máxima que éste puede disipar de forma segura sin que se eleve demasiado la temperatura para no causar daño al resistor. *a*) Si la potencia nominal de un resistor de 15 kΩ es de 5.0 W, ¿cuál es la diferencia de potencial máxima permisible a través de las terminales del resistor? *b*) Un resistor de 9.0 kΩ va a conectarse a través de una diferencia de potencial de 120 V. ¿Qué potencia nominal se requiere? *c*) A través de una diferencia de potencial variable se conectan en serie dos resistores, uno de 100.0 Ω y otro de 150.0 Ω, ambos con potencia nominal de 2.00 W. ¿Cuál es la máxima diferencia de potencial que se puede establecer sin que se caliente en exceso ninguno de los resistores, y cuál es la tasa de calentamiento generado en cada uno en estas condiciones?

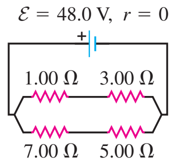
26.11. Calcule la resistencia equivalente de la red de la figura 26.42, y obtenga la corriente en cada resistor. La batería tiene una resistencia interna despreciable.

Figura 26.42 Ejercicio 26.11.



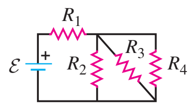
26.12. Calcule la resistencia equivalente de la red de la figura 26.43, y determine la corriente en cada resistor. La batería tiene una resistencia interna despreciable.

Figura 26.43 Ejercicio 26.12.



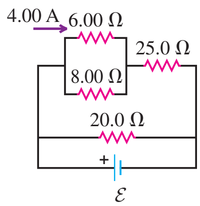
26.13. En el circuito de la figura 26.44, cada resistor representa una bombilla. Sea $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 4.50\ \Omega$, y $\mathcal{E} = 9.00$ V. *a*) Calcule la corriente en cada bombilla. *b*) Encuentre la potencia disipada por cada bombilla. ¿Cuál, o cuáles, de éstas es la más brillante? *c*) Ahora se retira la bombilla R_4 del circuito y deja un hueco en el alambre en la posición en que estaba. Ahora, ¿cuál es la corriente en cada una de las bombillas restantes R_1, R_2 y R_3? *d*) Sin la bombilla R_4, ¿cuál es la potencia disipada en cada una de las bombillas restantes? *e*) Como resultado de la remoción de R_4, ¿cuál(es) bombilla(s) brilla(n) más? ¿Cuál(es) brilla(n) menos? Analice por qué hay diferentes efectos en las distintas bombillas.

Figura 26.44 Ejercicio 26.13.



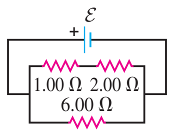
26.14. Considere el circuito de la figura 26.45. La corriente a través del resistor de 6.00 Ω es de 4.00 A, en el sentido que se indica. ¿Cuáles son las corrientes a través de los resistores de 25.0 Ω y 20.0 Ω?

Figura 26.45 Ejercicio 26.14.



26.15. En el circuito que se aprecia en la figura 26.46, el voltaje a través del resistor de 2.00 Ω es de 12.0 V. ¿Cuáles son los valores de la fem de la batería y de la corriente a través del resistor de 6.00 Ω?

Figura 26.46 Ejercicio 26.15.



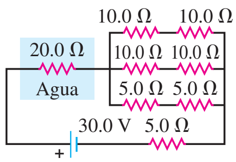
26.16. Bombillas de tres intensidades. Una bombilla de tres intensidades tiene tres niveles de luminosidad (baja, media y alta), pero sólo dos filamentos. *a*) Una bombilla de tres intensidades particular conectada a través de una línea de 120 V puede disipar 60 W, 120 W o 180 W. Describa cómo están arreglados los dos filamentos de la bombilla y calcule la resistencia de cada una. *b*) Suponga que se funde el filamento con la resistencia mayor. ¿Cuánta potencia se disipará en cada una de las tres modalidades de luminosidad (baja, media y alta)? *c*) Repita el inciso *b*) para la situación en que se funde el filamento con la menor resistencia.

26.17. Bombillas en serie y en paralelo. Dos bombillas tienen resistencias de 400 Ω y 800 Ω. Si están conectadas en serie a través de una línea de 120 V, calcule *a*) la corriente que pasa por cada bombilla; *b*) la potencia disipada por cada una; *c*) el total de potencia disipada en ambas bombillas. Ahora las bombillas se conectan en paralelo a través de la línea de 120 V. Obtenga *d*) la corriente a través de cada bombilla; *e*) la potencia disipada en cada bombilla; *f*) la potencia total que se disipa en las dos bombillas. *g*) En cada situación, ¿cuál es la bombilla más luminosa? *h*) ¿En cuál situación hay una salida total mayor de luz de ambas bombillas combinadas?

26.18. Bombillas en serie. Un bombilla de 60 W y 120 V está conectada en serie con otra de 200 W y 120 V, a través de una línea de 240 V. Suponga que la resistencia de cada bombilla no varía con la corriente (*Nota:* esta descripción de una bombilla da la potencia que disipa cuando se conecta a una diferencia de potencial dada; es decir, una bombilla de 25 W y 120 V disipa 25 W cuando está conectada a una línea de 120 V.) *a*) Obtenga la corriente a través de las bombillas. *b*) Encuentre la potencia disipada en cada bombilla. *c*) Una de las bombillas se funde rápido. ¿Cuál fue y por qué?

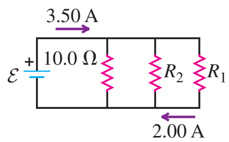
26.19. En el circuito de la figura 26.47, un resistor de 20.0 Ω está dentro de 100 g de agua pura rodeada por espuma de poliestireno. Si el agua inicialmente está a 10.0 °C, ¿cuánto tiempo tomará que su temperatura suba a 58.0 °C?

Figura 26.47 Ejercicio 26.19.



26.20. En el circuito que se muestra en la figura 26.48, la tasa a la que R_1 disipa energía eléctrica es 20.0 W. *a*) Obtenga R_1 y R_2. *b*) ¿Cuál es la fem de la batería? *c*) Encuentre la corriente a través tanto de R_2 como del resistor de 10.0 Ω. *d*) Calcule el consumo total de energía eléctrica en todos los resistores y la que entrega la batería. Demuestre que sus resultados son congruentes con la conservación de la energía.

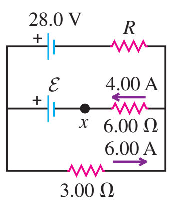
Figura 26.48 Ejercicio 26.20.



Sección 26.2 Reglas de Kirchhoff

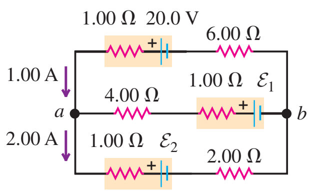
26.21. En el circuito que se aprecia en la figura 26.49, obtenga *a*) la corriente en el resistor *R*; *b*) la resistencia *R*; *c*) la fem desconocida $\mathcal{E}$. *d*) Si el circuito se rompe en el punto *x*, ¿cuál es la corriente en el resistor *R*?

Figura 26.49 Ejercicio 26.21.



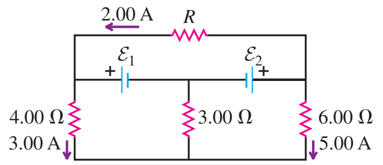
26.22. Encuentre las fem $\mathcal{E}_1$ y $\mathcal{E}_2$ en el circuito de la figura 26.50, y obtenga la diferencia de potencial del punto *b* en relación con el punto *a*.

Figura 26.50 Ejercicio 26.22.



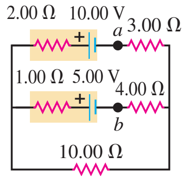
26.23. En el circuito que se ilustra en la figura 26.51, encuentre *a*) la corriente en el resistor de 3.00 Ω; *b*) las fem desconocidas $\mathcal{E}_1$ y $\mathcal{E}_2$; *c*) la resistencia *R*. Note que se dan tres corrientes.

Figura 26.51 Ejercicio 26.23.



26.24. En el circuito que se ilustra en la figura 26.52, obtenga *a*) la corriente en cada ramal y *b*) la diferencia de potencial V_{ab} del punto *a* en relación con el punto *b*.

Figura 26.52 Ejercicios 26.24, 26.25 y 26.26.

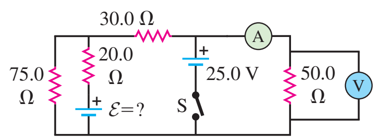


26.25. La batería de 10.00 V de la figura 26.52 se retira del circuito y se vuelve a colocar con la polaridad opuesta, de manera que ahora su terminal positiva está junto al punto *a*. El resto del circuito queda como en la figura. Encuentre *a*) la corriente en cada ramal y *b*) la diferencia de potencial V_{ab} del punto *a* con respecto al punto *b*.

26.26. La batería de 5.00 V de la figura 26.52 se retira del circuito y se sustituye por otra de 20.00 V, con su terminal negativa próxima al punto *b*. El resto del circuito queda como en la figura. Calcule *a*) la corriente en cada ramal y *b*) la diferencia de potencial V_{ab} del punto *a* en relación con el punto *b*.

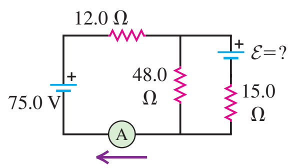
26.27. En el circuito que se presenta en la figura 26.53, las baterías tienen resistencias internas despreciables y los dos medidores son ideales. Con el interruptor S abierto, el voltímetro da una lectura de 15.0 V. *a*) Calcule la fem $\mathcal{E}$ de la batería. *b*) ¿Cuál será la lectura del amperímetro cuando se cierre el interruptor?

Figura 26.53 Ejercicio 26.27.



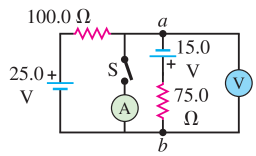
26.28. En el circuito que se muestra en la figura 26.54, ambas baterías tienen resistencia interna insignificante y el amperímetro ideal lee 1.50 A en el sentido que se ilustra. Encuentre la fem $\mathcal{E}$ de la batería. ¿Es correcta la polaridad que se indica?

Figura 26.54 Ejercicio 26.28.



26.29. En la figura 26.55 se ilustra un circuito en el que todos los medidores son ideales y las baterías no tienen resistencia interna apreciable. *a*) Diga cuál será la lectura del voltímetro con el interruptor S abierto. ¿Cuál punto está a un potencial mayor: *a* o *b*? *b*) Con el interruptor cerrado, obtenga la lectura del voltímetro y del amperímetro. ¿Cuál trayectoria (superior o inferior) sigue la corriente a través del interruptor?

Figura 26.55 Ejercicio 26.29.



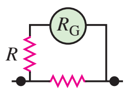
26.30. En el circuito de la figura 26.12 (ejemplo 26.6), el resistor de 2 Ω se sustituye por otro de 1 Ω, y el resistor central de 1 Ω (por el que pasa la corriente I_3) se sustituye por un resistor de resistencia *R* desconocida. El resto del circuito es como se indica en la figura. *a*) Calcule la corriente en cada resistor. Dibuje un diagrama del circuito y anote junto a cada resistor la corriente que pasa a través de él. *b*) Calcule la resistencia equivalente de la red. *c*) Calcule la diferencia de potencial V_{ab}. *d*) Las respuestas que dio para los incisos *a*), *b*) y *c*) no dependen del valor de R; explique por qué.

Sección 26.3 Instrumentos de medición eléctrica

26.31. La resistencia de una bobina de galvanómetro es de 25.0 Ω, y la corriente requerida para la desviación de escala completa es de 500 μA. *a*) Muestre en un diagrama la manera de convertir el galvanómetro en un amperímetro que lea 20.0 mA a escala completa, y calcule la resistencia de derivación. *b*) Demuestre el modo de convertir el galvanómetro en un voltímetro con lectura de 500 mV a escala completa, y calcule la resistencia en serie.

26.32. La resistencia de la bobina de un galvanómetro con bobina articulada es de 9.36 Ω, y una corriente de 0.0224 A ocasiona una desviación de escala completa. Queremos convertir este galvanómetro en un amperímetro con una lectura de escala completa de 20.0 A. La única derivación disponible tiene una resistencia de 0.0250 Ω. ¿Cuál es la resistencia R que debe conectarse en serie con la bobina (figura 26.56)?

Figura 26.56 Ejercicio 26.32.



26.33. Un circuito consiste en una combinación en serie de resistores de 6.00 kΩ y 5.00 kΩ conectados a través de una batería de 50.0 V con resistencia interna despreciable. Se desea medir la diferencia de potencial verdadera (es decir, la diferencia de potencial sin el medidor presente) a través del resistor de 5.00 kΩ con un voltímetro cuya resistencia interna es de 10.0 kΩ. *a*) ¿Cuál es la diferencia de potencial que mide el voltímetro a través del resistor de 5.00 kΩ? *b*) ¿Cuál es la diferencia de potencial *verdadera* a través de este resistor cuando el medidor no está presente? *c*) ¿Qué porcentaje de error tiene la lectura del voltímetro con respecto a la diferencia de potencial verdadera?

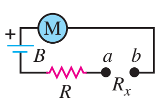
26.34. Un galvanómetro con resistencia de 25.0 Ω tiene una resistencia de derivación de 1.00 Ω instalada para convertirlo en un amperímetro. Después se utiliza para medir la corriente en un circuito que consiste en un resistor de 15.0 Ω conectado a través de las terminales de una batería de 25.0 V que no tiene resistencia interna apreciable. *a*) ¿Cuál es la corriente que mide el amperímetro? *b*) ¿Cuál debe ser la corriente *verdadera* en el circuito (es decir, la corriente sin el amperímetro presente)? *c*) ¿Qué porcentaje de error tiene la lectura del amperímetro con respecto a la corriente *verdadera*?

26.35. Considere el circuito del potenciómetro de la figura 26.19a. El resistor entre a y b es un alambre uniforme con longitud l, con un contacto deslizante c a una distancia x de b. Se lee una fem $\mathcal{E}_2$ desconocida deslizando el contacto hasta que la lectura del galvanómetro G es igual a cero. *a*) Demuestre que en estas condiciones la fem desconocida está dada por $\mathcal{E}_2 = (x/l)\mathcal{E}_1$. *b*) ¿Por qué no es importante la resistencia interna del galvanómetro? *c*) Suponga que $\mathcal{E}_1 = 9.15$ V y $l = 1.000$ m. La lectura del galvanómetro G es de cero cuando $x = 0.365$ m. ¿Cuál es la fem $\mathcal{E}_2$?

26.36. En el óhmetro de la figura 26.17, la bobina del medidor tiene una resistencia $R_c = 15.0$ Ω, y la corriente requerida para una desviación de escala completa es $I_{fs} = 3.60$ mA. La fuente es una batería de linterna con $\mathcal{E} = 1.50$ V y resistencia interna insignificante. El óhmetro va a presentar una desviación del medidor de media escala completa cuando se conecte a un resistor con $R = 600$ Ω. ¿Cuál es la resistencia R_s que se requiere?

26.37. En el óhmetro de la figura 26.57, M es un medidor de 2.50 mA con una resistencia de 65.0 Ω. (Un medidor de 2.50 mA sufre una desviación de escala completa cuando la corriente a través de él es de 2.50 mA.) La batería B tiene una fem de 1.52 V y resistencia interna despreciable. Se elige R de manera que cuando las terminales a y b estén en cortocircuito ($R_x = 0$), la lectura del medidor es la escala completa. Cuando a y b están abiertos ($R_x = \infty$), la lectura del medidor es cero. *a*) ¿Cuál es la resistencia del resistor R? *b*) ¿Qué corriente indica una resistencia R_x de 200 Ω? *c*) ¿Qué valores de R_x corresponden a desviaciones del medidor de $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ y $\frac{3}{4}$ de la escala completa si la desviación es proporcional a la corriente que pasa por el galvanómetro?

Figura 26.57 Ejercicio 26.37.



Sección 26.4 Circuitos *R-C*

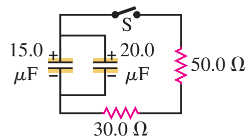
26.38. Un capacitor de 4.60 μF, que al inicio está descargado, se conecta en serie con un resistor de 7.50 kΩ y una fuente de fem con $\mathcal{E} =$ 125 V y resistencia interna insignificante. Justo después que el circuito se completa, ¿cuáles son *a*) la caída de voltaje a través del capacitor; *b*) la caída de voltaje a través del resistor; *c*) la carga en el capacitor; *d*) la corriente que pasa por el resistor? *e*) Mucho tiempo después de completar el circuito (después de muchas constantes de tiempo), ¿cuáles son los valores de los incisos *a*) a *d*)?

26.39. Un capacitor se carga a un potencial de 12.0 V y luego se conecta a un voltímetro que tiene una resistencia interna de 3.40 MΩ. Después de un tiempo de 4.00 s, el voltímetro da una lectura de 3.0 V. ¿Cuáles son *a*) la capacitancia y *b*) la constante de tiempo del circuito?

26.40. Un capacitor de 12.4 μF se conecta a través de un resistor de 0.895 MΩ a una diferencia de potencial constante de 60.0 V. *a*) Calcule la carga en el capacitor en los siguientes tiempos después de haber hecho la conexión: 0, 5.0 s, 10.0 s, 20.0 s y 100.0 s. *b*) Determine las corrientes de carga en los mismos instantes citados. *c*) Elabore una gráfica de los resultados de los incisos *a*) y *b*) para t entre 0 y 20 s.

26.41. En el circuito de la figura 26.58, los dos capacitores están cargados al principio a 45.0 V. *a*) ¿Cuánto tiempo después de cerrar el interruptor S el potencial a través de cada capacitor se reducirá a 10.0 V? *b*) En ese momento, ¿cuál será la corriente?

Figura 26.58 Ejercicio 26.41.



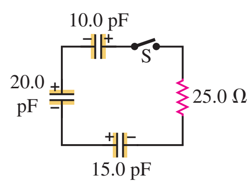
26.42. Un resistor y un capacitor se conectan en serie con una fuente de fem. La constante de tiempo para el circuito es de 0.870 s. *a*) Se agrega en serie un segundo capacitor, idéntico al primero. ¿Cuál es la constante de tiempo para este nuevo circuito? *b*) En el circuito original, un segundo capacitor, idéntico al primero, se conecta en paralelo con el primer capacitor. ¿Cuál es la constante de tiempo para este nuevo circuito?

26.43. Están conectados en serie una fuente de fem con $\mathcal{E} = 120$ V, un resistor con $R = 80.0$ Ω y un capacitor con $C = 4.00$ μF. A medida que el capacitor carga, cuando la corriente en el resistor es de 0.900 A, ¿cuál es la magnitud de la carga en cada placa del capacitor?

26.44. Un capacitor de 1.50 μF se carga a través de un resistor de 12.0 Ω por medio de una batería de 10.0 V. ¿Cuál será la corriente cuando el capacitor haya adquirido $\frac{1}{4}$ de su carga máxima? ¿Será $\frac{1}{4}$ de la corriente máxima?

26.45. En el circuito que se ilustra en la figura 26.59, cada capacitor tiene inicialmente una carga de magnitud 3.50 nC en sus placas. Después de que el interruptor S se cierra, ¿cuál será la corriente en el circuito en el instante en que los capacitores hayan perdido el 80.0% de su energía almacenada inicialmente?

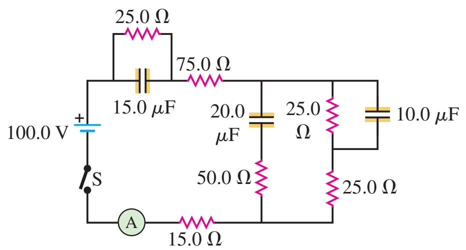
Figura 26.59 Ejercicio 26.45.



26.46. Se carga un capacitor de 12.0 μF a un potencial de 50.0 V, y luego se descarga a través de un resistor de 175 Ω. ¿Cuánto tiempo se requiere para que el capacitor pierda *a*) la mitad de su carga y *b*) la mitad de su energía almacenada?

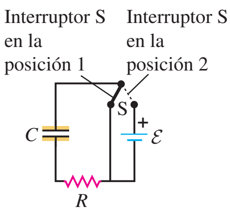
26.47. En el circuito de la figura 26.60, todos los capacitores están descargados al principio, la batería no tiene resistencia interna y el amperímetro es ideal. Calcule la lectura del amperímetro *a*) inmediatamente después de haber cerrado el interruptor S y *b*) mucho tiempo después de que se cerró el interruptor.

Figura 26.60 Ejercicio 26.47.



26.48. En el circuito que se ilustra en la figura 26.61, $C = 5.90\ \mu$F, $\mathcal{E} = 28.0$ V, y la fem tiene una resistencia despreciable. Inicialmente, el capacitor está descargado y el interruptor S está en la posición 1. Luego, el interruptor se mueve a la posición 2, por lo que el capacitor comienza a cargarse. *a*) ¿Cuál será la carga en el capacitor mucho tiempo después de que el interruptor se movió a la posición 2? *b*) Después de haber movido el interruptor a la posición 2 durante 3.00 ms se mide la carga en el capacitor y resulta ser de 110 μC. ¿Cuál es el valor de la resistencia *R*? *c*) ¿Cuánto tiempo después de haber movido el interruptor a la posición 2, la carga en el capacitor será igual al 99.0% del valor final calculado en el inciso *a*)?

Figura 26.61 Ejercicios 28.49 y 26.49.



26.49. Un capacitor con $C = 1.50 \times 10^{-5}$ se conecta como se aprecia en la figura 26.61, con un resistor con $R = 980\ \Omega$ y una fuente de fem con $\mathcal{E} = 18.0$ V y resistencia interna despreciable. Inicialmente, el capacitor está descargado y el interruptor S se encuentra en la posición 1. Luego, el interruptor se mueve a la posición 2, por lo que el capacitor comienza a cargarse. Después de que el interruptor ha estado en la posición 2 durante 10.0 ms, el interruptor se lleva de regreso a la posición 1, por lo que el capacitor comienza a descargarse. *a*) Calcule la carga en el capacitor justo *antes* de que el interruptor se lleve de la posición 2 a la 1. *b*) Calcule la caída del voltaje a través del resistor y el capacitor en el instante descrito en el inciso *a*). *c*) Calcule las caídas de voltaje a través del resistor y el capacitor justo *después* de que el interruptor se lleve de la posición 2 a la 1. *d*) Calcule la carga en el capacitor 10.0 ms después de haber llevado el interruptor de la posición 2 de regreso a la 1.

Sección 26.5 Sistemas de distribución de energía

26.50. El elemento calentador de una secadora eléctrica tiene una potencia nominal de 4.1 kW cuando se conecta a una línea de 240 V. *a*) ¿Cuál es la corriente en el elemento calentador? ¿El alambre de calibre 12 es suficiente para suministrar esa corriente? *b*) ¿Cuál es la resistencia del elemento calentador de la secadora a su temperatura de operación? *c*) ¿Cuánto cuesta operar la secadora durante una hora si la tarifa vigente es de 11 centavos por kWh?

26.51. Se enchufa un calentador eléctrico de 1500 W a la toma de un circuito de 120 V que tiene un interruptor de circuito o disyuntor de 20 A. En la misma toma se conecta una secadora eléctrica, la cual tiene ajustes de potencia de 600 W, 900 W, 1200 W y 1500 W. Se enciende la secadora para el cabello en el ajuste de 600 W y se incrementa hasta que se dispara el interruptor de circuito. ¿Cuál fue el ajuste de potencia que hizo que se disparara?

26.52. ¿Cuántas bombillas de 90 W y 120 V se pueden conectar en un circuito de 20 A y 120 V sin que se dispare el interruptor de circuito? (Consulte la nota del ejercicio 26.18.)

26.53. El elemento calentador de una estufa eléctrica consiste en un conductor incrustado dentro de un material aislante, que a su vez está dentro de una cubierta metálica. El alambre del calentador tiene una resistencia de 20 Ω a temperatura ambiente (23.0 °C) y un coeficiente de temperatura de la resistividad $\alpha = 2.8 \times 10^{-3}\ (\mathrm{C}°)^{-1}$. El elemento calentador opera desde una línea de 120 V. *a*) Cuando se enciende el elemento calentador por primera vez, ¿cuánta corriente toma y cuánta energía eléctrica disipa? *b*) Cuando el elemento calentador ha alcanzado su temperatura de operación de 280 °C (536 °F), ¿cuánta corriente toma y cuánta energía eléctrica disipa?

Problemas

26.54. Se necesita un resistor de 400 Ω y 2.4 W, pero sólo se dispone de varios resistores de 400 Ω y 1.2 W (véase el ejercicio 26.10). *a*) ¿Cuáles dos diferentes combinaciones de las unidades disponibles dan la resistencia y potencia nominal requeridas? *b*) Para cada una de las redes de resistores del inciso *a*), ¿qué potencia se disipa en cada resistor cuando la combinación disipa 2.4 W?

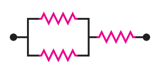
26.55. Un cable de 20.0 m de largo consiste en un núcleo interior sólido de níquel, cilíndrico, de 10.0 cm de diámetro, y rodeado por una coraza exterior sólida y cilíndrica de cobre con diámetro interno de 10.0 cm y diámetro externo de 20.0 cm. La resistividad del níquel es de $7.8 \times 10^{-8}\ \Omega \cdot \mathrm{m}$. *a*) ¿Cuál es la resistencia de este cable? *b*) Si se piensa en este cable como en un solo material, ¿cuál es su resistividad equivalente?

26.56. Dos cables idénticos de 1.00 Ω se colocan lado a lado y se sueldan de manera que cada uno toca la mitad del otro. ¿Cuál es la resistencia equivalente de esta combinación?

26.57. Las dos bombillas idénticas del ejemplo 26.2 (sección 26.1) están conectadas en paralelo a una fuente diferente, una con $\mathcal{E} = 8.0$ V y resistencia interna de 0.8 Ω. Cada bombilla tiene una resistencia $R = 2.0\ \Omega$ (se supone independiente de la corriente que pasa por la bombilla). *a*) Encuentre la corriente que fluye por cada bombilla, la diferencia de potencial en cada bombilla, y la potencia que se suministra a cada una. *b*) Suponga que una de las bombillas se funde, por lo que su filamento se rompe y deja de fluir corriente por ella. La bombilla que queda, ¿ilumina más o menos que antes que la bombilla se fundiera?

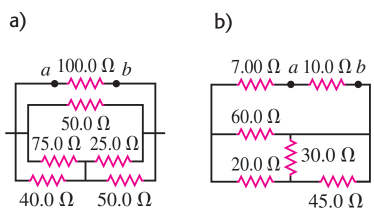
26.58. Cada uno de los tres resistores de la figura 26.62 tiene una resistencia de 2.4 Ω y disipa un máximo de 36 W sin calentarse en exceso. ¿Cuál es la potencia máxima que el circuito puede disipar?

Figura 26.62 Problema 26.58.



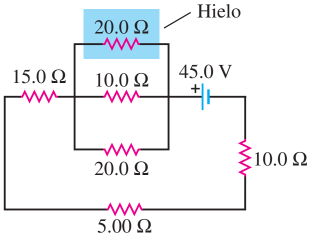
26.59. Si se conecta un óhmetro entre los puntos *a* y *b* en cada uno de los circuitos que se ilustran en la figura 26.63, ¿cuál será la lectura que dé?

Figura 26.63 Problema 26.59.



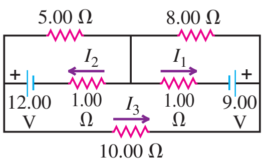
26.60. En el circuito que se ilustra en la figura 26.64, hay un resistor de 20.0 Ω incrustado en un bloque grande de hielo a 0.00 °C, y la batería tiene una resistencia interna insignificante. ¿A qué tasa (en g/s) el circuito derrite el hielo? (El calor latente de fusión para el hielo es de 3.34×10^5 J/kg.)

Figura 26.64 Problema 26.60.



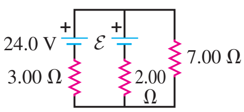
26.61. Calcule las tres corrientes I_1, I_2 e I_3 que se indican en el diagrama de circuito en la figura 26.65.

Figura 26.65 Problema 26.61.



26.62. ¿Cuál debe ser la fem $\mathcal{E}$ en la figura 26.66 para que la corriente a través del resistor de 7.00 Ω sea 1.80 A? Cada fuente de fem tiene resistencia interna despreciable.

Figura 26.66 Problema 26.62.



26.63. Determine la corriente que pasa por cada uno de los tres resistores del circuito que se ilustran en la figura 26.67. Las fuentes de fem tienen resistencia interna insignificante.

26.64. *a*) Encuentre la corriente a través de la batería y de cada uno de los resistores en el circuito ilustrado en la figura 26.68. *b*) ¿Cuál es la resistencia equivalente de la red de resistores?

Figura 26.67 Problema 26.63.

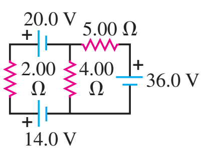
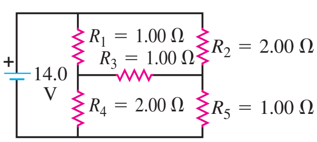
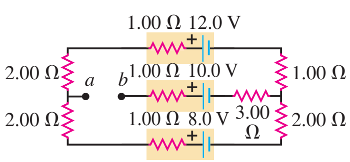


Figura 26.68 Problema 26.64.



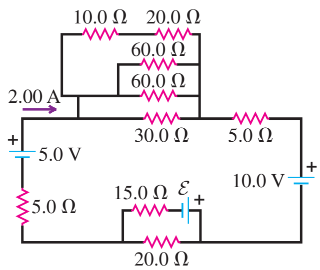
26.65. *a*) Calcule el potencial del punto *a* con respecto al punto *b*, en la figura 26.69. *b*) Si los puntos *a* y *b* se conectan con un alambre con resistencia insignificante, determine la corriente en la batería de 12.0 V.

Figura 26.69 Problema 26.65.



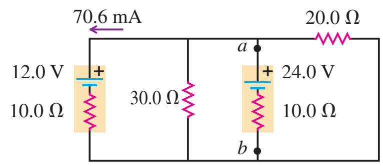
26.66. Considere el circuito que se ilustra en la figura 26.70. *a*) ¿Cuál debe ser la fem $\mathcal{E}$ de la batería para que una corriente de 2.00 A fluya a través de la batería de 5.00 V, como se muestra? La polaridad de la batería, ¿es correcta como se indica? *b*) ¿Cuánto tiempo se requiere para que se produzcan 60.0 J de energía térmica en el resistor de 10.0 Ω?

Figura 26.70 Problema 26.66.



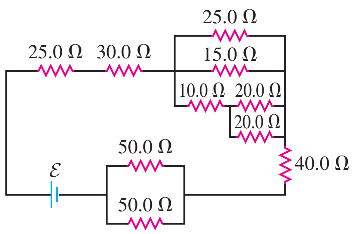
26.67. En el circuito de la figura 26.71, se mide la corriente que pasa a través de la batería de 12.0 V y resulta ser de 70.6 mA en el sentido que se indica. ¿Cuál es el voltaje terminal V_{ab} de la batería de 24.0 Ω?

Figura 26.71 Problema 26.67.



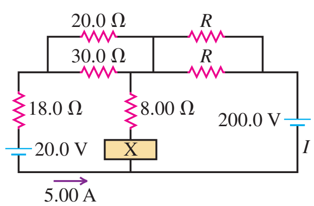
26.68. En el circuito que se ilustra en la figura 26.72, todos los resistores tienen potencia nominal máxima de 1.00 W. ¿Cuál es la fem $\mathcal{E}$ máxima que la batería puede tener sin que se queme ninguno de los resistores?

Figura 26.72 Problema 26.68.



26.69. En el circuito de la figura 26.73, la corriente en la batería de 20.0 V es de 5.00 A en el sentido que se indica, y el voltaje a través del resistor de 8.00 Ω es de 16.0 V, con el extremo inferior del resistor a un potencial mayor. Calcule *a*) la fem (incluida su polaridad) de la batería X; *b*) la corriente *I* a través de la batería de 200.0 V (incluido su sentido); *c*) la resistencia *R*.

Figura 26.73 Problema 26.69.

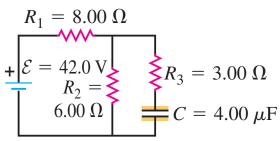


26.70. Se conectan en serie tres resistores idénticos. Cuando se aplica cierta diferencia de potencial a través de la combinación, la potencia total disipada es de 27 W. ¿Qué potencia se disiparía si los tres resistores se conectaran en paralelo a través de la misma diferencia de potencial?

26.71. Un resistor R_1 consume una energía eléctrica P_1 cuando se conecta a una fem $\mathcal{E}$. Cuando el resistor R_2 se conecta a la misma fem consume una energía eléctrica P_2. En términos de P_1 y P_2, ¿cuál es la energía eléctrica total consumida cuando los dos están conectados a esta fuente de fem *a*) en paralelo y *b*) en serie?

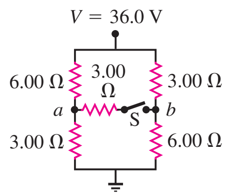
26.72. El capacitor de la figura 26.74 está inicialmente descargado. El interruptor se cierra en $t = 0$. *a*) Inmediatamente después de cerrar el interruptor, ¿cuál es la corriente a través de cada resistor? *b*) ¿Cuál es la carga final en el capacitor?

Figura 26.74 Problema 26.72.



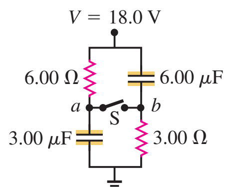
26.73. La figura 26.75 emplea una convención que se utiliza con frecuencia en los diagramas de circuito. La batería (u otra fuente de potencia) no se muestra de manera explícita. Se entiende que el punto en la parte superior, con la leyenda “36.0 V”, está conectado a la terminal positiva de una batería de 36.0 V que tiene resistencia interna despreciable, y que el símbolo de “tierra” en la parte inferior está conectado a la terminal negativa de la batería. El circuito se completa a través de la batería, aun cuando ésta no aparezca en el diagrama. *a*) ¿Cuál es la diferencia de potencial V_{ab} del punto *a* con respecto al punto *b*, cuando se abre el interruptor S? *b*) ¿Cuál es la corriente que pasa a través del interruptor S cuando está cerrado? *c*) ¿Cuál es la resistencia equivalente cuando el interruptor S está cerrado?

Figura 26.75 Problema 26.73.



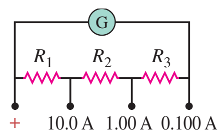
26.74. (Véase el problema 26.73). *a*) En la figura 26.76, ¿cuál es el potencial del punto *a* con respecto al punto *b* cuando el interruptor S está abierto? *b*) ¿Cuál punto, *a* o *b*, está a un mayor potencial? *c*) ¿Cuál es el potencial final del punto *b* con respecto a tierra cuando el interruptor S está cerrado? *d*) ¿Cuánto cambia la carga en cada capacitor cuando S está cerrado?

Figura 26.76 Problema 26.74.



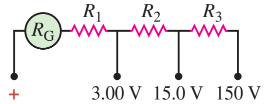
26.75. Amperímetro de escalas múltiples. La resistencia de la bobina móvil del galvanómetro G en la figura 26.77 es de 48.0 Ω, y el galvanómetro sufre una desviación de escala completa con una corriente de 0.0200 A. Cuando se conecta el medidor al circuito que se va a medir, se hace una conexión con el poste marcado con + y la otra con el poste marcado con la escala de corriente deseada. Calcule las magnitudes de las resistencias R_1, R_2 y R_3 que se requieren para convertir el galvanómetro en un amperímetro de escalas múltiples que se desvíe la escala completa con corrientes de 10.0 A, 1.00 A y 0.100 A.

Figura 26.77 Problema 26.75.



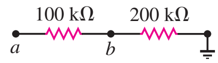
26.76. Voltímetro de escalas múltiples. La figura 26.78 muestra el cableado interior de un voltímetro de “tres escalas” cuyos postes de conexión están marcados con +, 3.00 V, 15.0 V y 150 V. Cuando el medidor se conecta al circuito por medir, se establece una conexión con el poste marcado como + y la otra con el poste marcado con la escala de voltaje deseada. La resistencia de la bobina móvil, R_G, es de 40.0 Ω, y una corriente de 1.00 mA en la bobina provoca una desviación de escala completa. Encuentre las resistencias R_1, R_2 y R_3, y la resistencia conjunta del medidor en cada una de sus escalas.

Figura 26.78 Problema 26.76.



26.77. En la figura 26.79, el punto *a* se mantiene a potencial constante de 400 V más alto con respecto a la tierra. (Véase el problema 26.73.) *a*) ¿Cuál es la lectura del voltímetro con la escala apropiada y con una resistencia de 5.00×10^4 Ω, cuando se conecta entre el punto *b* y la tierra? *b*) ¿Cuál es la lectura de un voltímetro con resistencia de 5.00×10^6 Ω? *c*) ¿Cuál es la lectura de un voltímetro con resistencia infinita?

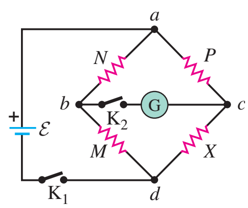
Figura 26.79 Problema 26.77.



26.78. Un voltímetro de 150 V tiene una resistencia de 30,000 Ω. Cuando se conecta en serie con una resistencia *R* grande a través de una línea de 110 V, el medidor da una lectura de 68 V. Calcule la resistencia *R*.

26.79. El puente de Wheatstone. El circuito que se aprecia en la figura 26.80, conocido como *puente de Wheatstone*, se utiliza para determinar el valor de un resistor desconocido *X* por comparación con tres resistores *M*, *N* y *P* cuyas resistencias se pueden modificar. Para cada arreglo, la resistencia de cada resistor se conoce con precisión. Con los interruptores K_1 y K_2 cerrados, estos resistores se modifican hasta que la corriente en el galvanómetro G sea igual a cero; entonces, se dice que el puente está *equilibrado*. *a*) Demuestre que en esta condición la resistencia desconocida está dada por $X = MP/N$. (Este método permite una precisión muy elevada al comparar resistores.) *b*) Si el galvanómetro G muestra una desviación nula cuando $M = 850.0\ \Omega$, $N = 15.00\ \Omega$ y $P = 33.48\ \Omega$, ¿cuál es la resistencia desconocida *X*?

Figura 26.80 Problema 26.79.



26.80. Cierto galvanómetro tiene una resistencia de 65.0 Ω y sufre una desviación de escala completa con una corriente de 1.50 mA en su bobina. Ésta se remplaza con un segundo galvanómetro que tiene una resistencia de 38.0 Ω y sufre una desviación de escala completa con una corriente de 3.60 μA en su bobina. Diseñe un circuito que incorpore al segundo galvanómetro de manera que la resistencia equivalente del circuito sea igual a la resistencia del primer galvanómetro, y el segundo galvanómetro sufra una desviación de escala completa cuando la corriente a través del circuito sea igual a la corriente de escala completa del primer galvanómetro.

26.81. Un resistor de 224 Ω y otro de 589 Ω están conectados en serie a través de una línea de 90.0 V. *a*) ¿Cuál es el voltaje a través de cada resistor? *b*) Un voltímetro conectado a través del resistor de 224 Ω da una lectura de 23.8 V. Calcule la resistencia del voltímetro. *c*) Determine la lectura del mismo voltímetro si se conecta a través del resistor de 589 Ω. *d*) Las lecturas de este voltímetro son menores que los voltajes “verdaderos” (es decir, sin el voltímetro presente). ¿Sería posible diseñar un voltímetro que diera lecturas *mayores* que los voltajes “verdaderos”? Explique su respuesta.

26.82. Un capacitor de 2.36 μF inicialmente descargado se conecta en serie con un resistor de 4.26 Ω y una fuente de fem con $\mathcal{E} = 120$ V y resistencia interna despreciable. *a*) Inmediatamente después de hacer la conexión, ¿cuáles son i) la tasa a la que se disipa la energía eléctrica en el resistor; ii) la tasa a la que la energía eléctrica almacenada en el capacitor se incrementa; iii) la potencia de salida eléctrica de la fuente? ¿Cómo se comparan las respuestas i), ii) y iii)? *b*) Responda las mismas preguntas que en el inciso *a*) para un tiempo más largo después de hacer la conexión. *c*) Conteste las mismas preguntas que en el inciso *a*) en el momento en que la carga en el capacitor es la mitad de su valor final.

26.83. Un capacitor que inicialmente está descargado se conecta en serie con un resistor y una fuente de fem con $\mathcal{E} = 110$ V y resistencia interna insignificante. Apenas completado el circuito, la corriente que pasa por el resistor es de 6.5×10^{-5} A. La constante de tiempo para el circuito es de 6.2 s. ¿Cuáles son los valores de la resistencia del resistor y de la capacitancia del capacitor?

26.84. Un resistor con $R = 850\ \Omega$ está conectado a las placas de un capacitor cargado con capacitancia $C = 4.62\ \mu$F. Justo antes de hacer la conexión, la carga en el capacitor es de 8.10 mC. *a*) ¿Cuál es la energía almacenada inicialmente en el capacitor? *b*) ¿Cuál es la potencia eléctrica disipada en el resistor justo después de hacer la conexión? *c*) ¿Cuánta energía eléctrica se disipa en el resistor en el instante en que la energía almacenada en el capacitor ha disminuido a la mitad del valor calculado en el inciso *a*)?

26.85. En sentido estricto, la ecuación (26.16) implica que se requiere una cantidad *infinita* de tiempo para descargar por completo un capacitor. Pero para fines prácticos, puede considerarse que está descargado completamente después de un lapso finito de tiempo. Para ser más específicos, considere que un capacitor con capacitancia C conectado a un resistor R está descargado totalmente si su carga q difiere de cero en no más de la carga de un electrón. *a*) Calcule el tiempo que se requiere para alcanzar ese estado si $C = 0.920\ \mu$F, $R = 670$ kΩ y $Q_0 = 7.00\ \mu$F. ¿A cuántas constantes de tiempo equivale el resultado? *b*) Para una Q_0 dada, ¿el tiempo requerido para alcanzar ese estado siempre es el mismo número de constantes de tiempo, independientemente de los valores de C y R? ¿Por qué?

26.86. Un circuito R-C tiene una constante de tiempo RC. *a*) Si el circuito está descargándose, ¿cuánto tiempo tomará que la energía almacenada se reduzca a $1/e$ de su valor inicial? *b*) Si se está cargando, ¿cuánto tiempo se necesita para que la energía almacenada alcance $1/e$ de su valor máximo?

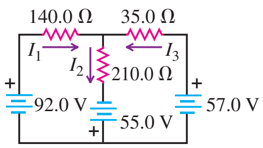
26.87. En un capacitor en proceso de carga la corriente está dada por la ecuación (26.13). *a*) La potencia instantánea suministrada por la batería es $\mathcal{E}i$. Intégrela para calcular la energía total suministrada por la batería. *b*) La potencia instantánea disipada en el resistor es i^2R. Intégrela para obtener la energía total disipada en el resistor. *c*) Encuentre la energía final almacenada en el capacitor y demuestre que es igual a la energía total suministrada por la batería menos la energía disipada en el resistor, como se obtuvo en los incisos *a*) y *b*). *d*) ¿Qué fracción de la energía suministrada por la batería se almacena en el capacitor? ¿Cómo depende de R esta fracción?

26.88. *a*) Empleando la ecuación (26.17) para la corriente en un capacitor en proceso de descarga, obtenga una expresión para la potencia instantánea $P = i^2R$ disipada en el resistor. *b*) Integre la expresión para P con la finalidad de encontrar la energía total que se disipa en el resistor, y demuestre que es igual a la energía total inicialmente almacenada en el capacitor.

Problemas de desafío

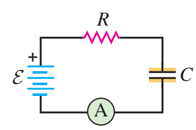
26.89. De acuerdo con el teorema de superposición, la respuesta (corriente) en un circuito es proporcional al estímulo (voltaje) que la produce. Esto es verdad aun si hay fuentes múltiples en un circuito. Este teorema sirve para analizar un circuito sin recurrir a las reglas de Kirchhoff considerando que las corrientes en el circuito son la superposición de corrientes causadas por cada fuente de manera independiente. De esta forma, el circuito puede analizarse calculando las resistencias equivalentes en vez de utilizar el (a veces) complicado método de las reglas de Kirchhoff. Además, con el teorema de superposición es posible examinar cómo la modificación de una fuente en una parte del circuito afectará las corrientes en todas las demás partes del circuito, sin tener que utilizar las reglas de Kirchhoff para volver a calcular todas las corrientes. Considere el circuito de la figura 26.81. Si se dibujara de nuevo el circuito sustituyendo las fuentes de 55.0 V y 57.0 V por cortocircuitos, podría analizarse con el método de las resistencias equivalentes sin recurrir a las reglas de Kirchhoff, y podría encontrarse la corriente en cada ramal de una forma más sencilla. De manera similar, si el circuito con las fuentes de 92.0 V y 55.0 V fuera remplazado por cortocircuitos, podría analizarse de nuevo en una forma más fácil. Por último, si se remplazaran las fuentes de 92.0 V y 57.0 V con un cortocircuito, el circuito podría otra vez analizarse fácilmente. Al superponer las corrientes respectivas encontradas en cada uno de los ramales utilizando los tres circuitos simplificados, es posible encontrar la corriente real en cada ramal. *a*) Con base en las reglas de Kirchhoff, encuentre las corrientes de ramal de los resistores de 140.0 Ω, 210.0 Ω y 35.0 Ω. *b*) Con base en un circuito similar al de la figura 26.81, pero con un cortocircuito en vez de las fuentes de 55.0 V y 57.0 V, determine las corrientes en cada resistencia. *c*) Repita el inciso *b*) sustituyendo las fuentes de 92.0 V y 55.0 V por cortocircuitos y dejando intacta la fuente de 57.0 V. *d*) Repita el inciso *b*) sustituyendo las fuentes de 92.0 V y 57.0 V por cortocircuitos y dejando intacta la fuente de 55.0 V. *e*) Verifique el teorema de superposición comparando las corrientes calculadas en los incisos *b*), *c*) y *d*) con las corrientes calculadas en el inciso *a*). *f*) Si la fuente de 57.0 V se sustituye por otra de 80.0 V, ¿cuáles serán las nuevas corrientes en todos los ramales del circuito? [*Sugerencia:* con base en el teorema de superposición, vuelva a calcular las corrientes parciales obtenidas en el inciso *c*), considerando el hecho de que esas corrientes son proporcionales a la fuente que se sustituye. Después superponga las nuevas corrientes parciales con aquellas calculadas en los incisos *b*) y *d*).]

Figura 26.81 Problema de desafío 26.89.



26.90. Alarma de capacitores contra robo. La capacitancia de un capacitor puede verse afectada por el material dieléctrico que, aunque no esté dentro del capacitor, esté suficientemente cerca de éste como para ser polarizado por la curvatura del campo eléctrico que existe cerca de un capacitor con carga. Este efecto por lo general es del orden de picofarads (pF), pero, con la ayuda de circuitos electrónicos apropiados, permite detectar un cambio en el material dieléctrico que rodea al capacitor. Ese material dieléctrico puede ser el cuerpo humano, y el efecto descrito es de utilidad para diseñar una alarma contra robo. Considere el circuito simplificado que se ilustra en la figura 26.82. La fuente de voltaje tiene una fem $\mathcal{E} = 1000$ V, y el capacitor tiene una capacitancia $C = 10.0$ pF. Los circuitos electrónicos para detectar la corriente, representados como un amperímetro en el diagrama, tienen una resistencia despreciable y son capaces de detectar una corriente que persista en un nivel de al menos 1.00 μA durante al menos 200 μs después de que la capacitancia haya cambiado abruptamente de C a C'. La alarma contra robo está diseñada para activarse si la capacitancia cambia en un 10%. *a*) Determine la carga en el capacitor de 10.0 pF cuando está cargado por completo. *b*) Si el capacitor está completamente cargado antes de detectar al intruso, y suponiendo que el tiempo que tarda la capacitancia en cambiar en un 10% es suficientemente corto como para ser ignorado, obtenga una ecuación que exprese la corriente a través del resistor R como función del tiempo t, a partir de que la capacitancia cambia. *c*) Determine el intervalo de valores de la resistencia R que cumplirá las especificaciones de diseño de la alarma contra robo. ¿Qué pasa si R es demasiado pequeña? ¿O demasiado grande? (*Sugerencia:* no podrá resolver este inciso en forma analítica, por lo que tendrá que usar métodos numéricos. Exprese R como una función logarítmica de R más las cantidades conocidas. Utilice un valor tentativo para R y calcule un nuevo valor a partir de la expresión. Siga haciendo esto hasta que los valores de alimentación y salida de R coincidan con tres cifras significativas.)

Figura 26.82 Problema de desafío 26.90.

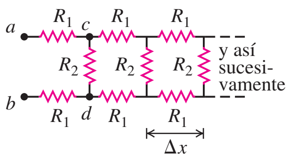


26.91. Red infinita. Como se muestra en la figura 26.83, una red de resistores de resistencias R_1 y R_2 se extiende infinitamente hacia la derecha. Demuestre que la resistencia total R_T de la red infinita es igual a

$$R_T = R_1 + \sqrt{R_1^2 + 2R_1R_2}$$

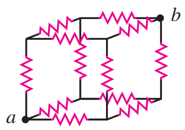
(*Sugerencia:* como la red es infinita, su resistencia a la derecha de los puntos c y d también es igual a R_T.)

Figura 26.83 Problemas de desafío 26.91 y 26.93.



26.92. Suponga que un resistor R está a lo largo de cada arista de un cubo (12 resistores en total) con conexiones en las esquinas. Encuentre la resistencia equivalente entre dos esquinas del cubo opuestas diagonalmente (puntos a y b, en la figura 26.84).

Figura 26.84 Problema de desafío 26.92.



26.93. Cadenas atenuadoras y axones. La red infinita de resistores en la figura 26.83 se conoce como *cadena atenuadora*, porque esta cadena de resistores reduce, o atenúa, la diferencia de potencial entre los alambres superior e inferior a todo lo largo de la cadena. *a*) Demuestre que si la diferencia de potencial entre los puntos a y b de la figura 26.83 es V_{ab}, entonces la diferencia de potencial entre los puntos c y d es $V_{cd} = V_{ab}/(1 + \beta)$, donde $\beta = 2R_1(R_T + R_2)/R_TR_2$ y R_T, la resistencia total de la red, está dada en el problema de desafío 26.91. (Véase la sugerencia en ese problema.) *b*) Si la diferencia de potencial entre las terminales a y b en el extremo izquierdo de la red infinita es V_0, demuestre que la diferencia de potencial entre los alambres superior e inferior a n segmentos del extremo izquierdo es $V_n = V_0/(1 + \beta)^n$. Si $R_1 = R_2$, ¿cuántos segmentos se necesitan para que la diferencia de potencial V_n disminuya a menos del 1.0% de V_0? *c*) Una cadena atenuadora infinita ofrece un modelo de propagación de un pulso de voltaje a lo largo de una fibra nerviosa o axón. Cada segmento de la red en la figura 26.83 representa un segmento corto del axón con longitud Δx. Los resistores R_1 representan la resistencia del fluido adentro y afuera de la membrana de la pared del axón. La resistencia de la membrana al flujo de corriente a través de la pared se representa con R_2. Para un segmento de axón de longitud $\Delta x = 1.0\ \mu\text{m}$, $R_1 = 6.4 \times 10^3\ \Omega$ y $R_2 = 8.0 \times 10^8\ \Omega$ (la membrana de la pared es un buen aislante). Calcule la resistencia total R_T y β para un axón infinitamente largo. (Ésta es una buena aproximación, ya que la longitud de un axón es mucho mayor que su ancho; los axones más largos en el sistema nervioso humano son mayores de 1 m pero sólo miden 10^{-7} m de radio.) *d*) ¿En qué fracción disminuye la diferencia de potencial entre el interior y el exterior del axón a lo largo de una distancia de 2.0 mm? *e*) La atenuación de la diferencia de potencial calculada en el inciso *d*) muestra que el axón no es un cable pasivo portador de corriente eléctrica; la diferencia de potencial debe reforzarse periódicamente a lo largo del axón. Este mecanismo de refuerzo es lento, por lo que una señal se propaga a lo largo del axón a sólo 30 m/s. En situaciones en que se requiere una respuesta más rápida, los axones están cubiertos con una película grasosa de mielina. Los segmentos miden alrededor de 2 mm de largo y están separados por espacios llamados *nodos de Ranvier*. La mielina incrementa la resistencia de un segmento de la membrana de 1.0 μm de largo a $R_2 = 3.3 \times 10^{12}\ \Omega$. En el caso de un axón mielinizado de este tipo, ¿en qué fracción disminuye la diferencia de potencial entre el interior y el exterior del axón a lo largo de la distancia de un nodo de Ranvier al siguiente? Esta menor atenuación significa que la velocidad de propagación aumenta.