

4

Ley de Ohm, potencia y energía



4.1 LEY DE OHM

Considere la siguiente relación:

$$\text{Efecto} = \frac{\text{causa}}{\text{oposición}} \quad (4.1)$$

Toda conversión de energía de una forma a otra puede ser relacionada a esta ecuación. Para circuitos eléctricos, el efecto que se trata de establecer es el flujo de carga, o *corriente*. La *diferencia de potencial*, o voltaje, entre dos puntos es la *causa* ("presión"), y la oposición es la *resistencia* encontrada.

Una excelente analogía para el más sencillo de los circuitos eléctricos es el agua que hay en una manguera conectada a una válvula de presión. Considere que los electrones en un alambre de cobre representan el agua en la manguera, la válvula de presión sería el voltaje aplicado, y el tamaño de la manguera constituiría el factor que determina la resistencia. Si la válvula de presión está cerrada, el agua simplemente permanece en la manguera sin moverse, tal como los electrones en un conductor sin un voltaje aplicado. Si abrimos la válvula de presión, el agua fluirá a través de la manguera tal como lo harán los electrones en un alambre de cobre cuando se le aplique un voltaje. En otras palabras, la ausencia de la "presión" en un caso y del voltaje en el otro resultará simplemente en un sistema sin movimiento o reacción. La velocidad a la que el agua fluirá en la manguera es una función del tamaño de la manguera. Una manguera con un diámetro muy pequeño limitará la velocidad a la que el agua puede fluir por ella, de la misma forma que un alambre de cobre con diámetro pequeño presentará una resistencia alta y limitará la corriente.

En resumen, la ausencia de una "presión" aplicada, así como de voltaje en un circuito eléctrico, resultará en una reacción nula en el sistema y ninguna corriente en el circuito eléctrico. La corriente es una reacción al voltaje aplicado y no el factor que pone al sistema en movimiento. Para continuar con la analogía de la manguera, entre más presión exista en el grifo mayor será la

Alemán
(Erlangen, Colonia)
(1789-1854)
Físico y
matemático
Profesor de física,
Universidad de
Colonia



Cortesía de
Smithsonian Institution
Fotografía núm. 51.145

En 1827 desarrolló una de las leyes más importantes de los circuitos eléctricos: la *ley de Ohm*. Cuando la ley de Ohm fue presentada por primera vez, se consideró absurda y que faltaba la documentación de soporte, por lo que Georg Simon Ohm perdió su posición de profesor y tuvo que dedicarse a efectuar trabajos de poca monta y a dar clases privadas como tutor. Pasaron 22 años antes de que su trabajo fuera reconocido como una contribución importante al campo de la electricidad. Se le otorgó una cátedra en la Universidad de Munich y recibió la Medalla Copley de la Real Sociedad en 1841. Sus investigaciones abarcaron también las áreas de física molecular, acústica y comunicación telegráfica.

FIGURA 4.1
Georg Simon Ohm.

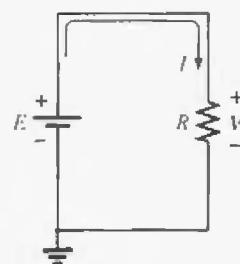


FIGURA 4.2
Circuito básico.

velocidad del agua que fluirá por la manguera, justo como aplicar un voltaje alto al mismo circuito resultará en una corriente elevada.

Al sustituir los términos introducidos en la ecuación (4.1) resulta:

$$\text{Corriente} = \frac{\text{diferencia de potencial}}{\text{resistencia}}$$

y

$$I = \frac{E}{R} \quad (\text{ampere, A}) \quad (4.2)$$

La ecuación (4.2) es conocida como *ley de Ohm* en honor de Georg Simon Ohm (Figura 4.1). Esta ley revela claramente que para una resistencia fija, a mayor voltaje (o presión) en un resistor, mayor es la corriente, y a mayor resistencia para el mismo voltaje, menor es la corriente. En otras palabras, la corriente es proporcional al voltaje aplicado e inversamente proporcional a la resistencia.

Por medio de simples manejos matemáticos, el voltaje y la resistencia pueden encontrarse en términos de las otras dos cantidades:

$$E = IR \quad (\text{volts, V}) \quad (4.3)$$

y

$$R = \frac{E}{I} \quad (\text{ohms, } \Omega) \quad (4.4)$$

Las tres cantidades de las ecuaciones (4.2) a la (4.4) son definidas por el sencillo circuito de la figura 4.2. La corriente I de la ecuación (4.2) resulta de aplicar E volts de corriente directa (cd) a una red con resistencia R . La ecuación (4.3) determina el voltaje E requerido para establecer una corriente I a través de una red con una resistencia total R , y la ecuación (4.4) proporciona la resistencia de una red que resulta en una corriente I debida a un voltaje aplicado E .

Observe en la figura 4.2 que la fuente de voltaje "presiona" la corriente en una dirección que pasa de la terminal negativa de la batería a la terminal positiva. Esto será siempre el caso para circuitos de una sola fuente. El efecto de más de una fuente en la red será examinado en el siguiente capítulo. El símbolo para el voltaje de la batería (una fuente de energía eléctrica) es la letra E mayúscula, mientras que la caída de voltaje en el resistor es dada por el símbolo V . La polaridad de la caída de voltaje en el resistor es como se define por la fuente aplicada porque las dos terminales de la batería se conectan directamente al elemento resistivo.

EJEMPLO 4.1 Determine la corriente resultante de la aplicación de una batería de 9 V a una red con resistencia de 2.2 Ω .

Solución: Ecuación (4.2):

$$I = \frac{E}{R} = \frac{9 \text{ V}}{2.2 \Omega} = 4.09 \text{ A}$$

EJEMPLO 4.2 Calcule la resistencia de un foco de 60 W si una corriente de 500 mA resulta de un voltaje aplicado de 120 V.



Solución: Ecuación (4.4):

$$R = \frac{E}{I} = \frac{120 \text{ V}}{500 \times 10^{-3} \text{ A}} = 240 \Omega$$

Para un elemento resistivo aislado, la polaridad de la caída de voltaje es como se muestra en la figura 4.3(a) para la dirección indicada de la corriente. Una inversión de la corriente invertirá la polaridad, como se muestra en la figura 4.3(b). En general, el flujo de la carga va desde un potencial alto (+) hasta uno bajo (-). Las polaridades establecidas por la dirección de la corriente se volverán cada vez más importantes en el análisis que se presenta en seguida.



FIGURA 4.3

Definición de las polaridades.

EJEMPLO 4.3 Calcule la corriente a través del resistor de $2 \text{ k}\Omega$ de la figura 4.4 si la caída de voltaje en él es de 16 V.

Solución:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{16 \text{ V}}{2 \times 10^3 \Omega} = 8 \text{ mA}$$

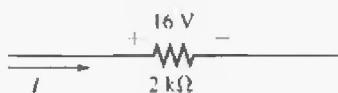


FIGURA 4.4

Ejemplo 4.3.

EJEMPLO 4.4 Calcule el voltaje que debe aplicarse al cautín de la figura 4.5 para establecer una corriente de 1.5 A a través de él si su resistencia interna es de 80Ω .

Solución:

$$E = IR = (1.5 \text{ A})(80 \Omega) = 120 \text{ V}$$

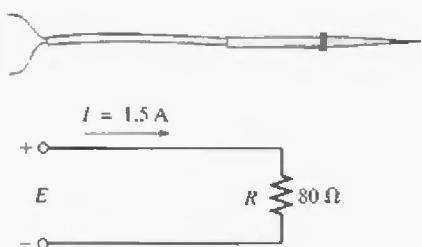


FIGURA 4.5

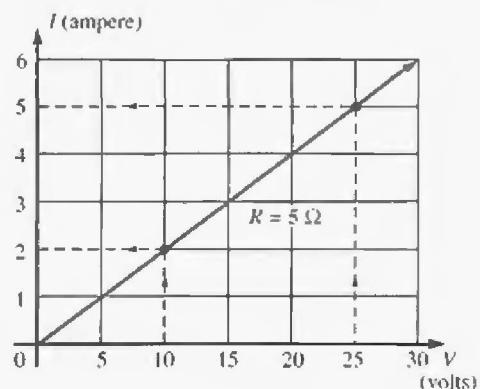
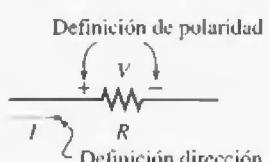
Ejemplo 4.4.

En varios de los ejemplos de este capítulo, como en el ejemplo 4.4, el voltaje aplicado es realmente obtenido de una salida de ca en el hogar, la oficina o el laboratorio. Este enfoque se usó para dar al estudiante una oportunidad de relacionarse cuanto antes con situaciones del mundo real y para demostrar que varias de las ecuaciones obtenidas en este capítulo son aplicables también a redes de ca. El capítulo 13 proporcionará una relación directa entre voltajes de ca y cd que permite las sustituciones matemáticas empleadas en este capítulo. En otras palabras, no se preocupe por el hecho de que algunos de los voltajes y corrientes que aparecen en los ejemplos de este capítulo sean en realidad voltajes de ca, porque las ecuaciones para redes de cd tienen exactamente el mismo formato, y todas las soluciones serán correctas.

4.2 TRAZADO DE LA LEY DE OHM

Las gráficas, características, diagramas y elementos similares, juegan un papel importante en cada campo técnico como un modo por el cual una imagen amplia del comportamiento o respuesta de un sistema pueden ser mostrados de manera conveniente. Por tanto, resulta crítico desarrollar las habilidades necesarias para leer y graficar datos de manera que puedan ser interpretados fácilmente.

Para la mayor parte de los conjuntos de características de los dispositivos electrónicos, la corriente está representada por el eje vertical (ordenadas), y el voltaje por el eje horizontal (abscisas), como se muestra en la figura 4.6. Observe primero que el eje vertical está en ampere y el horizontal en volts. En

FIGURA 4.6
Gráfica de la ley de Ohm.

algunas gráficas, I puede estar en miliampere (mA), microampere (μA), o en cualquier unidad apropiada para el intervalo de interés. Lo mismo es cierto para los niveles de voltaje sobre el eje horizontal. Observe también que los parámetros seleccionados requieren que la separación entre valores numéricos del eje vertical sea diferente a la del eje horizontal. La gráfica lineal (línea recta) revela que la resistencia no está cambiando con el nivel de la corriente o del voltaje; sino que se trata de una cantidad fija en todas partes. La dirección de la corriente y la polaridad del voltaje que aparecen en la parte superior de la figura 4.6 son las definidas para la gráfica proporcionada. Si la dirección de la corriente es opuesta a la dirección definida, la región por debajo del eje horizontal será la región de interés para la corriente I . Si la polaridad del voltaje es opuesta a la definida, la región situada a la izquierda del eje de corriente será la región de interés. Para el resistor fijo estándar, el primer cuadrante, o región, de la figura 4.6 es la única región de interés. Sin embargo, el estudiante encontrará muchos dispositivos en sus cursos de electrónica que utilizarán los otros cuadrantes de una gráfica.

Una vez que una gráfica como la de la figura 4.6 es desarrollada, la corriente o el voltaje a cualquier nivel puede encontrarse a partir de la otra cantidad empleando simplemente la gráfica resultante. Por ejemplo, en $V = 25$ V, si se traza una línea vertical sobre la figura 4.6 hacia la curva como se muestra, la corriente resultante puede encontrarse trazando una línea horizontal sobre el eje de corriente, donde se obtiene una resultante de 5 A. Similarmente, en $V = 10$ V, una línea vertical a la gráfica y una línea horizontal al eje de corriente resultarán en una corriente de 2 A, de acuerdo con la ley de Ohm.

Si se desconoce la resistencia de una gráfica, puede ser determinada en cualquier punto de la gráfica ya que una línea recta indica una resistencia fija. En cualquier punto sobre la gráfica, encuentre la corriente y el voltaje resultantes, y simplemente sustitúyelos en la siguiente ecuación:

$$R_{cd} = \frac{V}{I} \quad (4.5)$$

Para probar la ecuación (4.5), considere un punto sobre la gráfica donde $V = 20$ V e $I = 4$ A. La resistencia resultante es $R_{cd} = V/I = 20\text{ V}/4\text{ A} = 5\Omega$. Para fines de comparación, un resistor de 1Ω y otro de 10Ω fueron trazados sobre la gráfica de la figura 4.7. Observe que a menor resistencia, la pendiente es más pronunciada (más cercana al eje vertical) de la curva.

Al escribir la ley de Ohm de la siguiente manera y relacionarla con la ecuación básica de una línea recta

$$I = \frac{1}{R} \cdot E + 0 \\ \downarrow \quad \downarrow \quad \downarrow \quad \downarrow \\ y = m \cdot x + b$$

se encontrará que la pendiente es igual a $1/R$, dividido entre el valor de la resistencia, como se indica mediante la siguiente expresión:

$$m = \text{pendiente} = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{\Delta I}{\Delta V} = \frac{1}{R} \quad (4.6)$$

donde Δ significa un cambio pequeño, finito, de la variable.

La ecuación (4.6) revela claramente que a mayor resistencia, menor es la pendiente. Si se escribe en la forma siguiente, la ecuación (4.6) puede emplearse para determinar la resistencia a partir de la curva lineal:

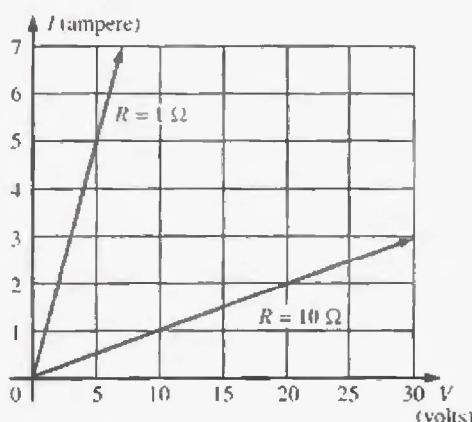


FIGURA 4.7
Demostración sobre una gráfica I - V de que a menor resistencia, más pronunciada es la pendiente.

$$R = \frac{\Delta V}{\Delta I} \quad (\text{ohms}) \quad (4.7)$$

La ecuación establece que escogiendo un ΔV particular (o ΔI), puede obtenerse el correspondiente ΔI (o ΔV , respectivamente) de la gráfica, como se muestra en la figura 4.8, y entonces determinar la resistencia. Si la gráfica es una línea recta, la ecuación (4.7) dará el mismo resultado sin importar dónde se aplique la ecuación. Pero si la gráfica es curva, la resistencia cambiará.

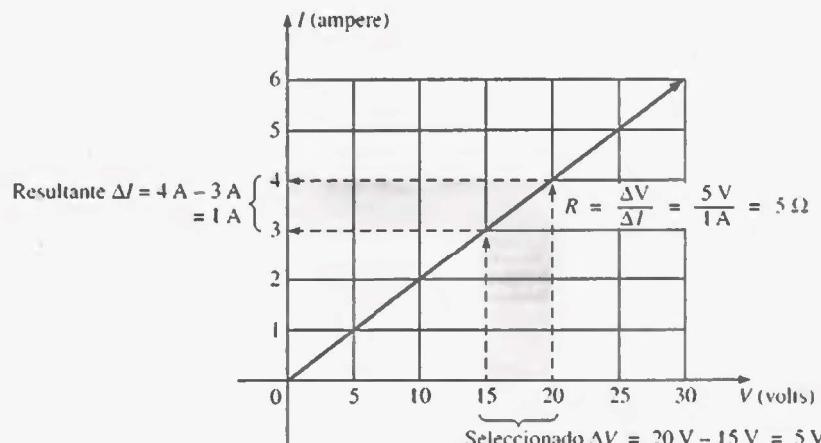


FIGURA 4.8
Aplicación de la ecuación (4.6).

EJEMPLO 4.5 Determine la resistencia asociada con la curva de la figura 4.9 empleando las ecuaciones (4.5) y (4.7), y compare los resultados.

Solución: En $V = 6 \text{ V}$, $I = 3 \text{ mA}$, y

$$R_{cd} = \frac{V}{I} = \frac{6 \text{ V}}{3 \text{ mA}} = 2 \text{ k}\Omega$$

Para el intervalo entre 6 V y 8 V,

$$R = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{2 \text{ V}}{1 \text{ mA}} = 2 \text{ k}\Omega$$

Los resultados son equivalentes.

Antes de dejar el tema, investiguemos primero las características de un dispositivo semiconductor muy importante llamado **diodo**, el cual será examinado con todo detalle en cursos de electrónica básica. Este dispositivo actuará idealmente como una trayectoria de baja resistencia a la corriente en una dirección y como una trayectoria de alta resistencia a la corriente en la dirección opuesta, algo muy parecido a la manera en que un interruptor pasa corriente en una sola dirección. Un conjunto típico de las características de un diodo se muestra en la figura 4.10. Sin cálculos matemáticos, la cercanía de la curva al eje de voltaje para valores negativos del voltaje aplicado indica que ésa es la región de baja conductancia (alta resistencia, interruptor abierto). Observe que esta región se extiende hasta aproximadamente 0.7 V positivos. Sin embargo, para valores del voltaje aplicado mayores que 0.7 V, la elevación vertical en las características indica una región de conductividad elevada (baja resistencia, interruptor cerrado). La aplicación de la ley de Ohm verificará las conclusiones anteriores.

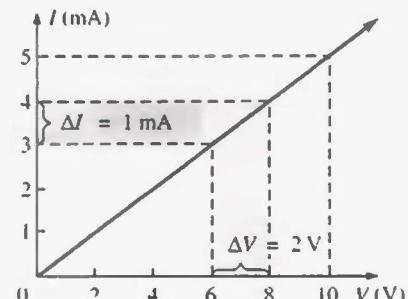


FIGURA 4.9
Ejemplo 4.5.

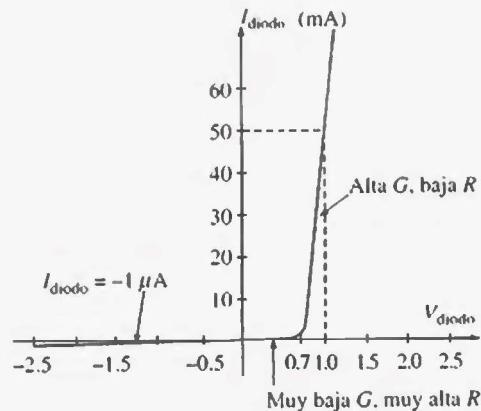


FIGURA 4.10
Características de un diodo semiconductor.

En $V = +1\text{ V}$,

$$\begin{aligned} R_{\text{diodo}} &= \frac{V}{I} = \frac{1\text{ V}}{50\text{ mA}} = \frac{1\text{ V}}{50 \times 10^{-3}\text{ A}} \\ &= 20\Omega \end{aligned}$$

(un valor relativamente bajo para la mayoría de las aplicaciones)

En $V = -1\text{ V}$,

$$\begin{aligned} R_{\text{diodo}} &= \frac{V}{I} = \frac{1\text{ V}}{1\mu\text{A}} \\ &= 1\text{ M}\Omega \end{aligned}$$

(lo cual a menudo se representa por un circuito abierto equivalente)

4.3 POTENCIA

La potencia es una indicación de cuánto trabajo (conversión de energía de una forma a otra) puede efectuarse en una cantidad específica de tiempo, esto es, una *tasa* de trabajo realizado. Por ejemplo, un motor grande tiene más potencia que un motor pequeño porque puede convertir más energía eléctrica en energía mecánica en el mismo periodo. Como la energía convertida se mide en *joules* (J) y el tiempo en segundos (s), la potencia se mide en joules/segundo (J/s). La unidad eléctrica de medición para la potencia es el watt (W), definido por:

$$1\text{ watt (W)} = 1\text{ joule/segundo (J/s)} \quad (4.8)$$

En forma de ecuación, la potencia es determinada por:

$$P = \frac{W}{t} \quad (\text{watts, W, o joules/segundo, J/s}) \quad (4.9)$$

con la energía W medida en joules y el tiempo t en segundos.

A lo largo del texto, la abreviatura para energía (W) puede ser distinguida de la usada para watt (W) por que una está en cursivas mientras la otra no. De hecho, todas las variables en la sección de cd se escriben en cursivas mientras que las unidades aparecen en tipo romano.

La unidad de medición, el watt, se deriva del nombre de James Watt (Figura 4.11), quien participó en el establecimiento de los estándares de mediciones de potencia. James Watt introdujo el término **caballo de potencia** (hp) como medida de la potencia promedio desarrollada por un caballo fuerte durante un día de trabajo. Esto es aproximadamente 50% más de lo que puede esperarse de un caballo promedio. El caballo de potencia y el watt están relacionados de la siguiente manera:

$$1 \text{ caballo de potencia} \cong 746 \text{ watts}$$

La potencia entregada a, o absorbida por, un dispositivo eléctrico o sistema puede encontrarse en términos de la corriente y el voltaje sustituyendo primero la ecuación (2.7) en la ecuación (4.9):

$$P = \frac{W}{t} = \frac{QV}{t} = V \frac{Q}{t}$$

Pero:

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

de modo que:

$$P = VI \quad (\text{watts}) \quad (4.10)$$

Por sustitución directa de la ley de Ohm, la ecuación para la potencia puede obtenerse en otras dos formas:

$$P = VI = V\left(\frac{V}{R}\right)$$

y

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (\text{watts}) \quad (4.11)$$

o bien:

$$P = VI = (IR)I$$

y

$$P = I^2R \quad (\text{watts}) \quad (4.12)$$

El resultado es que la potencia absorbida por el resistor de la figura 4.12 puede encontrarse directamente dependiendo de la información disponible. En otras palabras, si la corriente y la resistencia son conocidas, conviene emplear la ecuación (4.12) directamente, y si V e I son conocidas, el uso de la ecuación (4.10) es lo apropiado. Conviene tener que aplicar la ley de Ohm antes de determinar la potencia.

La potencia puede ser entregada o absorbida según sea la polaridad del voltaje y la dirección de la corriente. Para todas las fuentes de cd, la potencia está siendo *entregada* por la fuente si la corriente tiene la dirección que aparece en la figura 4.13(a). Observe que la corriente tiene la misma dirección establecida por la fuente en una red de una sola fuente. Si la dirección de la corriente y la polaridad son como se muestran en la figura 4.13(b) debido a una red multifuente, la batería estará absorbiendo tanta potencia como cuando esté siendo cargada.

Para elementos resistentivos, toda la potencia entregada se disipa en forma de calor porque la polaridad del voltaje es definida por la dirección de la corriente (y viceversa), y la corriente siempre entrará a la terminal de mayor potencial correspondiendo con el estado de absorción de la figura 4.13(b). Una inversión de la dirección de la corriente en la figura 4.12 también invertirá la polaridad del voltaje en el resistor y equiparáará las condiciones de la figura 4.13(b).

Escocés
(Greenock,
Birmingham)
(1736-1819)
Fabricante de
instrumentos
e inventor
Elegido Miembro de la
Real Sociedad de
Londres en 1785



Cortesía de
Smithsonian Institution
Fotografía núm. 30.391

En 1757, a la edad de 21 años, usó su talento innovador para diseñar instrumentos matemáticos como el cuadrante, la brújula, y varias escalas. En 1765 introdujo el uso de un condensador separado para incrementar la eficiencia de las máquinas de vapor. En los años siguientes recibió varias patentes importantes sobre el diseño mejorado de máquinas, incluyendo un movimiento rotatorio para la máquina de vapor (contra la acción alternativa) y una máquina de doble acción, en la que el pistón jalaba y empujaba en su movimiento cíclico. Introdujo el término **caballo de potencia** como la potencia promedio desarrollada por un caballo fuerte en un día de trabajo.

FIGURA 4.11

James Watt.

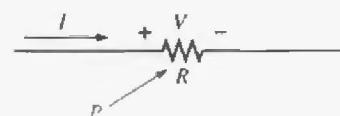


FIGURA 4.12

Definición de la potencia hacia un elemento resistivo.

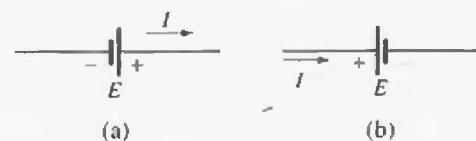


FIGURA 4.13

Potencia de una batería: (a) suministrada;
(b) absorbida.



La magnitud de la potencia entregada o absorbida por una batería está dada por:

$$P = EI \quad (\text{watts}) \quad (4.13)$$

donde E es el voltaje en las terminales de la batería e I es la corriente a través de la fuente.

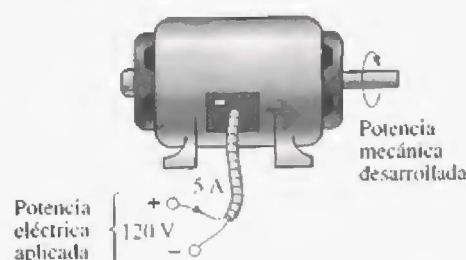


FIGURA 4.14
Ejemplo 4.6.

EJEMPLO 4.6 Encuentre la potencia entregada al motor de cd de la figura 4.14.

Solución:

$$P = VI = (120 \text{ V})(5 \text{ A}) = 600 \text{ W} = 0.6 \text{ kW}$$

EJEMPLO 4.7 ¿Cuál es la potencia disipada por un resistor de 5Ω si la corriente es de 4 A ?

Solución:

$$P = I^2R = (4 \text{ A})^2(5 \Omega) = 80 \text{ W}$$

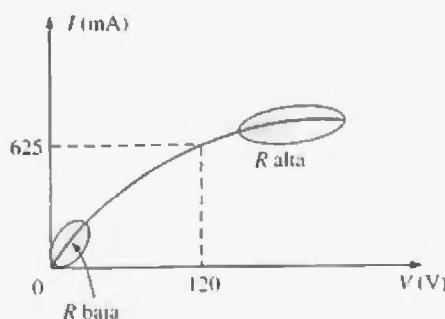


FIGURA 4.15
Características I - V no lineales de un foco de 75 W.

EJEMPLO 4.8 Las características I - V de un foco están dadas en la figura 4.15. Observe la no linealidad de la curva, lo que indica un rango amplio en resistencia del foco con voltaje aplicado como se definió mediante la explicación de la sección 4.2. Si el voltaje es de 120 V , encuentre la potencia del foco. También calcule la resistencia del foco bajo las condiciones dadas.

Solución: En 120 V ,

$$I = 0.625 \text{ A}$$

$$\text{y} \quad P = VI = (120 \text{ V})(0.625 \text{ A}) = 75 \text{ W}$$

En 120 V ,

$$R = \frac{V}{I} = \frac{120 \text{ V}}{0.625 \text{ A}} = 192 \Omega$$

Algunas veces la potencia es dada y la corriente o el voltaje deben ser determinados. Por medio de operaciones algebraicas, una ecuación para cada variable se obtiene como sigue:

$$P = I^2R \Rightarrow I^2 = \frac{P}{R}$$

y

$$I = \sqrt{\frac{P}{R}} \quad (\text{ampere}) \quad (4.14)$$

y

$$P = \frac{V^2}{R} \Rightarrow V^2 = PR$$

$$V = \sqrt{PR} \quad (\text{volts}) \quad (4.15)$$

EJEMPLO 4.9 Determine la corriente que pasa a través de un resistor de $5 \text{ k}\Omega$ cuando la potencia disipada por el elemento es de 20 mW .

Solución: Ecuación (4.14):

$$I = \sqrt{\frac{P}{R}} = \sqrt{\frac{20 \times 10^{-3} \text{ W}}{5 \times 10^3 \Omega}} = \sqrt{4 \times 10^{-6}} = 2 \times 10^{-3} \text{ A}$$

$$= 2 \text{ mA}$$

4.4 WATÍMETROS

Como podría esperarse, existen instrumentos que pueden medir la potencia entregada por una fuente a un elemento de dissipación o disipativo. Un instrumento de este tipo, el **watímetro**, se muestra en la figura 4.16. Como la potencia es una función de los niveles de corriente y voltaje, para medir la potencia al resistor R deben ser conectadas cuatro terminales como se muestra en la figura 4.17.

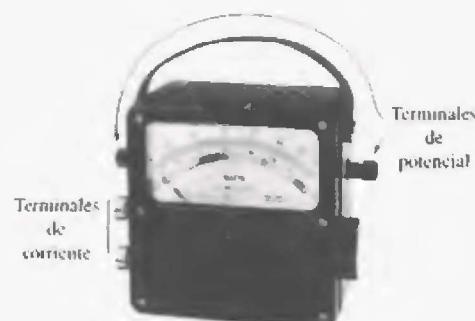


FIGURA 4.16

Watímetro. (Cortesía de Electrical Instrument Service, Inc.)

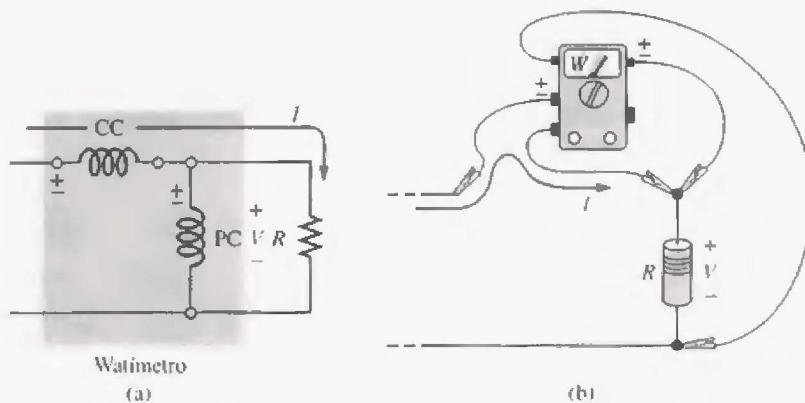


FIGURA 4.17
Conexiones de wattímetro.

Si las bobinas de corriente (CC) y las bobinas de potencial (PC) del wattímetro están conectadas como en la figura 4.17, se tendrá una lectura hacia arriba de la escala del wattímetro. Una inversión de cualquiera de las bobinas resultará en una indicación por abajo de cero. Tres terminales de voltaje pueden estar disponibles sobre el lado del voltaje para permitir una selección de los niveles de éste. En la mayoría de los wattímetros, las terminales de corriente son físicamente mayores que las de voltaje para proporcionar seguridad y garantizar una conexión sólida.

4.5 EFICIENCIA

Un diagrama de flujo para los niveles de energía asociados con cualquier sistema que convierte energía de una a otra forma se muestra en la figura 4.18. Observe en particular que el nivel de energía de salida debe ser siempre menor que la energía aplicada debido a pérdidas y almacenamiento dentro del sistema. Lo mejor que puede esperarse es que W_{en} y W_{sal} sean relativamente cercanas en magnitud.

La conservación de la energía requiere que:

Entrada de energía = salida de energía + energía perdida o almacenada en el sistema.

Al dividir ambos lados de la relación entre t da:

$$\frac{W_{\text{en}}}{t} = \frac{W_{\text{sal}}}{t} + \frac{\text{Energía perdida o almacenada por el sistema}}{t}$$

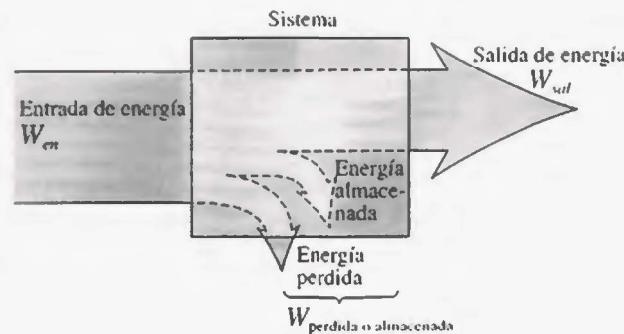


FIGURA 4.18
Flujo de energía a través de un sistema.

Como $P = W/t$, tenemos lo siguiente:

$$P_i = P_o + P_{\text{perdida o almacenada}} \quad (\text{W}) \quad (4.16)$$

La eficiencia (simbolizada por η , eta griega minúscula) del sistema se determina entonces por la siguiente ecuación:

$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{salida de potencia}}{\text{entrada de potencia}}$$

$$\text{y} \quad \eta = \frac{P_o}{P_i} \quad (\text{número decimal}) \quad (4.17)$$

donde η es un número decimal. Expresada como un porcentaje,

$$\eta \% = \frac{P_o}{P_i} \times 100\% \quad (\text{por ciento}) \quad (4.18)$$

En términos de la energía de entrada y de salida, la eficiencia en porcentaje está dada por:

$$\eta \% = \frac{W_o}{W_i} \times 100\% \quad (\text{por ciento}) \quad (4.19)$$

La máxima eficiencia posible es 100%, y ocurre cuando $P_o = P_i$, o cuando la potencia perdida o almacenada en el sistema es cero. Es obvio que entre mayores sean las pérdidas internas del sistema al generar la potencia necesaria de salida o energía, menor será la eficiencia neta.

EJEMPLO 4.10 Un motor de 2 hp opera con una eficiencia de 75%. ¿Cuál es la entrada de potencia en watts? Si el voltaje aplicado es de 220 V, ¿cuál es la entrada de corriente?

Solución:

$$\eta \% = \frac{P_o}{P_i} \times 100\%$$

$$0.75 = \frac{(2 \text{ hp})(746 \text{ W/hp})}{P_i}$$

o bien:

$$P_i = \frac{1492 \text{ W}}{0.75} = 1989.33 \text{ W}$$

$$P_i = EI \quad \text{o} \quad I = \frac{P_i}{E} = \frac{1989.33 \text{ W}}{220 \text{ V}} = 9.04 \text{ A}$$

EJEMPLO 4.11 ¿Cuál es la salida en caballos de potencia de un motor con eficiencia de 80% y entrada de corriente de 8 A a 120 V?

Solución:

$$\eta\% = \frac{P_o}{P_i} \times 100\%$$

$$0.80 = \frac{P_o}{(120 \text{ V})(8 \text{ A})}$$

$$\text{y} \quad P_o = (0.80)(120 \text{ V})(8 \text{ A}) = 768 \text{ W}$$

$$\text{con: } 768 \text{ W} \left(\frac{1 \text{ hp}}{746 \text{ W}} \right) = 1.029 \text{ hp}$$

EJEMPLO 4.12 Si $\eta = 0.85$, determine el nivel de salida de energía si la energía aplicada es de 50 J.

Solución:

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{W_o}{W_i} \Rightarrow W_o = \eta W_i \\ &= (0.85)(50 \text{ J}) \\ &= 42.5 \text{ J} \end{aligned}$$

Las componentes básicas de un sistema generador (voltaje) se muestran en la figura 4.19. La fuente de potencia mecánica es una estructura similar a una rueda de paletas que es girada por el agua que se precipita por una presa. El tren de engranes garantiza entonces que el elemento rotatorio del generador gire a una velocidad específica. El voltaje de salida debe entonces ser alimentado a través de un sistema de transmisión hacia la carga. Para cada componente

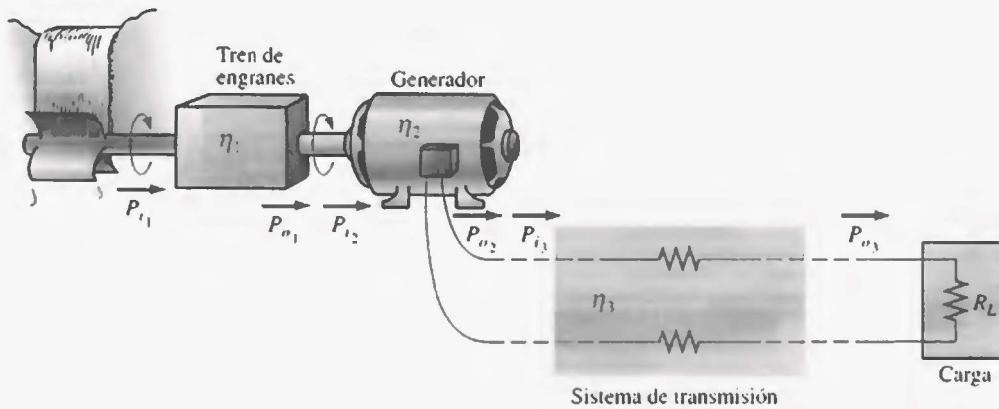


FIGURA 4.19
Componentes básicas de un sistema generador.



del sistema, una potencia de entrada y otra de salida han sido indicadas. La eficiencia de cada sistema está dada por:

$$\eta_1 = \frac{P_{o_1}}{P_{i_1}} \quad \eta_2 = \frac{P_{o_2}}{P_{i_2}} \quad \eta_3 = \frac{P_{o_3}}{P_{i_3}}$$

Si se forma el producto de esas tres eficiencias,

$$\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 = \frac{P_{o_1}}{P_{i_1}} \cdot \frac{P_{o_2}}{P_{i_2}} \cdot \frac{P_{o_3}}{P_{i_3}}$$

y se sustituye el hecho de que $P_{i_2} = P_{o_1}$ y $P_{i_3} = P_{o_2}$, la cual es una medida de la eficiencia total del sistema. En general, para el sistema representativo en cascada de la figura 4.20,

$$\eta_{\text{total}} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdots \eta_n \quad (4.20)$$



FIGURA 4.20
Sistema en cascada.

EJEMPLO 4.13 Encuentre la eficiencia total del sistema de la figura 4.19 si $\eta_1 = 90\%$, $\eta_2 = 85\%$ y $\eta_3 = 95\%$.

Solución:

$$\eta_T = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 = (0.90)(0.85)(0.95) = 0.727, \text{ o } 72.7\%$$

EJEMPLO 4.14 Si la eficiencia η_1 cae a 40%, encuentre la nueva eficiencia total y compare el resultado con el obtenido en el ejemplo 4.13.

Solución:

$$\eta_T = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 = (0.40)(0.85)(0.95) = 0.323, \text{ o } 32.3\%$$

Ciertamente, 32.3% es considerablemente menor que 72.7%. La eficiencia total de un sistema en cascada es determinada, por tanto, principalmente por la eficiencia más baja (eslabón más débil) y es menor que (o igual a si las eficiencias restantes son de 100%) el eslabón menos eficiente del sistema.

4.6 ENERGÍA

Para que la potencia, que es la tasa con que se efectúa un trabajo, produzca una conversión de energía de cualquier forma, debe ser *utilizada durante un periodo determinado*. Por ejemplo, un motor puede tener los caballos de potencia necesarios para mover una carga pesada, pero a menos que se *use* durante un periodo establecido, no habrá conversión de energía. Además, entre mayor sea el tiempo que el motor se use para mover la carga, mayor será la energía gastada.

La **energía (W)** perdida o ganada por cualquier sistema se determina, por tanto, mediante:

$$W = Pt \quad (\text{wattsegundo, Ws, o joules}) \quad (4.21)$$

Como la potencia se mide en watts (o joules por segundo) y el tiempo en segundos, la unidad de energía es el *watt-segundo* o *joule* (observe la figura 4.21) como se indicó líneas arriba. Sin embargo, el watt-segundo es una cantidad demasiado pequeña para la mayoría de los propósitos prácticos, por lo que el *watt-hora* (Wh) y el *kilowatt-hora* (kWh) fueron definidos como sigue:

$$\text{Energía (Wh)} = \text{potencia (W)} \times \text{tiempo (h)} \quad (4.22)$$

$$\text{Energía (kWh)} = \frac{\text{potencia (W)} \times \text{tiempo (h)}}{1000} \quad (4.23)$$

Observe que la energía en kilowatts hora es simplemente la energía en watt-hora dividida entre 1000. Para tener una idea del nivel kilowatt hora, considere que 1 kWh es la energía disipada por un foco de 100 W en 10 horas.

El **medidor de kilowatts hora** es un instrumento para medir la energía suministrada al usuario residencial o comercial de electricidad. El medidor está conectado, por lo general, directamente a las líneas distribuidoras en un punto justo antes de entrar al tablero de distribución de potencia del sitio de uso. Un conjunto típico de medidores se muestra en la figura 4.22(a) con la fotografía de un medidor analógico de kilowatts hora. Como se indica, cada potencia de 10 debajo del medidor está en kilowatts hora. Entre más rápidamente gira el disco de aluminio, mayor es la demanda de energía. Los medidores están conectados mediante un conjunto de engranes a la rotación de este disco. Un medidor digital de estado sólido con un rango ampliado de capacidades aparece en la figura 4.22(b).

Inglés
(Salford,
Manchester)
(1818-1889)
Físico
Doctorados honorarios
de las
Universidades de
Dublin y Oxford



Archivo Bettmann
Fotografía núm. 076800P

Contribuyó a la importante y fundamental *ley de la conservación de la energía* al establecer que las distintas formas de la energía —eléctrica, mecánica o calorífica—, se encuentran en la misma familia y pueden ser intercambiadas de una forma a otra. En 1841 introdujo la *ley de Joule*, la cual establece que el calor desarrollado por una corriente eléctrica en un alambre es proporcional al producto del cuadrado de la corriente y la resistencia del alambre (I^2R). James Prescott Joule determinó también que el calor emitido era equivalente a la potencia absorbida y que, por tanto, el calor es una forma de energía.

FIGURA 4.21
James Prescott Joule.

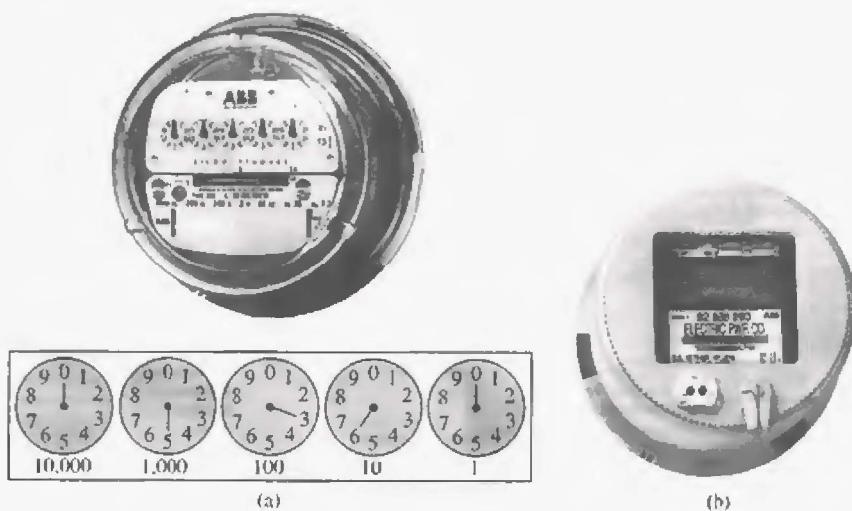


FIGURA 4.22
Medidores de kilowatts hora: (a) analógico; (b) digital. (Cortesía de ABB Electric Metering Systems.)

EJEMPLO 4.15 Para las posiciones de los medidores mostrados en la figura 4.22(a), calcule la cuenta de electricidad si la lectura previa fue de 4650 kWh y el costo promedio es de 9¢ por kilowatt hora.

Solución:

$$5360 \text{ kWh} - 4650 \text{ kWh} = 710 \text{ kWh utilizados}$$

$$710 \text{ kWh} \left(\frac{9\text{¢}}{\text{kWh}} \right) = \$63.90$$



EJEMPLO 4.16 ¿Cuánta energía (en kilowatts-hora) se requiere para mantener encendido un foco de 60 W continuamente durante 1 año (365 días)?

Solución:

$$W = \frac{Pt}{1000} = \frac{(60 \text{ W})(24 \text{ h/día})(365 \text{ días})}{1000} = \frac{525.600 \text{ Wh}}{1000}$$

$$= 525.60 \text{ kWh}$$

EJEMPLO 4.17 ¿Cuánto tiempo puede una televisión de 205 W permanecer encendida antes de utilizar más de 4 kWh de energía?

Solución:

$$W = \frac{Pt}{1000} \Rightarrow t (\text{horas}) = \frac{(W)(1000)}{P}$$

$$= \frac{(4 \text{ kWh})(1000)}{205 \text{ W}} = 19.51 \text{ h}$$

EJEMPLO 4.18 ¿Cuál es el costo por utilizar un motor de 5 hp durante 2 horas si el precio por kilowatt-hora es de 9¢?

Solución:

$$W (\text{kilowatt-hora}) = \frac{Pt}{1000} = \frac{(5 \text{ hp} \times 746 \text{ W/hp})(2 \text{ h})}{1000} = 7.46 \text{ kWh}$$

$$\text{Costo} = (7.46 \text{ kWh})(9\text{¢}/\text{kWh}) = 67.14\text{¢}$$

EJEMPLO 4.19 ¿Cuál es el costo total por utilizar lo siguiente a 9¢ por kilowatt-hora?

Un tostador de 1200 W durante 30 minutos

Seis focos de 50 W durante 4 horas

Una lavadora de 400 W durante 45 minutos

Una secadora de ropa de 4800 W durante 20 minutos

Solución:

$$W = \frac{(1200 \text{ W})(\frac{1}{2} \text{ h}) + (6)(50 \text{ W})(4 \text{ h}) + (400 \text{ W})(\frac{3}{4} \text{ h}) + (4800 \text{ W})(\frac{1}{3} \text{ h})}{1000}$$

$$= \frac{600 \text{ Wh} + 1200 \text{ Wh} + 300 \text{ Wh} + 1600 \text{ Wh}}{1000} = \frac{3700 \text{ Wh}}{1000}$$

$$W = 3.7 \text{ kWh}$$

$$\text{Costo} = (3.7 \text{ kWh})(9\text{¢}/\text{kWh}) = 33.3\text{¢}$$

La gráfica presentada en la figura 4.23 muestra el costo promedio por kilowatt-hora comparado con los kilowatt-hora utilizados por cliente. Observe que actualmente el costo es superior al de 1926 y que el cliente promedio utiliza 20 veces más energía eléctrica en un año. Tenga en mente que la gráfica de la figura 4.23 proporciona el costo promedio en Estados Unidos. Algunos estados tienen cuotas promedio de 5¢ por kilowatt-hora, mientras que otros se acercan a 12¢.

La tabla 4.1 muestra una lista de algunos aparatos domésticos comunes con sus clasificaciones típicas por potencia. Sería interesante para el lector calcular el costo de operar algunos de esos aparatos durante cierto periodo usando la gráfica de la figura 4.23 para encontrar el costo por kilowatt-hora.

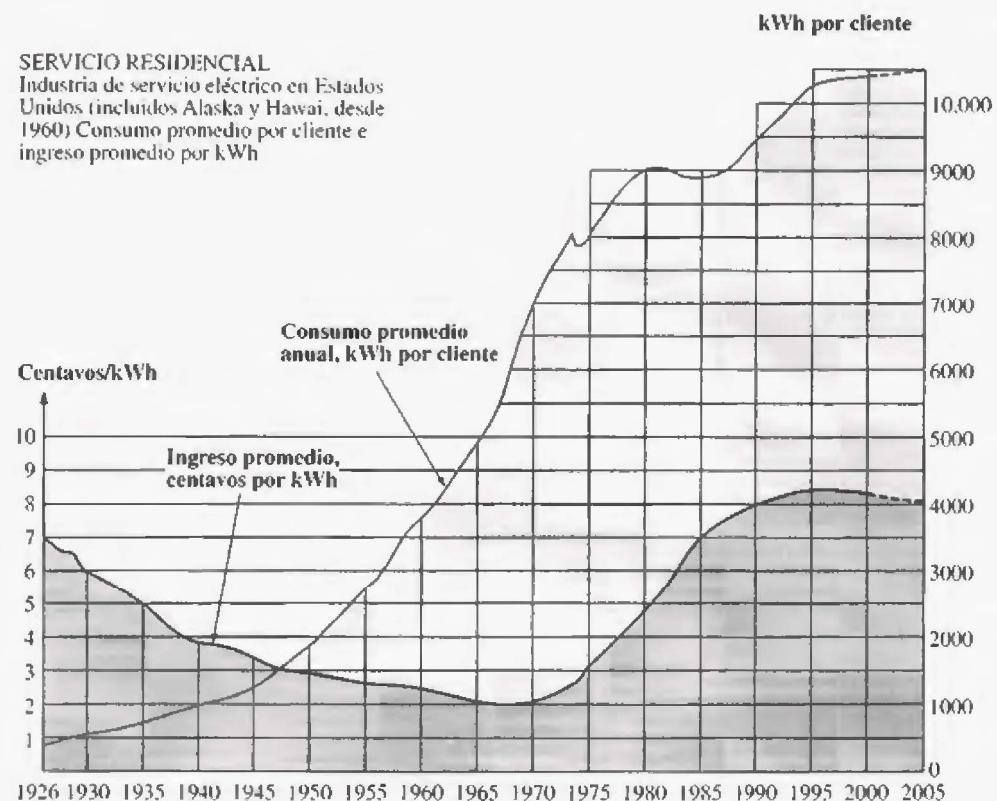


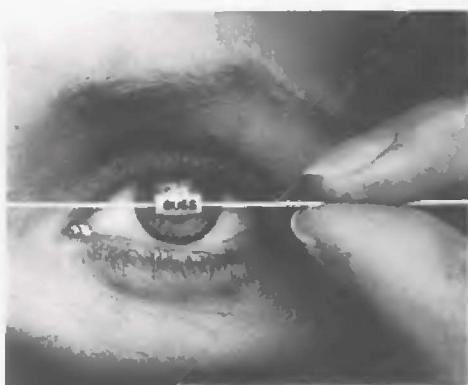
FIGURA 4.23
Costo por kWh y kWh promedio por cliente en función del tiempo.
(Cortesía de Edison Electric Institute.)

TABLA 4.1
Clasificaciones típicas por potencia de algunos aparatos caseros.

Aparato	Clasificación por potencia	Aparato	Clasificación por potencia
Acondicionador de aire	860	Computadora portátil	
Secadora de pelo	1,300	En reposo	< 1 W (Normalmente 0.3 W a 0.5 W)
Grabadora reproductora de cassetes	5	Uso normal	10-20 W
Teléfono celular:		Uso intenso	25-35 W
En espera	≈ 35 mW	Horno de microondas	1,200
Hablando	≈ 4.3 W	Localizador	1-2 mW
Reloj	2	Fonógrafo	75
Secadora de ropa	4,800	Proyector	1,200
Cafetera	900	Radio	70
Lavavajillas	1,200	Hornillo (de autolimpieza)	12,200
Ventilador:		Refrigerador (descongelador automático)	1,800
Fijo	90	Rasuradora	15
Ventilador	200	Equipo estereofónico	110
Calentador	1,322	Lámpara de sol	280
Equipo calefactor:		Tostador	1,200
Ventilador de horno	320	Compactador de basura	400
Motor quemador de aceite	230	Televisor a color	200
Plancha, seca o de vapor	1,100	Videocasetera	110
		Lavadora doméstica	500
		Calentador de agua	4,500



(a)



(b)



(c)

FIGURA 4.24
Fusibles: (a) CC-TRON® (0-10 A);
(b) matriz sólida subminiatura; (c) Semitron
(0-600 A). (Cortesía de Bussman
Manufacturing Co.)

4.7 CORTACIRCUITOS, DISPOSITIVOS GFCI Y FUSIBLES

La potencia de llegada a cualquier planta industrial, equipo pesado, circuito doméstico sencillo o medidores utilizados en el laboratorio, debe estar limitada a garantizar que la corriente a través de las líneas de distribución no esté por encima del valor establecido. De otra manera, los operadores o el equipo eléctrico o electrónico pueden resultar dañados, o pueden surgir efectos colaterales peligrosos como fuego o humo. Para limitar el nivel de corriente se instalan fusibles o cortacircuitos donde la potencia entra a la instalación, como en el tablero ubicado en los sótanos de las casas en el punto donde las líneas externas de alimentación entran a la construcción. Los fusibles de la figura 4.24 tienen un conductor interno metálico a través del cual pasa la corriente; un fusible comenzará a derretirse si la corriente que atraviesa el sistema excede el valor de clasificación impreso sobre la cubierta. Por supuesto, si el fusible se funde, la trayectoria de la corriente se rompe y la carga en su trayectoria queda protegida.

En casas de reciente construcción, los fusibles han sido reemplazados por cortacircuitos como los mostrados en la figura 4.25. Cuando la corriente excede las condiciones de clasificación, un electroimán instalado en el dispositivo tendrá suficiente fuerza como para extraer el eslabón metálico de conexión —ubicado en el cortacircuito— fuera del circuito y abrir así la trayectoria de la corriente. Cuando las condiciones hayan sido corregidas, el cortacircuito podrá ser reposicionado y utilizado de nuevo.

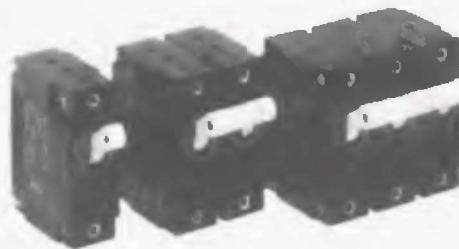


FIGURA 4.25
Cortacircuitos. (Cortesía de Potter y Brumfield Division, AMF, Inc.)

El más reciente National Electrical Code requiere que las tomas en los cuartos de baño y otras áreas sensibles sean de la variedad de interruptor de corriente por falla de tierra (GFCI, ground fault current interrupt); los GFCI están diseñados para desconectarse más rápidamente que los cortacircuito estándar. La unidad comercial mostrada en la figura 4.26 se desconecta en 5 ms. Se ha determinado que 6 mA es el nivel máximo al que la mayoría de las personas puede estar expuesta por un periodo corto sin riesgo de sufrir graves daños. Una



FIGURA 4.26
Interruptor de corriente por falla de tierra (GFCI).
toma de 125 V de ca, 60 Hz y 15 A. (Cortesía de Leviton, Inc.)

corriente mayor de 11 mA es capaz de causar contracciones musculares involuntarias que podrían impedirle a una persona soltar el conductor y provocarle entrar en estado de choque. Corrientes mayores que duren más de un segundo pueden causar fibrilación del corazón y posiblemente la muerte en unos pocos minutos. El GFCI es capaz de reaccionar tan rápido como lo hace por sensibilidad a la diferencia entre las corrientes de entrada y de salida en la toma; las corrientes deben ser las mismas si todo está trabajando apropiadamente. Una trayectoria errante, como la que pasa a través de una persona, establece una diferencia en los dos niveles de corriente y provoca que el interruptor se desconecte de la fuente de potencia.

4.8 APLICACIONES

Horno de microondas

Podría asegurarse que todos los propietarios de las casas residenciales más modernas tienen un horno de microondas como el mostrado en la figura 4.27(a) —incluso lo tienen quienes pasaron por la fase de preocuparse acerca de si era segura y apropiada esta manera de preparar la comida. Ahora se usa el horno de microondas tan a menudo durante el día que muchas personas llegan a preguntarse cómo podía vivirse antes sin este aparato. Para la mayoría de los usuarios, su eficiencia operativa no es la preocupación mayor, probablemente porque su impacto en la cuenta mensual no es fácil de definir con tantos aparatos en casa. Sin embargo, podría ser interesante examinar la unidad con más detalle y aplicar alguna de las teorías presentadas en este capítulo.

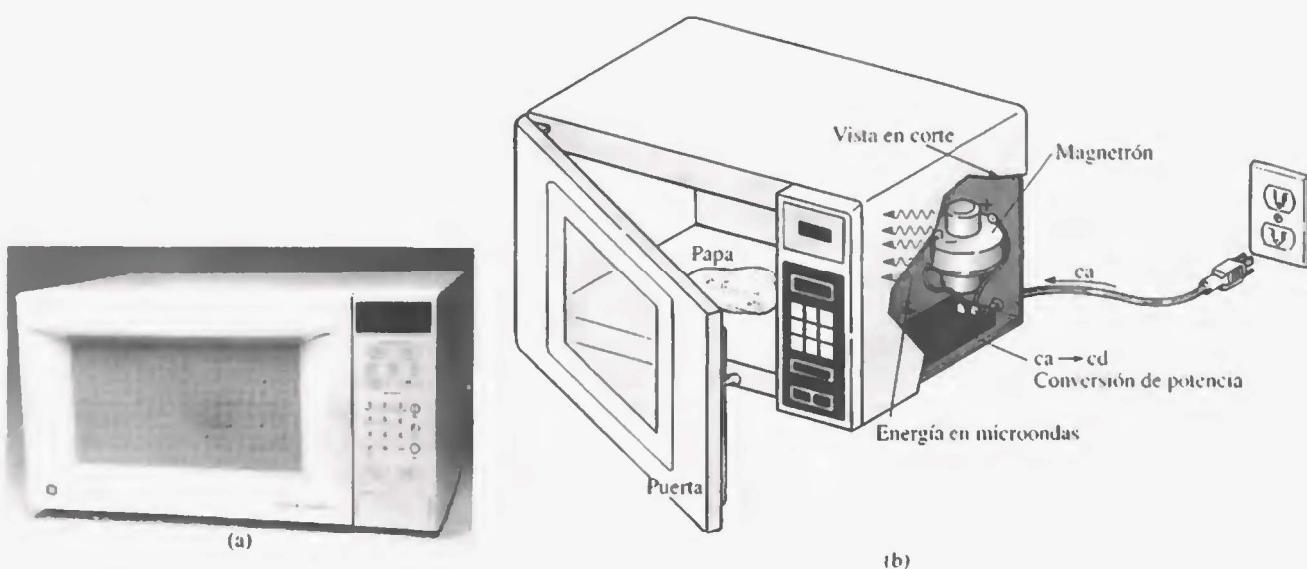


FIGURA 4.27
Horno de microondas: (a) fotografía; (b) construcción básica.

En primer lugar, algunos comentarios generales. La mayor parte de los hornos de microondas están clasificados de 500 W a 1200 W en una frecuencia de 2.45 GHz (casi 2500 millones de ciclos por segundo en comparación con los 60 ciclos por segundo para el voltaje de ca en una toma casera normal —veremos los detalles en el capítulo 13). El calentamiento ocurre porque las moléculas de agua existentes en la comida son sometidas a vibración en una frecuencia tan alta que la fricción con moléculas vecinas causa el efecto de calentamiento. Como es esta alta frecuencia de vibración lo que calienta la

comida, no hay necesidad de que el material sea un conductor de electricidad. Sin embargo, cualquier metal colocado en el horno de microondas puede actuar como una antena (especialmente si tiene puntos o bordes agudos) que atraerá la energía de las microondas y alcanzará temperaturas muy altas. Se fabrica actualmente una sartén bronceadora para horno de microondas que tiene algo de metal empotrado en el fondo y los lados para atraer la energía de las microondas y elevar la temperatura en la superficie entre la comida y la sartén para dar a la comida un color café y una textura encrespada. Aun si el metal no actuase como antena, es un buen conductor de calor y puede calentarse bastante al extraer calor de la comida. Cualquier recipiente con bajo contenido de humedad puede ser usado para calentar comida en un horno de microondas. Debido a este requisito, los fabricantes han desarrollado una extensa línea de vajillas para microondas que es muy baja en contenido de humedad. Teóricamente, el vidrio y el plástico tienen muy poco contenido de humedad, pero aun así se calientan cuando son utilizados en el horno por un minuto aproximadamente. Podría ser la humedad en el aire lo que se adhiere a la superficie de estos materiales o tal vez el plomo usado en los buenos cristales. En todo caso, los hornos de microondas deberían ser usados sólo para cocinar comida, ya que no fueron diseñados como secadores o evaporadores. Las instrucciones que acompañan a todo horno de microondas especifican que éste no debería encenderse al estar vacío. Aun cuando el horno esté vacío, será generada energía de las microondas y el horno realizará todo el esfuerzo necesario para encontrar un canal que la absorba. Si el horno está vacío, la energía podría ser atraída hacia el propio horno y podría ocasionar algunos daños. Para demostrar que un vaso vacío seco o un recipiente de plástico no atraerán una cantidad importante de energía, coloque dos vasos en un horno de microondas, uno con agua y el otro vacío, y accione el horno. Despues de un minuto encontrará el vaso con agua bastante caliente debido al efecto calorífico del agua caliente mientras que el otro vaso estará cercano a su temperatura original. En otras palabras, el agua creó un sumidero de calor para la mayoría de la energía de las microondas, dejando al vaso vacío como una trayectoria menos atractiva para la conducción del calor. Las toallas de papel seco y las envolturas de plástico pueden ser usadas en el horno para cubrir platos ya que inicialmente tienen un bajo contenido de moléculas de agua, y el papel y el plástico no son buenos conductores del calor. Sin embargo, no sería seguro colocar una toalla de papel sola en un horno porque, como se anotó líneas arriba, la energía de las microondas buscará un medio absorbente y podría incendiar el papel.

La cocción de comida con un horno convencional es de afuera hacia adentro. Lo mismo es cierto para hornos de microondas, pero éstos tienen la ventaja adicional de ser capaces de penetrar los pocos centímetros exteriores de la comida, reduciendo el tiempo de cocción considerablemente. El tiempo de cocción con un horno de microondas está relacionado con la cantidad de comida expuesta en el horno. Dos copas de agua tardarán más tiempo en calentarse que una copa, aunque no según una relación lineal y no tomará el doble de tiempo —tal vez sólo 75% a 90% más de tiempo. Eventualmente, si se coloca suficiente comida en el horno de microondas para comparar el tiempo de cocción más alto con el de un horno convencional, se alcanzará un punto de cruce donde sería más conveniente usar un horno convencional y obtener la textura preferida en la comida.

La construcción básica del horno de microondas se muestra en la figura 4.27(b). Este aparato emplea un suministro de 120 V de ca que es entonces convertida por medio de un transformador de alto voltaje a otra con valores pico cercanos a 5000 V —en niveles de corriente considerables—, lo que debería ser suficiente advertencia para dejar el mantenimiento a personal capacitado. A través del proceso rectificador descrito brevemente en el capítulo 2, un alto voltaje dc de unos pocos miles de volts serán generados de modo que aparecerán a través de un magnetrón. El magnetrón, debido a su muy especial diseño (actualmente es el mismo diseño que se utilizó durante la Segunda Guerra Mundial y

fue inventado por los británicos para sus unidades de radar de alta potencia), generará la señal requerida de 2.45 GHz para el horno. Debe señalarse también que el magnetrón tiene un nivel específico de potencia de operación que no puede ser controlado —una vez instalado, queda fijo a cierto nivel de potencia. Cabría preguntarse cómo pueden ser controladas la temperatura y el tiempo de cocción. Esto se logra por medio de una red de control que determina la cantidad de tiempo de apagado y encendido durante el ciclo de entrada del suministro de 120 V. Temperaturas mayores se logran fijando una razón superior de tiempo de encendido a tiempo de apagado, mientras que temperaturas menores son establecidas por la acción inversa.

Una desafortunada característica del magnetrón es que, en el proceso de conversión, genera una gran cantidad de calor que no va hacia el calentamiento de la comida y debe ser absorbido por sumideros de calor o dispersado por un ventilador de enfriamiento. Las eficiencias de conversión normales están entre 55 y 75%. Considerando otras pérdidas inherentes en el funcionamiento de cualquier sistema, es razonable suponer que la mayoría de los hornos de microondas tienen entre 50 y 60% de eficiencia. Sin embargo, el horno convencional tiene también pérdidas significativas a causa de su ventilador de extracción que opera continuamente, el calentamiento de la unidad, los utensilios de cocina, el aire calecedante, etc., aun si es menos sensible a la cantidad de comida por ser cocida. Considerando todo esto, el factor de conveniencia es probablemente el otro elemento de más peso en este análisis; lo cual deja también de lado el asunto de cómo se toma en cuenta el tiempo de los usuarios en la ecuación de la eficiencia.

Para manejar números específicos, considérese la energía asociada con la cocción de una papa de 5 onzas en un horno de microondas de 1200 W durante 5 minutos si la eficiencia de conversión es un valor promedio de 55%. Primero, es importante darse cuenta de que cuando una unidad está clasificada como de 1200 W, esa es la potencia extraída de la línea durante el proceso de cocción. Si el horno de microondas está enchufado a una salida de 120 V, la corriente extraída es:

$$I = P/V = 1200 \text{ W}/120 \text{ V} = 10.0 \text{ A}$$

lo cual representa un nivel importante de corriente. A continuación, podemos determinar la cantidad de potencia dedicada solamente al proceso de cocción usando el nivel de eficiencia. Esto es,

$$P_o = \eta P_i = (0.55)(1200 \text{ W}) = 660 \text{ W}$$

La energía transferida a la papa en un periodo de 5 minutos puede entonces ser determinada con:

$$W = Pt = (660 \text{ W})(5 \text{ min})(60 \text{ s}/1 \text{ min}) = 198 \text{ kJ}$$

que es aproximadamente la mitad de la energía (valor nutricional) derivada de comer una papa de 5 onzas. El número de kilowatts-hora extraído por la unidad es determinado a partir de:

$$W = Pt/1000 = (1200 \text{ W})(5/60 \text{ h})/1000 = 0.1 \text{ kWh}$$

A razón de 10¢/kWh encontramos que podemos cocer la papa por 1 centavo —lo que es muy barato, relativamente hablando. Un horno tostador común de 1550 W tomaría una hora para calentar la misma papa, resultando en 1.55 kWh y un costo de 15.5 centavos —esto es un aumento considerable en costo.

Cableado doméstico

Algunas facetas del cableado doméstico pueden ser analizadas sin examinar la manera en que están físicamente conectadas. En los capítulos subsiguientes se proporcionará una cobertura adicional para que se desarrolle un entendimiento

fundamental sólido del sistema de cableado doméstico total. Por lo menos, podrá establecerse una base que permitirá responder preguntas que el lector debe ser capaz de contestar como estudiante de este campo.

La especificación que define al sistema entero es la corriente máxima que puede extraerse de las líneas de energía puesto que el voltaje está fijo a 120 V o 208 V (dependiendo de cómo se utilicen las líneas de energía). Para casas muy antiguas con un sistema calefactor diferente al eléctrico, un servicio de 100 A es la norma. Actualmente, cuando los sistemas electrónicos se han vuelto tan comunes en las casas, muchas personas están optando por el servicio de 200 A aunque no tengan calefacción eléctrica. Un servicio de 100 A especifica que la corriente máxima que puede extraerse de las líneas de energía hacia una casa es de 100 A. Usando el voltaje fijado de línea a línea y la corriente de servicio pleno (y suponiendo que todas las cargas son de tipo resistivo), es posible determinar la potencia máxima que puede ser entregada usando la ecuación básica de la potencia:

$$P = EI = (208 \text{ V})(100 \text{ A}) = 20,800 \text{ W} = 20.8 \text{ kW}$$

Este valor nominal revela que el total de todas las unidades encendidas en una casa no puede ser superior a los 20.8 kW en ningún momento. De otra manera podríamos esperar que el interruptor principal instalado en la parte superior del tablero de potencia se abriese. Inicialmente, 20.8 kW puede parecer un valor nominal muy grande, pero cuando se considera que un horno eléctrico de autolimpieza puede extraer 12.2 kW, una secadora 4.8 kW, un calentador de agua 4.5 kW, y una lavavajillas 1.2 kW, ya estamos en 22.7 kW (si todas las unidades están operando en demanda pico), y no se han encendido aún las luces o la televisión. Obviamente, sólo el uso de un horno eléctrico puede sugerir fuertemente la consideración de obtener un servicio de 200 A. Sin embargo, hay que tener en cuenta que rara vez se usan todos los quemadores de una estufa al mismo tiempo, y que el horno contiene un termostato para controlar la temperatura de manera que no esté encendido siempre. Lo mismo es cierto para el calentador de agua y la lavavajillas, por lo que la probabilidad de que todas las unidades en una casa demanden servicio pleno al mismo tiempo es muy pequeña. Desde luego, una casa típica con calefacción eléctrica que pueda extraer 16 kW sólo para calefacción en clima frío, debe considerar un servicio de 200 A. También debe quedar claro que hay algo de margen en los valores nominales máximos por razones de seguridad. En otras palabras, un sistema diseñado para una carga máxima de 100 A puede aceptar una corriente ligeramente superior durante períodos cortos sin mostrar daños significativos. Sin embargo, para el largo plazo la corriente no debe excederse.

Cambiar el servicio a 200 A no es simplemente un asunto de cambiar el tablero instalado en el sótano —una línea más pesada debe llevarse de la calle a la casa. En algunas áreas, los cables alimentadores son de aluminio debido a su menor costo y peso; en otras, el aluminio no está permitido debido a su sensibilidad a la temperatura (expansión y contracción), y debe usarse cobre. En todo caso, cuando se usa aluminio, el contratista debe estar absolutamente seguro de que las conexiones en ambos extremos son muy seguras. El National Electric Code especifica que un servicio de 100 A debe usar un conductor de cobre AWG del número 4 o uno de aluminio del número 2. Para un servicio de 200 A, debe usarse un conductor de cobre 2/0 o uno de aluminio 4/0 como se muestra en la figura 4.28(a). Un servicio de 100 A o de 200 A debe tener dos conductores de líneas más uno del neutro como se muestra en la figura 4.28(b). Observe en la figura 4.28(b) que las líneas están revestidas y aisladas una de otra, y que el neutro está distribuido alrededor de la capa interna del cable. En el punto terminal, todos los conductores del neutro se juntan y unen con seguridad al tablero. Es claramente obvio que los cables de la figura 4.28(a) son trenzados para lograr una mayor flexibilidad.

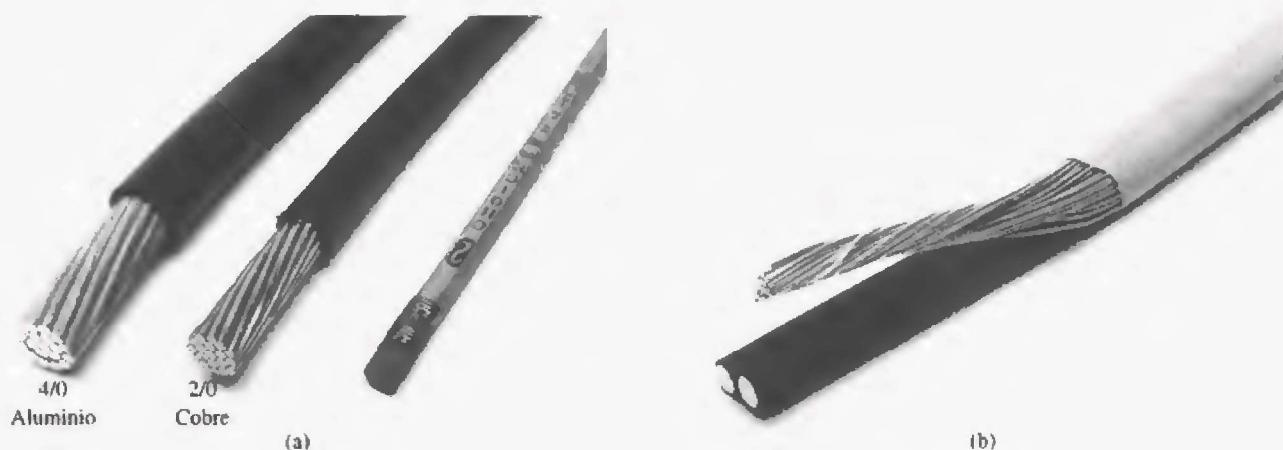


FIGURA 4.28
*Conductores de servicio a 200 A: (a) aluminio 4/0 y cobre 2/0;
(b) servicio de tres alambres 4/0 de aluminio.*

La potencia entrante es separada dentro del sistema en un número de circuitos con valores menores de corriente utilizando interruptores protectores de 15 A, 20 A, 30 A y 40 A. Como la carga en cada interruptor no debe exceder 80% de su valor nominal, en un interruptor de 15 A la corriente máxima debería estar limitada a 80% de 15 A o 12 A, a 16 A para un interruptor de 20 A, a 24 A para un interruptor de 30 A, y a 32 A para un interruptor de 40 A. El resultado es que una casa con servicio de 200 A puede teóricamente tener un máximo de 12 circuitos ($200 \text{ A} / 16 \text{ A} = 12.5$) utilizando los valores máximos de corriente de 16 A asociados con los interruptores de 20 A. Sin embargo, el electricista puede instalar tantos circuitos como considere conveniente si está consciente de las cargas en cada circuito. El código especifica además que un cable calibre 14 no conducirá una corriente que exceda los 15 A, uno del número 12 ninguna en exceso de 20 A, y uno calibre 10 ninguna mayor a 30 A. Así, un cable del número 12 es actualmente el de uso más común en los cableados caseros para garantizar que puede manipular cualquier incursión más allá de 15 A en el interruptor de 20 A (el tamaño de interruptor más común). El cable calibre 14 es a menudo usado junto con el del número 12 en áreas donde se sabe que los niveles de corriente son limitados. El cable calibre 10 se utiliza normalmente para aparatos de gran demanda como secadoras y hornos. Los propios circuitos son separados usualmente entre aquellos que proporcionan iluminación, salidas, etc. Algunos circuitos (como hornos y secadoras) requieren un voltaje superior a 208 V, obtenidos usando dos líneas de energía y la neutra. El voltaje superior reduce el requisito de corriente para el mismo valor de potencia con el resultado neto de que el aparato puede usualmente ser más pequeño. Por ejemplo, el tamaño de un acondicionador de aire con la misma capacidad de enfriamiento es menor cuando se diseña para una línea de 208 V que cuando es para una de 120 V. Sin embargo, la mayoría de las líneas de 208 V demandan un nivel de corriente que requiere interruptores de 30 A o 40 A y tomas especiales para garantizar que los aparatos clasificados en 120 V no sean conectados a la misma toma. Si el tiempo lo permite, revise el tablero instalado en su casa y tome nota del número de circuitos, en particular el valor de cada interruptor y el número de líneas de 208 V indicadas por interruptores que requieren dos ranuras del tablero. Sume el total de los valores de corriente de todos los interruptores en su tablero, y explique, usando la información proporcionada líneas arriba, por qué el total excede su nivel de alimentación.

Por seguridad, la conexión a tierra es una parte muy importante del sistema eléctrico doméstico. El National Electric Code demanda que el alambre neutro del sistema doméstico sea conectado a tierra por medio de una barra empotrada, un sistema de tubos de agua metálicos de 10 pies o más, o una placa metálica enterrada. Esa tierra es pasada entonces a través de los circuitos eléctricos de la casa como protección adicional. En un capítulo posterior serán presentados los detalles de las conexiones y los métodos para conectar a tierra.

4.9 ANÁLISIS POR COMPUTADORA

Una vez presentado y examinado un circuito completo en detalle, es posible empezar con la aplicación de métodos por computadora. Como se mencionó en el capítulo 1, se presentarán tres paquetes de software para mostrar las opciones disponibles con cada uno y las diferencias que existen entre ellos. Todos tienen un soporte amplio en las comunidades educativas e industriales. La versión de PSpice para el estudiante (OrCAD Release 9.2 de Cadence Design Systems) recibirá la mayor atención, seguido por Electronics Workbench, de Multisim, y luego unos pocos programas de muestra que usan un lenguaje de programación llamado C++. Cada enfoque tiene sus propias características con procedimientos que deben ser seguidos exactamente; de otra manera aparecerán mensajes de error. No suponga que puede "forzar" el sistema a que responda de la manera que usted preferiría —cada paso está bien definido, y un error en el lado de entrada puede conducir a resultados de naturaleza sin sentido. En ocasiones podrá creerse que el sistema está en un error porque se tiene la seguridad absoluta de haber seguido cada paso correctamente. En tales casos, debe aceptarse el hecho de que algo fue introducido incorrectamente, y repasar todo el trabajo de manera muy cuidadosa. Todo procedimiento o ecuación que tome una coma en vez de un punto decimal va a generar resultados incorrectos.

Sea paciente con el proceso de aprendizaje: lleve notas de maniobras específicas que aprenda y no tenga temor de pedir ayuda cuando la necesite. En cada enfoque se tiene siempre la preocupación inicial acerca de cómo empezar y proceder a través de las primeras fases del análisis. Sin embargo, es seguro que con tiempo y orientación el estudiante llegará a desenvolverse a través de las maniobras requeridas con una rapidez que nunca habría esperado. Con el tiempo se estará absolutamente satisfecho de los resultados obtenidos usando los métodos de análisis por computadora.

En esta sección será investigada la ley de Ohm utilizando los paquetes de software PSpice y Electronics Workbench (EWB) para analizar el circuito mostrado en la figura 4.29. Ambos paquetes requieren que el circuito sea primero "dibujado" en la pantalla de la computadora y luego analizado (simulado) para obtener los resultados deseados. Como se mencionó, el programa de análisis es fijo y no puede ser cambiado por el usuario. El usuario diestro es alguien que puede extraer lo máximo de un paquete de software para computadora. En un capítulo posterior, el lenguaje C++ de programación será presentado con cierto detalle para demostrar cómo un usuario puede controlar el procedimiento de análisis y cómo se despliegan los resultados.

Aunque el autor considera que hay suficiente material en el texto como para llevar a un nuevo estudiante a través de los programas proporcionados, debe recordarse que éste no es un texto de computación. En vez de eso, es un libro cuyo propósito principal reside simplemente en introducir los diferentes enfoques y mostrar cómo pueden ser aplicados de manera eficaz. En la actualidad existen algunos textos y materiales excelentes que cubren el material con mucho mayor detalle y tal vez a un paso más lento. De hecho, la calidad de la literatura técnica disponible ha mejorado bastante en años recientes.

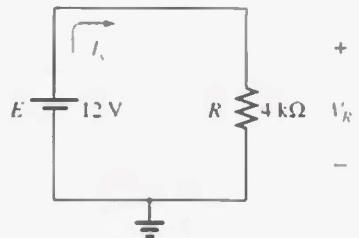


FIGURA 4.29

Círculo a ser analizado utilizando PSpice y Electronics Workbench.

PSpice

Los lectores que estaban familiarizados con viejas versiones de PSpice, como la versión 8, encontrarán que los mayores cambios en esta última versión 9.2 radican principalmente en el ambiente de acceso y en el proceso de simulación. Después de ejecutar unos cuantos programas, se encontrará que la mayor parte de los procedimientos aprendidos en versiones anteriores serán aplicables también aquí —por lo menos el proceso secuencial tiene cierto número de fuertes similitudes.

Una vez que 9.2 OrCAD Lite ha sido instalado, el primer procedimiento requerido es abrir un **Fólder** (carpeta) en la unidad C: para el almacenamiento de los archivos de circuito que resultarán del análisis. Sin embargo, sea consciente de que:

una vez que el folder ha sido definido, no tiene que ser definido para cada nuevo proyecto a menos que se prefiera hacerlo así. Si se está satisfecho con una localidad (folder) para todos los proyectos, ésta es una operación que no tiene que ser repetida con cada red.

Para establecer el **Fólder**, simplemente haga clic con el botón derecho del ratón sobre Start para obtener un listado que incluye **Explore**. Seleccione **Explore** y luego use la secuencia **File-New Folder** para obtener una nueva carpeta sobre la pantalla esperando un nombre. Escriba **PSpice** (la selección del autor) seguido por un clic con el botón izquierdo del ratón para instalarlo. Luego salga (usando la **X** en la parte superior derecha de la pantalla) del **Exploring-Start Menú**, y el primer paso quedará completo —está usted en ruta. El folder **PSpice** ha sido establecido para todos los proyectos en los que se planea trabajar en este texto.

El primer proyecto puede ser iniciado ahora haciendo clic dos veces sobre el ícono **Orcad Lite Edition** en la pantalla, o puede usarse la secuencia **Start-Programs-Oread Family Release 9.2 Lite Edition**. La pantalla resultante tiene sólo unas pocas teclas activas sobre la barra de herramientas superior. La primera tecla en la parte superior izquierda es la **Create new document** (puede

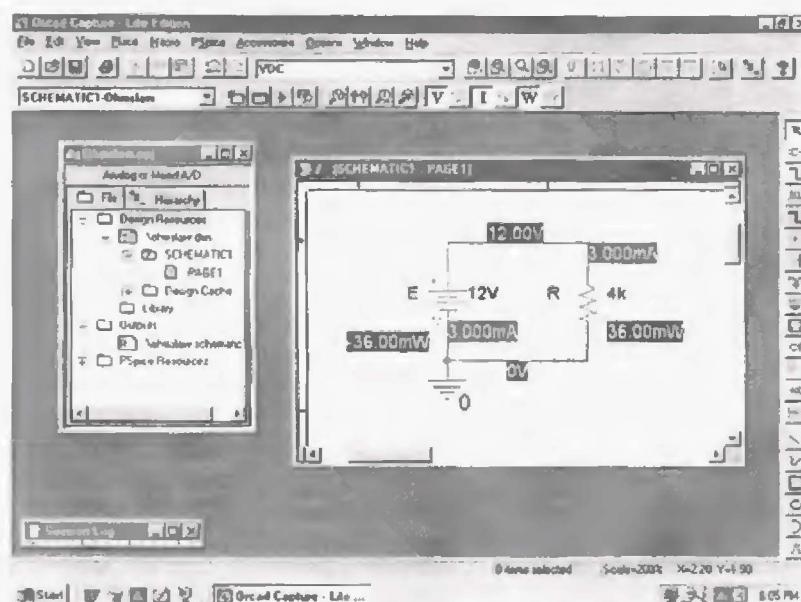


FIGURA 4.30
Uso de PSpice para determinar los niveles de voltaje, corriente y potencia en el circuito de la figura 4.29.

usarse la secuencia **File-New Project**). Al seleccionar la tecla aparecerá un cuadro de diálogo **New Project** en el que debe introducirse el **Name** del proyecto. Para los fines de este análisis se escoge **Ohmslaw** como se muestra en el encabezado de la figura 4.30 y se selecciona **Analog or Mixed A/D** (para ser usado en todos los análisis de este texto). Observe en el fondo del cuadro de diálogo que la **Location** aparece como **C:\PSpice** como se estableció antes. Haga clic en **OK** y otro cuadro de diálogo aparecerá con el nombre **Create PSpice Project**. Seleccione **Create a blank project** (de nuevo, para todos los análisis por ser efectuados en este texto). Haga clic en **OK** y una tercera barra de herramientas aparecerá en la parte superior de la pantalla con algunas de las teclas activas. Una ventana **Project Manager** aparecerá con **Ohmslaw** como su encabezado. El nuevo listado del proyecto aparecerá con un ícono y un signo + asociado en un pequeño cuadro. Haciendo clic sobre el signo + llevará el listado un paso adelante a **SCHEMATIC1**. Haga clic en + otra vez y aparecerá **PAGE 1**; haciendo clic sobre un signo —se invertirá el proceso. Al hacer dos veces clic sobre **PAGE1** se creará una ventana de trabajo llamada **SCHEMATIC1: PAGE1**, lo cual revela que un proyecto puede tener más de un archivo esquemático y más de una página asociada. El ancho y la altura de la ventana pueden ser ajustados seleccionando un borde para obtener una flecha de doble punta y desplazar el límite a la dimensión deseada. Cualquier ventana sobre la pantalla puede ser movida haciendo clic sobre el encabezado superior para volverla azul oscuro y luego desplazarla hacia cualquier ubicación.

Ahora puede procederse a la construcción del sencillo circuito mostrado en la figura 4.29. Seleccione la tecla **Place a part** (la segunda tecla a partir de la parte superior de la barra de herramientas hacia la derecha) para obtener el cuadro de diálogo **Place Part**. Como éste es el primer circuito por ser construido, debe asegurarse de que las partes aparezcan en la lista de bibliotecas activas. Seleccione **Add Library-Browse File**, y seleccione **analog.olb**, **eval.olb**, y **source.olb**. Cuando cada una aparezca bajo el encabezado **File name**, seleccione **Open**. Los tres archivos serán requeridos para que construyan las redes que aparecen en este texto. Sin embargo, es importante darse cuenta de que:

una vez que los archivos de biblioteca han sido seleccionados, aparecerán en el listado activo para cada nuevo proyecto sin tener que agregarlos cada vez —paso a paso—, como en el paso Fólder desarrollado líneas arriba que no tiene que ser repetido con cada proyecto similar.

Haga clic en **OK** para poder colocar componentes sobre la pantalla. Para la fuente de voltaje de cd, seleccione primero la tecla **Place a part** y luego seleccione **SOURCE** en el listado de biblioteca. Bajo **Part List**, aparecerá una lista de fuentes disponibles; seleccione **VDC** para este proyecto. Una vez que **VDC** ha sido seleccionado su símbolo, etiqueta y valor aparecerán sobre la ventana en el fondo derecho del cuadro de diálogo. Haga clic en **OK**, y la fuente **VDC** seguirá al cursor a través de la pantalla. Muévala a una ubicación conveniente, haga clic izquierdo en el ratón y se situará en posición como se muestra en la figura 4.30. Como sólo se requiere una fuente, un clic en el botón derecho del ratón resultará en una lista de opciones, en la que **End Mode** aparecerá en la parte superior. Al seleccionar esta opción terminará el procedimiento, dejando la fuente en un recuadro rojo punteado. Lo rojo indica que es un modo activo sobre el cual puede operarse. Un clic más en el botón izquierdo del ratón y la fuente estará en posición y el estado rojo activo será removido.

Uno de los pasos más importantes en el procedimiento es asegurar que un potencial a tierra de 0 V esté definido para la red de manera que los voltajes en cualquier punto de ésta tengan un punto de referencia. *El resultado es el requisito de que toda red tenga definida una tierra.* Para los fines de este texto, la opción **0/SOURCE** será la alternativa cuando la tecla **GND** sea seleccionada. Esto asegurará que un lado de la fuente esté definido como 0 V. Por último, tene-

mos que agregar un resistor a la red seleccionando de nuevo la tecla **Place a part** y luego la biblioteca **ANALOG**. Al desplegar las opciones, observe que aparecerá **R** y deberá ser seleccionada. Haga clic sobre **OK** y el resistor aparecerá próximo al cursor sobre la pantalla. Muévalo a la posición deseada y haga clic en el lugar. Luego haga clic con el botón derecho del ratón y en **End Mode**, y el resistor habrá sido introducido en la memoria esquemática. Desafortunadamente, el resistor terminó en la posición horizontal, y el circuito de la figura 4.29 tiene el resistor en la posición vertical. No hay problema: simplemente seleccione de nuevo el resistor para volverlo rojo y haga clic con el botón derecho del ratón. Aparecerá un listado en el que **Rotate** es una opción para girar el resistor 90° en el sentido contrario a las manecillas del reloj. El resistor también puede ser girado 90° seleccionando simultáneamente **Ctrl-R**.

Todos los elementos requeridos están en la pantalla, pero necesitan ser conectados. Esto se logra seleccionando la tecla **Place a wire** que se ve como un escalón en la barra de herramientas derecha. El resultado es un cursor en forma de cruz con el centro por colocarse en el punto a ser conectado. Coloque la cruz en la parte superior de la fuente de voltaje, y haga clic con el botón izquierdo una vez para conectarla a ese punto. Luego trace una línea al extremo del próximo elemento y haga clic de nuevo en el ratón cuando la cruz esté en el punto correcto. Resultará una línea roja con un cuadrado en cada extremo para confirmar que se ha hecho la conexión. Entonces mueva la cruz hacia los otros elementos y construya el circuito. Una vez que todo está conectado, un clic con el botón derecho proporciona la opción **End Mode**. No olvide conectar la fuente a tierra como se muestra en la figura 4.30.

Ahora tenemos todos los elementos en posición, pero sus etiquetas y valores están equivocados. Para cambiar cualquier parámetro, simplemente haga clic dos veces sobre él (sobre la etiqueta o el valor) para obtener el cuadro de diálogo **Display Properties**. Escriba la etiqueta o el valor correcto, haga clic en **OK**, y la cantidad quedará cambiada sobre la pantalla. Las etiquetas y los valores pueden ser movidos haciendo simplemente clic sobre el centro del parámetro hasta que esté rodeado estrechamente por los cuatro pequeños cuadrados y desplazándolo entonces a la nueva ubicación, donde quedará depositado luego de efectuar otro clic con el botón izquierdo.

Por último, podemos iniciar el proceso de análisis, llamado **Simulation**, seleccionando la tecla **Create a new simulation profile** cerca de la parte superior izquierda de la exhibición —la que parece una página de datos con una estrella en la esquina superior izquierda. Resultará un cuadro de diálogo **A New Simulation** que primero pregunta por el **Name** de la simulación. **Bias Point** es seleccionada para una solución de cd, y **none** se deja en la solicitud **Inherit From**. Luego seleccione **Create**, y aparecerá un cuadro de diálogo **Simulation Setting** en el que **Analysis-Type-Bias Point** es seleccionada secuencialmente. Haga clic sobre **OK**, y seleccione la tecla **Run** (que parece una punta de flecha aislada azul) o escoja **PSpice-Run** de la barra de menú. Resultará una **Output Window** que parece estar algo inactiva; no será usada en el presente análisis, por lo que cierre (**X**) la ventana, y el circuito de la figura 4.30 aparecerá con el voltaje, la corriente y los niveles de potencia de la red. El voltaje, la corriente o los niveles de potencia pueden ser retirados (o reemplazados) seleccionando simplemente **V**, **I** o **W** en la tercera barra de herramientas desde la parte superior. Valores individuales pueden ser removidos seleccionando simplemente el valor y oprimiendo la tecla **Delete** o la tecla de tijeras ubicada en la barra de menú superior. Los valores resultantes pueden ser movidos haciendo clic con el botón izquierdo en el valor y desplazándolo a la ubicación deseada.

Observe en la figura 4.30 que la corriente es de 3 mA (como se esperaba) en cada punto de la red, y la potencia entregada por la fuente y disipada por el resistor es la misma, o 36 mW. También hay 12 V a través del resistor como es requerido por la configuración.

No hay duda de que la descripción anterior fue muy larga para un circuito tan trivial. Sin embargo, recuerde que hubo que introducir muchas facetas nuevas del uso de PSpice que no tendrán que ser tocadas otra vez en el futuro. Cuando termine de analizar su tercera o cuarta red, el procedimiento anterior le parecerá rutinario y se moverá bastante rápidamente. Para entonces estará buscando nuevos retos.

Electronics Workbench (EWB)

Con fines de comparación, usaremos Electronics Workbench para analizar el circuito mostrado en la figura 4.29. Aunque existen diferencias entre PSpice y EWB, como en el proceso de inicio, en construir las redes, efectuar las mediciones y establecer el procedimiento de simulación, hay suficientes similitudes entre los dos enfoques como para facilitar el aprendizaje de uno si ya se está familiarizado con el otro. Las similitudes resultarán obvias sólo si se intenta aprender ambos paquetes. Una de las mayores diferencias entre los dos es la opción de usar instrumentos prácticos en EWB para efectuar las mediciones —un aspecto positivo en la preparación para la experiencia de laboratorio—. Sin embargo, en EWB no encontrará usted la amplia lista de opciones disponible con PSpice. No obstante, en general, ambos paquetes de software están bien preparados para llevarnos a través de los tipos de análisis encontrados en este texto.

Cuando el ícono Multisim 2001 es seleccionado de la ventana de inicio, aparece una pantalla con el encabezado **Multisim-Circuit 1**. Una barra de menú cruza la parte superior de la pantalla, con una barra de herramientas por debajo de la barra de menú y otra a cada lado de la pantalla. Las barras de herramientas que se muestran pueden ser controladas mediante la secuencia **View-Toolbars** seguida por una selección de las barras de herramientas que se deseé aparezcan. Para el análisis de este texto, fueron seleccionadas todas las barras de herramientas. Para la colocación de componentes, **View-Show Grid** fue seleccionada de manera que apareciese una rejilla sobre la pantalla. Al ser colocado un elemento, automáticamente será ubicado en una relación específica con la estructura de la rejilla.

A continuación se construirá el circuito de la figura 4.29. Primero se toma el cursor y se coloca sobre el símbolo de batería que aparece en la parte superior del componente de la barra de herramientas situado a la izquierda de la pantalla. Se efectúa un clic con el botón izquierdo del ratón y una lista de fuentes será desplegada. Coloque el cursor sobre cualquiera de las fuentes y aparecerá un texto sobre la pantalla definiendo el tipo de fuente. Colocando el cursor sobre la tercera tecla hacia abajo resultará en **DC VOLTAGE SOURCE**. Haga de nuevo clic con el botón izquierdo, y aparecerá el símbolo de batería sobre la pantalla próximo a la ubicación del cursor. Mueva éste al sitio deseado y con un solo clic del botón izquierdo, el símbolo de batería puede situarse en su lugar. La operación se ha completado. Si se desea borrar la fuente, simplemente se hace clic con el botón izquierdo, sobre el símbolo de nuevo para crear cuatro pequeños cuadrados alrededor de la fuente. Estos cuadrados indican que la fuente está en el modo activo y puede operarse sobre ella. Si desea borrarla, haga clic sobre la tecla **Delete** o seleccione la tecla de tijeras que está en la barra de herramientas superior. Si prefiere modificar la fuente, oprima el botón derecho del ratón *sobre* de los cuatro cuadrados pequeños para obtener una lista. Efectúe un clic derecho *dentro* de los cuatro cuadrados y tendrá un conjunto diferente de opciones. En cualquier momento, si se desea remover el estado activo, se da un clic izquierdo en cualquier parte de la pantalla. Para mover la fuente, haga clic sobre el símbolo de fuente para crear los cuatro cuadrados, pero no suelte el botón del ratón; manténgalo oprimido y lleve la fuente a la ubicación preferida. Cuando la fuente esté en posición, suelte el botón y un clic más removerá el estado activo. Para

remover la barra de herramientas SOURCES, haga clic sobre la X que aparece en la esquina superior derecha de la barra de herramientas.

La siguiente tecla hacia abajo desde la tecla fuente que parece un resistor controla el despliegue de las componentes pasivas Basic de una red. Haga clic una vez sobre el símbolo de resistor y aparecerán dos columnas de componentes. *De ahora en adelante, siempre que sea posible, la palabra clic implicará un clic izquierdo del ratón.* La necesidad de un clic derecho será explicada más adelante.

Para el circuito de la figura 4.29 se necesita un resistor. Cuando se coloca el cursor sobre el resistor izquierdo, aparece el texto RESISTOR; al colocarlo sobre el resistor derecho, aparecerá el texto RESISTOR_VIRTUAL. Para todos los análisis en este texto donde se utilice EWB, se empleará el resistor virtual. El término RESISTOR es usado para todos los resistores de un valor estándar comercial —los valores dados comercialmente. El término VIRTUAL se aplica a cualquier componente en la que el usuario puede definir el valor que deseé. Haga clic una vez sobre el resistor virtual y éste aparecerá sobre la pantalla al lado del cursor en la posición horizontal. En la figura 4.29, está en la posición vertical por lo que debe efectuarse una rotación. Esto puede lograrse haciendo clic sobre el resistor para obtener el estado activo y luego efectuar un clic con el botón derecho del ratón dentro de los cuatro cuadrados. Aparecen varias opciones, incluyendo borrar (Cut) la componente, copiar, cambiar la posición y aplicar color. Como queremos girar 90° en el sentido de las manecillas del reloj, seleccionamos esa opción, y el resistor será girado automáticamente 90°. Ahora, como con la batería, para colocar el resistor en posición se da clic sobre el símbolo de resistor para crear los cuatro pequeños cuadrados, y luego, manteniendo oprimido el botón izquierdo del ratón, se lleva el resistor a la posición deseada. Cuando queda en su lugar, se suelta el botón y se hace clic de nuevo para remover los cuatro cuadrados —el resistor está ahora en posición.

Por último, se necesita una tierra para todas las redes. Regresando al depósito de partes SOURCES, se encontrará que una tierra es la primera opción en la parte superior de la barra de herramientas. Seleccione la opción GROUND de la izquierda, y colóquela sobre la pantalla debajo de la fuente de voltaje como se muestra en la figura 4.31. Ahora, antes de conectar entre sí los componentes, deben moverse las etiquetas y el valor de cada componente a las posiciones relativas

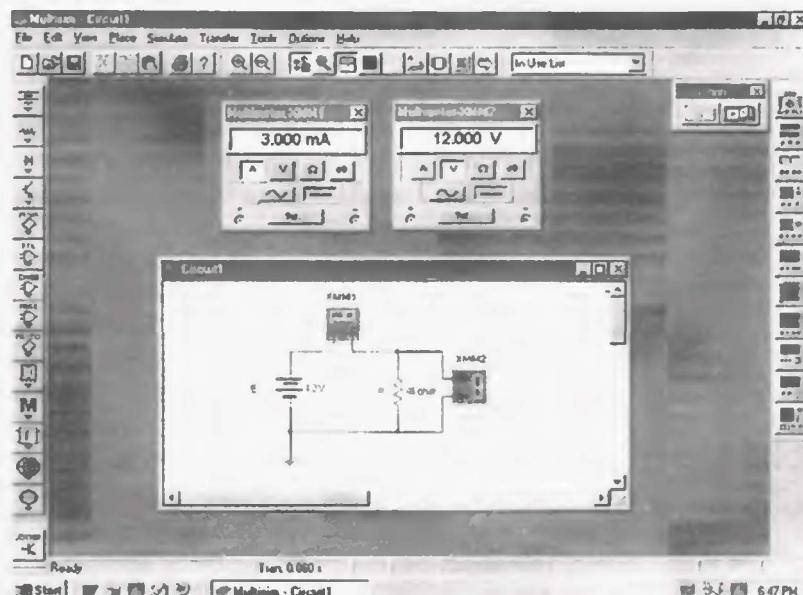


FIGURA 4.31
Uso de Electronics Workbench para determinar el nivel de voltaje
y la corriente en el circuito de la figura 4.29.

mostradas en la figura 4.31. Esto se logra haciendo clic sobre la etiqueta o el valor para crear un pequeño conjunto de cuadrados alrededor del elemento y desplazarlo entonces a la ubicación deseada. Se suelta el botón del ratón, y luego se hace clic de nuevo para situar el elemento en su lugar. Para cambiar la etiqueta o el valor, se da clic dos veces sobre la etiqueta (tal como **V1**), y aparece un cuadro de diálogo **Battery**. Se selecciona **Label** e introduce **E** como **Reference ID**. Entonces, antes de dejar el cuadro de diálogo, se va a **Value** para cambiar el valor si es necesario. Es muy importante darse cuenta de que no es posible escribir las unidades donde aparece ahora **V**. El prefijo es controlado por las teclas de recorrido situadas a la izquierda de la unidad de medición. Como práctica, ensaye con las teclas de recorrido, y encontrará que puede ir de **pV** a **TV**. Por ahora simplemente se deja como **V**. Haga clic en **OK**, y ambas habrán sido cambiadas sobre la pantalla. El mismo proceso puede ser aplicado al elemento resistivo para obtener la etiqueta y el valor que aparecen en la figura 4.31.

A continuación, se deberá indicar al sistema qué resultados deben ser generados y cómo tienen que desplegarse. Para este ejemplo se usará un multímetro para medir tanto la corriente como el voltaje del circuito. El **Multimeter** es la primera opción en la lista de instrumentos que aparecen en la barra de herramientas situada a la derecha de la pantalla. Al seleccionarlo, aparecerá en la pantalla y será colocado en cualquier parte usando el mismo procedimiento definido para las componentes anteriores. El voltímetro fue girado en el sentido de las manecillas del reloj usando el procedimiento descrito para los elementos. Se efectúa doble clic sobre cualquier símbolo de medidor, y aparecerá un cuadro de diálogo **Multimeter** donde la función del medidor debe ser definida. Como el medidor **XMM1** será usado como un amperímetro, la letra **A** será seleccionada y la línea horizontal lo será para indicar el nivel de cd. No hay necesidad de seleccionar **Set** para los valores por omisión ya que han sido elegidos para la amplia gama de aplicaciones. Las ventanas de diálogo de los medidores pueden ser movidas a cualquier ubicación haciendo clic sobre su barra de encabezado para volverlos azul oscuro y desplazar entonces el medidor a la posición preferida. Para el voltímetro, **V** y la barra horizontal fueron seleccionados como se muestra en la figura 4.31.

Por último, los elementos deben ser conectados. Esto se logra llevando el cursor a un extremo de un elemento, digamos, a la parte superior de la fuente de voltaje, con el resultado de que un pequeño punto y una cruz aparecerán en el extremo superior del elemento. Se da clic una vez, se sigue la trayectoria preferida, y se coloca la cruz sobre la terminal positiva del amperímetro. Luego se da clic de nuevo y el alambre aparecerá en posición.

En este punto el estudiante debe darse cuenta de que el paquete de software tiene sus preferencias acerca de cómo quiere conectar los elementos. Esto es, el estudiante puede tratar de dibujarlo de una manera, pero lo generado por la computadora tal vez resulte en una trayectoria diferente. Con el tiempo se toma conciencia de esas preferencias y se logra fijar la red al gusto personal. Por ahora se debe continuar haciendo las conexiones que aparecen en la figura 4.31, moviendo elementos para que las líneas se ajusten según sea necesario. Es importante asegurarse de que aparezca el pequeño punto en cualquier lugar donde se desee una conexión. Su ausencia sugiere que la conexión no ha sido hecha y que el programa de software no ha aceptado la entrada.

Ahora ya es posible correr el programa y ver la solución. El análisis puede ser iniciado de varias maneras. Una opción es seleccionar **Simulate** desde la barra de herramientas superior, seguido por **RUN/STOP**. Otra es seleccionar la tecla **Simulate** en el agrupamiento de la barra de diseño en la barra de herramientas superior; aparece como un diagrama con trazo verde, fino, sobre un fondo negro. La última opción, y la que más se usará en este análisis, requiere un interruptor



OFF/ON, 0/1 sobre la pantalla. Este interruptor se obtiene por medio de VIEW>Show Simulate Switch y aparecerá como se muestra en la esquina superior derecha de la figura 4.31. Usando esta última opción, el análisis (llamado Simulation) se inicia colocando el cursor sobre el 1 del interruptor y haciendo clic con el botón izquierdo del ratón. El análisis será ejecutado, y la corriente y el voltaje aparecerán sobre el medidor como se muestra en la figura 4.31. Observe que ambos están dando los resultados esperados.

A continuación se proporciona uno de los conceptos más importantes por aprender acerca de la aplicación de EWB:

Siempre detenga o termine la simulación (haciendo clic sobre 0 o seleccionando OFF) antes de efectuar cualquier cambio en la red. Cuando la simulación se haya iniciado, permanecerá en ese modo hasta que se apague.

Es obvio que una gran cantidad de material quedó por aprender en este primer ejercicio usando Electronics Workbench. Sin embargo, el estudiante puede estar seguro de que conforme continuemos con más ejemplos, encontrará el procedimiento bastante directo y entretenido en su aplicación.

PROBLEMAS

SECCIÓN 4.1 Ley de Ohm

1. ¿Cuál es la caída de potencia en un resistor de $6\ \Omega$ si la corriente que transporta es de $2.5\ A$?
2. ¿Cuál es la corriente a través de un resistor de $72\ \Omega$ si la caída de voltaje en él es de $12\ V$?
3. ¿Cuánta resistencia se requiere para limitar la corriente a $1.5\ mA$ si la caída de potencial en el resistor es de $6\ V$?
4. En el arranque, ¿cuál es la extraición de corriente en una batería de automóvil de $12\ V$ si la resistencia de arranque del motor es de $0.056\ \Omega$?
5. Si la corriente a través de un resistor de $0.02\ M\Omega$ es de $3.6\ \mu A$, ¿cuál es la caída de voltaje en el resistor?
6. Si un voltímetro tiene una resistencia interna de $15\ k\Omega$, encuentre la corriente a través del medidor cuando registra $62\ V$.
7. Si un refrigerador extrae $2.2\ A$ a $120\ V$, ¿cuál es su resistencia?
8. Si un reloj tiene una resistencia interna de $7.5\ k\Omega$, encuentre la corriente que pasa por él cuando se enchufa a una toma de $120\ V$.
9. Una lavadora es clasificada en $4.2\ A$ a $120\ V$. ¿Cuál es su resistencia interna?
10. Si un cautín extrae $0.76\ A$ a $120\ V$, ¿cuál es su resistencia?
11. La corriente de entrada a un transistor es de $20\ \mu A$. Si el voltaje aplicado (de entrada) es de $24\ mV$, determine la resistencia de entrada del transistor.
12. La resistencia interna de un generador dc es de $0.5\ \Omega$. Determine la pérdida de voltaje en él debida a esta resistencia interna si la corriente es de $15\ A$.
- *13. a. Si un calentador eléctrico extrae $9.5\ A$ al estar conectado a una fuente de $120\ V$, ¿cuál es su resistencia interna?
b. Emplee las relaciones básicas del capítulo 2 para responder a la pregunta: ¿cuánta energía se convierte en $1\ h$?

SECCIÓN 4.2 Trazado de la ley de Ohm

14. Trace las gráficas lineales de un resistor de $100\ \Omega$ y de otro de $0.5\ \Omega$ sobre la gráfica de la figura 4.6. Si es necesario, reproduzca la gráfica.
15. Esboce las características de un dispositivo que tiene resistencia interna de $20\ \Omega$ desde 0 hasta $10\ V$ y resistencia interna de $2\ \Omega$ para voltajes mayores. Use los ejes de la figura 4.6. Si es necesario, reproduzca la gráfica.
16. Trace las gráficas lineales de un resistor de $2\ k\Omega$ y de otro de $50\ k\Omega$ sobre la gráfica de la figura 4.6. Use una escala horizontal que se extienda desde 0 hasta $20\ V$ y un eje vertical con escala en miliamperes. Si es necesario, reproduzca la gráfica.
17. ¿Cuál es el cambio en voltaje en un resistor de $2\ k\Omega$ establecido mediante un cambio en corriente de $400\ mA$ a través del resistor?
- *18. a. Use los ejes de la figura 4.10 y esboce las características de un dispositivo que tiene una resistencia interna de $500\ \Omega$ desde 0 hasta $1\ V$ y $50\ \Omega$ entre $1\ V$ y $2\ V$. Su resistencia cambia entonces a $-20\ \Omega$ para voltajes mayores. El resultado es un conjunto de características muy similares a las de un dispositivo electrónico llamado *diodo túnel*.
b. Use las características mencionadas en el ejercicio anterior y determine la corriente resultante a voltajes de $0.7\ V$, $1.5\ V$ y $2.5\ V$.

SECCIÓN 4.3 Potencia

19. Si $420\ J$ de energía son absorbidos por un resistor en 7 minutos, ¿cuál es la potencia en el resistor?
20. La potencia en un dispositivo es de 40 joules por segundo (J/s). ¿Qué tiempo le tomará entregar $640\ J$?
21. a. ¿Cuántos joules de energía disipa una luz nocturna de $2\ W$ en 8 horas?
b. ¿Cuántos kilowatts·hora disipa?
22. Por un resistor de $10\ \Omega$ fluye una carga a razón de 300 coulombs por minuto (C/min). ¿Cuánta potencia es disipada?

23. ¿Cuánto tiempo debe existir una corriente permanente de 2 A en un resistor que tiene 3 V en él para disipar 12 J de energía?
24. ¿Cuál es la potencia entregada por una batería de 6 V si la carga fluye a razón de 48 C/min?
25. La corriente a través de un resistor de $4\ \Omega$ es de 7 mA. ¿Cuál es la potencia entregada al resistor?
26. La caída de voltaje en un resistor de $3\ \Omega$ es de 9 mV. ¿Cuál es la entrada de potencia al resistor?
27. Si la entrada de potencia a un resistor de $4\ \Omega$ es de 64 W, ¿cuál es la corriente a través del resistor?
28. Un resistor de $1/2\ W$ tiene una resistencia de $1000\ \Omega$. ¿Cuál es la corriente máxima que puede llevar con seguridad?
29. Un resistor de $2.2\ k\Omega$ en un sistema estéreo disipa 42 mW de potencia. ¿Cuál es el voltaje en el resistor?
30. Una batería de cd puede entregar 45 mA a 9 V. ¿Cuál es su valor nominal de potencia?
31. ¿Cuáles son el nivel de resistencia "caliente" y la corriente nominal de un foco de 100 W a 120 V?
32. ¿Cuáles son la resistencia interna y el valor nominal de voltaje de una lavadora automática de 450 W que extrae 3.75 A?
33. Una calculadora con batería interna de 3 V extrae 0.4 mW funcionando plenamente.
- ¿Cuál es la demanda de corriente del suministro?
 - Si la calculadora está clasificada para operar 500 h con la misma batería, ¿cuál es el valor nominal en ampere·hora de la batería?
34. Un resistor de $20\ k\Omega$ tiene un valor nominal de 100 W. ¿Cuáles son la corriente máxima y el voltaje máximo que pueden aplicarse al resistor?
- *35. a. Grafique la potencia en función de la corriente para un resistor de $100\ \Omega$. Use una escala de potencia de 0 a 1 W y una escala de corriente de 0 a 100 mA con divisiones de $0.1\ W$ y $10\ mA$, respectivamente.
 b. ¿Es la gráfica lineal o no lineal?
 c. Usando la gráfica resultante, determine la corriente a un nivel de potencia de 500 mW.
- *36. Un televisor en blanco y negro pequeña, portátil, extrae $0.455\ A$ a 9 V.
- ¿Cuál es el valor nominal de potencia de la televisión?
 - ¿Cuál es la resistencia interna de la televisión?
 - ¿Cuál es la energía convertida en 6 h de vida normal de la batería?
- *37. a. Si a una casa se le suministra un servicio de 120 V y 100 A, encuentre la capacidad máxima de potencia.
 b. ¿Puede el propietario operar con seguridad las siguientes cargas al mismo tiempo?
 motor de 5 hp
 secadora de ropa de 3000 W
 estufa eléctrica de 2400 W
 plancha de vapor de 1000 W

SECCIÓN 4.5 Eficiencia

38. ¿Cuál es la eficiencia de un motor que tiene una salida de 0.5 hp con una entrada de 450 W?

39. El motor de una sierra de potencia está clasificado con 68.5% de eficiencia. Si se requieren 1.8 hp para cortar una pieza particular de madera, ¿cuál es la corriente extraída de un suministro de 120 V?
40. ¿Cuál es la eficiencia del motor de una secadora que entrega 1 hp cuando la corriente de entrada y el voltaje son 4 A y 220 V, respectivamente?
41. Un sistema estéreo extrae 2.4 A a 120 V. La potencia de salida del audio es de 50 W.
- ¿Cuánta potencia se pierde en forma de calor en el sistema?
 - ¿Cuál es la eficiencia del sistema?
42. Si un motor eléctrico con eficiencia de 87% que opera en una línea de 220 V entrega 3.6 hp, ¿qué corriente de entrada extrae?
43. Un motor está clasificado para entregar 2 hp.
- Si el motor funciona con 110 V y tiene 90% de eficiencia, ¿cuántos watts extrae de la línea de potencia?
 - ¿Cuál es la corriente de entrada?
 - ¿Cuál es la corriente de entrada si el motor tiene sólo 70% de eficiencia?
44. Un motor eléctrico usado en un elevador tiene una eficiencia de 90%. Si el voltaje de entrada es de 220 V, ¿cuál es la corriente de entrada cuando el motor entrega 15 hp?
45. Un motor de 2 hp impulsa una banda abrasiva. Si la eficiencia del motor es de 87% y la de la banda es de 75% debido a deslizamientos, ¿cuál es la eficiencia total del sistema?
46. Si dos sistemas en cascada tienen cada uno una eficiencia de 80% y la energía de entrada es de 60 J, ¿cuál es la energía de salida?
47. La eficiencia total de dos sistemas en cascada es de 72%. Si la eficiencia de uno es de 0.9, ¿cuál es la eficiencia en porcentaje del otro?
- *48. Si la entrada y la salida totales de potencia de dos sistemas en cascada son de 400 W y 128 W, respectivamente, ¿cuál es la eficiencia de cada sistema si uno tiene el doble de eficiencia que el otro?
49. a. ¿Cuál es la eficiencia total de tres sistemas en cascada con eficiencias individuales de 98, 87 y 21%?
 b. Si el sistema con la menor eficiencia (21%) fuese retirado y reemplazado por otro con una eficiencia de 90%, ¿cuál sería el incremento porcentual total en eficiencia?
50. a. Efectúe las siguientes conversiones:
 1 Wh a joules
 1 kWh a joules
 b. Con base en los resultados de la parte (a), analice y explique cuándo es más apropiado usar una unidad o la otra.

SECCIÓN 4.6 Energía

51. Un resistor de $10\ \Omega$ está conectado a una batería de 15 V.
- ¿Cuántos joules de energía se disiparán en 1 minuto?
 - Si el resistor se deja conectado 2 min en vez de 1 min, ¿aumentará la energía usada? ¿Aumentará el nivel de dissipación de potencia?
52. ¿Cuánta energía en kilowatts hora se requiere para mantener funcionando un motor de 230 W durante 12 h por semana a lo largo de 5 meses? (Usa $4\frac{1}{3}$ semanas = 1 mes.)



53. ¿Cuánto tiempo un calentador de 1500 W puede estar encendido antes de usar más de 10 kWh de energía?
54. ¿Cuánto cuesta usar un radio de 30 W durante 3 horas a 9¢ por kilowatt-hora?
55. a. En 10 h un sistema eléctrico convierte 500 kWh de energía eléctrica en calor. ¿Cuál es el nivel de potencia del sistema?
b. Si el voltaje aplicado es de 208 V, ¿cuál es la corriente extraída del suministro?
c. Si la eficiencia del sistema es de 82%, ¿cuánta energía se pierde o almacena en 10 horas?
56. a. A 9¢ por kilowatt-hora, ¿cuánto tiempo puede mantenerse encendido un televisor a colores de 250 W por \$1?
b. Por \$1, ¿cuánto tiempo puede usarse una secadora de 4.8 kW?
c. Compare los resultados de las partes (a) y (b), y comente acerca del efecto del nivel de potencia sobre el costo relativo de usar un aparato.
57. ¿Cuál es el costo total de usar lo siguiente a 9¢ por kilowatt-hora?
Acondicionador de aire de 860 W durante 24 horas
Secadora de ropa de 4800 W durante 30 minutos
Lavadora de 400 W durante 1 hora
Lavavajillas de 1200 W durante 45 minutos
- *58. ¿Cuál es el costo total de usar lo siguiente a 9¢ por kilowatt-hora?
Estéreo de 110 W durante 4 horas
Proyector de 1200 W durante 20 minutos
Grabadora de cintas de 60 W durante 1.5 horas
Televisor a color de 150 W durante 3 horas 45 minutos

SECCIÓN 4.9 Análisis por computadora

PSpice o Electronics Workbench

59. Repita el análisis del circuito mostrado en la figura 4.29 con $E = 400 \text{ mV}$ y $R = 0.04 \text{ M}\Omega$.
60. Repita el análisis del circuito mostrado en la figura 4.29 pero invierta la polaridad de la batería y use $E = 0.02 \text{ V}$ y $R = 240 \Omega$.
- Lenguaje de programación (C++, QBASIC, Pascal, etc.)
61. Escriba un programa para calcular el costo de usar cinco aparatos diferentes durante períodos variables si el costo unitario es de 9¢ por kilowatt-hora.
62. Solicite I , R y t y determine V , P y W . Imprima los resultados con las unidades apropiadas.

GLOSARIO

Caballo de potencia (hp) Medida equivalente a 746 watts en el sistema eléctrico.

Cortacircuito Dispositivo de dos terminales diseñado para asegurar que la corriente no exceda los niveles de seguridad. Si el cortacircuito se "desconecta", puede restablecerse con un interruptor o un botón.

Diodo Dispositivo semiconductor cuyo comportamiento es muy parecido al de un interruptor sencillo; esto es, de manera ideal, un diodo pasará corriente en una sola dirección al operar dentro de límites específicos.

Eficiencia (η) Razón de potencia de salida a potencia de entrada que proporciona información inmediata sobre las características de conversión de energía de un sistema.

Energía (W) Cantidad cuyo cambio de estado se determina mediante el producto de la tasa de conversión (P) y el periodo implicado (t). Se mide en joules (J) o watts-segundo (Ws).

Fusible Dispositivo con dos terminales cuya única finalidad es asegurar que los niveles de corriente en un circuito no exceden los niveles de seguridad.

Ley de ohm Ecuación que establece una relación entre la corriente, el voltaje y la resistencia de un sistema eléctrico.

Medidor de kilowatts-hora Instrumento para medir los kilowatts-hora de energía suministrada a un usuario de electricidad residencial o comercial.

Potencia Indicación de cuánto trabajo puede ser realizado en una cantidad específica de tiempo. Se *mide* en joules/segundo (J/s) o watts (W).

Watímetro Instrumento capaz de medir la potencia entregada a un elemento detectando tanto el voltaje como la corriente a través del elemento.