

Circuitos en serie

5.1 INTRODUCCIÓN

Existen dos tipos de corriente disponibles para el consumidor de hoy. Uno es la *corriente directa* (cd), en la que idealmente el flujo de carga (corriente) no cambia en magnitud (o dirección) con el tiempo. La otra es la *corriente alterna senoidal* (ca), en la que el flujo de carga se encuentra cambiando continuamente en magnitud (y dirección) con el tiempo. Algunos de los capítulos siguientes presentan una introducción al análisis de circuitos únicamente desde el enfoque de cd. Se analizarán con todo detalle los métodos y conceptos para la corriente directa; en la medida de lo posible, un breve análisis será suficiente para cubrir cualquier variación que pudiera encontrarse cuando se considere el tipo de ca en capítulos posteriores.

La batería de la figura 5.1, por virtud de la diferencia de potencial entre sus terminales, tiene la habilidad de causar (o “presionar” para) que la carga fluya a través del circuito simple. La terminal positiva atrae los electrones a través del cable al mismo ritmo con que éstos son proporcionados por la terminal negativa. Siempre que la batería se encuentre conectada dentro del circuito y mantenga sus características terminales, la corriente (cd) a través del circuito no cambiará en magnitud ni en dirección.

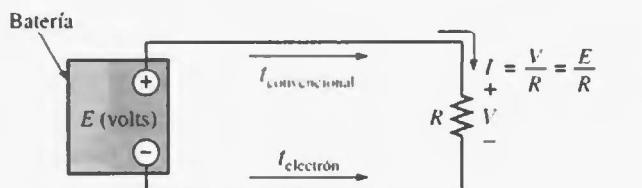
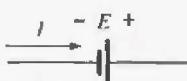


FIGURA 5.1
Presentación de los componentes básicos de un circuito eléctrico.

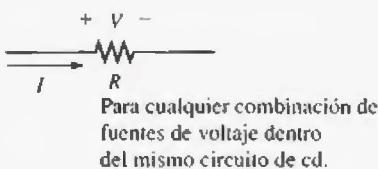
Si consideramos que el cable es un conductor ideal (es decir, que no presenta resistencia al flujo), la diferencia de potencial V en el resistor será igual al voltaje aplicado de la batería: V (volts) = E (volts).



Para todos los circuitos de cd con una fuente de voltaje.

FIGURA 5.2

Definición de la dirección del flujo convencional para circuitos de cd con una sola fuente.



Para cualquier combinación de fuentes de voltaje dentro del mismo circuito de cd.

FIGURA 5.3

Definición de la polaridad resultante de una corriente convencional I a través de un elemento resistivo.

La corriente está limitada únicamente por el resistor R . Mientras mayor sea la resistencia, menor será la corriente, y de forma recíproca, según lo determina la ley de Ohm.

Por convención (como se analizó en el capítulo 2), la dirección del **flujo de corriente convencional** $I_{\text{convencional}}$ que se muestra en la figura 5.1, es opuesta a la del **flujo de electrones** ($I_{\text{electrón}}$). Además, el flujo uniforme de carga estipula que la corriente directa I será la misma en todo el circuito. Al seguir la dirección del flujo convencional, se observa que existe una elevación del potencial a través de la batería ($-$ a $+$), y una caída de potencial a través del resistor ($+$ a $-$). Para circuitos de cd con una sola fuente de voltaje, el flujo convencional pasa siempre de un potencial bajo a un potencial alto cuando atraviesa una fuente de voltaje, como se muestra en la figura 5.2. Sin embargo, el flujo convencional siempre atraviesa de un potencial alto a uno bajo cuando pasa a través del resistor para cualquier número de fuentes de voltaje dentro del mismo circuito, como se muestra en la figura 5.3.

El circuito de la figura 5.1 presenta la configuración más simple posible. Este capítulo y los capítulos siguientes añadirán elementos a este sistema de una forma muy específica para presentar una gama de conceptos que darán forma a la mayor parte de los fundamentos requeridos para analizar sistemas más complejos. El lector debe estar consciente de que las leyes, reglas, etc., presentadas en los capítulos 5 y 6 se utilizarán a lo largo de sus estudios en sistemas eléctricos, electrónicos y computacionales. Tales conceptos no serán desechados a cambio de un conjunto más avanzado a medida que se progrese hacia un material más sofisticado; por tanto, resulta crítico que se comprendan completamente y que los distintos procedimientos y métodos se apliquen con confianza.

5.2 CIRCUITOS EN SERIE

Un **circuito** consta de cualquier número de elementos conectados en puntos terminales, ofreciendo al menos una ruta cerrada por la cual pueda fluir la carga. El circuito de la figura 5.4(a) cuenta con tres elementos conectados en tres puntos terminales (a , b y c) para obtener una ruta cerrada para la corriente I .

Dos elementos se encuentran en serie si:

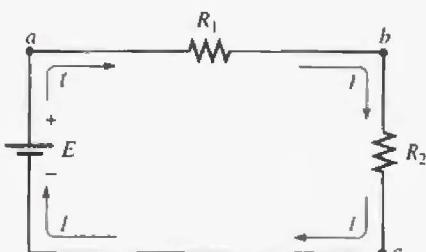
1. Solo cuentan con una terminal en común (es decir, una terminal de un elemento se encuentra conectada solamente a una terminal del otro elemento).
2. El punto común entre los dos elementos no se encuentra conectado con otro elemento que transporta corriente.

En la figura 5.4(a), los resistores R_1 y R_2 se encuentran en serie debido a que solo cuentan con el punto b en común. Los otros extremos de los resistores están conectados con cualquier otra parte del circuito. Por la misma razón, la batería E y el resistor R_1 se encuentran en serie (con la terminal a en común), y el resistor R_2 y la batería E también están en serie (terminal c en común). Dado que todos los elementos se encuentran en serie, la red se denomina **circuito en serie**. Dos ejemplos comunes de conexiones en serie incluyen el atado de dos piezas pequeñas de cuerda juntas para formar una cuerda más grande y la conexión de tuberías para llevar agua de un punto a otro.

Si el circuito de la figura 5.4(a) se modificara de forma que se insertara un resistor R_3 que transporte corriente como se muestra en la figura 5.4(b), los resistores R_1 y R_2 ya no estarán en serie debido a la violación del inciso 2 de la definición anterior de los elementos en serie.

La corriente es la misma a lo largo de los elementos en serie.

Por tanto, para el circuito de la figura 5.4(a), la corriente I a través de cada resistor será la misma que sobre la batería. El hecho de que la corriente sea la



(a) Circuitos en serie

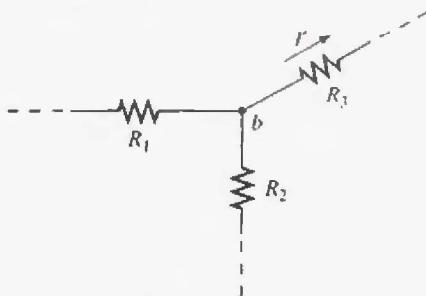
(b) R_1 y R_2 no están en serie

FIGURA 5.4

(a) Circuito en serie; (b) situación en la que R_1 y R_2 no se encuentran en serie.

misma a través de los elementos en serie es regularmente utilizado como un camino para determinar si dos elementos se encuentran en serie o para confirmar una conclusión.

Una rama de un circuito es cualquier segmento del circuito que cuente con uno o más elementos en serie. En la figura 5.4(a), el resistor R_1 forma una rama del circuito, el resistor R_2 otra, y la batería E una tercera.

La resistencia total de un circuito en serie es la suma de los niveles de resistencia.

En la figura 5.4(a), por ejemplo, la resistencia total (R_T) será igual a $R_1 + R_2$. Advierta que la resistencia total es realmente la resistencia "observada" por la batería, cuando ésta se "asoma" hacia la combinación en serie de los elementos como se muestra en la figura 5.5.

En general, para calcular la resistencia total de N resistores en serie, se aplica la siguiente ecuación:

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_N \quad (\text{ohms, } \Omega) \quad (5.1)$$

Una vez que se conoce la resistencia total, el circuito de la figura 5.4(a) puede volverse a trazar como se muestra en la figura 5.6, mostrando claramente que la única resistencia que la fuente "observa" será la resistencia total. La fuente es completamente inconsciente de la forma en que los elementos se conectaron para establecer R_T . Una vez que R_T se conoce, la corriente extraída de la fuente puede determinarse utilizando la ley de Ohm de la siguiente forma:

$$I_s = \frac{E}{R_T} \quad (\text{ampere, A}) \quad (5.2)$$

Dado que E es fija, la magnitud de la corriente de la fuente será totalmente dependiente de la magnitud de R_T . Una R_T más grande dará por resultado un valor relativamente pequeño de I_s , mientras que un menor valor de R_T ocasionará niveles más altos de corriente.

El hecho de que la corriente sea la misma por cada elemento de la figura 5.4(a) permite un cálculo directo del voltaje en cada resistor utilizando la ley de Ohm; es decir,

$$V_1 = IR_1, V_2 = IR_2, V_3 = IR_3, \dots, V_N = IR_N \quad (\text{volts, V}) \quad (5.3)$$

La potencia entregada a cada resistor puede entonces determinarse utilizando cualquiera de las tres ecuaciones que a continuación se presentan para R_1 :

$$P_1 = V_1 I_1 = I_1^2 R_1 = \frac{V_1^2}{R_1} \quad (\text{watts, W}) \quad (5.4)$$

La potencia entregada por la fuente es:

$$P_{\text{del}} = EI \quad (\text{watts, W}) \quad (5.5)$$

La potencia total entregada a un circuito resistivo será igual a la potencia total disipada por los elementos resistentes.

Es decir,

$$P_{\text{del}} = P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_N \quad (5.6)$$

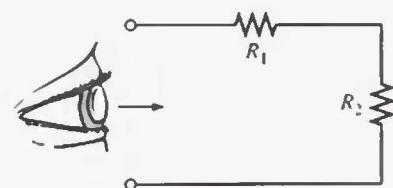


FIGURA 5.5
Resistencia "observada" por la fuente.

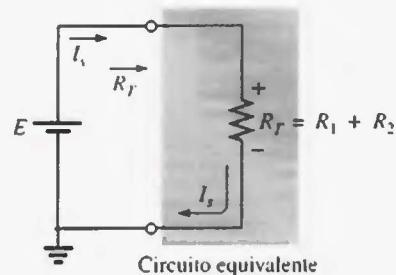


FIGURA 5.6
Reemplazo de los resistores en serie R_1 y R_2 de la figura 5.5 con la resistencia total.

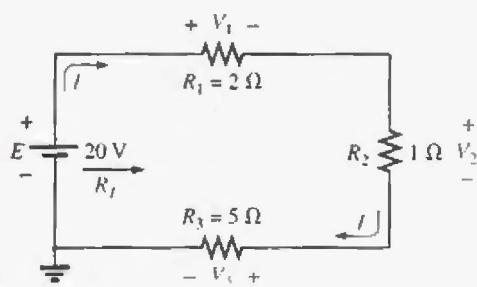


FIGURA 5.7

Ejemplo 5.1.

EJEMPLO 5.1

- Calcule la resistencia total del circuito en serie de la figura 5.7.
- Calcule la corriente de la fuente I_s .
- Determine los voltajes V_1 , V_2 y V_3 .
- Calcule la potencia disipada por R_1 , R_2 y R_3 .
- Determine la potencia entregada por la fuente, y compárela con la suma de los niveles de potencia del inciso (d).

Soluciones:

a. $R_T = R_1 + R_2 + R_3 = 2\Omega + 1\Omega + 5\Omega = 8\Omega$

b. $I_s = \frac{E}{R_T} = \frac{20\text{ V}}{8\Omega} = 2.5\text{ A}$

c. $V_1 = IR_1 = (2.5\text{ A})(2\Omega) = 5\text{ V}$

$V_2 = IR_2 = (2.5\text{ A})(1\Omega) = 2.5\text{ V}$

$V_3 = IR_3 = (2.5\text{ A})(5\Omega) = 12.5\text{ V}$

d. $P_1 = V_1 I_1 = (5\text{ V})(2.5\text{ A}) = 12.5\text{ W}$

$P_2 = I_2^2 R_2 = (2.5\text{ A})^2(1\Omega) = 6.25\text{ W}$

$P_3 = V_3^2/R_3 = (12.5\text{ V})^2/5\Omega = 31.25\text{ W}$

e. $P_{\text{del}} = EI = (20\text{ V})(2.5\text{ A}) = 50\text{ W}$

$P_{\text{del}} = P_1 + P_2 + P_3$

$50\text{ W} = 12.5\text{ W} + 6.25\text{ W} + 31.25\text{ W}$

$50\text{ W} = 50\text{ W}$ (se comprueba)

Para calcular la resistencia total de N resistores del mismo valor en serie, simplemente multiplique el valor de *uno* de los resistores por el número en serie; es decir,

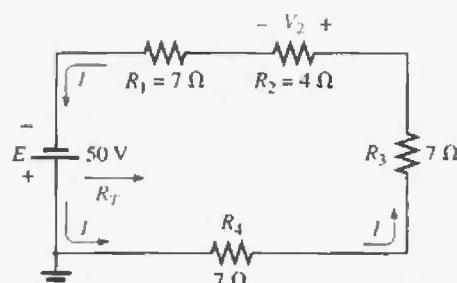


FIGURA 5.8

Ejemplo 5.2.

$$R_T = NR$$

(5.7)

EJEMPLO 5.2 Determine R_T , I y V_2 para el circuito de la figura 5.8.

Solución: Observe la dirección de la corriente según la establece la batería y la polaridad de la caída de voltaje en R_2 como la determina la dirección de la corriente. Dado que $R_1 = R_3 = R_4$,

$$R_T = NR_1 + R_2 = (3)(7\Omega) + 4\Omega = 21\Omega + 4\Omega = 25\Omega$$

$$I = \frac{E}{R_T} = \frac{50\text{ V}}{25\Omega} = 2\text{ A}$$

$$V_2 = IR_2 = (2\text{ A})(4\Omega) = 8\text{ V}$$

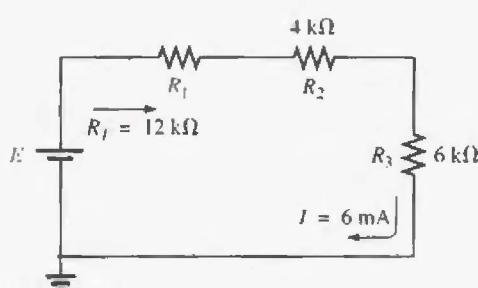


FIGURA 5.9

Ejemplo 5.3.

Los ejemplos 5.1 y 5.2 son problemas del tipo de sustitución directa y relativamente fáciles de resolver mediante la práctica. Sin embargo, el ejemplo 5.3 es evidencia de otro tipo de problemas que requieren un firme entendimiento de las ecuaciones fundamentales y la habilidad para identificar la ecuación que debe utilizarse primero. La mejor preparación para este tipo de ejercicios es simplemente trabajar con la mayor cantidad posible de ellos.

EJEMPLO 5.3 Dados R_T e I , calcule R_1 e E para el circuito de la figura 5.9.

Solución:

$$\begin{aligned} R_T &= R_1 + R_2 + R_3 \\ 12 \text{ k}\Omega &= R_1 + 4 \text{ k}\Omega + 6 \text{ k}\Omega \\ R_1 &= 12 \text{ k}\Omega - 10 \text{ k}\Omega = 2 \text{ k}\Omega \\ E &= IR_T = (6 \times 10^{-3} \text{ A})(12 \times 10^3 \Omega) = 72 \text{ V} \end{aligned}$$

5.3 FUENTES DE VOLTAJE EN SERIE

Las fuentes de voltaje pueden conectarse en serie, como se muestra en la figura 5.10, para incrementar o disminuir el voltaje total aplicado a un sistema. El voltaje neto se determina simplemente al sumar las fuentes con la misma polaridad y restando el total de las fuentes con polaridad opuesta. La polaridad neta será la polaridad de la suma más grande.

Por ejemplo, en la figura 5.10(a), todas las fuentes “presionan” la corriente a la derecha, por lo que el voltaje neto es:

$$E_T = E_1 + E_2 + E_3 = 10 \text{ V} + 6 \text{ V} + 2 \text{ V} = 18 \text{ V}$$

como se observa en la figura. Sin embargo, en la figura 5.10(b), la mayor “presión” es hacia la izquierda, con un voltaje neto de:

$$E_T = E_2 + E_3 - E_1 = 9 \text{ V} + 3 \text{ V} - 4 \text{ V} = 8 \text{ V}$$

y la polaridad mostrada en la figura.

5.4 LEY DE VOLTAJE DE KIRCHHOFF

Observe la figura 5.11.

La ley de voltaje de Kirchhoff (LVK) establece que la suma algebraica de las elevaciones y caídas de potencial alrededor de un lazo (o trayectoria) cerrado es cero.

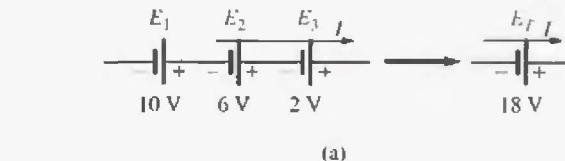
Un lazo cerrado es cualquier trayectoria continua que sale de un punto en una dirección y regresa al mismo punto desde otra dirección sin abandonar el circuito. En la figura 5.12, al seguir la corriente, es posible trazar una ruta continua que parte del punto *a* cruzando R_1 y regresa a través de E sin abandonar el circuito. Por tanto, *abcda* es un lazo cerrado. Para que podamos aplicar la ley de voltaje de Kirchhoff, la suma de las elevaciones y caídas de potencial debe realizarse en una sola dirección alrededor del lazo cerrado.

Por cuestiones de uniformidad, se empleará la dirección en el sentido de las manecillas del reloj a lo largo de este libro para todas las aplicaciones de la ley de voltaje de Kirchhoff. Sin embargo, tenga presente que el mismo resultado se obtendrá si se elige la dirección contraria a las manecillas del reloj y se aplica la ley de forma correcta.

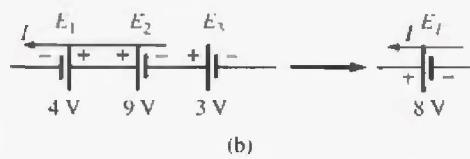
Se aplica un signo positivo para una elevación de potencial ($-a+$), y un signo negativo para una caída de potencial ($+a-$). Al seguir la corriente en la figura 5.12 desde el punto *a*, primero se encuentra una caída de potencial V_1 ($+a-$) a través de R_1 , y luego otra caída de potencial V_2 a través de R_2 . Al continuar a través de la fuente de voltaje, se tiene una elevación de potencial E ($-a+$) antes de regresar al punto *a*. En forma simbólica, donde Σ representa una sumatoria, c el lazo cerrado, y V las caídas y elevaciones de potencial, se tiene:

$$\Sigma_c V = 0$$

(Ley de voltaje de Kirchhoff en forma simbólica)



(a)



(b)

FIGURA 5.10
Reducción de fuentes de voltaje de cd en serie a una sola fuente.

Alemán
(Königsberg, Berlín)
(1824-1887)
Físico
Profesor de física,
Universidad de
Heidelberg



Cortesía de
Smithsonian Institution
Fotografía núm. 58,283

A pesar de que contribuyó en varias áreas bajo el dominio de la física, es mejor conocido por su trabajo en el área eléctrica, donde presentó su definición de la relaciones entre las corrientes y los voltajes de una red en 1847. Realizó amplios trabajos con el químico alemán Robert Bunsen (quien desarrolló el mechero Bunsen), dando por resultado el descubrimiento de los importantes elementos cesio y rubidio.

FIGURA 5.11
Gustav Robert Kirchhoff.

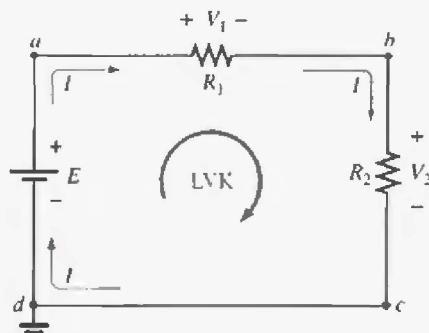


FIGURA 5.12
Aplicación de la ley de voltaje de Kirchhoff a un circuito de cd en serie.

la cual produce para el circuito de la figura 5.12 (en dirección de las manecillas del reloj, siguiendo la corriente I e iniciando en el punto d):

$$+E - V_1 - V_2 = 0$$

o bien,

$$E = V_1 + V_2$$

mostrando que,

el voltaje aplicado de un circuito en serie equivale a la suma de las caídas de voltaje en los elementos en serie.

La ley de voltaje de Kirchhoff también puede enunciarse de la siguiente forma:

$$\sum_{\text{C}} V_{\text{elevaciones}} = \sum_{\text{C}} V_{\text{caídas}} \quad (5.9)$$

la cual establece, en palabras, que la suma de las elevaciones alrededor de un lazo cerrado debe ser igual a la suma de las caídas de potencial. Sin embargo, en el presente libro se pondrá énfasis en la utilización de la ecuación (5.8).

Si el lazo se tomara en el sentido contrario de las manecillas del reloj comenzando por el punto a , se obtendría lo siguiente:

$$\sum_{\text{C}} V = 0$$

$$-E + V_2 + V_1 = 0$$

o, de la forma anterior, $E = V_1 + V_2$

La aplicación de la ley de voltaje de Kirchhoff no necesita seguir una ruta que incluya elementos portadores de corriente.

Por ejemplo, en la figura 5.13 existe una diferencia en el potencial entre los puntos a y b , incluso cuando los dos puntos no se encuentran conectados por un elemento portador de corriente. La aplicación de la ley de voltaje de Kirchhoff alrededor del lazo cerrado dará por resultado una diferencia de potencial de 4 V entre los dos puntos. Es decir, utilizando la dirección de las manecillas del reloj:

$$+12 \text{ V} - V_x - 8 \text{ V} = 0$$

y

$$V_x = 4 \text{ V}$$

EJEMPLO 5.4 Determine los voltajes desconocidos para las redes de la figura 5.14.

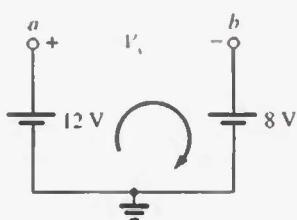


FIGURA 5.13

Demostración de que puede existir un voltaje entre dos puntos no conectados mediante un conductor portador de corriente.

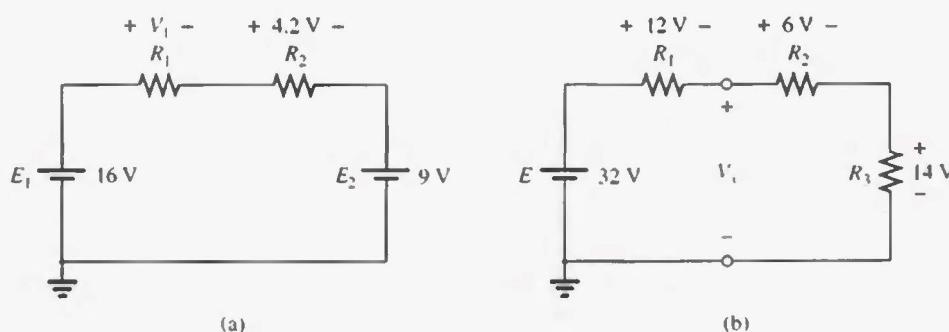


FIGURA 5.14

Ejemplo 5.4.

Solución: Al aplicar la ley de voltaje de Kirchhoff, asegúrese de concentrarse en las polaridades de la caída o elevación de voltaje en lugar de hacerlo

sobre el tipo de elemento. En otras palabras, no trate una caída de voltaje en un elemento resistivo de forma distinta a una caída de voltaje en una fuente. Si la polaridad indica que existe una caída, esto será lo importante al aplicar la ley. En la figura 5.14(a), por ejemplo, si elegimos la dirección de las manecillas del reloj, veremos que existe una caída en los resistores R_1 y R_2 y una caída en la fuente E_2 . Por tanto, todo tendrá un signo negativo cuando se aplique la ley de voltaje de Kirchhoff.

La aplicación de la ley de voltaje de Kirchhoff al circuito de la figura 5.14(a) en la dirección de las manecillas del reloj dará por resultado:

$$+E_1 - V_1 - V_2 - E_2 = 0$$

$$\text{y } V_1 = E_1 - V_2 - E_2 = 16 \text{ V} - 4.2 \text{ V} - 9 \text{ V} \\ = 2.8 \text{ V}$$

El resultado indica claramente que no era necesario conocer los valores de los resistores o de la corriente para determinar el voltaje desconocido. Los otros niveles de voltaje cuentan con suficiente información para determinar la incógnita.

En la figura 5.14(b) el voltaje desconocido no se encuentra en un elemento portador de corriente. Sin embargo, como se indicó en los párrafos anteriores, la ley de voltaje de Kirchhoff no se encuentra limitada a los elementos portadores de corriente. En este caso existen dos posibles trayectorias para encontrar la incógnita. Utilizando la trayectoria de las manecillas del reloj, que incluye la fuente de voltaje E , se obtendrá:

$$+E - V_1 - V_x = 0$$

$$\text{y } V_x = E - V_1 = 32 \text{ V} - 12 \text{ V} \\ = 20 \text{ V}$$

Al utilizar la dirección de las manecillas del reloj para el otro lazo que contiene a R_2 y a R_3 se obtendría el siguiente resultado:

$$+V_x - V_2 - V_3 = 0$$

$$\text{y } V_x = V_2 + V_3 = 6 \text{ V} + 14 \text{ V} \\ = 20 \text{ V}$$

lo que coincide con el resultado anterior.

EJEMPLO 5.5 Calcule V_1 y V_2 para la red de la figura 5.15.

Solución: Para la trayectoria 1, iniciando en el punto a en dirección de las manecillas del reloj:

$$+25 \text{ V} - V_1 + 15 \text{ V} = 0$$

$$\text{y } V_1 = 40 \text{ V}$$

Para la trayectoria 2, iniciando en el punto a en dirección de las manecillas del reloj:

$$-V_2 - 20 \text{ V} = 0$$

$$\text{y } V_2 = -20 \text{ V}$$

El signo negativo indica solamente que las polaridades reales de la diferencia de potencial son opuestas a la polaridad supuesta indicada en la figura 5.15.

El siguiente ejemplo enfatizará el hecho de que cuando aplicamos la ley de voltaje de Kirchhoff, son las polaridades de las elevaciones o caídas de voltaje los parámetros importantes y no el tipo de elemento involucrado.

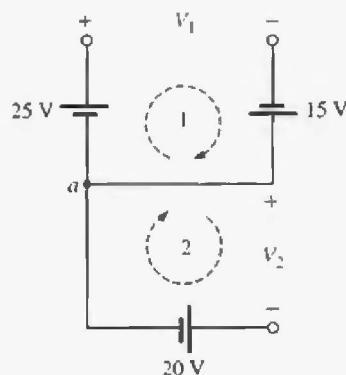


FIGURA 5.15
Ejemplo 5.5.

EJEMPLO 5.6 Utilizando la ley de voltaje de Kirchhoff, determine los voltajes desconocidos para la red de la figura 5.16.

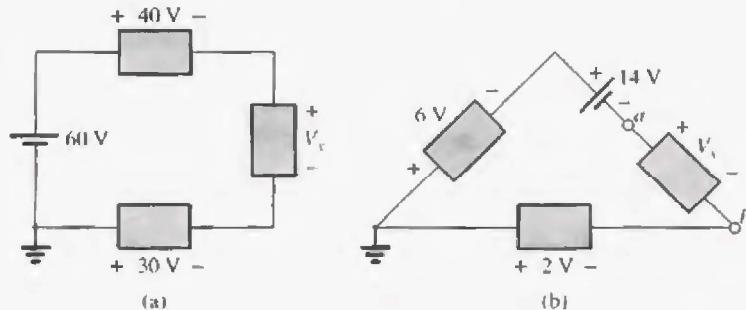


FIGURA 5.16
Ejemplo 5.6.

Solución: Observe en cada circuito que existen diversas polaridades en los elementos desconocidos, dado que éstos pueden contener cualquier mezcla de componentes. Al aplicar la ley de voltaje de Kirchhoff a la red de la figura 5.16(a) en la dirección de las manecillas del reloj se obtendrá:

$$60 \text{ V} - 40 \text{ V} - V_v + 30 \text{ V} = 0$$

$$\text{y } V_v = 60 \text{ V} + 30 \text{ V} - 40 \text{ V} = 90 \text{ V} - 40 \text{ V} \\ = 50 \text{ V}$$

En la figura 5.16(b) la polaridad del voltaje desconocido no se proporciona. En tales casos, realice un supuesto acerca de la polaridad, y aplique la ley de voltaje de Kirchhoff como antes. Si el resultado tiene signo positivo, la polaridad supuesta fue correcta; si tiene signo negativo, la magnitud es correcta, pero la polaridad supuesta debe invertirse. En este caso, si suponemos que *a* es positiva y *b* negativa, la aplicación de la ley de voltaje de Kirchhoff en dirección de las manecillas del reloj dará por resultado:

$$-6 \text{ V} - 14 \text{ V} - V_x + 2 \text{ V} = 0$$

$$\text{y } V_x = -20 \text{ V} + 2 \text{ V} \\ = -18 \text{ V}$$

Dado que el resultado es negativo, sabemos que *a* deberá ser negativa y *b* positiva, sin embargo, la magnitud de 18 V es correcta.

EJEMPLO 5.7 Para el circuito de la figura 5.17:

- Calcule R_T .
- Calcule I .
- Calcule V_1 y V_2 .
- Encuentre la potencia en los resistores de 4Ω y 6Ω .
- Encuentre la potencia suministrada por la batería, y compárela con la potencia disipada por los resistores de 4Ω y 6Ω combinados.
- Verifique la ley de voltaje de Kirchhoff (en dirección de las manecillas del reloj).

Soluciones:

$$\text{a. } R_T = R_1 + R_2 = 4 \Omega + 6 \Omega = 10 \Omega$$

$$\text{b. } I = \frac{E}{R_T} = \frac{20 \text{ V}}{10 \Omega} = 2 \text{ A}$$

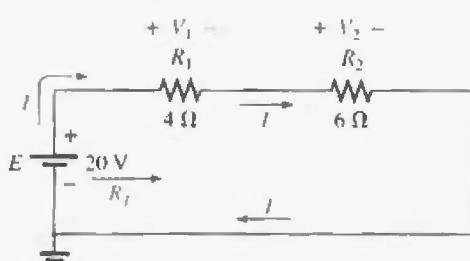


FIGURA 5.17
Ejemplo 5.7.

c. $V_1 = IR_1 = (2 \text{ A})(4 \Omega) = 8 \text{ V}$
 $V_2 = IR_2 = (2 \text{ A})(6 \Omega) = 12 \text{ V}$

d. $P_{4\Omega} = \frac{V_1^2}{R_1} = \frac{(8 \text{ V})^2}{4} = \frac{64}{4} = 16 \text{ W}$

$P_{6\Omega} = I^2 R_2 = (2 \text{ A})^2(6 \Omega) = (4)(6) = 24 \text{ W}$

e. $P_E = EI = (20 \text{ V})(2 \text{ A}) = 40 \text{ W}$
 $P_E = P_{4\Omega} + P_{6\Omega}$
 $40 \text{ W} = 16 \text{ W} + 24 \text{ W}$
 $40 \text{ W} = 40 \text{ W}$ (se comprueba)

f. $\Sigma_C V = +E - V_1 - V_2 = 0$
 $E = V_1 + V_2$
 $20 \text{ V} = 8 \text{ V} + 12 \text{ V}$
 $20 \text{ V} = 20 \text{ V}$ (se comprueba)

EJEMPLO 5.8 Para el circuito de la figura 5.18:

- Determine V_2 utilizando la ley de voltaje de Kirchhoff.
- Determine I .
- Calcule R_1 y R_3 .

Soluciones:

- La ley de voltaje de Kirchhoff (en dirección de las manecillas del reloj):

$$-E + V_3 + V_2 + V_1 = 0$$

o bien,

$$E = V_1 + V_2 + V_3$$

y $V_2 = E - V_1 - V_3 = 54 \text{ V} - 18 \text{ V} - 15 \text{ V} = 21 \text{ V}$

b. $I = \frac{V_2}{R_2} = \frac{21 \text{ V}}{7 \Omega} = 3 \text{ A}$

c. $R_1 = \frac{V_1}{I} = \frac{18 \text{ V}}{3 \text{ A}} = 6 \Omega$

$R_3 = \frac{V_3}{I} = \frac{15 \text{ V}}{3 \text{ A}} = 5 \Omega$

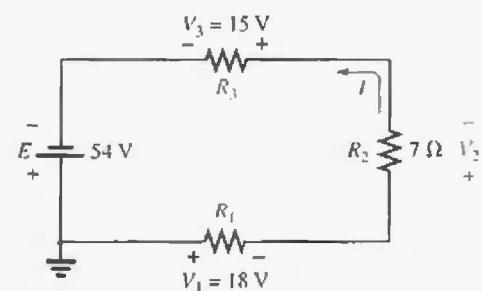


FIGURA 5.18
Ejemplo 5.8.

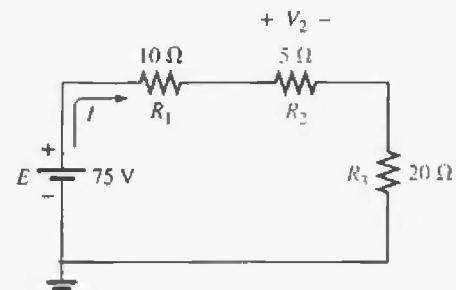


FIGURA 5.19
Circuito de cd en serie con elementos a ser intercambiados.

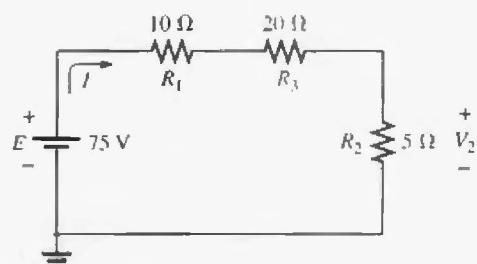


FIGURA 5.20
Circuito de la figura 5.19 con R_2 y R_3 intercambiados.

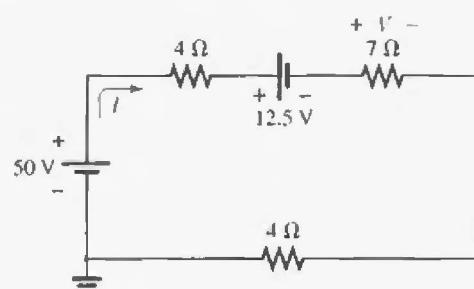


FIGURA 5.21
Ejemplo 5.9.

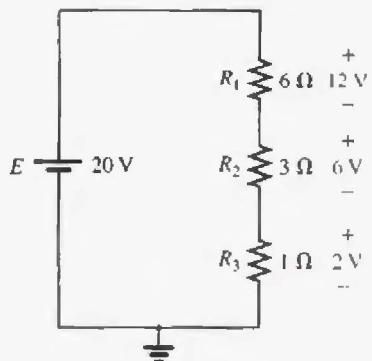


FIGURA 5.23

Muestra de la forma en que el voltaje se dividirá en los elementos resistentes en serie.

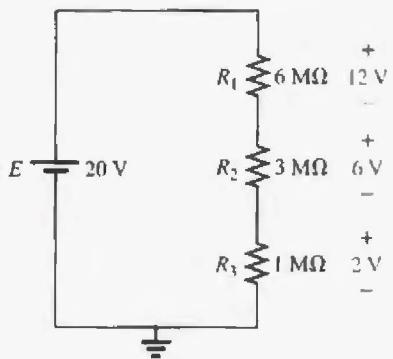


FIGURA 5.24

La proporción de los valores de resistencia determina la división de voltaje de un circuito de cd en serie.

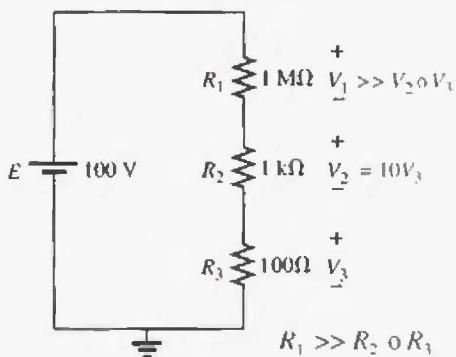


FIGURA 5.25

Los elementos resistentes en serie más grandes acapararán la mayor parte del voltaje aplicado.

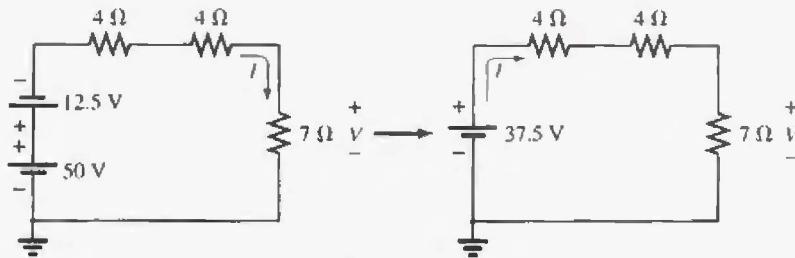


FIGURA 5.22
Nuevo trazado del circuito de la figura 5.21.

5.6 REGLA DEL DIVISOR DE VOLTAJE

En un circuito en serie,

el voltaje en los elementos resistentes se dividirá en función de la magnitud de los niveles de resistencia.

Por ejemplo, se proporcionan los voltajes en los elementos resistentes de la figura 5.23. El resistor más grande de 6Ω acapara la mayor parte del voltaje aplicado, mientras que el resistor más pequeño R_3 tiene la menor parte. Además observe que, como el nivel de resistencia de R_1 es 6 veces el de R_3 , el voltaje en R_1 será 6 veces el de R_3 . El hecho de que el nivel de resistencia de R_2 sea 3 veces el de R_1 da por resultado tres veces el voltaje en R_2 . Por último, dado que R_1 es el doble de R_2 , el voltaje en R_1 será el doble de R_2 . Por tanto, y en general, el voltaje en resistores en serie tendrá la misma proporción que los niveles de resistencia.

Resulta particularmente importante observar que si los niveles de resistencia de todos los resistores de la figura 5.23 se incrementan en la misma proporción, como se muestra en la figura 5.24, los niveles de voltaje permanecerán igual. En otras palabras, incluso cuando los niveles de resistencia se incrementen por un factor de 1 millón, las proporciones de voltaje permanecerán iguales. Por tanto, resulta evidente que es la proporción de los valores de los resistores lo que cuenta para la división de voltaje y no la magnitud relativa de todos los resistores. El nivel de corriente de la red será fuertemente afectado por el cambio en el nivel de resistencia de la figura 5.23 a la figura 5.24, pero los niveles de voltaje serán los mismos.

Con base en lo anterior, un primer vistazo a la red en serie de la figura 5.25 sugiere que la mayor parte del voltaje aplicado se presentará en el resistor de $1\text{ M}\Omega$ y muy poco en el resistor de 100Ω . De hecho $1\text{ M}\Omega = (1000)1\text{ k}\Omega = (10,000)100\Omega$, mostrando que $V_1 = 1000V_2 = 10,000V_3$.

Al resolver para la corriente y luego para los tres niveles de voltaje se obtendrá:

$$I = \frac{E}{R_T} = \frac{100\text{ V}}{1,001,100\Omega} \approx 99.89\text{ }\mu\text{A}$$

y

$$V_1 = IR_1 = (99.89\text{ }\mu\text{A})(1\text{ M}\Omega) = 99.89\text{ V}$$

$$V_2 = IR_2 = (99.89\text{ }\mu\text{A})(1\text{ k}\Omega) = 99.89\text{ mV} = 0.09989\text{ V}$$

$$V_3 = IR_3 = (99.89\text{ }\mu\text{A})(100\Omega) = 9.989\text{ mV} = 0.009989\text{ V}$$

corroborando claramente las conclusiones anteriores. En lo futuro, por tanto, utilice este método para estimar la parte del voltaje de entrada en los elementos en serie como una forma de verificación de los cálculos reales o simplemente para obtener un estimado con el mínimo de esfuerzo.

En el análisis anterior la corriente se determinó antes que el voltaje de la red. Sin embargo, existe un método denominado **regla del divisor de voltaje** (RDV) que permite la determinación de los niveles de voltaje sin tener que encontrar antes la corriente. La regla puede derivarse mediante el análisis de la red de la figura 5.26.

$$R_T = R_1 + R_2$$

$$\text{y} \quad I = \frac{E}{R_T}$$

Al aplicar la ley de Ohm:

$$V_1 = IR_1 = \left(\frac{E}{R_T}\right)R_1 = \frac{R_1 E}{R_T}$$

con: $V_2 = IR_2 = \left(\frac{E}{R_T}\right)R_2 = \frac{R_2 E}{R_T}$

Observe que el formato para V_1 y V_2 es:

$$V_x = \frac{R_x E}{R_T}$$

(regla del divisor de voltaje)
(5.10)

donde V_x es el voltaje en R_x , E es el voltaje en los elementos en serie, y R_T es la resistencia total del circuito en serie.

En palabras, la **regla del divisor de voltaje** establece que

el voltaje en un resistor en un circuito en serie es igual al valor de ese resistor multiplicado por el voltaje total en los elementos en serie, dividido entre la resistencia total de los elementos en serie.

EJEMPLO 5.10 Determine el voltaje V_1 para la red de la figura 5.27.

Solución: Con la ecuación (5.10):

$$V_1 = \frac{R_1 E}{R_T} = \frac{R_1 E}{R_1 + R_2} = \frac{(20 \Omega)(64 V)}{20 \Omega + 60 \Omega} = \frac{1280 V}{80} = 16 V$$

EJEMPLO 5.11 Utilice la regla del divisor de voltaje y determine los voltajes V_1 y V_3 para el circuito en serie de la figura 5.28.

Solución:

$$V_1 = \frac{R_1 E}{R_T} = \frac{(2 k\Omega)(45 V)}{2 k\Omega + 5 k\Omega + 8 k\Omega} = \frac{(2 k\Omega)(45 V)}{15 k\Omega}$$

$$= \frac{(2 \times 10^3 \Omega)(45 V)}{15 \times 10^3 \Omega} = \frac{90 V}{15} = 6 V$$

$$V_3 = \frac{R_3 E}{R_T} = \frac{(8 k\Omega)(45 V)}{15 k\Omega} = \frac{(8 \times 10^3 \Omega)(45 V)}{15 \times 10^3 \Omega}$$

$$= \frac{360 V}{15} = 24 V$$

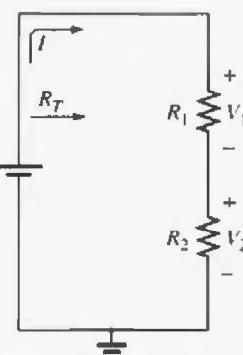


FIGURA 5.26
Desarrollo de la regla del divisor de voltaje.

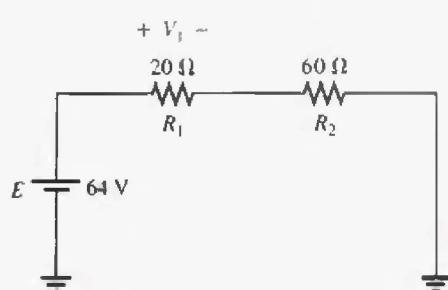


FIGURA 5.27
Ejemplo 5.10.

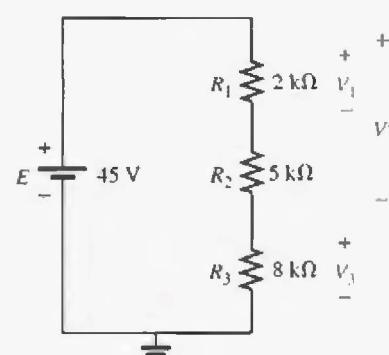


FIGURA 5.28
Ejemplo 5.11.

La regla puede ampliarse al voltaje presente en dos o más elementos en serie si la resistencia en el numerador de la ecuación (5.10) se desarrolla para incluir

la resistencia total de los elementos en serie (R') en los que se calculará el voltaje; es decir,

$$V' = \frac{R'E}{R_T} \quad (\text{volts}) \quad (5.11)$$

EJEMPLO 5.12 Determine el voltaje V' en la figura. 5.28 en los resistores R_1 y R_2 .

Solución:

$$V' = \frac{R'E}{R_T} = \frac{(2 \text{ k}\Omega + 5 \text{ k}\Omega)(45 \text{ V})}{15 \text{ k}\Omega} = \frac{(7 \text{ k}\Omega)(45 \text{ V})}{15 \text{ k}\Omega} = 21 \text{ V}$$

Tampoco existe la necesidad de que el voltaje E en la ecuación sea el voltaje fuente de la red. Por ejemplo, si V es el voltaje total en varios elementos en serie como los que se muestran en la figura 5.29, entonces:

$$V_{2\Omega} = \frac{(2 \Omega)(27 \text{ V})}{4 \Omega + 2 \Omega + 3 \Omega} = \frac{54 \text{ V}}{9} = 6 \text{ V}$$

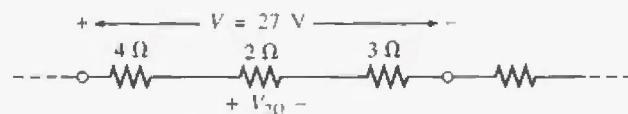


FIGURA 5.29

El voltaje total en elementos en serie no necesita ser una fuente de voltaje independiente.

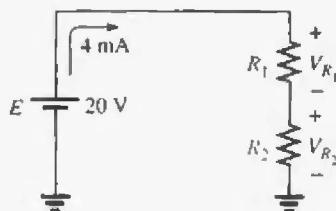


FIGURA 5.30
Ejemplo 5.13.

EJEMPLO 5.13 Diseñe el divisor de voltaje de la figura 5.30 de forma $V_{R_1} = 4V_{R_2}$.

Solución: La resistencia total se define mediante:

$$R_T = \frac{E}{I} = \frac{20 \text{ V}}{4 \text{ mA}} = 5 \text{ k}\Omega$$

Dado que $V_{R_1} = 4V_{R_2}$,

$$R_1 = 4R_2$$

De manera que $R_T = R_1 + R_2 = 4R_2 + R_2 = 5R_2$

y $5R_2 = 5 \text{ k}\Omega$

$$R_2 = 1 \text{ k}\Omega$$

y $R_1 = 4R_2 = 4 \text{ k}\Omega$

5.7 NOTACIÓN

La notación jugará un papel cada vez más importante en los análisis subsiguientes. Por tanto, resulta importante comenzar a analizar la notación utilizada en toda la industria.

Fuentes de voltaje y tierra

Excepto en algunos casos especiales, los sistemas eléctricos y electrónicos se aterrizan con propósitos de referencia y de seguridad. El símbolo para la conexión a tierra se muestra en la figura 5.31 junto con su nivel de potencial definido: cero volts. Ninguno de los circuitos analizados hasta aquí ha contenido la conexión a tierra. Si la figura 5.4(a) se volviese a trazar con una fuente de alimentación aterrizada, aparecería como se muestra en la figura 5.32(a), (b) o (c). En cualquier caso, se entiende que la terminal negativa de la batería y la parte inferior del resistor R_2 se encuentran con un potencial de



FIGURA 5.31
Potencial de tierra.

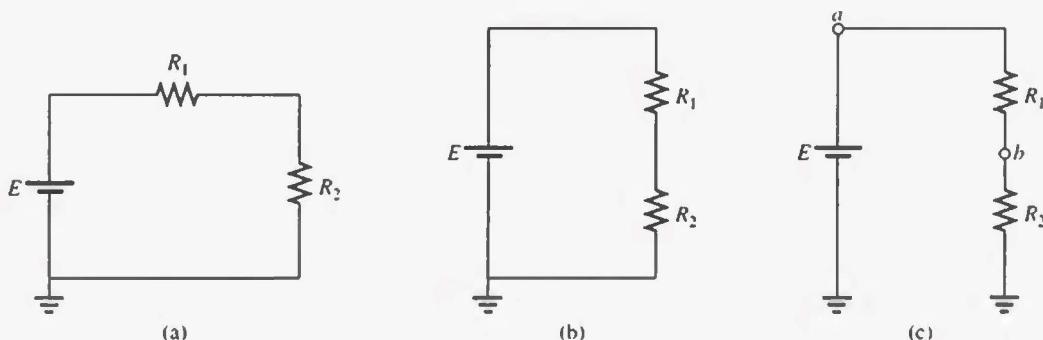


FIGURA 5.32
Tres formas de trazar el mismo circuito de cd en serie.

tierra. Aunque la figura 5.32(c) no muestra una conexión entre las dos tierras, se acepta que tal conexión existe para el flujo continuo de carga. Si $E = 12\text{ V}$, entonces el punto a será 12 V positivos con respecto a tierra, y existirán 12 V en la combinación en serie de los resistores R_1 y R_2 . Si se coloca un voltímetro desde el punto b hasta tierra se leerán 4 V, por lo que el voltaje en R_2 será de 4 V, con el potencial más alto en el punto b .

En diagramas muy grandes, donde el espacio es muy escaso y la claridad resulta importante, las fuentes de voltaje pueden indicarse como se muestra en las figuras 5.33(a) y 5.34(a) en lugar de como se ilustra en las figuras 5.33(b) y 5.34(b). Además, los niveles de potencial pueden indicarse como en la figura 5.35, para permitir una verificación rápida de los niveles de potencial en distintos puntos de la red con respecto a tierra y asegurar que el sistema se encuentra operando adecuadamente.

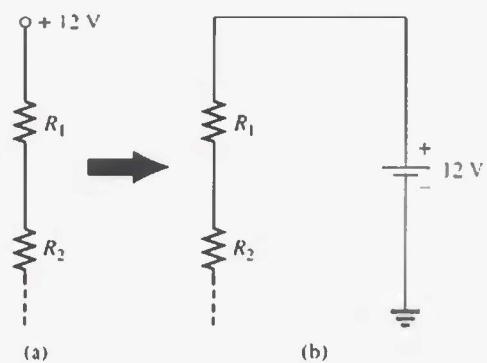


FIGURA 5.33
Reemplazo de la notación especial de una fuente de voltaje de cd por el símbolo estándar.

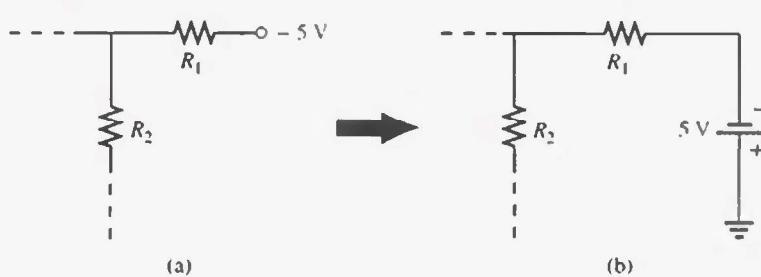
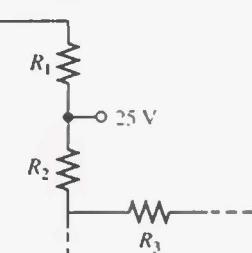


FIGURA 5.34
Reemplazo de la notación para una fuente de cd negativa por la notación estándar.

Notación de doble subíndice

El hecho de que el voltaje sea una variable que se presenta entre dos puntos ha dado por resultado una notación de doble subíndice que define al primer

FIGURA 5.35
El nivel de voltaje esperado en un punto particular en una red del sistema se encuentra funcionando adecuadamente.



subíndice como el potencial más alto. En la figura 5.36(a), los dos puntos que definen el voltaje en el resistor R están indicados por a y b . Dado que a es el primer subíndice de V_{ab} , debe tener un mayor potencial que el punto b si V_{ab} cuenta con un valor positivo. Si, de hecho, el punto b se encuentra a un mayor potencial que el punto a , V_{ab} tendrá un valor negativo, como se indica en la figura 5.36(b).



FIGURA 5.36
Definición del signo para la notación de doble subíndice.

En resumen:

La notación de doble subíndice V_{ab} especifica el punto a como el potencial mayor. Si este no es el caso, deberá asociarse un signo negativo con la magnitud de V_{ab} .

En otras palabras,

el voltaje V_{ab} será el voltaje en el punto a con respecto al punto b .

Notación de subíndice sencillo

Si el punto b de la notación V_{ab} se especifica como potencial de tierra (cero volts), entonces es posible utilizar la notación de subíndice sencillo que proporciona el voltaje en un punto con respecto a tierra.

En la figura 5.37, V_a es el voltaje del punto a con respecto a tierra. En este caso obviamente es 10 V dado que se encuentra justo en la fuente de voltaje E . El voltaje V_b es el voltaje del punto b a tierra. Dado que éste se encuentra directamente en el resistor de 4Ω , $V_b = 4 \text{ V}$.

En resumen:

La notación de subíndice sencillo V_a especifica el voltaje en el punto a con respecto a tierra (cero volts). Si el voltaje es menor a cero volts, deberá asociarse un signo negativo con la magnitud de V_a .

Comentarios generales

En este punto ya es posible establecer una relación particularmente útil que tendrá una amplia aplicación en el análisis de circuitos electrónicos. Para los estándares de notación anterior, existe la siguiente relación:

$$V_{ab} = V_a - V_b \quad (5.12)$$

En otras palabras, si se conoce el voltaje en los puntos a y b con respecto a tierra, entonces es posible determinar el voltaje V_{ab} utilizando la ecuación (5.12). En la figura 5.37, por ejemplo,

$$\begin{aligned} V_{ab} &= V_a - V_b = 10 \text{ V} - 4 \text{ V} \\ &= 6 \text{ V} \end{aligned}$$

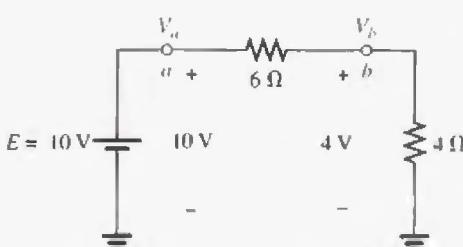


FIGURA 5.37

Definición del uso de la notación de subíndice sencillo para niveles de voltaje.

EJEMPLO 5.14 Encuentre el voltaje V_{ab} para las condiciones de la figura 5.38.

Solución: Al aplicar la ecuación (5.12):

$$\begin{aligned} V_{ab} &= V_a - V_b = 16 \text{ V} - 20 \text{ V} \\ &= -4 \text{ V} \end{aligned}$$

Observe el uso del signo negativo para reflejar que el punto b se encuentra a un mayor potencial que el punto a .

EJEMPLO 5.15 Encuentre el voltaje V_a para la configuración de la figura 5.39.

Solución: Al aplicar la ecuación (5.12):

$$\begin{aligned} V_{ab} &= V_a - V_b \\ \text{y} \quad V_a &= V_{ab} + V_b = 5 \text{ V} + 4 \text{ V} \\ &= 9 \text{ V} \end{aligned}$$

EJEMPLO 5.16 Encuentre el voltaje V_{ab} para la configuración de la figura 5.40.

Solución: Al aplicar la ecuación (5.12):

$$\begin{aligned} V_{ab} &= V_a - V_b = 20 \text{ V} - (-15 \text{ V}) = 20 \text{ V} + 15 \text{ V} \\ &= 35 \text{ V} \end{aligned}$$

Observe en el ejemplo 5.16 el cuidado que debe tenerse con los signos al aplicar la ecuación. El voltaje se encuentra cayendo desde un nivel alto de $+20 \text{ V}$ hasta un voltaje negativo de -15 V . Como se aprecia en la figura 5.41, esto representa una caída en el voltaje de 35 V . De alguna forma es como si pasáramos de un saldo positivo en una cuenta de $\$20$ a tener una deuda de $\$15$; el gasto total sería de $\$35$.

EJEMPLO 5.17 Encuentre los voltajes V_b , V_c y V_{ac} para la red de la figura 5.42.

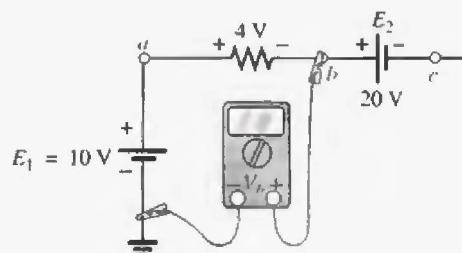


FIGURA 5.42
Ejemplo 5.17.

Solución: Comenzando desde un potencial de tierra (cero volts), se procede a una elevación de 10 V para llegar al punto a y luego se pasa por una caída de potencial de 4 V al punto b . El resultado es que el instrumento medidor presentará la lectura de:

$$V_b = +10 \text{ V} - 4 \text{ V} = 6 \text{ V}$$

como lo demuestra claramente la figura 5.43.

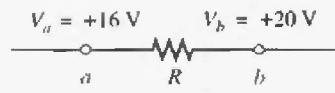


FIGURA 5.38
Ejemplo 5.14.

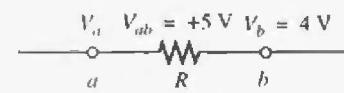


FIGURA 5.39
Ejemplo 5.15.

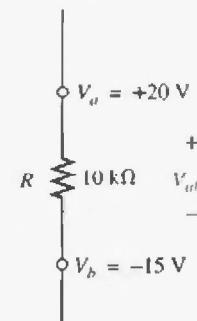


FIGURA 5.40
Ejemplo 5.16.

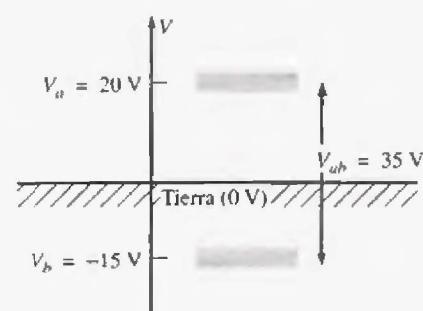


FIGURA 5.41
Impacto de voltajes positivos y negativos sobre la caída total de voltaje.

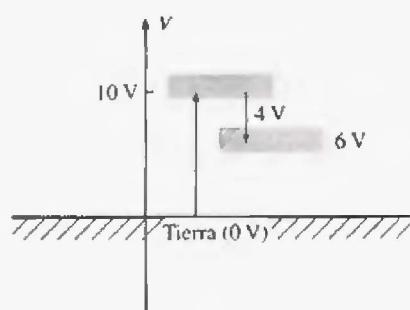


FIGURA 5.43
Determinación de V_b empleando los niveles de voltaje definidos.

Si se procede ahora con el punto *c*, existirá una caída adicional de 20 V, dando por resultado:

$$V_c = V_b - 20 \text{ V} = 6 \text{ V} - 20 \text{ V} = -14 \text{ V}$$

como se muestra en la figura 5.44.

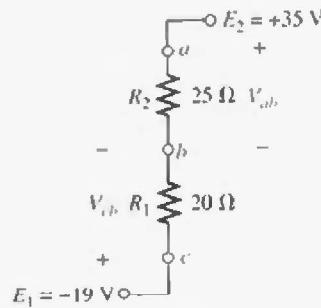


FIGURA 5.45
Ejemplo 5.18.

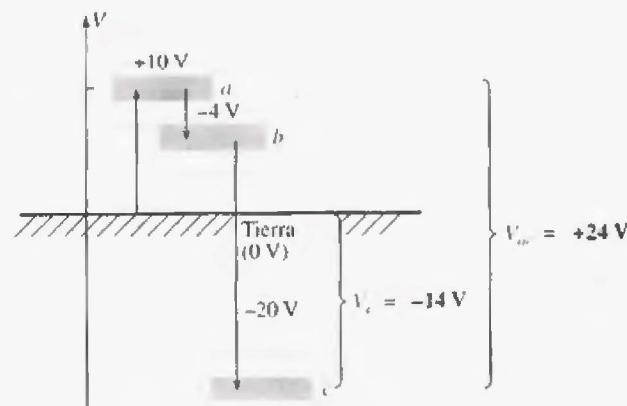


FIGURA 5.44

Revisión de los niveles de potencial para el circuito de la figura 5.42.

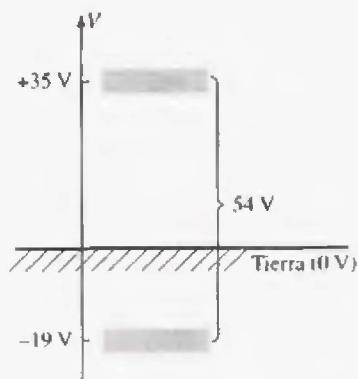


FIGURA 5.46

Determinación de la caída total de voltaje en los elementos resistentes de la figura 5.45.

El voltaje V_{ac} puede obtenerse utilizando la ecuación (5.12) o por simple referencia a la figura 5.44:

$$\begin{aligned} V_{ac} &= V_a - V_c = 10 \text{ V} - (-14 \text{ V}) \\ &= 24 \text{ V} \end{aligned}$$

EJEMPLO 5.18 Determinar V_{ab} , V_{cb} y V_c para la red de la figura 5.45.

Solución: Existen dos métodos para resolver este problema. El primero es trazar el diagrama de la figura 5.46 y observar que existe una caída de 54 V en los resistores en serie R_1 y R_2 . Luego, la corriente puede determinarse utilizando la ley de Ohm y los voltajes de la siguiente forma:

$$I = \frac{54 \text{ V}}{45 \Omega} = 1.2 \text{ A}$$

$$V_{ab} = IR_2 = (1.2 \text{ A})(25 \Omega) = 30 \text{ V}$$

$$V_{cb} = -IR_1 = -(1.2 \text{ A})(20 \Omega) = -24 \text{ V}$$

$$V_c = E_1 = -19 \text{ V}$$

El otro enfoque es volver a trazar la red como se muestra en la figura 5.47 para establecer con claridad el efecto auxiliar de E_1 y E_2 y luego resolver el circuito en serie resultante.

$$I = \frac{E_1 + E_2}{R_T} = \frac{19 \text{ V} + 35 \text{ V}}{45 \Omega} = \frac{54 \text{ V}}{45 \Omega} = 1.2 \text{ A}$$

$$\text{y } V_{ab} = 30 \text{ V} \quad V_{cb} = -24 \text{ V} \quad V_c = -19 \text{ V}$$

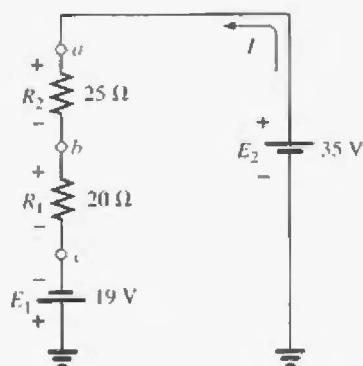


FIGURA 5.47

Nuevo trazado del circuito de la figura 5.45 empleando símbolos estándar de fuente de voltaje de cd.

EJEMPLO 5.19 Utilizando la regla del divisor de voltaje, determine los voltajes V_1 y V_2 de la figura 5.48.

Solución: Al volver a trazar la red con el símbolo estándar de la batería se obtiene la red de la figura 5.49. Al aplicar la regla del divisor de voltaje,

$$V_1 = \frac{R_1 E}{R_1 + R_2} = \frac{(4\Omega)(24\text{ V})}{4\Omega + 2\Omega} = 16\text{ V}$$

$$V_2 = \frac{R_2 E}{R_1 + R_2} = \frac{(2\Omega)(24\text{ V})}{4\Omega + 2\Omega} = 8\text{ V}$$

EJEMPLO 5.20 Para la red de la figura 5.50:

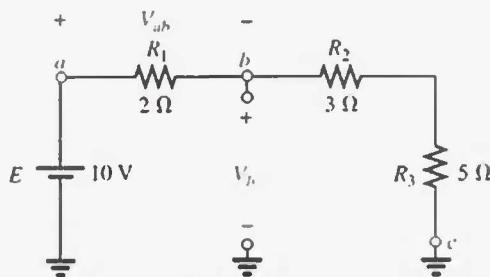


FIGURA 5.50
Ejemplo 5.20.

- Calcule V_{ab} .
- Determine V_b .
- Calcule V_c .

Soluciones:

a. Con la regla del divisor de voltaje:

$$V_{ab} = \frac{R_1 E}{R_T} = \frac{(2\Omega)(10\text{ V})}{2\Omega + 3\Omega + 5\Omega} = +2\text{ V}$$

b. Con la regla del divisor de voltaje:

$$V_b = V_{R_2} + V_{R_3} = \frac{(R_2 + R_3)E}{R_T} = \frac{(3\Omega + 5\Omega)(10\text{ V})}{10\Omega} = 8\text{ V}$$

$$\text{o bien } V_b = V_a - V_{ab} = E - V_{ab} = 10\text{ V} - 2\text{ V} = 8\text{ V}$$

c. $V_c = \text{potencial de tierra} = 0\text{ V}$

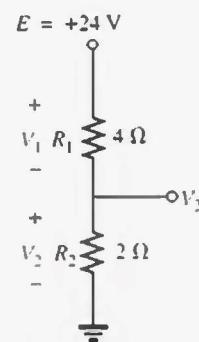


FIGURA 5.48
Ejemplo 5.19.

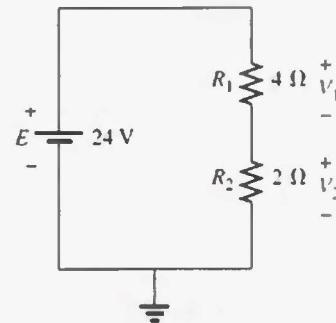


FIGURA 5.49
Circuito de la figura 5.48 trazado de nuevo.

5.8 RESISTENCIA INTERNA DE FUENTES DE VOLTAJE

Cada fuente de voltaje, ya sea un generador, una batería o una fuente de laboratorio como las que se muestran en la figura 5.51(a), tiene cierta resistencia interna. Por tanto, el circuito equivalente de cualquier fuente de voltaje aparecerá como el mostrado en la figura 5.51(b). En esta sección se analizará el efecto de la resistencia interna sobre el voltaje de salida, de forma que sea posible explicar cualquier cambio inesperado en las características terminales.

En todos los análisis de circuitos realizados hasta ahora, se utilizó la fuente de voltaje ideal (sin resistencia interna) [vea la figura 5.52(a)]. La fuente de voltaje ideal no cuenta con resistencia interna y presenta un voltaje de salida de E volts sin carga o con carga completa. En el caso práctico [Figura 5.52(b)],

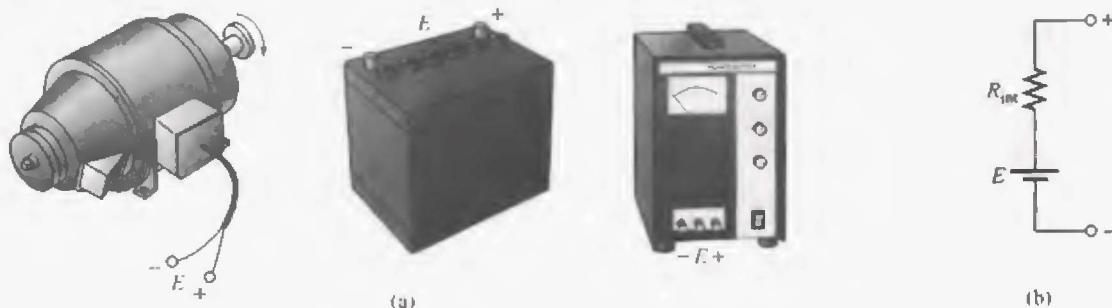


FIGURA 5.51
(a) Fuentes de voltaje de cd; (b) circuito equivalente.

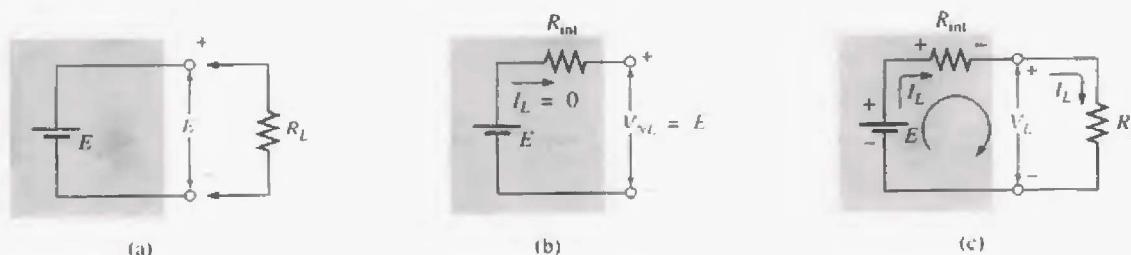


FIGURA 5.52
Fuente de voltaje: (a) ideal, $R_{int} = 0 \Omega$; (b) determinación de V_{NL} ; determinación de R_{int} .

donde consideramos los efectos de la resistencia interna, el voltaje de salida será de E volts únicamente cuando se presenten las condiciones sin carga ($I_L = 0$). Cuando se conecta una carga [Figura 5.52(c)], el voltaje de salida de la fuente de voltaje disminuirá debido a la caída de voltaje en la resistencia interna.

Al aplicar la ley de voltaje de Kirchhoff alrededor del lazo indicado por la figura 5.52(c) obtenemos:

$$\begin{aligned} E - I_L R_{int} - V_L &= 0 \\ \text{o, dado que} \quad E &= V_{NL} \\ \text{tenemos} \quad V_{NL} - I_L R_{int} - V_L &= 0 \\ \text{y} \quad V_L &= V_{NL} - I_L R_{int} \end{aligned} \tag{5.13}$$

Si el valor de R_{int} no se encuentra disponible, puede obtenerse al resolver primero R_{int} en la ecuación recién deducida de V_L ; es decir,

$$R_{int} = \frac{V_{NL} - V_L}{I_L} = \frac{V_{NL}}{I_L} - \frac{I_L R_L}{I_L}$$

$$\text{y} \quad R_{int} = \frac{V_{NL}}{I_L} - R_L \tag{5.14}$$

En la figura 5.53 se presenta una gráfica del voltaje de salida en función de la corriente para el generador de cd que tiene el circuito equivalente de la figura 5.51(b). Observe que todo incremento en la demanda de carga, comenzando en cualquier nivel, ocasiona una caída adicional en el voltaje terminal gracias a la creciente pérdida de potencial a través de la resistencia interna. Al nivel de

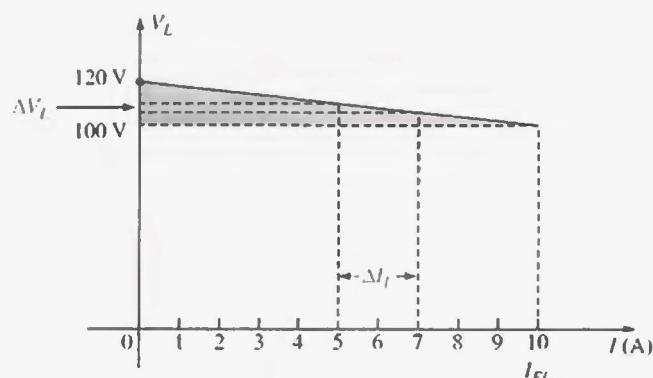


FIGURA 5.53

V_L en comparación con I_L , para un generador cd con $R_{int} = 2 \Omega$.

corriente máxima, señalada por I_{FL} , el voltaje en la resistencia interna será $V_{int} = I_{FL}R_{int} = (10 \text{ A})(2 \Omega) = 20 \text{ V}$, y el voltaje terminal habrá caído a 100 V —lo cual es una diferencia importante cuando idealmente se esperaría que un generador de 120 V proporcione los 120 V si nos mantenemos por debajo de la corriente señalada de carga completa. Eventualmente, si se permitiera que la corriente de carga se incrementara sin límite, el voltaje en la resistencia interna igualaría el voltaje de alimentación, y el voltaje terminal sería cero. Mientras mayor sea la resistencia interna, más pronunciada será la pendiente de las características de la figura 5.53. De hecho, para cualquier intervalo seleccionado de voltaje o corriente, la magnitud de la resistencia interna estará dada por:

$$R_{int} = \frac{\Delta V_L}{\Delta I_L} \quad (5.15)$$

Para el intervalo seleccionado de 5–7 A ($\Delta I_L = 2 \text{ A}$) sobre la figura 5.53, ΔV_L será 4 V, y $R_{int} = \Delta V_L / \Delta I_L = 4 \text{ V} / 2 \text{ A} = 2 \Omega$.

Una consecuencia directa de la pérdida de voltaje de salida es una pérdida en la potencia entregada a la carga. Al multiplicar ambos lados de la ecuación (5.13) por la corriente I_L dentro del circuito se obtiene:

$I_L V_L$	=	$I_L V_{NL}$	-	$I_L^2 R_{int}$	(5.16)
Potencia a la carga		Salida de potencia por la batería		Pérdida de potencia en forma de calor	

EJEMPLO 5.21 Antes de aplicar una carga, el voltaje terminal de la fuente de alimentación de la figura 5.54(a) se establece en 40 V. Cuando se conecta una carga de 500Ω como se muestra en la figura 5.54(b), el voltaje terminal cae a 38.5 V. ¿Qué sucedió con el resto del voltaje sin carga, y cuál es la resistencia interna de la fuente?

Solución: La diferencia de $40 \text{ V} - 38.5 \text{ V} = 1.5 \text{ V}$ se presentará ahora en la resistencia interna de la fuente. La corriente de carga será $38.5 \text{ V} / 0.5 \text{k}\Omega = 77 \text{ mA}$. Al aplicar la ecuación (5.14),

$$\begin{aligned} R_{int} &= \frac{V_{NL}}{I_L} - R_L = \frac{40 \text{ V}}{77 \text{ mA}} - 0.5 \text{ k}\Omega \\ &= 519.48 \Omega - 500 \Omega = 19.48 \Omega \end{aligned}$$

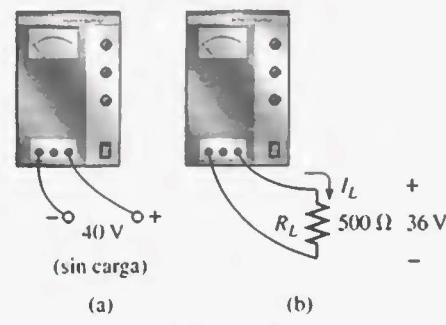


FIGURA 5.54
Ejemplo 5.21.

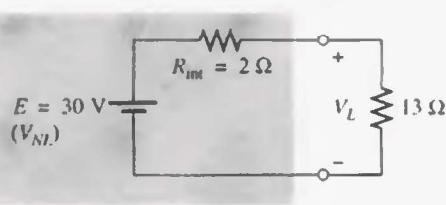


FIGURA 5.55
Ejemplo 5.22.

EJEMPLO 5.22 La batería de la figura 5.55 cuenta con una resistencia interna de 2Ω . Encuentre el voltaje V_L y la potencia perdida por la terminal interna si la carga aplicada es un resistor de 13Ω .

Solución:

$$I_L = \frac{30 \text{ V}}{2 \Omega + 13 \Omega} = \frac{30 \text{ V}}{15 \Omega} = 2 \text{ A}$$

$$V_L = V_{NL} - I_L R_{int} = 30 \text{ V} - (2 \text{ A})(2 \Omega) = 26 \text{ V}$$

$$P_{\text{perdida}} = I_L^2 R_{int} = (2 \text{ A})^2 (2 \Omega) = (4)(2) = 8 \text{ W}$$

En la sección 5.10 se describirán los procedimientos para medir R_{int} .

5.9 REGULACIÓN DE VOLTAJE

Para cualquier fuente, las condiciones ideales estipulan que para el rango de demanda de carga (I_L), el voltaje terminal permanece fijo en magnitud. En otras palabras, si una fuente se fija en 12 V, es deseable que mantenga este voltaje terminal, aunque la demanda de corriente a la fuente pueda variar. Una medida de qué tan cercana se encuentra una fuente a las condiciones ideales la ofrece la característica de regulación de voltaje. Por definición, la **regulación de voltaje (RV)** de una fuente entre los límites de las condiciones con carga completa (FL, del inglés *Full Load*) y sin carga (NL, del inglés *No Load*) (Figura 5.56) estará dada por lo siguiente:

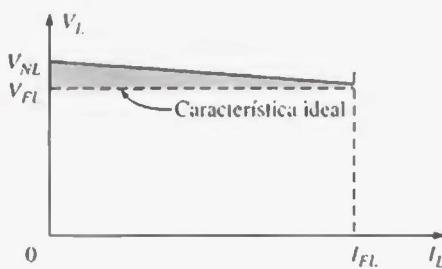


FIGURA 5.56
Definición de la regulación de voltaje.

$$\% \text{ de regulación de voltaje (RV)} = \frac{V_{NL} - V_{FL}}{V_{FL}} \times 100\% \quad (5.17)$$

Para condiciones ideales, $V_{FL} = V_{NL}$ y $RV\% = 0$. Por tanto, mientras más pequeña sea la regulación de voltaje, menor será la variación en el voltaje terminal ante cambios en la carga.

Es posible mostrar con una pequeña deducción que la regulación de voltaje también está dada por:

$$RV\% = \frac{R_{int}}{R_L} \times 100\% \quad (5.18)$$

En otras palabras, mientras menor sea la resistencia interna para una misma carga, menor será la regulación de voltaje y más ideal será la salida.

EJEMPLO 5.23 Calcule la regulación de voltaje de una fuente que posee las características de la figura 5.53.

Solución:

$$\begin{aligned} RV\% &= \frac{V_{NL} - V_{FL}}{V_{FL}} \times 100\% = \frac{120 \text{ V} - 100 \text{ V}}{100 \text{ V}} \times 100\% \\ &= \frac{20}{100} \times 100\% = 20\% \end{aligned}$$

EJEMPLO 5.24 Determine la regulación de voltaje de la fuente mostrada en la figura 5.54.

Solución:

$$VR\% = \frac{R_{int}}{R_L} \times 100\% = \frac{19.48 \Omega}{500 \Omega} \times 100\% \approx 3.9\%$$

5.10 TÉCNICAS DE MEDICIÓN

En el capítulo 2 se observó que los amperímetros se insertan dentro de la rama en que se medirá la corriente. Ahora se advierte que tal condición especifica que:

los amperímetros se colocan en serie con la rama en la que se medirá la corriente.

como se muestra en la figura 5.57.

Si se busca que el amperímetro tenga un mínimo impacto sobre el comportamiento de la red, su resistencia deberá ser muy pequeña (idealmente de cero ohms) en comparación con los otros elementos en serie de la rama, tal como el resistor R de la figura 5.57. Si la resistencia del medidor se aproxima o excede al 10% de R , naturalmente que tendrá un impacto significativo sobre el nivel de corriente que está midiendo. También es importante observar que las resistencias de las distintas escalas de corriente de un mismo medidor no siempre son iguales. De hecho, la resistencia del amperímetro normalmente aumenta con la disminución de los niveles de corriente. Sin embargo, para la mayor parte de las situaciones, puede suponerse simplemente que la resistencia interna del amperímetro es tan pequeña, en comparación con los otros elementos del circuito, que se puede ignorar.

Para una lectura de escala ascendente (medidor analógico) o positiva (medidor digital), el amperímetro debe conectarse con la corriente ingresando por la terminal positiva del medidor y saliendo por la terminal negativa, como se muestra en la figura 5.58. Debido a que la mayoría de los medidores utilizan una punta roja para la terminal positiva y una punta negra para la terminal negativa, usted solamente debe asegurarse de que la corriente ingresa por la punta roja y sale por la punta negra.

Los voltímetros siempre se conectan a través del elemento para el cual se determinará el voltaje.

Se obtiene una lectura positiva o de escala ascendente en un voltímetro al asegurarse que la terminal positiva (punta roja) se encuentra conectada al punto con el potencial más alto y la terminal negativa (punta negra) conectada al potencial más bajo, como se muestra en la figura 5.59.

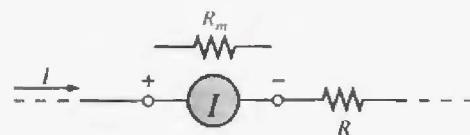


FIGURA 5.57
Conexión en serie de un amperímetro.

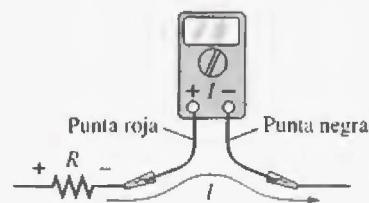


FIGURA 5.58
Conexión de un amperímetro para obtener una lectura de escala ascendente (positiva).

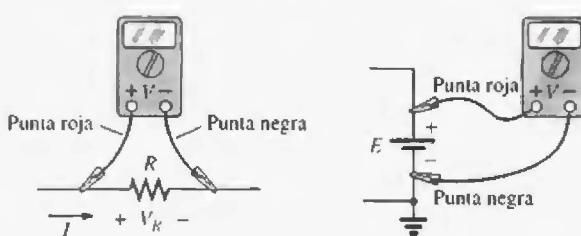


FIGURA 5.59

Conexión de un voltímetro para obtener una lectura de escala ascendente (positiva).

Para una notación de doble subíndice, siempre conecte la punta roja al primer subíndice y la negra al segundo; es decir, para medir el voltaje V_{ab} en la figura 5.60, conecte la punta roja al punto a y la punta negra al punto b . Para

la notación de subíndice sencillo, conecte la punta roja al punto de interés y la punta negra a tierra, como se muestra en la figura 5.60 para V_a y V_b .

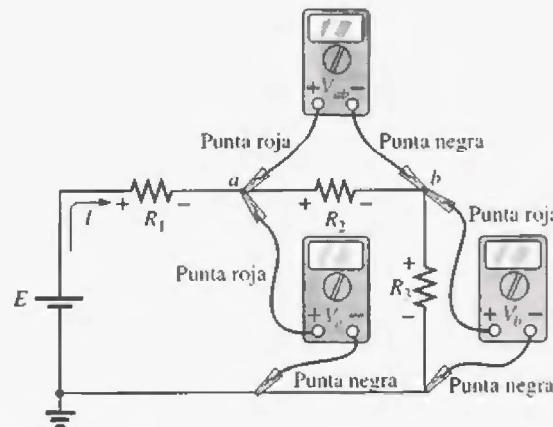


FIGURA 5.60
Medición de voltajes con notación de subíndices doble y sencillo.

La resistencia interna de una fuente no puede medirse con un ohmímetro debido al voltaje presente. Sin embargo, el voltaje sin carga puede medirse mediante la simple conexión del voltímetro como se muestra en la figura 5.61(a). No se preocupe por la trayectoria aparente de corriente que el medidor parece proporcionar al cerrar el circuito. La resistencia interna del medidor, por lo general, es lo suficientemente grande como para asegurar que la corriente resultante sea tan pequeña que pueda ignorarse. (Los efectos de la carga del voltímetro se discutirán con todo detalle en la sección 6.9.) Un amperímetro podría entonces colocarse directamente a través de la fuente, como se muestra en la figura 5.61(b), para medir la corriente de circuito cerrado (corto circuito) I_{SC} y R_{int} según lo determina la ley de Ohm: $R_{int} = E_{Nf}/I_{SC}$. Sin embargo, dado que la resistencia interna de la fuente puede ser muy baja, realizar la medición podría dar por resultado niveles de corriente muy altos que dañarían el aparato, la fuente y, posiblemente, causarían peligrosos efectos secundarios. Por tanto, *no* se sugiere la configuración de la figura 5.61(b). Una mejor forma sería aplicar una carga resistiva que ocasione una corriente de fuente de cerca de la mitad del valor nominal máximo y medir el voltaje terminal. Aplicando entonces la ecuación (5.14).

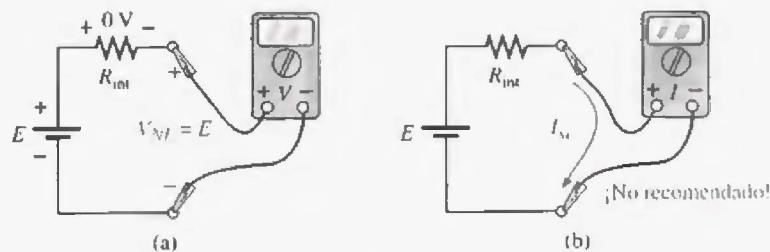


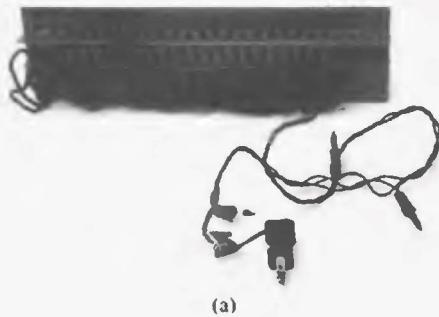
FIGURA 5.61
(a) Medición del voltaje E sin carga; (b) medición de la corriente de corto circuito.

5.11 APLICACIONES

Luces navideñas

En años recientes las pequeñas luces navideñas intermitentes con hasta 50 o 100 focos en una serie se han vuelto muy populares [vea la figura 5.62(a)]. Aunque estas luces navideñas pueden conectarse en serie o en paralelo (como se describirá en el siguiente capítulo), las luces intermitentes más pequeñas se conectan, por lo general, en serie. Es relativamente fácil determinar si las luces están conectadas en serie. Si entra y sale un solo cable de la base de cada foco, las luces se encuentran en serie; si dos cables entran y salen, probablemente se encuentren en paralelo. Por lo general, cuando los focos se conectan en serie, si uno de éstos se funde (el filamento se rompe y el circuito se abre), todos los demás se apagarán dado que la trayectoria de corriente ha sido interrumpida. Sin embargo, los focos de la figura 5.62(a) son diseñados especialmente, como se muestra en la figura 5.62(b), para permitir que la corriente continúe fluyendo a los otros focos cuando los filamentos se funden. En la base de cada foco existe un fusible de cinta enrollado alrededor de los dos postes que sostienen el filamento. El fusible de cinta de un material conductor suave parece estar tocando los dos postes verticales, pero, de hecho, un recubrimiento sobre los postes o sobre el fusible evita la conducción de uno a otro bajo condiciones normales de operación. Si un filamento se rompe y crea un circuito abierto entre los postes, la corriente a través de éste y los demás focos se vería interrumpida si no existiera el fusible de cinta. En el momento en que el foco se funde, la corriente que cruza el circuito es cero, y los 120 V de salida se presentarán en el foco descompuesto. Este voltaje alto de un poste a otro en un solo foco posee una diferencia de potencial suficiente para establecer una corriente a través del recubrimiento aislante y soldar el fusible de unión a los dos postes. Con esto el circuito estará nuevamente completo, y todos los focos se encenderán excepto el que activó el fusible de cinta. Sin embargo, tenga presente que cada vez que se funde un foco, existirá un mayor voltaje en los otros focos del circuito, haciendo que brillen más fuerte. Eventualmente, si demasiados focos se funden, el voltaje alcanzará un punto en que los otros focos se fundirán en rápida sucesión. El resultado es que se deben reemplazar los focos fundidos a la primera oportunidad.

Los focos mostrados en la figura 5.62(a) están valorados en 2.5 V a 0.2A o 200 mA. Dado que existen 50 focos en serie, el voltaje total que cruza por ellos es de 50×2.5 V o 125 V, el cual concuerda con el voltaje normal



(a)

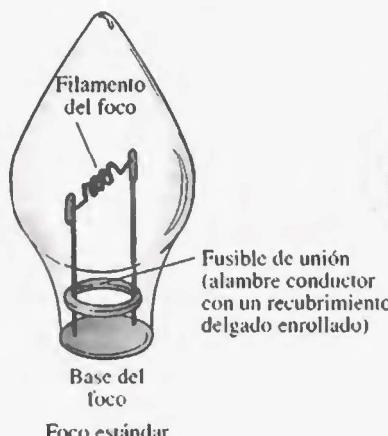
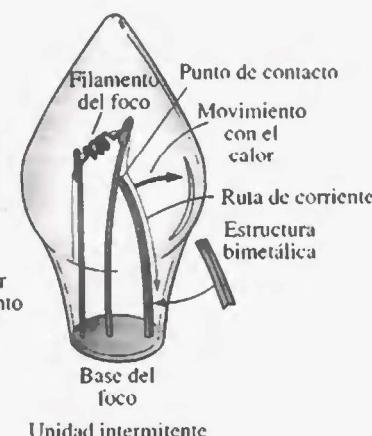


FIGURA 5.62

Luces navideñas: (a) serie de 50 unidades; (b) estructura de un foco.

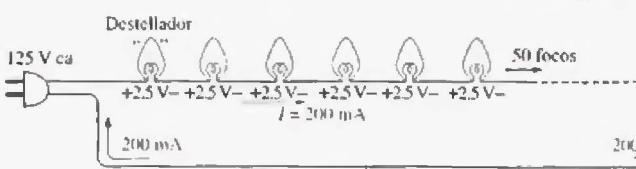


(b)

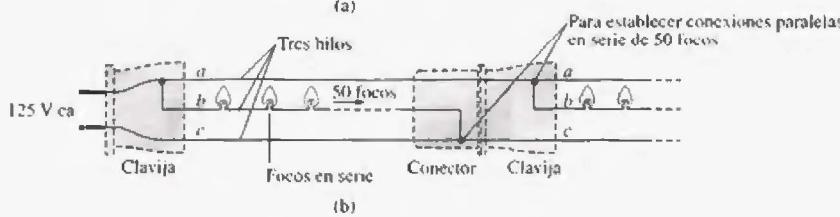
disponible en el hogar. Dado que los focos se encuentran en serie, la corriente a través de cada foco será de 200 mA. El nivel de potencia de cada foco será, por tanto, $P = VI = (2.5 \text{ V})(0.2 \text{ A}) = 0.5 \text{ W}$, con la demanda de potencia total de $50 \times 0.5 \text{ W} = 25 \text{ W}$.

En la figura 5.63(a) se proporciona una representación esquemática de la serie de luces mostrada en la figura 5.62(a). Observe que sólo se requiere una unidad intermitente. Dado que los focos se encuentran en serie, cuando la unidad intermitente interrumpe el flujo de corriente, apagará todos los focos. Como se muestra en la figura 5.62(b), la unidad intermitente incorpora un interruptor térmico bimetálico que se abrirá cuando se caliente a un nivel predeterminado por la corriente. Tan pronto como se abra, comenzará a enfriarse y se cerrará nuevamente de forma que la corriente pueda regresar a los focos. Luego, se calentará de nuevo, se abrirá y se repetirá todo el proceso. El resultado es una acción de encendido y apagado que crea el patrón destellante con el que estamos tan familiarizados. Naturalmente, en un clima muy frío (por ejemplo, en exteriores nevados y con hielo), la serie tomará más tiempo para calentarse, así que el patrón destellante se verá reducido al principio; pero a medida que los focos se calienten, la frecuencia se incrementará.

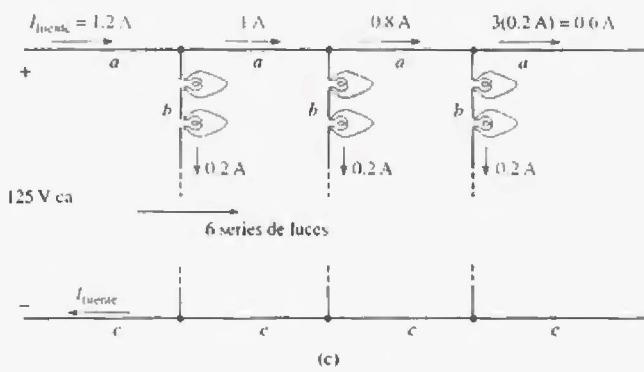
El fabricante especifica que no deben conectarse juntas más de 6 series de luces. La primera pregunta que surge es, ¿cómo pueden conectarse los juegos, de extremo a extremo, sin reducir el voltaje en cada foco y sin que las luces se vuelvan más débiles? Al observar detenidamente el cableado se verá que, como los focos están conectados en serie, existe un cable para cada foco con cables adicionales de conector a conector. ¿Por qué se necesitan dos cables adicionales si los focos se conectan en serie? La respuesta radica en el hecho de que cuando cada serie de luces sea conectada junto con otra, realmente se encontrarán en paralelo (lo cual se analizará en el siguiente capítulo) mediante el arreglo único de conexión que se muestra en la figura 5.63(b) y trazado de



(a)



(b)



(c)

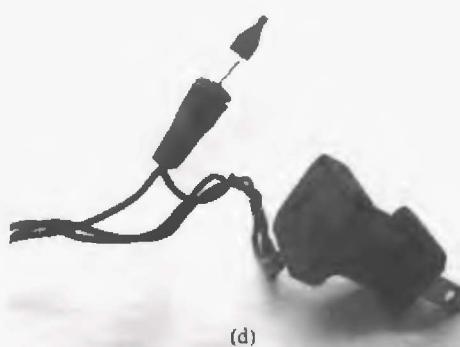


FIGURA 5.63

(a) Diagrama de conexión para una serie de luces sencilla; (b) arreglo de conexión especial; (c) nuevo trazado del diagrama esquemático; (d) clavija especial y unidad intermitente.

nuevo en la figura 5.63(c) para poder advertir claramente el arreglo en paralelo. Observe que la línea superior es la línea principal de todas las series de luces conectadas, y la línea inferior es la línea de retorno, neutral, o tierra para todas las series. Dentro de la clavija de la figura 5.63(d) la línea principal y la de retorno se encuentran conectadas a cada juego, teniendo las conexiones de las terminales metálicas de la clavija como se muestran en la figura 5.63(b). En el siguiente capítulo veremos que la corriente extraída del enchufe de la pared para cargas paralelas es la suma de la corriente a cada rama. El resultado, como se muestra en la figura 5.63(c), es que la corriente extraída de la fuente será de $6 \times 200 \text{ mA} = 1.2 \text{ A}$, y la potencia total para las seis series de luces será el producto del voltaje aplicado y la corriente de fuente o $(120 \text{ V})(1.2 \text{ A}) = 144 \text{ W}$ con $144 \text{ W}/6 = 24 \text{ W}$ por serie de luces.

Horno de microondas

Los circuitos en serie pueden ser muy efectivos en el diseño de equipo de seguridad. A pesar de que se reconoce la utilidad del horno de microondas, éste puede resultar muy peligroso si la puerta no se encuentra cerrada o sellada adecuadamente. No basta con verificar que esté cerrado en un solo punto del contorno de la puerta ya que ésta se puede doblar o distorsionar por el uso continuo, y podría existir alguna fuga en algún lugar alejado del punto de verificación. En la figura 5.64 se muestra un arreglo común de seguridad. Observe que los interruptores magnéticos se encuentran localizados alrededor de toda la puerta, teniendo el imán en la propia puerta y el interruptor magnético de ésta en el marco principal. Los interruptores magnéticos son simplemente interruptores donde el imán atrae una barra conductora magnética situada entre dos contactos para completar el circuito —lo que se muestra de alguna forma por medio del símbolo del dispositivo presentado en el diagrama de circuito de la figura 5.64. Dado que los interruptores magnéticos se encuentran en serie, deben cerrarse todos para completar el circuito y encender la unidad de energía. Si la puerta se encuentra tan fuera de forma como para evitar que un solo imán se acerque lo suficiente al mecanismo de interrupción, el circuito no

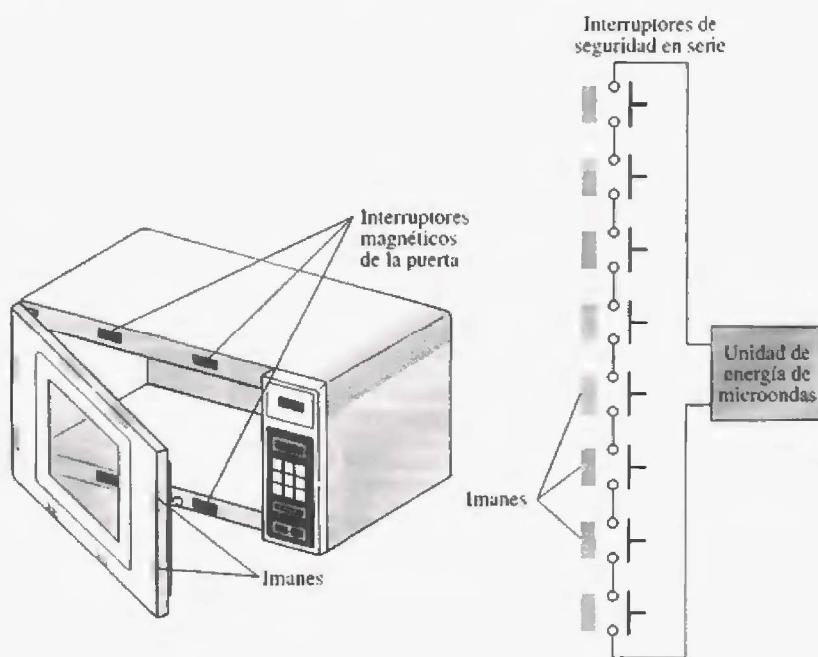


FIGURA 5.64
Interruptores de seguridad en serie en un horno de microondas.

estará completo y no podrá encenderse el aparato. Dentro de la unidad de control de la fuente de alimentación, el circuito en serie completa un circuito para lograr la operación o se establece una corriente de sensor que controla y monitorea la operación del sistema.

Circuito de alarma en serie

El circuito de la figura 5.65 es un circuito simple de alarma. Observe que cada elemento del diseño se encuentra en una configuración en serie. La fuente de alimentación es una fuente de 5 V que puede proporcionarse mediante un diseño similar al de la figura 2.31, una batería de cd, o una combinación de una fuente de cd y ca que asegure que la batería siempre se encontrará completamente cargada. Si todos los sensores se encuentran cerrados se obtendrá una corriente de 5 mA debido a la carga terminal del relevador de cerca de 1 k Ω . La corriente activará el relevador y mantendrá una posición de apagado para la alarma. Sin embargo, si alguno de los sensores se abre, la corriente será interrumpida, el relevador se desactivará y el circuito de alarma se activará. Con relativamente poco cable y unos cuantos sensores, el sistema deberá trabajar bien dado que la caída de voltaje en cada sensor será mínima. Sin embargo, debido a que el cable de alarma por lo general es relativamente delgado, occasionando un nivel medible de resistencia, si el cable que va a los sensores es demasiado largo, se observará una caída de voltaje en la línea, reduciendo con esto el voltaje en el relevador hasta un punto en que la alarma pudiera no funcionar adecuadamente. De esta forma, la longitud del cable es un factor que debe considerarse cuando se emplea una configuración en serie. Un cuidado adecuado de la longitud del cable deberá eliminar cualquier preocupación concerniente a esta operación. En el capítulo 8 se presentará un mejor diseño de este circuito.

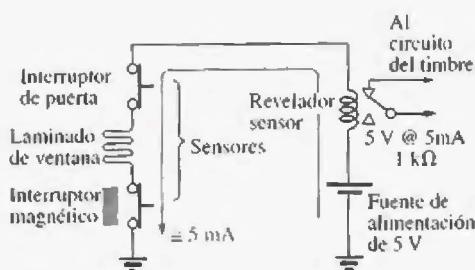


FIGURA 5.65
Circuito de alarma en serie.

5.12 ANÁLISIS POR COMPUTADORA

PSpice

En la sección 4.9 se presentó el procedimiento básico para configurar la carpeta de PSpice y ejecutar el programa. Debido al detalle ofrecido en esa sección, el lector deberá revisarlo antes de proceder con este ejemplo. Ya que éste es apenas el segundo ejemplo utilizando PSpice, se proporcionará cierto detalle, pero no al mismo nivel que el visto en la sección 4.9.

El circuito que se analizará aparece en la figura 5.66. Dado que la carpeta de PSpice se estableció en la sección 4.9, no hay necesidad de repetir aquí el proceso puesto que se encuentra disponible de manera inmediata. Al hacer doble clic sobre el ícono de **Orcad Lite Edition** se generará la pantalla de captura **Orcad Capture-Lite Edition**. Luego se inicia un nuevo proyecto al seleccionar la opción **Create Document** (Crear documento) en la parte superior izquierda de la pantalla (que parece una página con una estrella en la esquina superior izquierda). Con esto se obtiene el cuadro de diálogo **New Project** (Proyecto nuevo) en el que **SeriesDC** se encuentra insertado como el nombre, **Name**. Ya se encuentra seleccionada la opción **Analog or Mixed A/D** y **C:\PSPice** aparece en **Location** —sólo deberá ingresarse el nombre, **Name!**. Haga clic sobre **OK** y aparecerá el cuadro de diálogo de **Create PSpice Project**. Seleccione **Create a blank project** (Crear proyecto nuevo), haga clic en **OK** y aparecerá la ventana de trabajo. Al mantener seleccionada la esquina izquierda de la ventana de **SCHEMATIC1:PAGE1** (esquema, página 1) el lector podrá moverla hacia la derecha de forma que pueda ver las dos ventanas. Al hacer clic en el signo + dentro de la ventana de **Project Manager** (Administrador del proyecto) podrá establecerse la secuencia hasta **PAGE1** (página 1). Si prefiere cambiar el nom-

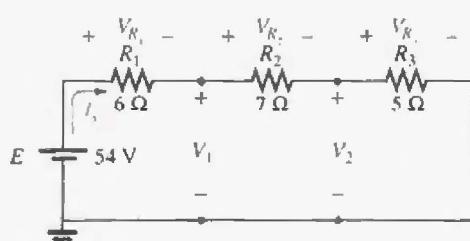


FIGURA 5.66
Red de cd en serie que se analizará
utilizando PSpice.

bre de **SCHEMATIC1** selecciónelo y haga clic con el botón derecho del mouse. Aparecerá un listado con la opción **Rename**; al seleccionar ésta se obtendrá el cuadro de diálogo **Rename Schematic** en el cual se puede ingresar el nombre **SeriesDC**. En la figura 5.67 se dejó como **SCHEMATIC1**.

El siguiente paso es muy importante ahora. Si la barra de herramientas en el extremo derecho no aparece, asegúrese de hacer doble clic sobre **PAGE1** en la ventana **Project Manager**, o seleccione la **ventana del esquema**. Cuando el encabezado de la **ventana del esquema** sea azul oscuro, aparecerá la barra de herramientas. Para comenzar a construir el circuito, seleccione la tecla **Place a part** (**Colocar un elemento**) (la segunda tecla hacia abajo) para obtener el cuadro de diálogo **Place Part**. Observe que ahora la biblioteca **SOURCE** se encuentra ya en su lugar en **Library** (la lista de bibliotecas) como consecuencia del trabajo realizado en el capítulo 4, por lo que no necesita reinstalarse. Al seleccionar **SOURCE** se obtendrá una lista de fuentes debajo de **Part List**, de donde podrá seleccionarse **VDC**. Al hacer clic sobre **OK**, el cursor podrá colocarla en su lugar con un solo clic izquierdo. Haga clic con el botón derecho y seleccione **End Mode** para finalizar el proceso, dado que la red sólo cuenta con una fuente. Con un clic izquierdo adicional la fuente se encontrará en su lugar. Ahora, se selecciona nuevamente la tecla **Place a part**, seguida de la biblioteca **ANALOG** para localizar el transistor **R**. Una vez que éste ha sido seleccionado, al presionar en **OK** se colocará junto al cursor sobre la pantalla. En esta ocasión, como es necesario colocar tres resistores, no hay que desplazarse hacia **End Mode** entre cada colocación de éstos. Simplemente se hace clic en un lugar, luego en el siguiente y por último en un tercer sitio. Entonces se hace clic con el botón derecho para terminar el proceso con **End Mode**. Por último, debe añadirse **GND** (tierra) por medio de la tecla apropiada y seleccionando **0/SOURCE** en el cuadro de diálogo **Place Ground** (**colocar tierra**). Se hace clic sobre **OK** y se coloca la tierra como se muestra en la figura 5.67.

Ahora los elementos deberán conectarse entre sí utilizando la tecla **Place a wire** (**Colocar un cable**) para conseguir el cursor en forma de cruz sobre la pantalla. Se comienza en la parte superior de la fuente de voltaje con un clic izquierdo, y se traza el cable, haciendo clic izquierdo en cada giro de 90°. Cuando ya esté conectado un cable de un elemento a otro, se continúa con la siguiente conexión que deba hacerse, no es necesario ir a **End Mode** entre cada conexión. Ahora se

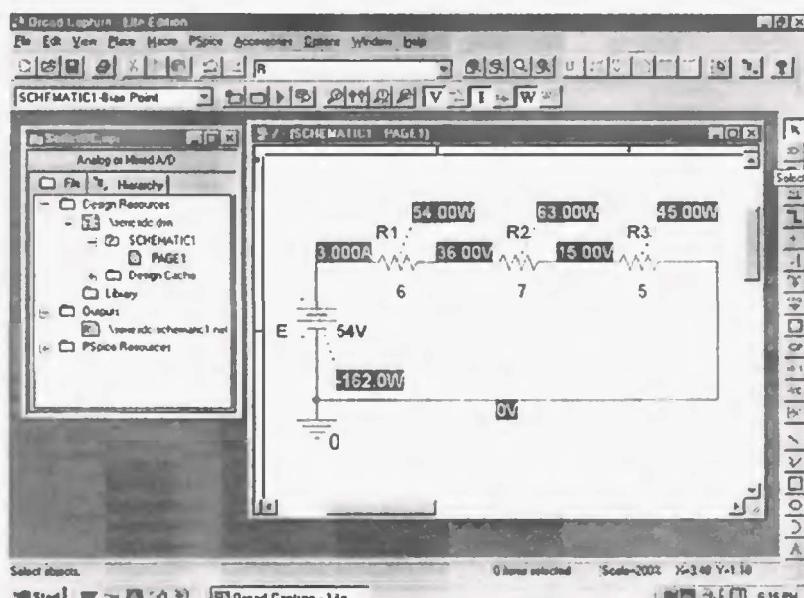


FIGURA 5.67
Aplicación de PSpice a un circuito de cd en serie.

tienen que asignar los valores y las etiquetas mediante un doble clic sobre cada parámetro para obtener el cuadro de diálogo **Display Properties** (Propiedades visuales). Dado que este cuadro de diálogo aparece con la cantidad de interés en un fondo azul, simplemente se teclea el nivel o valor deseado, seguido por **OK**. Ahora la red se encuentra completa y lista para analizarse.

Antes de la simulación, se seleccionan V, I y W en la barra de herramientas situada en la parte superior de la pantalla para asegurar que se desplieguen los voltajes, las corrientes y la potencia. Para comenzar la simulación, se selecciona la tecla **New Simulation Profile** (la cual aparece como una hoja de datos en la segunda barra de herramientas hacia abajo con una estrella en la esquina superior izquierda) y se obtiene el cuadro de diálogo **New Simulation**. Introduzca **Bias Point** para una solución de cd bajo **Name**, y presione la tecla de creación **Create**. Aparecerá el cuadro de diálogo **Simulation Settings-Bias Point**, en el cual se selecciona **Analysis**, y **Bias Point** se localiza debajo del encabezado de **Analysis type**. Se hace clic en **OK** y luego se selecciona la tecla **Run PSpice** (la flecha azul) para comenzar la simulación. Salga de la pantalla resultante, y se desplegará la de la figura 5.67.

La corriente claramente será de 3 A para el circuito con 15 V en R_3 , y 36 V desde un punto entre R_1 y R_2 a tierra. El voltaje en R_2 será de $36V - 15V = 21V$, y el voltaje en R_1 será de $54V - 36V = 18V$. También se presentará la potencia suministrada o disipada por cada elemento. No hay duda de que los resultados de la figura 5.67 incluyen además una agradable representación de los niveles de voltaje, corriente y potencia.

Electronics Workbench (EWB)

Debido a que éste es apenas el segundo circuito que se construye utilizando EWB, se presenta una lista detallada de pasos como forma de repaso. Sin embargo, en esencia, el circuito completo de la figura 5.68 puede "trazarse" utilizando simplemente la información para la construcción presentada en el capítulo 4.

Una vez que se ha seleccionado el ícono **Multisim 2001**, aparecerá una ventana para el **Multisim Circuit 1** lista para aceptar los elementos del circuito. Se selecciona la tecla de fuentes **Sources** de la parte superior de la barra izquierda de herramientas, y se presentará una colección de fuentes **Sources** con 30 opciones. Se selecciona la opción superior para colocar la tierra **GROUND** en la pantalla de la figura 5.68, y la tercera opción para obtener una fuente de voltaje de cd **DC_VOLTAGE_SOURCE**. Los resistores se obtienen al seleccionar la segunda tecla hacia abajo de la barra de herramientas situada a la izquierda y denominada **Basic** (básica). El resultado de esto son 25 opciones de las que se selecciona **RESISTOR_VIRTUAL** (el resistor virtual). Debe regresarse a la tecla **RESISTOR_VIRTUAL** para colocar cada resistor sobre la pantalla. Sin embargo, cada nuevo resistor se encontrará numerado en secuencia, aunque a todos los resistores se les asignará el valor predeterminado de $1\text{ k}\Omega$. Recuerde del análisis del capítulo 4 que debe añadir los medidores antes de conectar los elementos entre sí, ya que los medidores ocupan espacio y deben orientarse de forma adecuada. La corriente estará determinada por el amperímetro **XMM1** y los voltajes por los voltímetros **XMM2** a **XMM5**. Tiene particular importancia observar que:

en EWB los medidores se conectan exactamente de la misma forma que se conectarían en un circuito activo en el laboratorio. Los amperímetros se colocan en serie con la rama en la que se determinará la corriente, y los voltímetros se conectan entre los dos puntos de interés (en los resistores). Además, para obtener lecturas positivas, los amperímetros se conectan de forma que la corriente convencional entre por la terminal positiva, y para el caso de los voltímetros, se conectan de forma que el punto con el potencial más alto esté conectado con la terminal positiva.

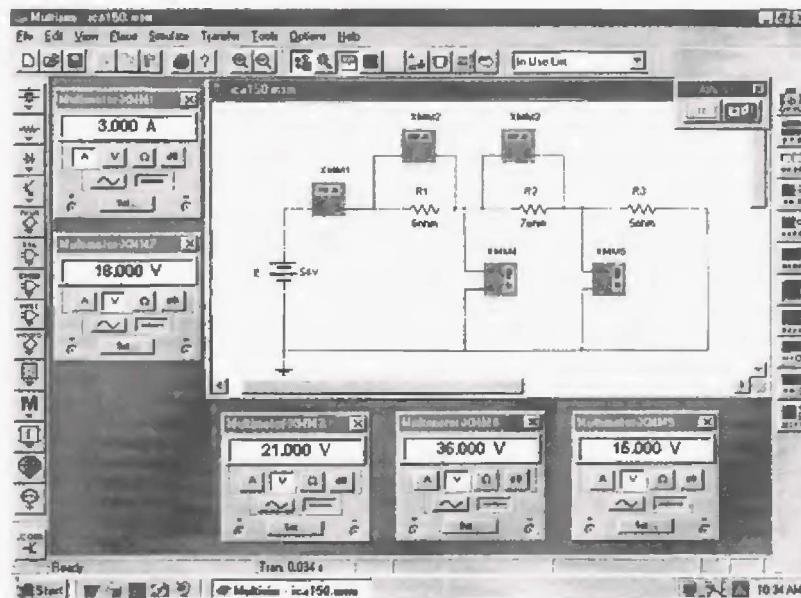


FIGURA 5.68
Aplicación de *Electronics Workbench* a un circuito de cd en serie.

La configuración de los medidores se realiza mediante un doble clic sobre el símbolo del medidor en el esquema. En cada caso, se debe seleccionar V o I aunque la línea horizontal para el análisis de cd sea la misma para cada uno. Nuevamente, es posible seleccionar la tecla Set para verificar lo que controla, sin embargo, los valores predeterminados de los niveles de resistencia de entrada del medidor serán adecuados para la mayor parte de los análisis descritos en este libro. Deje los medidores en la pantalla de forma que los distintos voltajes y el nivel de corriente se desplieguen después de la simulación.

Debe recordarse del capítulo 4 que es posible mover los elementos simplemente haciendo clic sobre cada símbolo esquemático y arrastrándolo hacia la ubicación deseada. Lo mismo rige para el caso de las etiquetas y los valores. Las etiquetas y los valores se establecen haciendo doble clic sobre la etiqueta o el valor e ingresando su elección. Al presionar OK aparecerán cambiados en el esquema. No es necesario seleccionar primero una tecla especial para conectar los elementos. Simplemente se acerca el cursor al punto inicial para generar el pequeño círculo y el cursor en forma de cruz. Se hace clic en el punto inicial y se sigue la ruta deseada hasta la siguiente trayectoria de conexión. Una vez en el lugar, nuevamente se da un clic y la línea aparecerá. Todas las líneas de conexión pueden realizar giros de 90°. Sin embargo, no es posible seguir una ruta diagonal de un punto a otro. Para eliminar cualquier elemento, etiqueta o línea, simplemente se hace clic sobre la cantidad para obtener el estatus activo de cuatro cuadros y se selecciona la tecla de borrado Delete o la que tiene forma de tijeras en la barra de menú superior.

Antes de la simulación, debe asegurarse que el interruptor de simulación **Simulate Switch** se encuentre visible seleccionando **View>Show Simulate Switch**. Luego se selecciona la opción 1 del interruptor para que se inicie el análisis. Los resultados que aparecen en la figura 5.68 verifican los obtenidos utilizando PSpice y la solución efectuada a mano.

C++

Ahora nos orientaremos hacia el lenguaje C++ y revisaremos un programa diseñado para efectuar el mismo análisis que se realizó utilizando PSpice y EWB.

```

Encabezado [ //Análisis de un circuito en serie con C++
Directrices del
preprocesador [ # include <iostream.h>           //necesario para la entrada/salida

Definición de variables
y tipos de datos [ class resistor {
    public:
        float value;
        float voltage;
        float power;
    };

    class voltage_source {
    public:
        float voltage;
        float current;
        float power;
    };
};

main () {                                     //la ejecución comienza aquí
{
    Establecimiento
    de los objetos
    y la  $R_T$  [ resistor R1, R2, R3;
    float Rtotal;
    voltage_source V1;

    Asignación
    de valores [ R1.value = 6;           //se asignan valores de resistencia
    R1.value = 7;
    R1.value = 5;
    Rtotal = R1.value + R2.value + R3.value; //cálculo de la resistencia total
    count << "La resistencia total es " << Rtotal << "Ohms.\n";

    Cálculo de  $I = V/R_T$  [ V1.voltage = 54;           //se asigna el voltaje de la fuente
    V1.current = V1.voltage / Rtotal;         //cálculo de la corriente del circuito
    count << "La corriente del circuito es " << V1.current << "Ampere.\n";

    Despliegue
    de  $V_R$  [ R1.voltage = V1.current * R1.value;      //cálculo de los voltajes de resistor
    R2.voltage = V1.current * R2.value;
    R3.voltage = V1.current * R3.value;
    count << "El voltaje en R1 es " << R1.voltage << " Volts.\n";
    count << "El voltaje en R2 es " << R2.voltage << " Volts.\n";
    count << "El voltaje en R3 es " << R3.voltage << " Volts.\n";

    Cálculo
    de la  $P_R$  [ R1.power = V1.current * R1.voltage;      //cálculo de la potencia del resistor
    R2.power = V1.current * R2.voltage;
    R3.power = V1.current * R3.voltage;
    count << "La potencia en R1 es " << R1.power << " Watts.\n";
    count << "La potencia en R2 es " << R2.power << " Watts.\n";
    count << "La potencia en R3 es " << R3.power << " Watts.\n";

    Despliegue
    de  $P_E$  [ V1.power = V1.voltage * V1.current;       //cálculo de la potencia total
    count << "La potencia total es " << V1.power << " Watts.\n";

    Cuerpo
    del
    programa ]
}

```

FIGURA 5.69
C++ Programa en lenguaje diseñado para realizar un análisis completo de la red presentada en la figura 5.66.

Como se indicó en capítulos anteriores, no intente comprender todos los detalles acerca de la forma en que se escribió el programa y de las decisiones que se tomaron. El propósito aquí es simplemente exponer al lector las características generales de un programa utilizando este lenguaje de creciente popularidad.

En primer lugar observe todos los signos diagonales dobles // que aparecen en el programa de la figura 5.69. Éstos se utilizan para identificar los comentarios en el programa, los cuales no serán reconocidos por el compilador cuando

el programa se ejecute. También pueden utilizarse para recordar al programador acerca de objetivos específicos que deben cubrirse en un punto particular del programa o sobre la razón para entradas específicas. Sin embargo, en este ejemplo, el propósito principal es ilustrar al lector acerca del objetivo de una entrada u operación en particular.

La directriz `#include` indica al compilador que incluya el archivo que sigue dentro del programa C++. El nombre `<iostream.h>` es un archivo de encabezado que establece la ruta de entrada-salida entre el programa y el sistema operativo. El formato `class` define el tipo de datos (en este caso todos son de punto flotante, lo que significa que incluirán un punto decimal), y el estatuto `public` dentro de las llaves `{ }` indica que las variables `value`, `voltage` y `power` serán accesibles para operaciones fuera de la estructura de datos.

Observe que la parte del programa que comprende `main()` se extiende hasta el final del programa, según se identifica por las llaves `{ }`. Dentro de esta región recibirán valores todos los parámetros de la red, se efectuarán todos los cálculos y, por último, serán presentados los resultados. A continuación, se establecen tres objetos del tipo resistor. `Rtotal` se define como una variable de tipo flotante, y se introduce un objeto de tipo fuente de voltaje. Luego se ingresan los valores de los resistores y se calcula la resistencia total. En seguida, mediante `cout`, se despliega la resistencia total utilizando la `Rtotal` que se acaba de calcular. El símbolo `\n` al final de la línea del `cout` llama un salto de línea con el propósito de preparar la siguiente sentencia `cout`.

En la siguiente línea, se introduce la magnitud de la fuente de voltaje, seguida por el cálculo de la corriente de la fuente, la cual se despliega en la siguiente línea. Luego se calcula el voltaje en cada resistor y se despliega en las líneas sucesivas. Por último, se calculan y despliegan las distintas potencias.

Al ejecutar este programa, la salida será como la mostrada en la figura 5.70, obteniendo los mismos resultados logrados con PSpice y EWB. Como se advirtió, el lector no debe confundirse con los detalles o con la razón de que ciertas líneas se muestren de determinada manera. Desde luego, mediante experiencia y preparación, eventualmente todo esto resultará obvio. Sin embargo, observe que las primeras líneas establecen el análisis a desarrollarse indicando a la computadora el tipo de operaciones que deberá manejar y el formato de los datos que se ingresarán, así como el formato de los datos de salida esperados. Luego, existe una parte principal del programa donde se realizan todas las entradas, cálculos y presentaciones de salida. Cuando este programa se ejecute, su flujo irá de arriba hacia abajo; es decir, un paso seguirá a otro sin regresar a ciertos puntos (una opción que se describirá en un programa posterior). No fue necesario numerar las líneas o incluir instrucciones detalladas. Si se eliminan todos los comentarios, el programa real será muy compacto y claro, con la mayor parte de su cuerpo representada por las sentencias `cout`.

```

La resistencia total es de 18 Ohms.
La corriente del circuito es de 3 Ampere.
El voltaje en R1 es de 18 Volts.
El voltaje en R2 es de 21 Volts.
El voltaje en R3 es de 15 Volts.
La potencia en R1 es de 54 Watts.
La potencia en R2 es de 63 Watts.
La potencia en R3 es de 45 Watts.
La potencia total es de 162 Watts.

```

FIGURA 5.70
Resultados de salida del programa en C++ presentado en la figura 5.59.

PROBLEMAS

SECCIÓN 5.2 Circuitos en serie

1. Calcule la resistencia total y la corriente I para cada circuito de la figura 5.71.

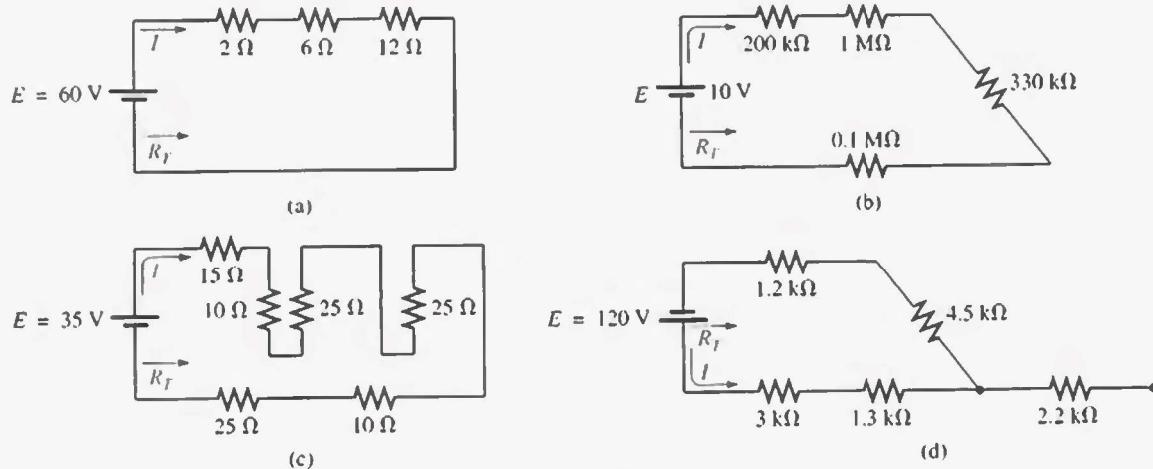


FIGURA 5.71
Problemas 1 y 36.

2. Para los circuitos de la figura 5.72, se especifica la resistencia total. Encuentre las resistencias desconocidas y la corriente I para cada circuito.

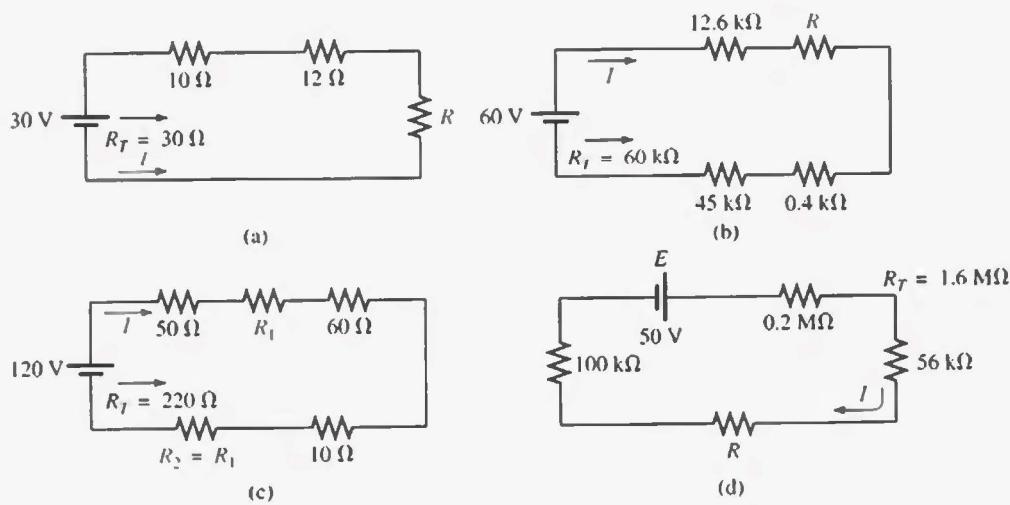


FIGURA 5.72
Problema 2.

3. Encuentre el voltaje E necesario para desarrollar la corriente especificada en cada red de la figura 5.73.

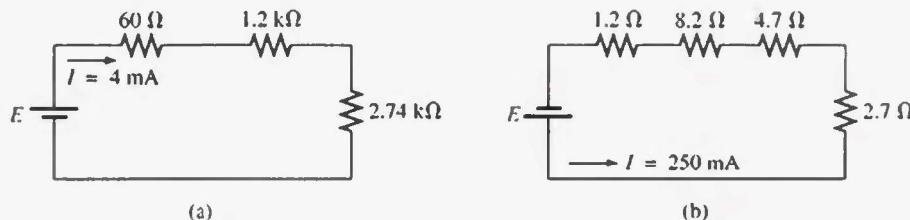


FIGURA 5.73
Problema 3.

- *4. Para cada red de la figura 5.74, determine la corriente I , la fuente de voltaje E , la resistencia desconocida y el voltaje en cada elemento.

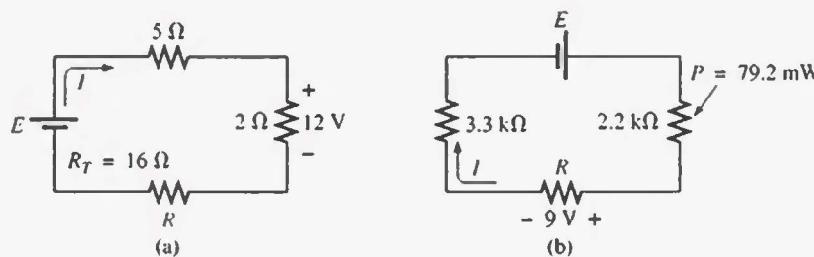


FIGURA 5.74
Problema 4.

SECCIÓN 5.3 Fuentes de voltaje en serie

5. Determine la corriente I y su dirección para cada red de la figura 5.75. Antes de resolver para I , vuelva a trazar cada red con una sola fuente de voltaje.

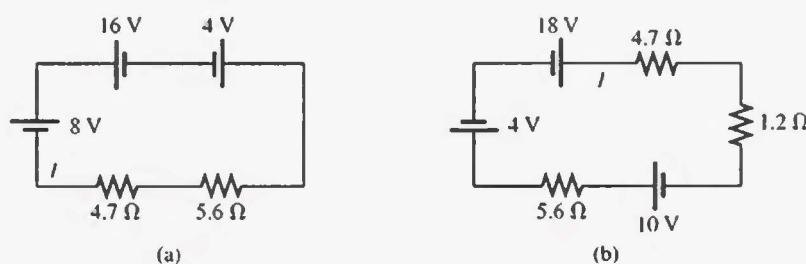


FIGURA 5.75
Problema 5.

- *6. Encuentre la fuente de voltaje desconocida y el resistor para las redes de la figura 5.76. También indique la dirección de la corriente resultante.

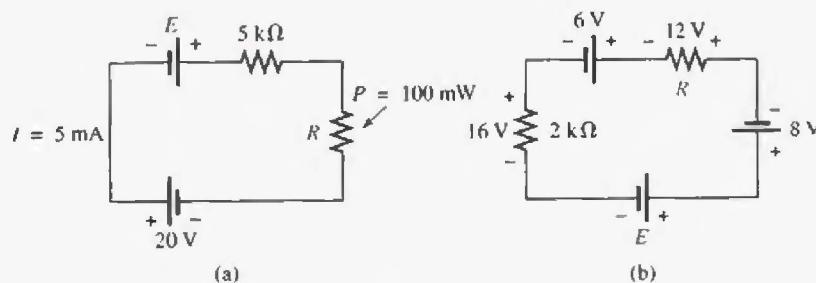


FIGURA 5.76
Problema 6.

SECCIÓN 5.4 Ley de voltaje de Kirchhoff

7. Encuentre V_{ab} con polaridad para los circuitos de la figura 5.77. Cada cuadro puede contener una carga o una fuente de voltaje, o una combinación de ambas.

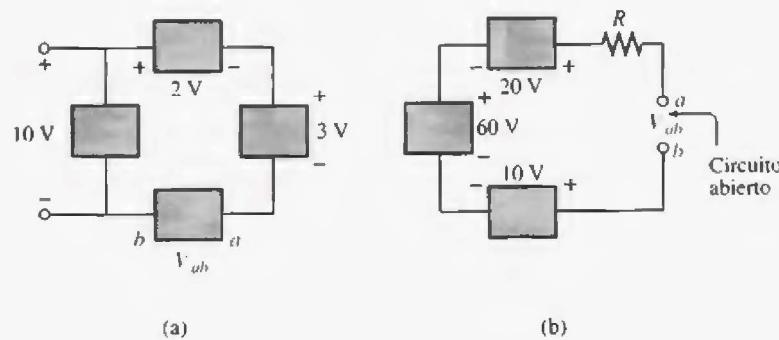


FIGURA 5.77
Problema 7.

8. A pesar de que las redes de la figura 5.78 no son circuitos simples en serie, determine los voltajes desconocidos utilizando la ley de voltaje de Kirchhoff.

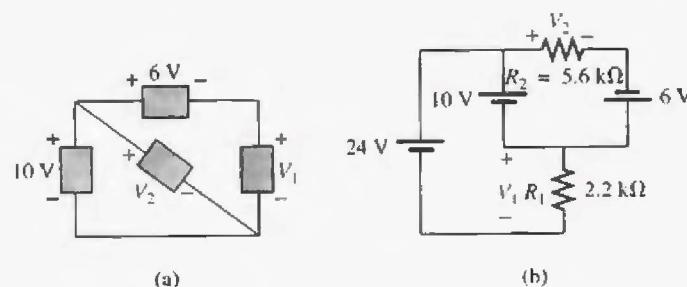


FIGURA 5.78
Problema 8.

9. Determine la corriente I y el voltaje V_1 para la red de la figura 5.79.

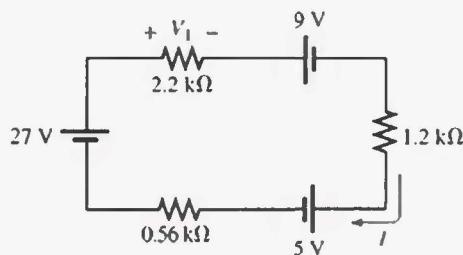


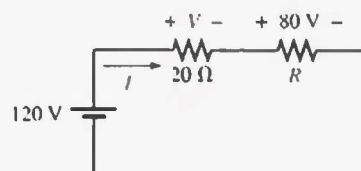
FIGURA 5.79
Problema 9.

10. Para el circuito de la figura 5.80:

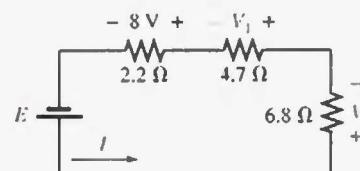
- Calcule la resistencia total, la corriente y las caídas de voltaje desconocidas.
- Verifique la ley de voltaje de Kirchhoff alrededor del lazo cerrado.
- Encuentre la potencia disipada por cada resistor, y confirme si la potencia entregada es igual a la potencia disipada.
- Si los resistores se encuentran disponibles con niveles en watts de 1/2, 1 y 2 W, ¿cuál será el nivel mínimo en watts que puede utilizarse para cada resistor en este circuito?

11. Repita el problema 10 para el circuito de la figura 5.81.

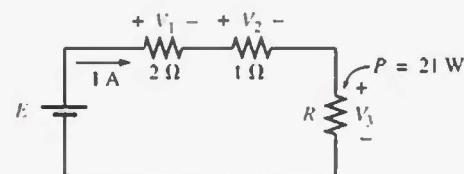
- *12. Encuentre las cantidades desconocidas en los circuitos de la figura 5.82 utilizando la información proporcionada.



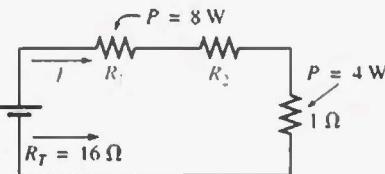
(a)



(b)



(c)



(d)

FIGURA 5.82
Problema 12.

13. Ocho luces navideñas se conectan en serie como se muestra en la figura 5.83.

- Si la serie de luces se conecta a una fuente de 120 V, ¿cuál será la corriente a través de los focos si cada foco tiene una resistencia interna de $28\frac{1}{2}$ Ω?
- Determine la potencia entregada a cada foco.
- Calcule la caída de voltaje en cada foco.
- Si un foco se funde (es decir, si el filamento se abre), ¿cuál será el efecto sobre los focos restantes?

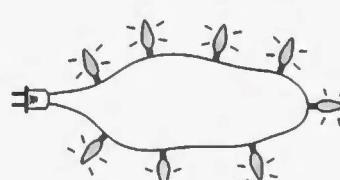


FIGURA 5.83
Problema 13.

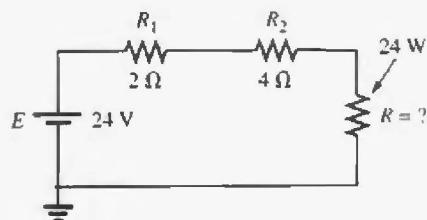


FIGURA 5.84
Problema 14.

- *14. Para las condiciones especificadas en la figura 5.84, determine la resistencia desconocida.

SECCIÓN 5.6 Regla del divisor de voltaje

15. Utilizando la regla del divisor de voltaje, encuentre V_{ab} (con polaridad) para los circuitos de la figura 5.85.

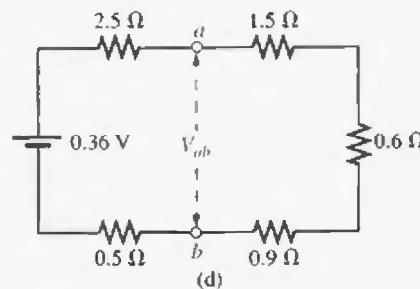
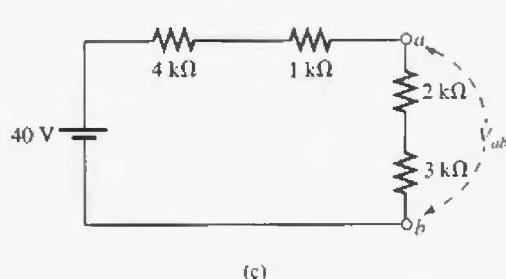
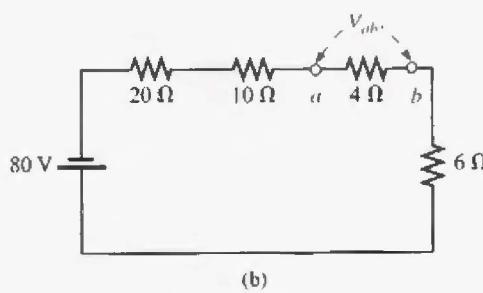
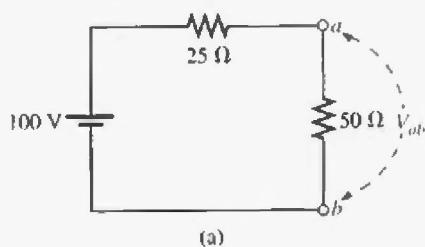


FIGURA 5.85
Problemas 15 y 37.

16. Encuentre la resistencia desconocida utilizando la regla del divisor de voltaje y la información proporcionada para los circuitos de la figura 5.86.

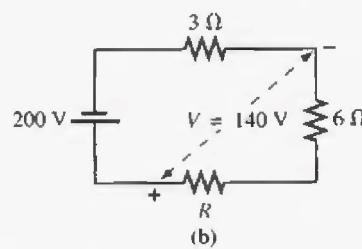
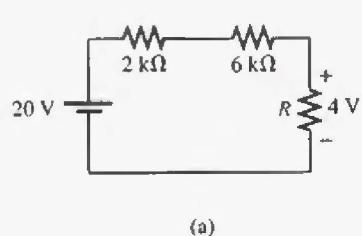


FIGURA 5.86
Problema 16.

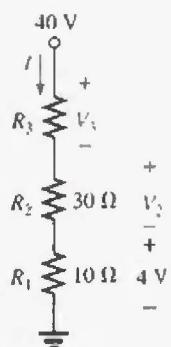


FIGURA 5.87
Problema 17.

17. Con referencia a la figura 5.87:
 - a. Determine V_2 observando simplemente que $R_2 = 3R_1$.
 - b. Calcule V_3 .
 - c. Observando la magnitud de V_3 en comparación con V_2 o V_1 , determine R_3 mediante inspección.
 - d. Calcule la corriente de fuente I .
 - e. Calcule la resistencia R_3 utilizando la ley de Ohm y compárela con el resultado del inciso (c).
18. Con la información proporcionada en la figura 5.88, encuentre el nivel de resistencia para R_1 y R_3 .
19. a. Diseñe un circuito con divisor de voltaje que permita el uso de un foco de 8 V, 50 mA en un automóvil con un sistema eléctrico de 12 V.
b. ¿Cuál es el nivel mínimo en watts del resistor seleccionado si se encuentran disponibles resistores de $\frac{1}{4}$ W, $\frac{1}{2}$ W y 1 W.
20. Determine los valores de R_1 , R_2 , R_3 y R_4 para el divisor de voltaje de la figura 5.89 si la corriente de fuente es de 16 mA.
21. Diseñe el divisor de voltaje de la figura 5.90 de forma que $V_{R_1} = (1/5)V_{R_2}$ si $I = 4$ mA.
22. Encuentre el voltaje en cada resistor de la figura 5.91 si $R_1 = 2R_3$ y $R_2 = 7R_3$.
23. a. Diseñe el circuito de la figura 5.92 de forma que $V_{R_2} = 3V_{R_1}$ y $V_{R_3} = 4V_{R_1}$.
b. Si la corriente I se reduce a 10 μ A, ¿cuáles serán los nuevos valores de R_1 , R_2 y R_3 ? ¿Cómo se comparan con los resultados del inciso (a)?

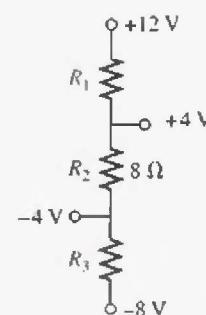


FIGURA 5.88
Problema 18.

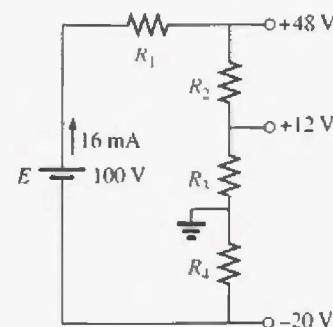


FIGURA 5.89
Problema 20.

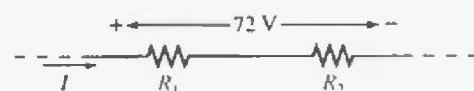


FIGURA 5.90
Problema 21.

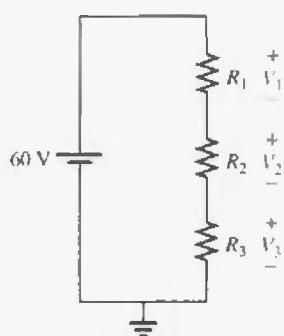


FIGURA 5.91
Problema 22.

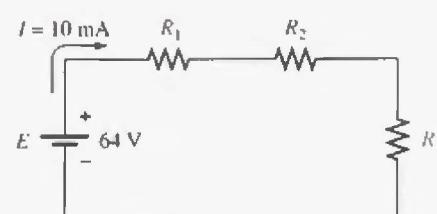


FIGURA 5.92
Problema 23.

SECCIÓN 5.7 Notación

24. Determine los voltajes V_a , V_b y V_{ab} para la red de la figura 5.93.

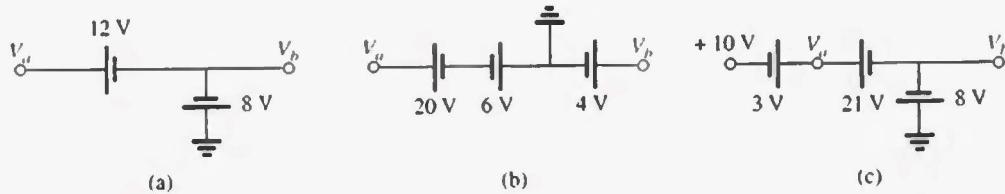


FIGURA 5.93

Problema 24.

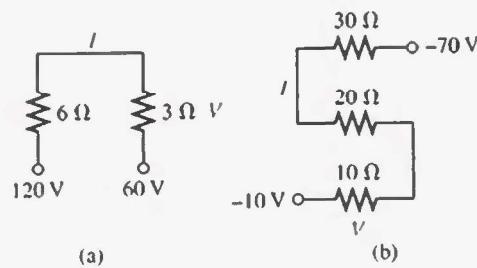


FIGURA 5.94

Problema 25.

25. Determine la corriente I (con dirección) y el voltaje V (con polaridad) para las redes de la figura 5.94.

26. Determine los voltajes V_a y V_1 para las redes de la figura 5.95.

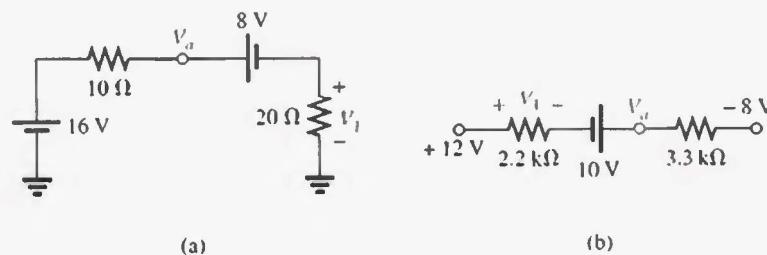


FIGURA 5.95

Problema 26.

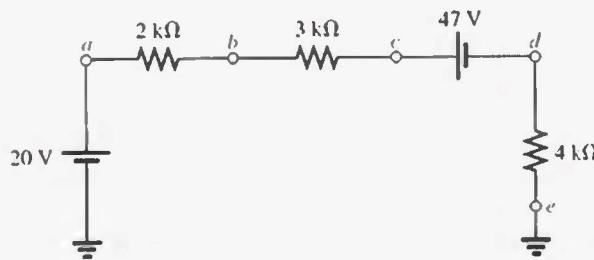


FIGURA 5.96

Problema 27.

*27. Para la red de la figura 5.96, determine los voltajes:

- a. V_a , V_b , V_c , V_d , V_e
- b. V_{ab} , V_{dc} , V_{eb}
- c. V_{ac} , V_{db}

*28. Para la red de la figura 5.97, determine los voltajes:

- V_a, V_b, V_c, V_d
- V_{ab}, V_{cb}, V_{cd}
- V_{ad}, V_{ca}

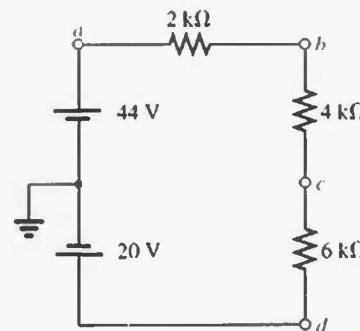


FIGURA 5.97

Problema 28.

*29. Para el circuito integrado de la figura 5.98, determine V_0, V_4 , $V_7, V_{10}, V_{23}, V_{30}, V_{67}, V_{56}$, e I (magnitud y dirección).

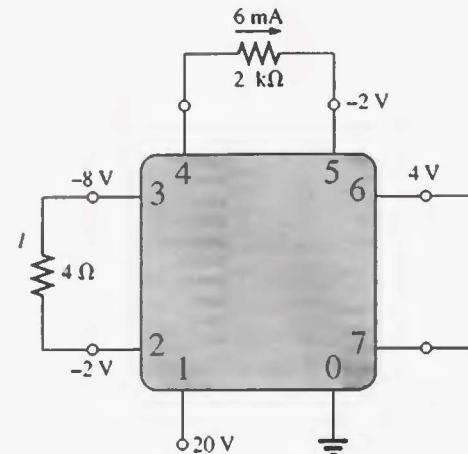


FIGURA 5.98

Problema 29.

*30. Para el circuito integrado de la figura 5.99, determine V_0, V_{03} , V_2, V_{23}, V_{12} , e I_r .

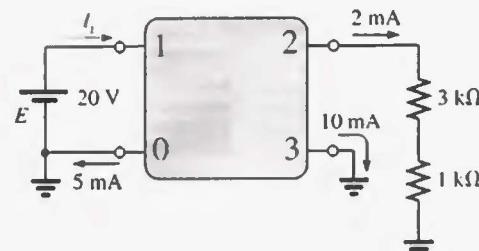


FIGURA 5.99

Problema 30.

SECCIÓN 5.8 Resistencia interna de fuentes de voltaje

- Encuentre la resistencia interna de una batería que tiene un voltaje de salida sin carga de 60 V y suministra una corriente de 2 A a una carga de 28Ω .
- Encuentre el voltaje V_L y la pérdida de potencia en la resistencia interna para la configuración de la figura 5.100.
- Encuentre la resistencia interna de una batería que tiene un voltaje de salida sin carga de 6 V y suministra una corriente de 10 mA a una carga de $1/2 \text{ k}\Omega$.

SECCIÓN 5.9 Regulación de voltaje

- Determine la regulación de voltaje para la batería del problema 31.
- Calcule la regulación de voltaje para la fuente de la figura 5.100.

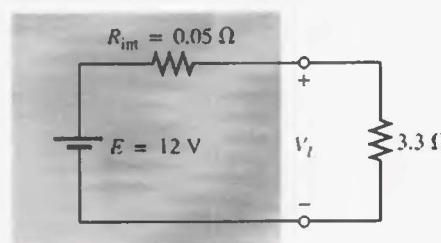


FIGURA 5.100

Problemas 32 y 35.

SECCIÓN 5.12 Análisis por computadora

PSpice o Electronics Workbench

36. Mediante esquematización, determine la corriente I y el voltaje en cada resistor para la red de la figura 5.71 (a).
37. Mediante esquematización, determine el voltaje V_{ab} para la red de la figura 5.85(d).

Lenguaje de programación (C++, QBASIC, Pascal, etc.)

38. Escriba un programa para determinar la resistencia total de cualquier número de resistores en serie.
39. Escriba un programa que aplique la regla del divisor de voltaje a cada resistor de un circuito en serie con una sola fuente y dos resistores en serie.
40. Escriba un programa para tabular la corriente y la potencia del resistor R_L de la red mostrada en la figura 5.101 para un intervalo de valores de R_L desde 1Ω hasta 20Ω . Imprima el valor de R_L que ocasiona la máxima potencia en R_L .

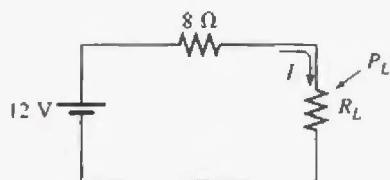


FIGURA 5.101

Problema 40.

GLOSARIO

Circuito Combinación de cierto número de elementos unidos en puntos terminales que proporciona al menos una ruta cerrada a través de la cual la carga pueda fluir.

Circuito en serie Configuración de circuito en la que los elementos tienen solo un punto en común y cada terminal no se encuentra conectada a un tercer elemento portador de corriente.

Flujo de corriente convencional Dirección definida para el flujo de carga en un sistema eléctrico que es opuesto al flujo del movimiento de los electrones.

Flujo de electrones Flujo de carga en un sistema eléctrico que cuenta con la misma dirección que el movimiento de los electrones.

Ley de voltaje de Kirchhoff (LVK) La suma algebraica de las elevaciones y caídas de potencial alrededor de un lazo cerrado (o trayectoria) es cero.

Lazo cerrado Cualquier conexión continua de rama que permite el trazo de una trayectoria que sale de un punto en una dirección y regresa al mismo punto desde otra dirección sin abandonar el circuito.

Rama Parte de un circuito que consta de uno o más elementos en serie.

Regla del divisor de voltaje (RDV) Método por el cual puede determinarse un voltaje en un circuito en serie sin tener que calcular primero la corriente dentro del circuito.

Regulación de voltaje (RV) Valor, dado en forma de porcentaje, que ofrece una indicación del cambio en el voltaje terminal de una fuente ante el cambio en la demanda de carga.

Resistencia interna Resistencia inherente encontrada al interior de cualquier fuente de energía.