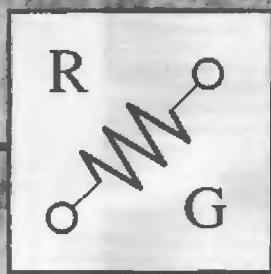


3

Resistencia



3.1 INTRODUCCIÓN

El flujo de carga a través de cualquier material encuentra una fuerza opuesta que es similar en muchos aspectos a la fricción mecánica. A esta oposición, debida a las colisiones entre electrones y entre electrones y otros átomos en el material, *que convierte la energía eléctrica en otra forma de energía como el calor*, se le llama **resistencia** del material. La unidad de medición para la resistencia es el **ohm**, para el cual se emplea el símbolo Ω . El símbolo para la resistencia en circuitos se muestra en la figura 3.1 con la abreviatura gráfica para resistencia (R).



FIGURA 3.1
Símbolo y notación de la resistencia.

La resistencia de cualquier material con un área transversal uniforme se determina mediante los siguientes cuatro factores:

1. Material
2. Longitud
3. Área transversal
4. Temperatura

El material escogido, con su estructura molecular única, reaccionará diferencialmente a presiones para establecer una corriente a través de su núcleo. Los conductores que permiten un flujo de carga abundante con poca presión externa tendrán bajos niveles de resistencia, mientras que los aislantes tendrán altas características de resistencia.

Como podría esperarse, entre mayor es la trayectoria que la carga debe recorrer, mayor es el nivel de resistencia, mientras que a mayor área (y por tanto, espacio disponible), menor será la resistencia. La resistencia es entonces directamente proporcional a la longitud e inversamente proporcional al área.

Conforme la temperatura de la mayoría de los conductores aumenta, el movimiento incrementado de las partículas dentro de la estructura molecular vuelve más difícil que los portadores "libres" circulen, incrementándose así el nivel de la resistencia.

A una temperatura fija de 20°C (temperatura ambiente), la resistencia está relacionada con los otros tres factores por:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (\text{ohms, } \Omega) \quad (3.1)$$

donde ρ (letra griega rho) es una característica del material llamada **resistividad**, l es la longitud de la muestra, y A es el área transversal de la muestra.

Las unidades de medición sustituidas en la ecuación (3.1) están relacionadas con la aplicación. Para alambres circulares, las unidades de medición son usualmente definidas como en la sección 3.2. Para la mayor parte de otras aplicaciones que implican importantes áreas como los circuitos integrados, las unidades son como se definen en la sección 3.4.

3.2 RESISTENCIA: ALAMBRES CIRCULARES

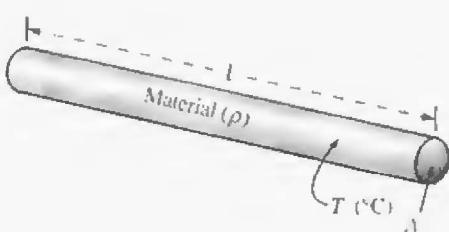


FIGURA 3.2
Factores que afectan la resistencia de un conductor.

Para un alambre circular, las cantidades que aparecen en la ecuación (3.1) son definidas en la figura 3.2: para dos alambres del mismo tamaño físico a la misma temperatura, como se muestra en la figura 3.3(a).

a mayor resistividad, mayor resistencia.

Como se indica en la figura 3.3(b),

mayor longitud de un conductor, mayor resistencia.

La figura 3.3(c) revela que para las similares variables restantes,

a menor área transversal de un conductor, mayor resistencia.

Por último, la figura 3.3(d) establece que para alambres metálicos de construcción y material idéntico,

a mayor temperatura de un conductor, mayor resistencia.

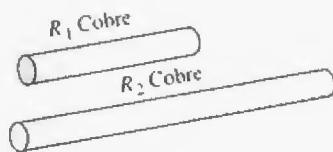
Para alambres circulares, las cantidades de la ecuación (3.1) tienen las siguientes unidades:

ρ :	CM-ohms/pies a $T = 20^\circ\text{C}$
l :	pies
A :	mils circulares (CM)



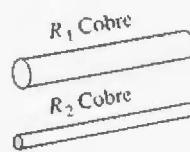
$$\rho_2 > \rho_1$$

(a)



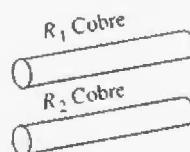
$$l_2 > l_1$$

(b)



$$A_2 < A_1$$

(c)



$$T_2 > T_1$$

(d)

FIGURA 3.3

Casos en que $R_2 > R_1$. Para cada caso, todos los parámetros restantes que controlan el nivel de resistencia son los mismos.

Observe que el área del conductor se mide en **mils circulares (CM)** y *no* en *metros cuadrados, pulgadas, etc.*, según se ha determinado por la ecuación:

$$\text{Área (del círculo)} = \pi r^2 = \frac{\pi d^2}{4} \quad r = \text{radio} \quad d = \text{diámetro} \quad (3.2)$$

El *mil* es una unidad de medición para la longitud y está relacionado con la pulgada mediante:

$$1 \text{ mil} = \frac{1}{1000} \text{ pulg}$$

o bien: **1000 mils = 1 pulg**

Por definición,

un alambre con un diámetro de 1 mil tiene un área de 1 mil circular (CM), como se muestra en la figura 3.4.

Un mil cuadrado fue superpuesto al área de 1 CM en la figura 3.4 para mostrar claramente que tiene un área mayor que el mil circular.

Al aplicar la definición anterior a un alambre con diámetro de 1 mil, y aplicando la ecuación (3.2), tenemos:

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi}{4} (1 \text{ mil})^2 = \frac{\pi}{4} \text{ mils cuadrados} \stackrel{\text{por definición}}{=} 1 \text{ CM}$$

Por tanto,

$$1 \text{ CM} = \frac{\pi}{4} \text{ mils cuadrados} \quad (3.3a)$$

$$\text{o bien, } 1 \text{ mil cuadrado} = \frac{4}{\pi} \text{ CM} \quad (3.3b)$$

Al dividir la ecuación 3.3b obtendremos como resultado:

$$1 \text{ mil cuadrado} = \frac{4}{\pi} \text{ CM} = 1.273 \text{ CM}$$

que ciertamente concuerda con la representación gráfica de la figura 3.4. Para un alambre con un diámetro de N mils (donde N puede ser cualquier número positivo),

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi N^2}{4} \text{ mils cuadrados}$$

Al sustituir $4/\pi$ CM = 1 mil cuadrado obtenemos:

$$A = \frac{\pi N^2}{4} (\text{mils cuadrados}) = \left(\frac{\pi N^2}{4} \right) \left(\frac{4}{\pi} \text{ CM} \right) = N^2 \text{ CM}$$

Como $d = N$, el área en mils circulares es simplemente igual al diámetro en mils cuadrados; esto es,

$$A_{\text{CM}} = (d_{\text{mils}})^2 \quad (3.4)$$

La verificación de que un área puede ser simplemente el diámetro al cuadrado se proporciona en parte con la figura 3.5 para diámetros de 2 y 3 mils. Aunque algunas áreas no son circulares, tienen la misma área que 1 mil circular.

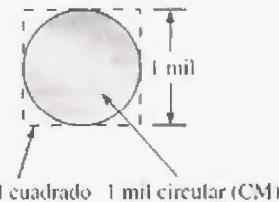


FIGURA 3.4
Definición del mil circular (CM).

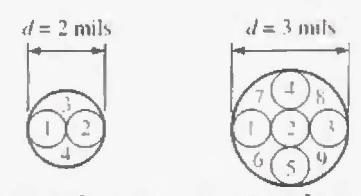


FIGURA 3.5
Verificación de la ecuación (3.4):
 $A_{\text{CM}} = (d_{\text{mils}})^2$.

Por tanto, en el futuro, para encontrar el área en mils circulares, el diámetro debe ser convertido primero a mils. Como 1 mil = 0.001 pulg, si el diámetro está dado en pulgadas, simplemente mueva el punto decimal tres lugares hacia la derecha. Por ejemplo,

$$0.02 \text{ pulg} = 0.020 \text{ mils} = 20 \text{ mils}$$

Si el diámetro está dado en forma de fracción, primero conviértalo a forma decimal y luego proceda como antes. Por ejemplo,

$$\frac{1}{8} \text{ pulg} = 0.125 \text{ pulg} = 125 \text{ mils}$$

La constante ρ (resistividad) es diferente para cada material. Su valor es la resistencia de un alambre de 1 pie de longitud por 1 mil de diámetro, medida a 20°C (Figura 3.6). La unidad de medición para ρ puede determinarse con la ecuación (3.1) despejando primero ρ y sustituyendo luego las unidades de las otras cantidades. Esto es,

$$\rho = \frac{AR}{l}$$

$$\text{y} \quad \text{Unidades de } \rho = \frac{\text{CM} \cdot \Omega}{\text{pies}}$$

La resistividad ρ se mide también en ohms por mil-pie, de acuerdo con la figura 3.6, o en ohm-metros en el Sistema Internacional de unidades (SI). En la tabla 3.1 se dan algunos valores típicos de ρ .

TABLA 3.1

Resistividad (ρ) de varios materiales.

Material	$\rho @ 20^\circ\text{C}$
Plata	9.9
Cobre	10.37
Oro	14.7
Aluminio	17.0
Tungsteno	33.0
Níquel	47.0
Hierro	74.0
Constantán	295.0
Cromoníquel	600.0
Calorita	720.0
Carbono	21,000.0



FIGURA 3.6

Definición de la constante ρ (resistividad).

TABLA 3.1

Resistividad (ρ) de varios materiales.

EJEMPLO 3.1 ¿Cuál es la resistencia de un alambre de cobre de 100 pies de longitud y diámetro de 0.020 pulg a 20°C?

Solución:

$$\rho = 10.37 \frac{\text{CM} \cdot \Omega}{\text{pies}} \quad 0.020 \text{ pulg} = 20 \text{ mils}$$

$$A_{\text{CM}} = (d_{\text{mils}})^2 = (20 \text{ mils})^2 = 400 \text{ CM}$$

$$R = \rho \frac{l}{A} = \frac{(10.37 \text{ CM} \cdot \Omega/\text{pies})(100 \text{ pies})}{400 \text{ CM}}$$

$$R = 2.59 \Omega$$

EJEMPLO 3.2 Un número indeterminado de pies de alambre ha sido utilizado de la caja que aparece en la figura 3.7. Encuentre la longitud del alambre de cobre restante si su diámetro es de 1/16 pulg y la resistencia de 0.5 Ω.

Solución:

$$\rho = 10.37 \text{ CM} \cdot \Omega/\text{pies} \quad \frac{1}{16} \text{ pulg} = 0.0625 \text{ pulg} = 62.5 \text{ mils}$$

$$A_{\text{CM}} = (d_{\text{mils}})^2 = (62.5 \text{ mils})^2 = 3906.25 \text{ CM}$$

$$R = \rho \frac{l}{A} \Rightarrow l = \frac{RA}{\rho} = \frac{(0.5 \Omega)(3906.25 \text{ CM})}{10.37 \frac{\text{CM} \cdot \Omega}{\text{pies}}} = \frac{1953.125}{10.37} \text{ pies}$$

$$l = 188.34 \text{ pies}$$

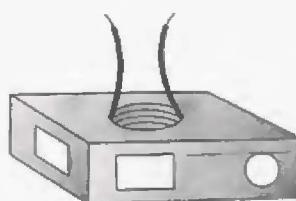


FIGURA 3.7

Ejemplo 3.2.

EJEMPLO 3.3 ¿Cuál es la resistencia de una placa de cobre, utilizada en el panel de distribución de potencia de un edificio de oficinas alto, que tiene las dimensiones indicadas en la figura 3.8?

Solución:

$$\left. \begin{array}{l} 5.0 \text{ pulg} = 5000 \text{ mils} \\ \frac{1}{2} \text{ pulg} = 500 \text{ mils} \\ A_{CM} = (5000 \text{ mils})(500 \text{ mils}) = 2.5 \times 10^6 \text{ mils cuadrados} \\ \quad = 2.5 \times 10^6 \text{ mils cuadrados} \left(\frac{4/\pi \text{ CM}}{1 \text{ mil cuadrado}} \right) \\ \quad = 3.185 \times 10^6 \text{ CM} \\ R = \rho \frac{l}{A} = \frac{(10.37 \text{ CM} \cdot \Omega / \text{pies})(3 \text{ pies})}{3.185 \times 10^6 \text{ CM}} = \frac{31.110}{3.185 \times 10^6} \\ R = 9.768 \times 10^{-6} \Omega \\ \text{(bastante pequeño, } 0.000009768 \Omega \text{)} \end{array} \right\}$$

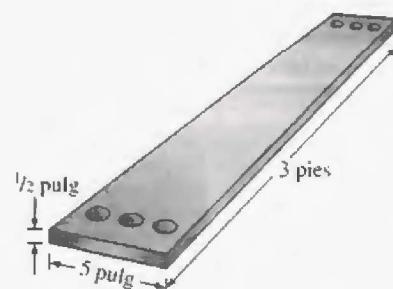


FIGURA 3.8
Ejemplo 3.3.

Veremos en los capítulos siguientes que a menor resistencia de un conductor, menores son las pérdidas en la conducción de la fuente a la carga. Similarmente, como la resistividad es un factor importante al determinar la resistencia de un conductor, a menor resistividad, menor será la resistencia para un conductor del mismo tamaño. La tabla 3.1 sugiere que la plata, el cobre, el oro y el aluminio son los mejores conductores y los más comunes. Sin embargo, en general, hay otros factores como la **maleabilidad** (capacidad de un material de ser moldeado), la **ductilidad** (capacidad de un material de ser estirado en alambres largos y delgados), la sensibilidad a la temperatura, la resistencia al uso rudo, y, por supuesto, el costo, que deben ser considerados al escoger un conductor para una aplicación en particular.

En general, el cobre es el material más ampliamente utilizado por ser muy maleable, dúctil y accesible; tiene buenas características térmicas y es menos caro que el oro o la plata. Sin embargo, ciertamente no es barato. Por ejemplo, en edificios por ser demolidos, el alambrado es retirado antes para recuperar el cobre. En algún tiempo el aluminio fue introducido como alambrado general por ser más barato que el cobre, pero sus características térmicas generaron algunas dificultades. Se encontró que el calentamiento debido al flujo de la corriente y el enfriamiento que ocurría cuando se apagaba el circuito resultaban en expansiones y contracciones del alambre de aluminio hasta el punto en que las conexiones podían aflojarse y presentar efectos colaterales peligrosos. Sin embargo, el aluminio aún se utiliza en áreas como la manufactura de circuitos integrados y en situaciones donde las conexiones pueden efectuarse con seguridad. La plata y el oro son, por supuesto, mucho más caros que el cobre o el aluminio, pero hay casos en que el costo se justifica. La plata tiene excelentes características de plateado para preparaciones de superficies, y el oro se utiliza muy extensamente en circuitos integrados. El tungsteno tiene tres veces la resistividad del cobre, pero hay ocasiones en que sus características físicas (durabilidad, dureza) son las consideraciones primordiales.

3.3 TABLA DE CALIBRES DE ALAMBRE

La tabla de calibres de alambre fue diseñada principalmente para estandarizar el tamaño del alambre producido en Estados Unidos. Como resultado, los

TABLA 3.2
Dimensiones de los calibres de alambre estadounidense (AWG).

AWG #	Área (CM)	$\Omega/1000$ pies a 20°C	Corriente máxima permisible para RHW aislamiento (A)*
(4/0)	0000	211.600	230
(3/0)	000	167.810	200
(2/0)	00	133.080	175
(1/0)	0	105.530	150
1	83.694	0.1240	130
2	66.373	0.1563	115
3	52.634	0.1970	100
4	41.742	0.2485	85
5	33.102	0.3133	—
6	26.250	0.3951	65
7	20.816	0.4982	—
8	16.509	0.6282	50
9	13.094	0.7921	—
10	10.381	0.9989	30
11	8.234.0	1.260	—
12	6.529.0	1.588	20
13	5.178.4	2.003	—
14	4.106.8	2.525	15
15	3.256.7	3.184	
16	2.582.9	4.016	
17	2.048.2	5.064	
18	1.624.3	6.385	
19	1.288.1	8.051	
20	1.021.5	10.15	
21	810.10	12.80	
22	642.40	16.14	
23	509.45	20.36	
24	404.01	25.67	
25	320.40	32.37	
26	254.10	40.81	
27	201.50	51.47	
28	159.79	64.90	
29	126.72	81.83	
30	100.50	103.2	
31	79.70	130.1	
32	63.21	164.1	
33	50.13	206.9	
34	39.75	260.9	
35	31.52	329.0	
36	25.00	414.8	
37	19.83	523.1	
38	15.72	659.6	
39	12.47	831.8	
40	9.89	1049.0	

*No más de tres conductores en duelo, cable o enterramiento directo.

Fuente: Reimpreso con permiso de la NFPA núm. SPP-6C del National Electrical Code™, copyright 1996, National Fire Protection Association, Quincy, MA 02269. Este material reimpreso no es la posición completa y oficial de la NFPA la cual solo está representada por la norma en su totalidad. National Electrical Code es una marca comercial registrada de la National Fire Protection Association, Inc., Quincy, MA para una publicación eléctrica que aparece cada tres años. El término National Electrical Code, como se usa aquí, significa la publicación trianual que constituye el National Electrical Code y se usa con permiso de la National Fire Protection Association.

fabricantes tienen un mayor mercado y el consumidor sabe que siempre habrá tamaños estándar de alambre disponibles. La tabla está configurada para ayudar al usuario en todo lo posible; usualmente incluye datos como el área transversal en mils circulares, diámetros en mils, ohms por cada 1000 pies a 20°C, y peso por 1000 pies.

Los calibres de alambre estadounidense (AWG, por *American Wire Gage*) están dados en la tabla 3.2 para alambres de cobre redondos sólidos. Una columna que indica la corriente máxima permisible en ampere, determinada por la Asociación Nacional de Protección contra Incendios estadounidense, también ha sido incluida.

Los calibres seleccionados tienen una interesante relación: por cada caída en 3 números de calibre, el área se duplica; y por cada caída en 10 números de calibre, el área aumenta por un factor de 10.

Al examinar la ecuación (3.1), notamos también que *la duplicación del área reduce la resistencia a la mitad, e incrementando el área por un factor de 10 disminuye la resistencia a 1/10 de la original*, manteniéndose todo lo demás constante.

Los calibres reales de los alambres de la tabla 3.2 se muestran en la figura 3.9 con algunas de sus áreas de aplicación. Algunos ejemplos en los que se usa la tabla 3.2 son los siguientes:

EJEMPLO 3.4 Encuentre la resistencia de 650 pies de alambre de cobre del número 8 ($T = 20^\circ\text{C}$).

Solución: Para alambre de cobre del número 8 (sólido), $\Omega/1000 \text{ pies a } 20^\circ\text{C} = 0.6282 \Omega$, y

$$650 \text{ pies} \left(\frac{0.6282 \Omega}{1000 \text{ pies}} \right) = 0.408 \Omega$$

EJEMPLO 3.5 ¿Cuál es el diámetro, en pulgadas, de un alambre de cobre del número 12?

Solución: Para alambre de cobre del número 12 (sólido), $A = 6529.9 \text{ CM}$, y

$$d_{\text{mils}} = \sqrt{A_{\text{CM}}} = \sqrt{6529.9 \text{ CM}} \cong 80.81 \text{ mils}$$

$$d = 0.0808 \text{ pulg} \text{ (o cercano a } 1/12 \text{ pulg)}$$

EJEMPLO 3.6 Para el sistema de la figura 3.10, la resistencia total de *cada* línea de potencia no puede exceder de 0.025Ω , y la corriente máxima a extraer por la carga es de 95 A. ¿Qué calibre de alambre debe usarse?

Solución:

$$R = \rho \frac{l}{A} \Rightarrow A = \rho \frac{l}{R} = \rho \frac{l}{0.025 \Omega} = \frac{(10.37 \text{ CM} \cdot \Omega/\text{pies})(100 \text{ pies})}{0.025 \Omega} = 41,480 \text{ CM}$$

Usando la tabla 3.2, escogemos el alambre con el área inmediatamente mayor, que es el número 4, para satisfacer el requisito de resistencia. Sin embargo, advertimos que por la línea deben fluir 95 A. Esta especificación requiere que sea usado alambre del número 3 ya que el del número 4 puede llevar sólo una corriente máxima de 85 A.

3.4 RESISTENCIA: UNIDADES MÉTRICAS

El diseño de elementos resistentes para varias áreas de aplicación, inclusive el de los resistores de película delgada y circuitos integrados, utiliza unidades métricas para las cantidades de la ecuación (3.1). En unidades SI, la resistividad se mediría en ohm-metros, el área en metros cuadrados y la longitud en metros.

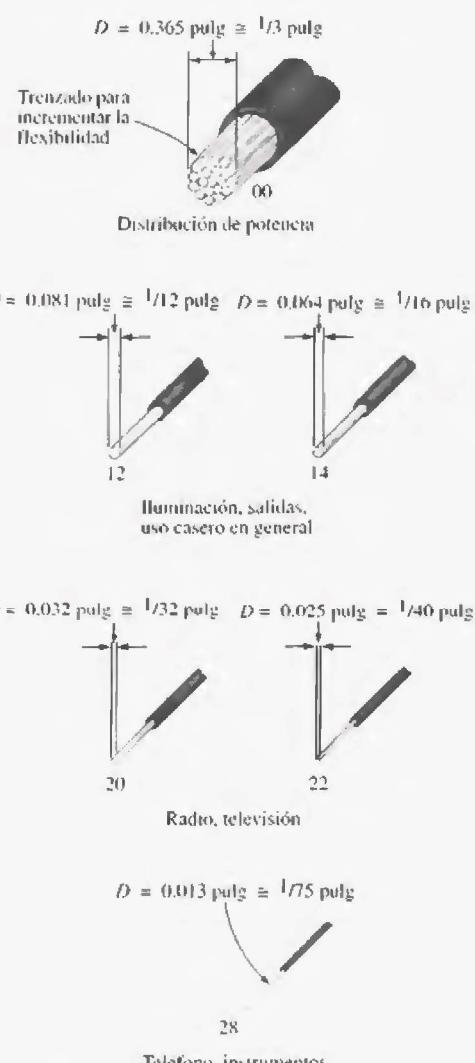


FIGURA 3.9
Medidas populares de alambre y algunas de sus áreas de aplicación.

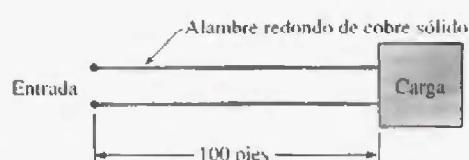
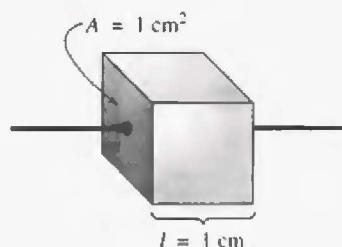


FIGURA 3.10
Ejemplo 3.6.



Definición de ρ en ohm-centímetros.

TABLA 3.3
Resistividad (ρ) en ohm-centímetros para varios materiales.

Plata	1.645×10^{-6}
Cobre	1.723×10^{-6}
Oro	2.443×10^{-6}
Aluminio	2.825×10^{-6}
Tungsteno	5.485×10^{-6}
Níquel	7.811×10^{-6}
Hierro	12.299×10^{-6}
Tantalio	15.54×10^{-6}
Cromoníquel	99.72×10^{-6}
Óxido de estaño	250×10^{-6}
Carbono	3500×10^{-6}

Sin embargo, el metro es generalmente una unidad de medición muy grande para la mayor parte de las aplicaciones, por lo que usualmente se emplea el centímetro. Las dimensiones resultantes para la ecuación (3.1) son, por tanto,

ρ :	ohm-centímetros
l :	centímetros
A :	centímetros cuadrados

Las unidades para ρ pueden derivarse de:

$$\rho = \frac{RA}{l} = \frac{\Omega \cdot \text{cm}^2}{\text{cm}} = \Omega \cdot \text{cm}$$

La resistividad de un material es realmente la resistencia de una muestra como la que aparece en la figura 3.11. La tabla 3.3 proporciona una lista de valores de ρ en ohm-centímetros. Observe que el área está expresada ahora en centímetros cuadrados, la cual puede ser determinada usando la ecuación básica $A = \pi d^2/4$, eliminando la necesidad de trabajar con mils circulares, la unidad especial de medición asociada con alambres circulares.

EJEMPLO 3.7 Determine la resistencia de 100 pies de alambre telefónico del número 28 con diámetro de 0.0126 pulgadas.

Solución: Conversión de unidades:

$$l = 100 \text{ pies} \left(\frac{12 \text{ pulg}}{1 \text{ pie}} \right) \left(\frac{2.54 \text{ cm}}{1 \text{ pulg}} \right) = 3048 \text{ cm}$$

$$d = 0.0126 \text{ pulg} \left(\frac{2.54 \text{ cm}}{1 \text{ pulg}} \right) = 0.032 \text{ cm}$$

Por tanto,

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{(3.1416)(0.032 \text{ cm})^2}{4} = 8.04 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$$

$$R = \rho \frac{l}{A} = \frac{(1.723 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm})(3048 \text{ cm})}{8.04 \times 10^{-4} \text{ cm}^2} \cong 6.5 \Omega$$

Usando las unidades para alambres circulares y la tabla 3.2 para el área de un alambre del número 28 encontramos:

$$R = \rho \frac{l}{A} = \frac{(10.37 \text{ CM} \cdot \Omega/\text{pies})(100 \text{ pies})}{159.79 \text{ CM}} \cong 6.5 \Omega$$

EJEMPLO 3.8 Determine la resistencia del resistor de película delgada de la figura 3.12 si la resistencia laminar R_s (definida por $R_s = \rho/d$) es de 100 Ω .

Solución: Para materiales depositados del mismo espesor, es común emplear el factor de resistencia laminar en el diseño de resistores de película delgada.

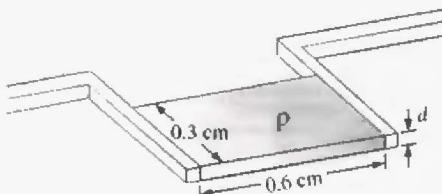
La ecuación (3.1) se puede escribir como:

$$R = \rho \frac{l}{A} = \rho \frac{l}{dw} = \left(\frac{\rho}{d} \right) \left(\frac{l}{w} \right) = R_s \frac{l}{w}$$

donde l es la longitud de la muestra y w el ancho. Sustituyendo en la ecuación anterior obtenemos:

$$R = R_s \frac{l}{w} = \frac{(100 \Omega)(0.6 \text{ cm})}{0.3 \text{ cm}} = 200 \Omega$$

como podría esperarse ya que $l = 2w$.



Resistor de película delgada (véase la figura 3.22).

El factor de conversión entre la resistividad en mil-ohms circulares por pie y ohm-centímetros es el siguiente:

$$\rho (\Omega \cdot \text{cm}) = (1.662 \times 10^{-7}) \times (\text{valor en CM} \cdot \Omega/\text{pies})$$

Por ejemplo, para cobre, $\rho = 10.37 \text{ CM} \cdot \Omega/\text{pies}$:

$$\begin{aligned}\rho (\Omega \cdot \text{cm}) &= 1.662 \times 10^{-7} (10.37 \text{ CM} \cdot \Omega/\text{pies}) \\ &= 1.723 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}\end{aligned}$$

como se indica en la tabla 3.3

La resistividad en el diseño de circuitos integrados está dada normalmente en unidades de ohm-centímetro, aunque las tablas a menudo proporcionan ρ en ohm-metros o microohm-centímetros. Usando la técnica de conversión del capítulo 1, encontramos que el factor de conversión entre ohm-centímetros y ohm-metros es el siguiente:

$$1.723 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm} \left[\frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}} \right] = \frac{1}{100} [1.723 \times 10^{-6}] \Omega \cdot \text{m}$$

o el valor en ohm-metros es 1/100 del valor en ohm-centímetros.

$$\rho (\Omega \cdot \text{m}) = \left(\frac{1}{100} \right) \times (\text{valor en } \Omega \cdot \text{cm})$$

De modo similar:

$$\rho (\mu\Omega \cdot \text{cm}) = (10^6) \times (\text{valor en } \Omega \cdot \text{cm})$$

Para fines de comparación, en la tabla 3.4 se proporcionan valores típicos de ρ en ohm-centímetros para conductores, semiconductores y aislantes.

TABLA 3.4
Comparación de niveles de ρ en $\Omega \cdot \text{cm}$.

Conductor	Semiconductor	Aislante
Cobre 1.723×10^{-6}	Ge 50 Si 200×10^3 GaAs 70×10^6	En general: 10^{15}

En particular, observe la diferencia en potencias de diez entre conductores y aislantes (10^{21}) —una diferencia de enormes proporciones. Existe una diferencia considerable en los niveles de ρ para la lista de semiconductores, pero la diferencia en potencias de diez entre los niveles de un conductor y un aislante es por lo menos de 10^6 para cada uno de los semiconductores en la lista.

3.5 EFECTOS DE TEMPERATURA

La temperatura tiene un efecto considerable sobre la resistencia de conductores, semiconductores y aislantes.

Conductores

Los conductores tienen un número abundante de electrones libres, y cualquier introducción de energía térmica tendrá poco impacto en el número total de por-



tadores libres. De hecho, la energía térmica sólo aumentará la intensidad del movimiento aleatorio de las partículas dentro del material y hará más difícil que se establezca un flujo general de electrones en cualquier dirección. El resultado es que:

para buenos conductores, un aumento en la temperatura resultará en un aumento en el nivel de resistencia. En consecuencia, los conductores tienen un coeficiente térmico de resistencia positivo.

La gráfica de la figura 3.13(a) tiene un coeficiente térmico positivo.

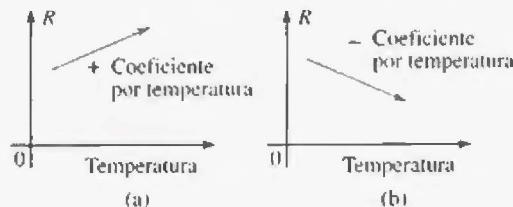


FIGURA 3.13
(a) Coeficiente térmico positivo —conductores; (b) coeficiente térmico negativo —semiconductores.

Semiconductores

En los semiconductores, un aumento de temperatura impartirá cierta energía térmica al sistema que resultará en un aumento en el número de portadores libres para conducción en el material. El resultado es que:

para materiales semiconductores, un aumento de temperatura resultará en una disminución en el nivel de resistencia. En consecuencia, los semiconductores tienen coeficientes térmicos de resistencia negativos.

El termistor y la celda fotoconductiva de las secciones 3.10 y 3.11 de este capítulo son excelentes ejemplos de dispositivos semiconductores con coeficientes térmicos negativos. La gráfica de la figura 3.13(b) tiene un coeficiente térmico negativo.

Aislantes

Igual que en los semiconductores, un aumento de temperatura resultará en una disminución en la resistencia de un aislante. El resultado es un coeficiente térmico de resistencia negativo.

Temperatura absoluta inferida

La figura 3.14 revela que para el cobre (y para la mayor parte de los conductores metálicos), la resistencia aumenta casi linealmente (según una relación de línea recta) con un incremento de la temperatura. Como la temperatura puede tener un efecto pronunciado sobre la resistencia de un conductor, es importante disponer de algún método para determinar la resistencia a cualquier temperatura dentro de límites operativos. Una ecuación adecuada para este fin se puede obtener aproximando la curva de la figura 3.14 mediante la línea recta segmentada que interseca la escala de temperatura a -234.5°C . Aunque la curva real se extiende hasta el **cero absoluto** (-273.15°C , o 0 K), la aproximación de línea recta es bastante precisa para el intervalo normal de temperaturas de operación. A dos temperaturas diferentes, T_1 y T_2 , la resistencia del cobre es R_1 y R_2 , como se indica sobre la curva. Por triángulos semejantes podemos desarrollar una relación matemática entre esos valores de resistencias

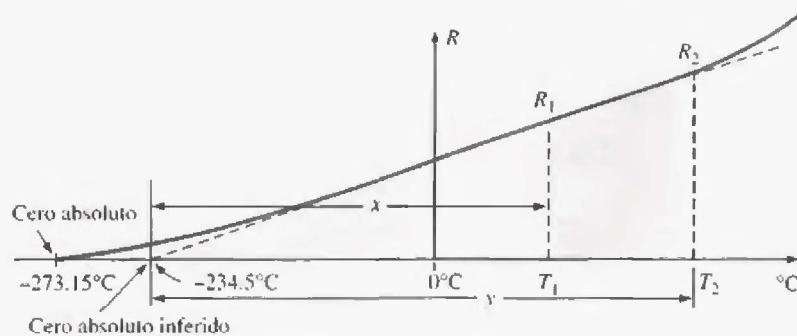


FIGURA 3.14
Efecto de la temperatura sobre la resistencia del cobre.

a diferentes temperaturas. Sea x la distancia desde -234.5°C hasta T_1 e y la distancia desde -234.5°C hasta T_2 , como se muestra en la figura 3.14. Por triángulos semejantes,

$$\frac{x}{R_1} = \frac{y}{R_2}$$

o bien:

$$\frac{234.5 + T_1}{R_1} = \frac{234.5 + T_2}{R_2} \quad (3.5)$$

A la temperatura de -234.5°C se le denomina **temperatura absoluta inferida** del cobre. Para diferentes materiales conductores, la intersección de la aproximación de línea recta ocurrirá a diferentes temperaturas. En la tabla 3.5 se dan algunos valores típicos.

El signo menos no aparece con la temperatura absoluta inferida en ningún lado de la ecuación (3.5) porque x y y son las *distancias* desde -234.5°C hasta T_1 y T_2 , respectivamente, y por tanto son sólo magnitudes. Para T_1 y T_2 menores que cero, x y y son menores que -234.5°C , y las distancias son las diferencias entre la temperatura absoluta inferida y la temperatura de interés.

La ecuación (3.5) puede ser adaptada fácilmente a cualquier material insertando la apropiada temperatura absoluta inferida; por tanto, puede escribirse como sigue:

$$\frac{|T_1| + T_1}{R_1} = \frac{|T_2| + T_2}{R_2} \quad (3.6)$$

donde $|T_1|$ indica que la temperatura absoluta inferida del material implicado es insertada como un valor positivo en la ecuación. En general, por tanto, asocie el signo sólo con T_1 y T_2 .

EJEMPLO 3.9 Si la resistencia de un alambre de cobre es de $50\ \Omega$ a 20°C . ¿Cuál es su resistencia a 100°C (punto de ebullición del agua)?

Solución: Ecuación (3.5):

$$\begin{aligned} \frac{234.5^{\circ}\text{C} + 20^{\circ}\text{C}}{50\ \Omega} &= \frac{234.5^{\circ}\text{C} + 100^{\circ}\text{C}}{R_2} \\ R_2 &= \frac{(50\ \Omega)(334.5^{\circ}\text{C})}{254.5^{\circ}\text{C}} = 65.72\ \Omega \end{aligned}$$

TABLA 3.5

Temperaturas absolutas inferidas (T_i).

Material	°C
Plata	-243
Cobre	-234.5
Oro	-274
Aluminio	-236
Tungsteno	-204
Níquel	-147
Hierro	-162
Cromoníquel	-2,250
Constantán	-125,000

EJEMPLO 3.10 Si la resistencia de un alambre de cobre en el punto de congelación (0°C) es de 30Ω , ¿cuál es su resistencia a -40°C ?

Solución: Ecuación (3.5):

$$\frac{234.5^{\circ}\text{C} + 0}{30 \Omega} = \frac{234.5^{\circ}\text{C} - 40^{\circ}\text{C}}{R_2}$$

$$R_2 = \frac{(30 \Omega)(194.5^{\circ}\text{C})}{234.5^{\circ}\text{C}} = 24.88 \Omega$$

EJEMPLO 3.11 Si la resistencia de un alambre de aluminio a temperatura ambiente (20°C) es de $100 \text{ m}\Omega$ (medida por un miliohmímetro), ¿a qué temperatura aumentará su resistencia a $120 \text{ m}\Omega$?

Solución: Ecuación (3.5):

$$\frac{236^{\circ}\text{C} + 20^{\circ}\text{C}}{100 \text{ m}\Omega} = \frac{236^{\circ}\text{C} + T_2}{120 \text{ m}\Omega}$$

y

$$T_2 = 120 \text{ m}\Omega \left(\frac{256^{\circ}\text{C}}{100 \text{ m}\Omega} \right) - 236^{\circ}\text{C}$$

$$T_2 = 71.2^{\circ}\text{C}$$

Coeficiente térmico de resistencia

Existe una segunda ecuación para calcular la resistencia de un conductor a diferentes temperaturas. Si se define:

$$\alpha_{20} = \frac{1}{|T_1| + 20^{\circ}\text{C}} \quad (\Omega^{\circ}\text{C}/\Omega) \quad (3.7)$$

como el **coeficiente térmico de resistencia a 20°C** , and R_{20} es la resistencia de la muestra a 20°C , la resistencia R_1 a una temperatura T_1 , se determina mediante:

$$R_1 = R_{20}[1 + \alpha_{20}(T_1 - 20^{\circ}\text{C})] \quad (3.8)$$

Han sido evaluados los valores de α_{20} para diferentes materiales, y algunos se presentan en la tabla 3.6.

La ecuación (3.8) puede escribirse en la siguiente forma:

$$\alpha_{20} = \frac{\left(\frac{R_1 - R_{20}}{T_1 - 20^{\circ}\text{C}} \right)}{R_{20}} = \frac{\Delta R}{\Delta T}$$

de la cual se definen las unidades de $\Omega^{\circ}\text{C}/\Omega$ para α_{20} .

Como $\Delta R/\Delta T$ es la pendiente de la curva de la figura 3.14, podemos concluir que: *entre mayor es el coeficiente térmico de resistencia de un material, más sensible es el nivel de resistencia a cambios de temperatura.*

En la tabla 3.5 vemos que el cobre es más sensible a variaciones de temperatura que la plata, el oro o el aluminio, aunque las diferencias son bastante pequeñas. La pendiente definida por α_{20} para el constantán es tan pequeña que la curva es casi horizontal.

TABLA 3.6
Coeficiente térmico de resistencia para varios conductores a 20°C .

Material	Coeficiente térmico (α_{20})
Plata	0.0038
Cobre	0.00393
Oro	0.0034
Aluminio	0.00391
Tungsteno	0.005
Níquel	0.006
Hierro	0.0055
Constantán	0.000008
Cromoníquel	0.00044

Como la R_{20} de la ecuación (3.8) es la resistencia del conductor a 20°C y $T_1 - 20^\circ\text{C}$ es el cambio de temperatura desde 20°C, la ecuación (3.8) puede escribirse de la siguiente manera:

$$R = \rho \frac{l}{A} [1 + \alpha_{20} \Delta T] \quad (3.9)$$

que es una ecuación para la resistencia en términos de todos los parámetros de control.

PPM/°C

En los resistores, así como en los conductores, la resistencia cambia en la temperatura. La especificación se proporciona normalmente en partes por millón por grado Celsius (PPM/°C), lo que da una indicación inmediata del nivel de sensibilidad del resistor a la temperatura. Para resistores, un nivel de 5000 PPM es considerado alto, mientras que 20 PPM es bastante bajo. Una característica de 1000 PPM/°C revela que un cambio de 1° en temperatura ocasionará un cambio en resistencia igual a 1000 PPM, o $1000/1,000,000 = 1/1000$ de su valor nominal —lo que no es un cambio importante para la mayoría de las aplicaciones—. Sin embargo, un cambio de 10° ocasionará un cambio igual a 1/100 (1%) del valor nominal, lo cual empieza a ser significativo. La importancia, por tanto, reside no sólo en el nivel PPM sino también en el rango esperado de variación de la temperatura.

En forma de ecuación, el cambio en resistencia está dado por:

$$\Delta R = \frac{R_{\text{nominal}}}{10^6} (\text{PPM})(\Delta T) \quad (3.10)$$

donde R_{nominal} es el valor nominal del resistor a temperatura ambiente y ΔT es el cambio en temperatura medido desde el nivel de referencia de 20°C.

EJEMPLO 3.12 Para un resistor de composición de carbono de $1 \text{ k}\Omega$ con una especificación PPM de 2500, determine la resistencia a 60°C.

Solución:

$$\begin{aligned} \Delta R &= \frac{1000 \Omega}{10^6} (2500)(60^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) \\ &= 100 \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y \quad R &= R_{\text{nominal}} + \Delta R = 1000 \Omega + 100 \Omega \\ &= 1100 \Omega \end{aligned}$$

3.6 SUPERCONDUCTORES

No hay duda de que el campo de la electricidad y la electrónica es uno de los más apasionantes del siglo xx. Aunque aparecen nuevos adelantos casi semanalmente gracias a las extensas actividades de investigación y desarrollo, de vez en cuando se da un paso adelante muy especial que mantiene a todos los especialistas a la expectativa de lo que podrá desarrollarse en el futuro cercano. Tal nivel de entusiasmo e interés rodea en la actualidad a la investigación conducida para desarrollar un superconductor a temperatura ambiente —avance

comparable a la introducción de dispositivos semiconductores como el transistor (que reemplazó a los bulbos), la comunicación inalámbrica o la luz eléctrica—. Las implicaciones de un desarrollo así son de tan largo alcance que resulta difícil predecir el vasto impacto que tendrá en todo el campo asociado.

La intensidad del esfuerzo de investigación en todo el mundo hoy en día para desarrollar un superconductor a temperatura ambiente es descrito por algunos investigadores como "increíble, contagioso, emocionante y exigente", pero una aventura en la que ellos realmente valoran la oportunidad de estar implicados. El progreso en el campo desde 1986 sugiere que el uso de la superconductividad en aplicaciones comerciales crecerá muy rápidamente en las décadas futuras. Es, en efecto, una apasionante era llena de creciente expectación. ¿Por qué este interés en los superconductores? ¿Qué se espera de ellos? En pocas palabras,

los superconductores son conductores de carga eléctrica que, para todo propósito práctico, tienen resistencia cero.

En un conductor convencional los electrones viajan a velocidades promedio de 1600 km/s (pueden cruzar Estados Unidos en aproximadamente 3 segundos), aun cuando la teoría de la relatividad de Einstein sugiere que la velocidad máxima de transmisión de la información es la velocidad de la luz, o 300,000 km/s. La velocidad relativamente baja de la conducción convencional se debe a colisiones con otros átomos existentes en el material conductor, a fuerzas repulsivas entre los electrones (cargas iguales se repelen), a la agitación térmica que resulta en trayectorias indirectas debido al movimiento incrementado de átomos vecinos, a impurezas en el conductor, etc. En el estado superconductor, existe un apareamiento o enlace de electrones, denotado por el **efecto Cooper**, en el que los electrones viajan en pares y se ayudan entre sí para mantener una velocidad considerablemente elevada a través del medio conductor. En algún sentido esto es semejante a una "asociación" establecida por corredores o ciclistas de competencias. Existe una oscilación de la energía entre los socios e incluso entre "nuevos" socios (según surja la necesidad) para asegurar el paso a través del conductor a la más alta velocidad posible con el menor gasto total de energía.

Si bien el concepto de superconductividad apareció primero en 1911, no fue sino hasta 1986 que la posibilidad de conseguirla a temperatura ambiente se volvió una meta a conquistar por parte de la comunidad de investigadores. Durante 74 años la superconductividad pudo ser establecida sólo a temperaturas más frías que 23 K. (La temperatura Kelvin es universalmente aceptada como la unidad de medición de la temperatura para efectos superconductivos. Recuerde que $K = 273.15^\circ + {}^\circ C$, por lo que una temperatura de 23 K es de $-250^\circ C$, o de $-418^\circ F$.) Sin embargo, en 1986 los físicos Alex Muller y George Bednorz del IBM Zurich Research Center encontraron un material cerámico, el óxido de lantano, bario y cobre, que mostró superconductividad a 30 K. Aunque ello no parecía ser un paso significativo hacia adelante, introdujo un cambio de rumbo en el esfuerzo de investigación e incitó a otros a mejorar el nuevo estándar. En octubre de 1987 Muller y Bednorz recibieron el Premio Nobel por su contribución a tan importante área de desarrollo.

En sólo unos cuantos meses, los profesores Paul Chu de la Universidad de Houston y Man Kuen Wu de la Universidad de Alabama elevaron la temperatura a 95 K usando un superconductor de óxido de ítrio, bario y cobre. El resultado fue un nivel de entusiasmo en la comunidad científica que llevó la investigación en el área a una nueva etapa de esfuerzo e inversión. La mayor repercusión de tal descubrimiento fue que el nitrógeno líquido (punto de ebullición a 77 K) podía utilizarse para llevar el material a la temperatura requerida, en vez de helio líquido que hiere a 4 K. Ello propicia un ahorro enorme en el

costo de enfriamiento ya que el helio líquido es, por lo menos, diez veces más caro que el nitrógeno líquido. En el mismo sentido, se han logrado algunos éxitos al alcanzar 125 y 162 K usando un compuesto de talio (desafortunadamente, sin embargo, el talio es una sustancia muy venenosa).

La figura 3.15 revela claramente que hubo poco avance en el factor temperatura para superconductores hasta el descubrimiento de 1986. La curva toma entonces un crecimiento sostenido, sugiriendo que los superconductores a temperatura ambiente pueden llegar a ser accesibles en unos cuantos años. Sin embargo, a menos que se tenga un avance significativo en el futuro cercano, esta meta no parece ya factible; pero el esfuerzo continúa y está recibiendo un nivel de financiamiento y atención mundial en aumento constante. En la actualidad, un número creciente de empresas están tratando de capitalizar los éxitos ya alcanzados, como veremos más adelante en esta sección.

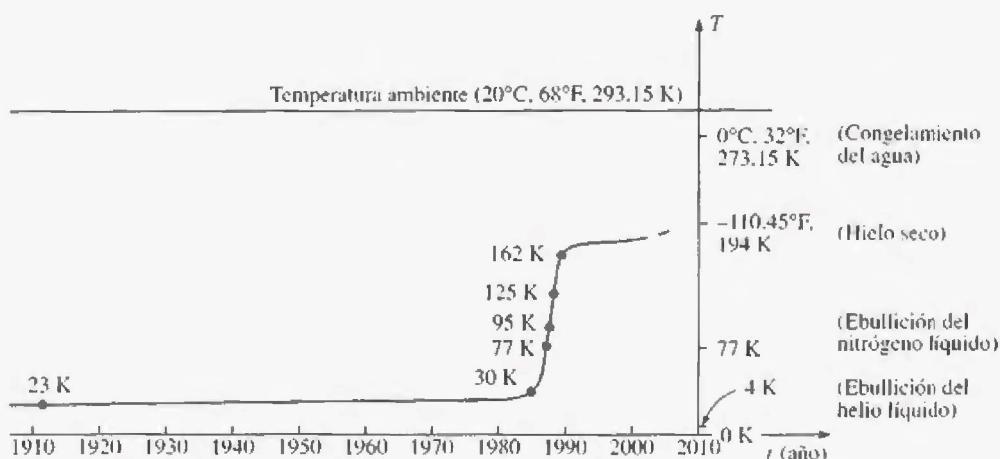


FIGURA 3.15
Temperaturas crecientes de los superconductores.

El hecho de que las cerámicas hayan proporcionado el avance reciente en la superconductividad es, probablemente, una sorpresa si se considera que son también una importante clase de aislantes. Sin embargo, las cerámicas que presentan las características de superconductividad son compuestos que incluyen cobre, oxígeno y tierras raras como el itrio, el lantano y el talio. Hay también indicadores de que los compuestos actuales pueden estar limitados a una temperatura máxima de 200 K (aproximadamente 100 K por debajo de la temperatura ambiente), dejando la puerta abierta a innovaciones en la selección de compuestos. La temperatura a la que un superconductor regresa a las características de un conductor convencional se llama *temperatura crítica*, denotada por T_c . Observe en la figura 3.16 que el nivel de resistividad cambia abruptamente en T_c . La agudeza de la zona de transición es una función de la pureza de la muestra. Largas listas de temperaturas críticas para una variedad de compuestos probados pueden encontrarse en manuales de referencia que proporcionan tablas de una amplia variedad de materiales como ayuda para la investigación en física, química, geología y campos afines. Dos de tales publicaciones incluyen el *Manual de Tablas para Ciencias de la Ingeniería Aplicada* CRC (The Chemical Rubber Co.) y el *Manual de Química y Física CRC*.

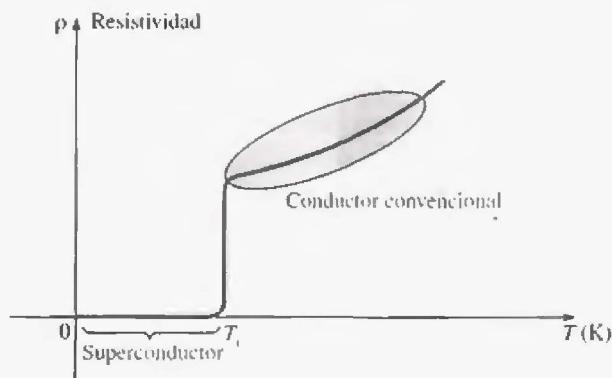


FIGURA 3.16
Definición de la temperatura crítica T_c .

Aunque se han establecido temperaturas de transición elevadas en compuestos cerámicos, existe cierta preocupación sobre sus limitaciones por fragilidad y densidad de corriente. En la fabricación de circuitos integrados, los niveles de densidad de corriente deben ser iguales o exceder 1 MA/cm^2 , un millón de ampere a través de un área transversal de aproximadamente la mitad del tamaño de una moneda de diez centavos de dólar. Recientemente, la IBM alcanzó un nivel de 4 MA/cm^2 a 77 K , lo que permite el uso de superconductores en el diseño de algunas computadoras de alta velocidad de nueva generación.

Aunque se han establecido temperaturas de transición. Si bien no se ha tenido éxito con los superconductores a temperatura ambiente, existen numerosas aplicaciones para algunos de los superconductores desarrollados hasta ahora. Se trata simplemente de balancear el costo adicional contra los resultados o decidir si se puede obtener algún resultado sin el uso del estado de cero resistencia. Algunas investigaciones requieren aceleradores de alta energía o poderosos imanes que sólo pueden construirse con materiales superconductores. La superconductividad se aplica actualmente en el diseño de trenes Meglev de 450 km/h (trenes que viajan sobre un colchón de aire formado mediante polos magnéticos opuestos), en poderosos motores y generadores, en sistemas nucleares de resonancia magnética para obtener imágenes de secciones transversales del cerebro (y otras partes del cuerpo), en el diseño de computadoras con velocidades de operación cuatro veces las de sistemas convencionales, y en sistemas de distribución de potencia mejorados.

La gama de usos futuros para los superconductores es una función del éxito que tengan los físicos en elevar la temperatura de operación, y qué tan bien puedan capitalizar los éxitos obtenidos hasta ahora. Sin embargo, parecería que es sólo cuestión de tiempo (el eterno optimismo) antes que los trenes levitados magnéticamente aumenten en número; que se encuentre disponible equipo mejorado de diagnóstico médico y se tengan computadoras operando a muy altas velocidades; que se encuentren disponibles sistemas de potencia altamente eficientes y con gran capacidad de almacenamiento, así como que los sistemas de transmisión operen a niveles de muy alta eficiencia gracias a esta área de creciente interés. Sólo el tiempo revelará el impacto que esta nueva dirección tendrá en la calidad de la vida.

3.7 TIPOS DE RESISTORES

Resistores fijos

Los resistores se fabrican en muchas presentaciones, pero se clasifican sólo en dos grupos: fijos y variables. Los resistores del tipo fijo de baja potencia más

comunes son los resistores moldeados de composición de carbono. Su construcción básica se muestra en la figura 3.17.

Los tamaños relativos de todos los resistores fijos y variables cambian con la clasificación por potencia, creciendo en tamaño por clasificaciones crecientes de la potencia, para resistir las corrientes elevadas y pérdidas por disipación. Los tamaños relativos de los resistores de composición moldeada para diferentes clasificaciones por potencia se muestran en la figura 3.18. Los resistores de este tipo se consiguen en valores de $2.7\ \Omega$ a $22\ M\Omega$.

Las curvas temperatura en función de la resistencia para un resistor tipo composición de $10,000\ \Omega$ y $0.5\ M\Omega$ se muestran en la figura 3.19. Observe el pequeño porcentaje de cambio de resistencia en el rango normal operativo de temperatura. Algunos otros tipos de resistores fijos que usan alambre de alta resistencia o películas metálicas se muestran en la figura 3.20.

La miniaturización de las partes —usada muy extensamente en las computadoras— requiere que las resistencias de valores diferentes sean colocadas en paquetes muy pequeños. Ejemplos de esto se pueden apreciar en la figura 3.21.

Para uso con tableros de circuitos impresos, se encuentran disponibles en paquetes miniatura redes de resistores fijos en diversas configuraciones, como los mostrados en la figura 3.22. Esta figura incluye la fotografía de tres cubiertas diferentes y la configuración interna de los resistores para la sencilla estructura en línea de la derecha.

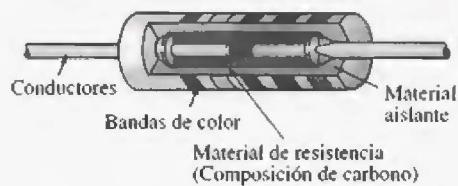


FIGURA 3.17
Resistor de composición fijo.

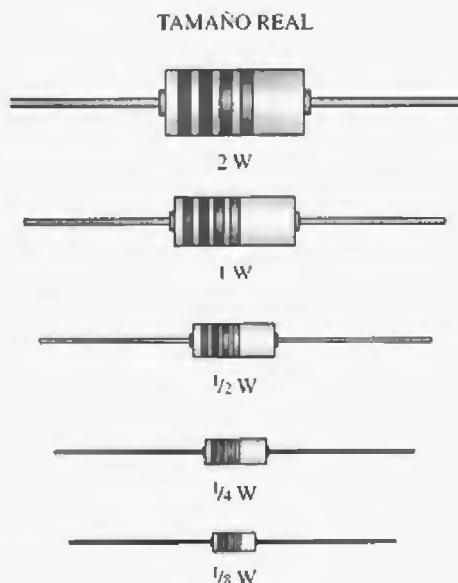


FIGURA 3.18
Resistores de composición fijos con clasificaciones de potencia diferentes.

Resistores variables

Los resistores variables, como implica su nombre, tienen una resistencia terminal que puede ser variada girando un cuadrante, una perilla, un tornillo o lo que sea apropiado para la aplicación. Estos resistores pueden tener dos o tres terminales, la mayoría tienen tres. Si el dispositivo de dos o tres terminales se usa como resistor variable, se le llama **réostato**. Si el dispositivo con tres terminales se usa para el control de niveles de potencial, se le llama comúnmente **potenciómetro**. Aunque un dispositivo de tres terminales puede usarse como réostato o potenciómetro (dependiendo de cómo sea conectado), normalmente es llamado **potenciómetro** cuando se anuncia en revistas técnicas o se requiere para una aplicación en particular.

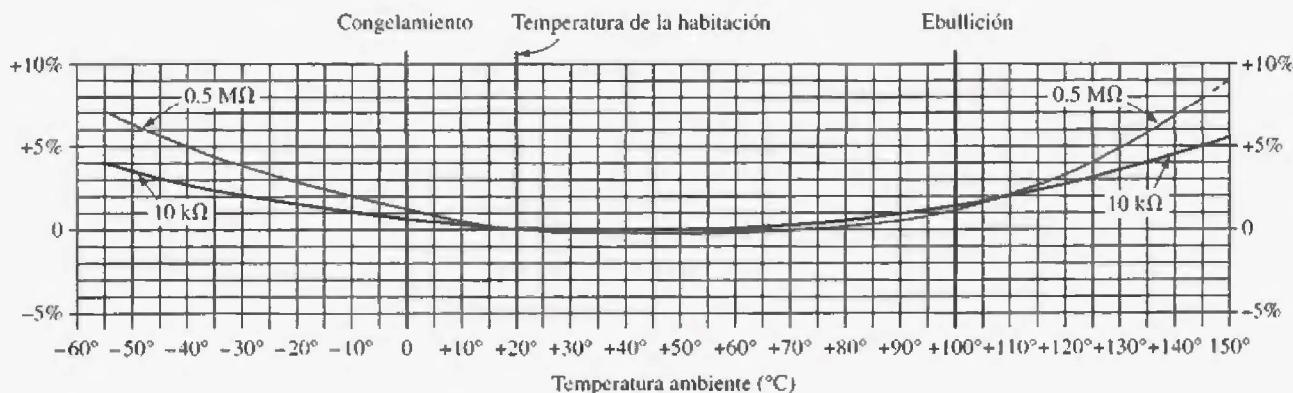


FIGURA 3.19
Curvas que muestran los cambios porcentuales de resistencia temporal desde valores de $+20^{\circ}\text{C}$. (Cortesía de Allen-Bradley Co.)

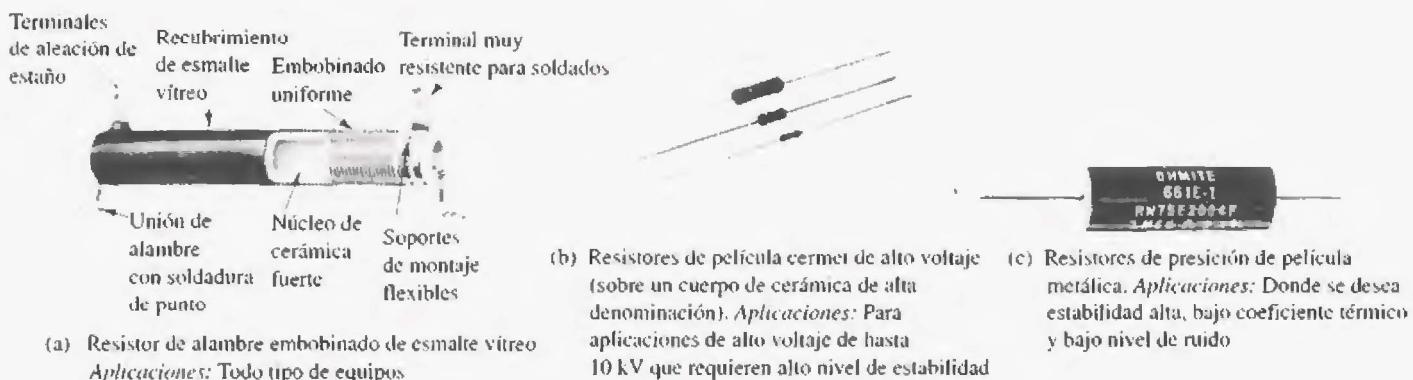


FIGURA 3.20
Resistores fijos. [Partes (a) y (c), cortesía de Ohmite Manufacturing Co. Parte (b), cortesía de Philips Components Inc.]

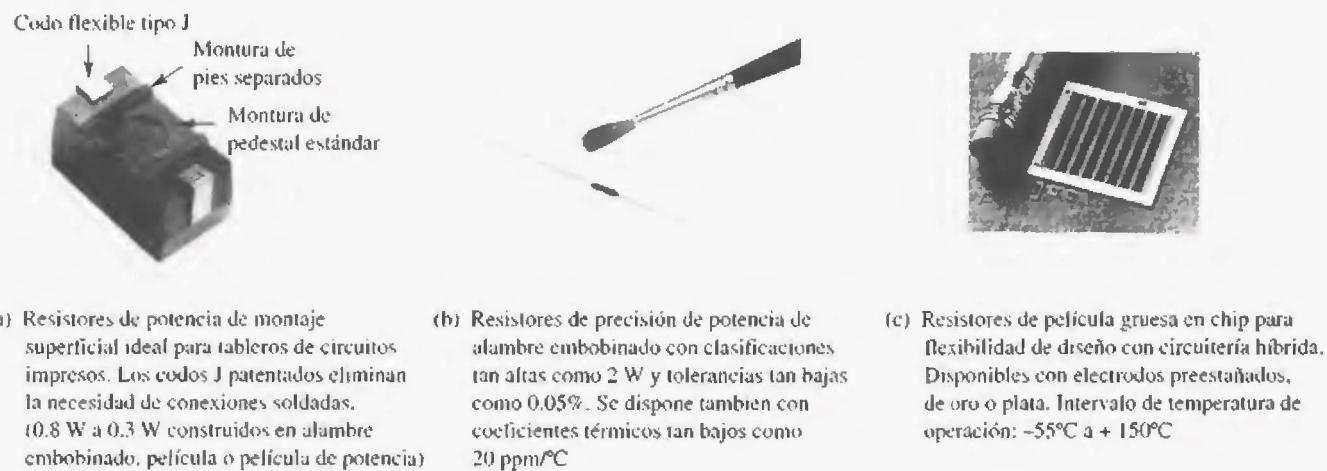


FIGURA 3.21
Resistores fijos miniatura. [Parte (a), cortesía de Ohmite Manufacturing Co. Partes (b) y (c), cortesía de Dale Electronics, Inc.]

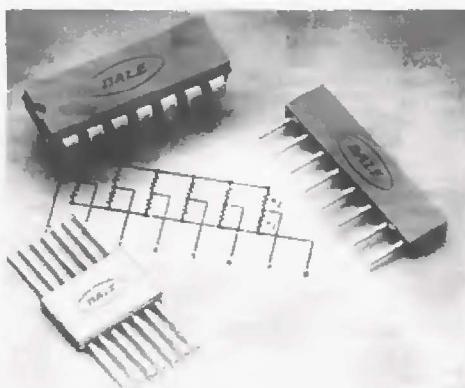


FIGURA 3.22
Redes de resistores de película gruesa. (Cortesía de Dale Electronics, Inc.)

El símbolo para identificar a un potenciómetro de tres terminales se muestra en la figura 3.23(a); cuando se usa como resistor variable (o reóstato), puede ser conectado en una de dos maneras, como se aprecia en la figura 3.23(b) y (c). En la figura 3.23(b), los puntos *a* y *b* se conectan al circuito y la terminal restante se deja abierta. La resistencia introducida está determinada por la porción del elemento resistivo entre los puntos *a* y *b*. En la figura 3.23(c), la resistencia está de nuevo entre los puntos *a* y *b*, pero entonces la resistencia restante es puesta en "corto circuito" (efecto cancelado) por la conexión de *b* a *c*. El símbolo universalmente aceptado para un reóstato se muestra en la figura 3.23(d).

La mayoría de los potenciómetros tienen tres terminales en las posiciones relativas mostradas en la figura 3.24. La perilla, el cuadrante o el tornillo situados en el centro de la cubierta controlan el movimiento de un contacto que se puede desplazar a lo largo del elemento resistivo conectado entre las dos terminales externas. El contacto está conectado a la terminal central, estableciendo una resistencia desde el contacto móvil hacia cada terminal exterior.

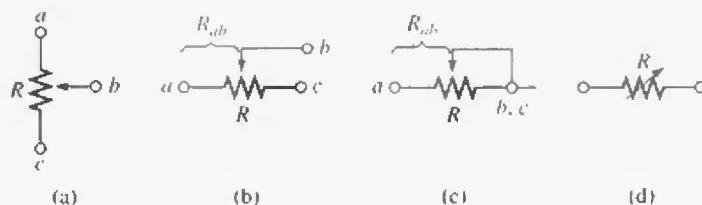


FIGURA 3.23

Potenciómetro: (a) símbolo; (b) y (c) conexiones de reóstato; (d) símbolo de reóstato.

La resistencia entre las terminales exteriores a y c de la figura 3.25(a) (y Figura 3.24) siempre está sujeta al máximo valor de clasificación del potenciómetro, independientemente de la posición del brazo de contacto b .

En otras palabras, la resistencia entre las terminales a y c de la figura 3.25(a) para un potenciómetro de $1 \text{ M}\Omega$ será siempre de $1 \text{ M}\Omega$, sin importar cómo giremos el elemento de control y movamos el contacto. En la figura 3.25(a), el contacto central no es parte de la configuración de la red.

La resistencia entre el brazo de contacto y cualquier terminal exterior puede variarse desde un mínimo de 0Ω hasta un valor máximo igual al valor de clasificación del potenciómetro.

En la figura 3.25(b) el brazo de contacto se ha situado a $1/4$ parte de la distancia entre los puntos a y c . La resistencia resultante entre los puntos a y b será, por tanto, $1/4$ del total, o $250 \text{ k}\Omega$ (para un potenciómetro de $1 \text{ M}\Omega$), y la resistencia entre b y c será $3/4$ del total, o $750 \text{ k}\Omega$.

La suma de las resistencias entre el brazo de contacto y cada terminal exterior es igual a la resistencia de clasificación del potenciómetro.

Esto se demuestra en la figura 3.25(b), donde $250 \text{ k}\Omega + 750 \text{ k}\Omega = 1 \text{ M}\Omega$. Específicamente:

$$R_{ac} = R_{ab} + R_{bc} \quad (3.11)$$

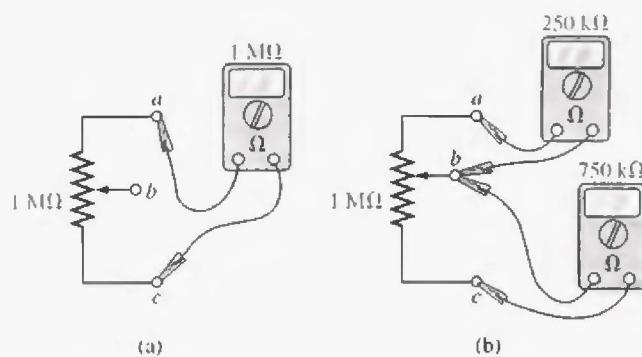
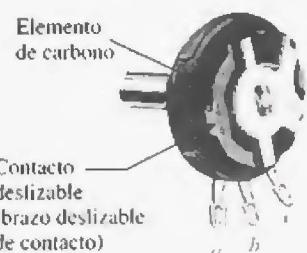


FIGURA 3.25

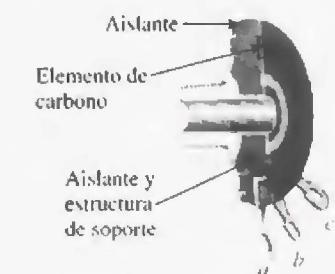
Resistencia terminal de un potenciómetro: (a) entre terminales exteriores; (b) entre las tres terminales.



(a) Vista externa



(b) Vista interna



(c) Elemento de carbono

FIGURA 3.24
Potenciómetro tipo composición moldeada.
(Cortesía de Allen-Bradley Co.)

Por tanto, cuando la resistencia desde el brazo de contacto hasta un contacto exterior aumenta, la resistencia entre el brazo de contacto y la otra terminal exterior debe disminuir correspondientemente. Por ejemplo, si la R_{ab} de un potenciómetro de $1\text{ k}\Omega$ es de $200\ \Omega$, entonces la resistencia R_{bc} debe ser de $800\ \Omega$. Si la R_{ab} es disminuida a $50\ \Omega$, entonces R_{bc} debe aumentar a $950\ \Omega$, y así sucesivamente.

El potenciómetro moldeado de composición de carbono se aplica normalmente en redes con demandas de potencia pequeñas, y varía en tamaño desde $20\ \Omega$ hasta $22\text{ M}\Omega$ (valores máximos). Otros potenciómetros disponibles comercialmente se muestran en la figura 3.26.

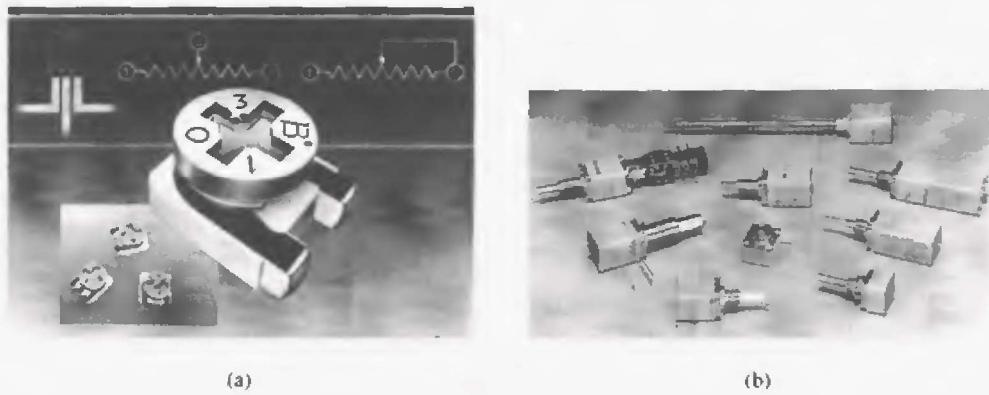


FIGURA 3.26
Potenciómetros: (a) Trimmer de 4 mm ($\approx 5/32"$) (cortesía de Bourns, Inc.); (b) elemento conductor de plástico y cermet (cortesía de Clarostat Mfg. Co.).

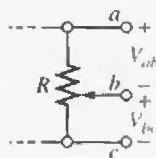


FIGURA 3.27
Control con potenciómetro de los niveles de voltaje.

Cuando el dispositivo se usa como potenciómetro, las conexiones son similares a las que muestra la figura 3.27. Puede usarse asimismo para controlar el nivel de V_{ab} , V_{bc} , o ambos, dependiendo de la aplicación. Un estudio adicional del potenciómetro en una situación de carga puede encontrarse en los capítulos subsiguientes.

3.8 CÓDIGO DE COLOR Y VALORES ESTÁNDAR DE RESISTORES

Una amplia variedad de resistores, fijos o variables, es lo suficientemente grande como para llevar impresa en su cubierta o funda su resistencia en ohms. Sin embargo, algunos son tan pequeños que el espacio no admite la impresión de sus números de resistencia, por lo que se usa un sistema de **código de color**. En el resistor fijo moldeado de composición que se muestra en la figura 3.28, cuatro o cinco bandas de color están impresas en un extremo de la cubierta exterior; cada color representa el valor numérico indicado en la tabla 3.7. Las bandas de color son leídas siempre desde el extremo que tiene la banda más cercana a él, como se aprecia en la figura 3.28. Las bandas primera y segunda representan los dígitos primero y segundo, respectivamente. La tercera banda determina el multiplicador potencia de diez para los primeros dos dígitos (en realidad, el número de ceros que siguen al segundo dígito) o un factor de multiplicación si se trata de oro o plata. La cuarta banda es la tolerancia del fabricante, e indica la precisión con que fue fabricado el resistor; si esta banda es

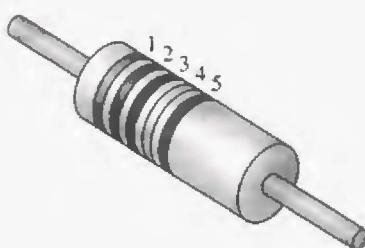


FIGURA 3.28
Código de color de un resistor fijo moldeado de composición.

TABLA 3.7
Código de color para resistores.

Bandas 1-3*	Banda 3	Banda 4	Banda 5
0 Negro	0.1 Oro	5% Oro	1% Café
1 Café	0.01 Plata	10% Plata	0.1% Rojo
2 Rojo		20% Sin banda	0.01% Anaranjado
3 Anaranjado			0.001% Amarillo
4 Amarillo			
5 Verde			
6 Azul			
7 Víioleta			
8 Gris			
9 Blanco			

*Con la excepción de que el color negro no es válido para la primera banda.

omitida, la tolerancia se supone igual a $\pm 20\%$. La quinta banda es un factor de confiabilidad, el cual proporciona el porcentaje de falla por 1000 horas de uso. Por ejemplo, una falla de 1% revelaría que uno de cada 100 (o 10 de cada 1000) resistores fallará al caer dentro del intervalo de tolerancia después de 1000 horas de uso.

EJEMPLO 3.13 Encuentre el intervalo en que debe situarse un resistor con las siguientes bandas de color para satisfacer la tolerancia del fabricante:

a.	1a banda	2a banda	3a banda	4a banda	5a banda
	Gris	Rojo	Negro	Dorado	Café
	8	2	0	$\pm 5\%$	1%

b.	1a banda	2a banda	3a banda	4a banda	5a banda
	Anaranjado	Blanco	Dorado	Plateado	Sin color
	3	9	0.1	$\pm 10\%$	

Soluciones:

a. **$82 \Omega \pm 5\% (1\% \text{ de confiabilidad})$**

Como $5\% \text{ de } 82 = 4.10$, el resistor deberá estar dentro del intervalo de $82 \Omega \pm 4.10 \Omega$, o *entre* 77.90 y 86.10Ω .

b. **$3.9 \Omega \pm 10\% = 3.9 \pm 0.39 \Omega$**

El resistor deberá posicionarse en alguna parte *entre* 3.51 y 4.29Ω .

Podría esperarse que los resistores estuviesen disponibles en un intervalo completo de valores como 10Ω , 20Ω , 30Ω , 40Ω , 50Ω , etc. Sin embargo, este no es el caso con algunos valores comerciales típicos, por ejemplo, 27Ω , 56Ω y 68Ω ; lo cual puede parecer algo extraño y fuera de lugar. Hay una razón para los valores seleccionados, la cual se evidencia examinando la lista de valores estándar de los resistores comercialmente disponibles que aparecen en la tabla 3.8. Los valores en negritas están disponibles con tolerancias de 5, 10 y 20%, siendo así los más comunes de la variedad comercial están disponibles normalmente con tolerancias de 5 y 10%, y aquellos en escritura normal se encuentran sólo en la variedad del 5%. Al agrupar los valores disponibles por niveles de tolerancia se obtiene la tabla 3.9, donde se observa claramente que existen pocos resistores disponibles de hasta 100 W con tolerancias de 20%.

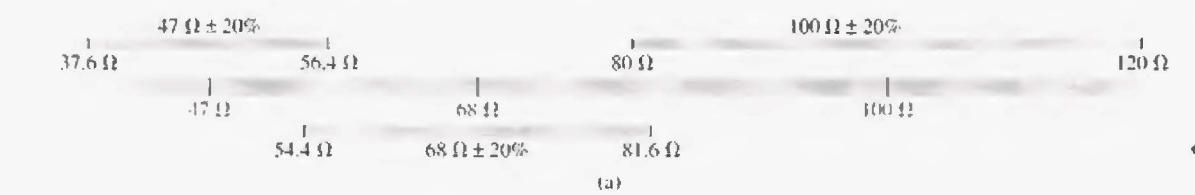
TABLA 3.8
Valores estándar de resistores disponibles comercialmente.

Ohms (Ω)					Kilohms ($k\Omega$)		Megohms ($M\Omega$)	
0.10	1.0	10	100	1000	10	100	1.0	10.0
0.11	1.1	11	110	1100	11	110	1.1	11.0
0.12	1.2	12	120	1200	12	120	1.2	12.0
0.13	1.3	13	130	1300	13	130	1.3	13.0
0.15	1.5	15	150	1500	15	150	1.5	15.0
0.16	1.6	16	160	1600	16	160	1.6	16.0
0.18	1.8	18	180	1800	18	180	1.8	18.0
0.20	2.0	20	200	2000	20	200	2.0	20.0
0.22	2.2	22	220	2200	22	220	2.2	22.0
0.24	2.4	24	240	2400	24	240	2.4	
0.27	2.7	27	270	2700	27	270	2.7	
0.30	3.0	30	300	3000	30	300	3.0	
0.33	3.3	33	330	3300	33	330	3.3	
0.36	3.6	36	360	3600	36	360	3.6	
0.39	3.9	39	390	3900	39	390	3.9	
0.43	4.3	43	430	4300	43	430	4.3	
0.47	4.7	47	470	4700	47	470	4.7	
0.51	5.1	51	510	5100	51	510	5.1	
0.56	5.6	56	560	5600	56	560	5.6	
0.62	6.2	62	620	6200	62	620	6.2	
0.68	6.8	68	680	6800	68	680	6.8	
0.75	7.5	75	750	7500	75	750	7.5	
0.82	8.2	82	820	8200	82	820	8.2	
0.91	9.1	91	910	9100	91	910	9.1	

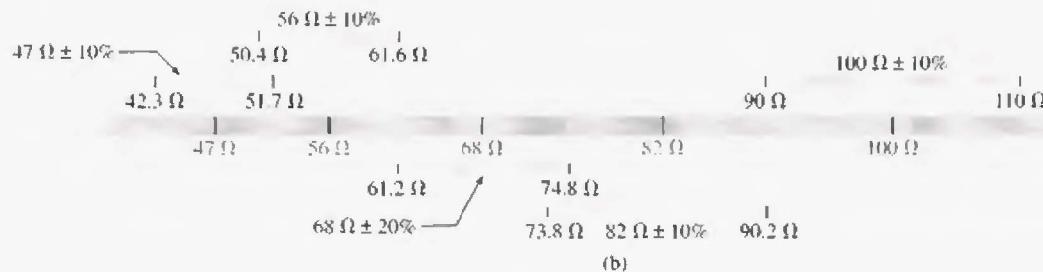
TABLA 3.9
Valores estándar y sus tolerancias.

$\pm 5\%$	$\pm 10\%$	$\pm 20\%$
10	10	10
11		
12	12	
13		
15	15	15
16		
18	18	
20		
22	22	22
24		
27	27	
30		
33	33	33
36		
39	39	
43		
47	47	47
51		
56	56	
62		
68	68	68
75		
82	82	
91		

Un examen del impacto del nivel de tolerancia ayudará a explicar la selección de números para los valores comerciales. Considere la secuencia 47Ω 68Ω 100Ω , que están todos disponibles con tolerancias de 20%. En la figura 3.29(a), la banda de tolerancia para cada uno ha sido determinada y trazada sobre un solo eje. Observe que, con esta tolerancia (que es toda la que el fabricante garantizará), el intervalo completo de valores de resistores está disponible des-



(a)



(b)

FIGURA 3.29
Garantía de cobertura del intervalo completo de valores de resistores para la tolerancia dada: (a) 20%; (b) 10%.

de 37.6Ω hasta 120Ω . En otras palabras, el fabricante está garantizando el intervalo completo, usando las tolerancias para llenar los huecos. Bajando al nivel de 10% se introducen los resistores de 56Ω y 82Ω para llenar los huecos, como se muestra en la figura 3.29(b). Bajando al nivel de 5% se requerirían valores adicionales de resistores para llenar los huecos. Por tanto, los valores de los resistores fueron seleccionados para garantizar que el intervalo completo quedase cubierto, determinado por las tolerancias empleadas. Por supuesto, si se desea un valor específico pero no es uno de los valores estándar, las combinaciones de valores estándar darán a menudo una resistencia total muy cercana al nivel deseado. Si aún así este enfoque no es satisfactorio, puede fijarse un potenciómetro al valor exacto y luego ser insertado en la red.

A lo largo del texto se encontrará que muchos de los valores de los resistores no son estándar. Esto se hizo para reducir la complejidad matemática, que podría oscurecer la técnica de análisis o el procedimiento a ser introducidos. Sin embargo, en las secciones de problemas, a menudo se emplean valores estándar para que el lector empiece a familiarizarse con los valores comerciales disponibles.

3.9 CONDUCTANCIA

Al encontrar el recíproco de la resistencia de un material se tendrá una medida de qué tan bien conducirá éste la electricidad. La cantidad se llama **conductancia**, tiene el símbolo G , y se mide en *siemens* (S) (observe la figura 3.30). En forma de ecuación, la conductancia es:

$$G = \frac{1}{R} \quad (\text{siemens, S}) \quad (3.12)$$

Una resistencia de $1 \text{ M}\Omega$ es equivalente a una conductancia de 10^{-6} S , y una resistencia de 10Ω es equivalente a una conductancia de 10^{-1} S . Por tanto, entre mayor es la conductancia, menor es la resistencia y mayor la conductividad.

En forma de ecuación, la conductancia está determinada por:

$$G = \frac{A}{\rho l} \quad (\text{S}) \quad (3.13)$$

indicando que al aumentar el área o disminuir la longitud o la resistividad aumentará la conductancia.

EJEMPLO 3.14 ¿Cuál es la disminución o el incremento relativos en la conductividad de un conductor si el área se reduce 30% y la longitud se incrementa 40%? La resistividad es fija.

Solución: Ecuación (3.11):

$$G_i = \frac{A_i}{\rho_i l_i}$$

con el subíndice i para el valor inicial. Usando el subíndice n para el nuevo valor:

$$G_n = \frac{A_n}{\rho_n l_n} = \frac{0.70 A_i}{\rho_i (1.4 l_i)} = \frac{0.70}{1.4} \frac{A_i}{\rho_i l_i} = \frac{0.70}{1.4} G_i$$

y

$$G_n = 0.5 G_i$$

Alemán
(Lenthe, Berlin)
(1816-1892)
Ingeniero eléctrico
Fabricante de
telégrafos,
Siemens & Halske
AG



Archivos Bettman
Fotografía núm. 33,619

Desarrolló un *proceso de galvanoplastia* durante un breve periodo que pasó en prisión por actuar como ayudante en un duelo entre compañeros oficiales del ejército prusiano. Inspirado por el telégrafo eléctrico inventado por Sir Charles Wheatstone en 1817, mejoró el diseño y procedió a tender cable, con ayuda de su hermano Carl, a través del Mediterráneo y de Europa hasta la India. Sus invenciones incluyen el primer *generador autoexcitado*, el cual depende del magnetismo residual de su electroimán en vez de depender de un imán permanentemente ineficiente. En 1888 fue elevado a la nobleza con la adición de von a su nombre. La empresa Siemens AG tiene fábricas en 35 países con oficinas de ventas en 125.

FIGURA 3.30
Werner von Siemens.

3.10 OHMÍMETROS

El ohmímetro es un instrumento que se utiliza para efectuar las siguientes tareas y cumplir otras útiles funciones:

1. Mide la resistencia de elementos individuales o combinados.
2. Detecta situaciones de circuito abierto (alta resistencia) y corto circuito (baja resistencia).
3. Revisa la continuidad de las conexiones en redes e identifica los alambres de un cable multiconductor.
4. Prueba algunos dispositivos semiconductores (electrónicos).

En la mayoría de las aplicaciones, los ohmímetros más frecuentemente usados son la sección de ohmímetro de un VOM o un DMM. Los detalles de los circuitos internos y el método de uso del medidor se dejarán para un ejercicio de laboratorio. Sin embargo, en general, la resistencia de un resistor puede medirse conectando simplemente los dos conductores del medidor a través del resistor, como se muestra en la figura 3.31. No hay necesidad de preocuparse acerca de cuál conductor debe llegar a qué extremo: el resultado será el mismo en cualquier caso ya que los resistores ofrecen igual resistencia al flujo de carga (corriente) en cualquier dirección. Si se emplea el VOM, debe fijarse un interruptor al intervalo apropiado de resistencia, y una escala no lineal (usualmente la escala superior del medidor) debe leerse apropiadamente para obtener el valor de la resistencia. El DMM también requiere que se escoja la mejor escala para la resistencia a ser medida, pero el resultado aparece como un despliegue numérico, con la posición apropiada del punto decimal determinada por la escala escogida. Al medir la resistencia de un solo resistor, usualmente es mejor retirar el resistor de la red antes de efectuar la medición. Si esto es difícil o imposible, por lo menos un extremo del resistor no debe estar conectado a la red, o el resultado puede incluir los efectos de los otros elementos del sistema.

Si los dos conductores del medidor se están tocando en el modo de ohmímetro, la resistencia resultante es cero. Una conexión se puede revisar como se muestra en la figura 3.32 enganchando simplemente el medidor a cualquier lado de la conexión. Si la resistencia es cero, la conexión es segura; si es diferente de cero, la conexión será débil, y si es infinita, no habrá conexión en absoluto.

Si se conoce un alambre de un arnés, puede encontrarse un segundo alambre como se muestra en la figura 3.33. Simplemente conecte el extremo del conductor conocido al extremo de cualquier otro conductor. Cuando el ohmímetro indique cero ohms (o muy poca resistencia), el segundo conductor habrá sido identificado. El procedimiento anterior se puede usar también para determinar el primer conductor conocido conectando simplemente el medidor a cualquier alambre en un extremo y tocando luego todos los conductores en el otro extremo hasta obtener una indicación de cero ohms.

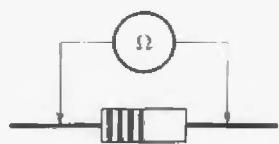


FIGURA 3.31

Medición de la resistencia de un solo elemento.

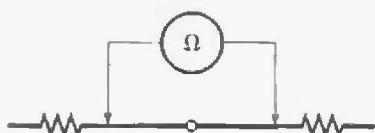


FIGURA 3.32

Verificación de la continuidad de una conexión.



FIGURA 3.33
Identificación de los conductores de un cable multiconductor.

Las mediciones preliminares de la condición de algunos dispositivos electrónicos como el diodo y el transistor pueden hacerse usando el ohmímetro. El medidor también se puede usar para identificar las terminales de tales dispositivos.

Una observación importante acerca del uso de cualquier ohmímetro es:

Nunca conecte un ohmímetro a un circuito vivo!

La lectura no tendrá sentido y puede dañarse el instrumento. La sección del ohmímetro de cualquier medidor está diseñado para pasar una pequeña corriente sensora a través de la resistencia a medir. Una corriente grande externa podría dañar el movimiento y ciertamente descalibraría el instrumento. Además,

nunca almacene un VOM o un DMM en el modo de resistencia.

Los dos conductores del medidor podrían tocarse y la pequeña corriente sensora podría descargar la batería interna. Los VOM se deben almacenar con el interruptor selector en el intervalo de voltaje más alto, y el interruptor selector de los DMM debe estar en la posición de apagado (off).

3.11 TERMISTORES

El **termistor** es un dispositivo semiconductor de dos terminales cuya resistencia, como su nombre sugiere, es sensible a la temperatura. Una característica representativa de ello se muestra en la figura 3.34 con el símbolo gráfico utilizado para identificar este dispositivo. Observe la no linealidad de la curva y la caída en la resistencia desde aproximadamente $5000\ \Omega$ hasta $100\ \Omega$ para un incremento en la temperatura de 20°C hasta 100°C . La disminución en la resistencia con un aumento de la temperatura indica un coeficiente térmico negativo.

La temperatura del dispositivo puede cambiarse interna o externamente. Un aumento de la corriente en el dispositivo elevará su temperatura, ocasionando una caída en su resistencia terminal. Cualquier fuente de calor aplicada externamente resultará en un incremento de su temperatura y una caída de su resistencia. Este tipo de acción (interna o externa) se presta bien para los mecanismos de control. En la figura 3.35 se muestran muchos tipos diferentes

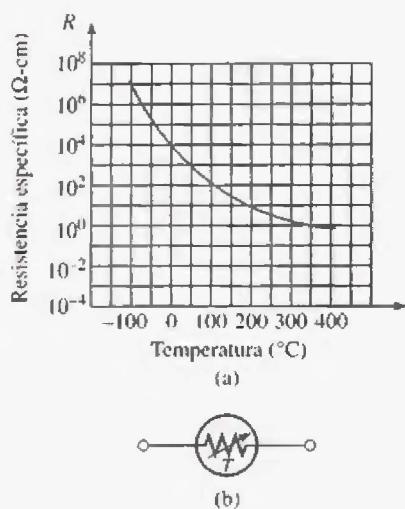


FIGURA 3.34
Termistor: (a) características; (b) símbolo.



FIGURA 3.35
Termistores con coeficiente térmico negativo (NTC) y con coeficiente térmico positivo (PTC). (Cortesía de Siemens Components, Inc.)

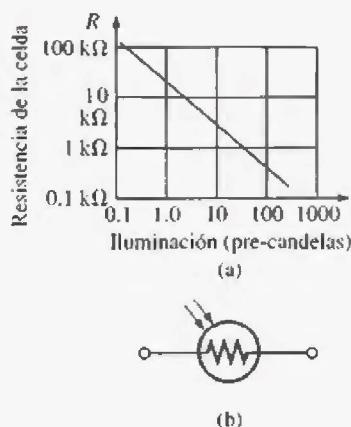


FIGURA 3.36
Celda fotoconductora: (a) características;
(b) símbolo.



FIGURA 3.37
Celdas fotoconductoras. (Cortesía de
EG&G VACTEC, Inc.)

de termistores. Los materiales empleados en la fabricación de termistores incluyen óxidos de cobalto, níquel, estroncio y manganeso.

Observe el uso de una escala logarítmica (que se analizará en el capítulo 23) en la figura 3.34 para el eje vertical. La escala logarítmica permite desplegar un intervalo más amplio de niveles específicos de resistencia que una escala lineal como la del eje horizontal. Advierta que la escala se extiende desde $0.0001 \Omega \cdot \text{cm}$ hasta $100,000,000 \Omega \cdot \text{cm}$ sobre un intervalo muy corto. La escala logarítmica se usa para los ejes vertical y horizontal de la figura 3.36.

3.12 CELDA FOTOCONDUCTORA

La **celda fotoconductora** es un dispositivo semiconductor de dos terminales cuya resistencia terminal está determinada por la intensidad de la luz incidente sobre su superficie expuesta. Conforme la iluminación aplicada aumenta en intensidad, el estado de energía de los electrones y átomos superficiales también aumenta, con lo cual el número de "portadores libres" se eleva y se produce la correspondiente caída en la resistencia. Un conjunto típico de características y el símbolo gráfico de la celda fotoconductora se muestran en la figura 3.36. Observe el coeficiente negativo de iluminación. En la figura 3.37 pueden apreciarse varias celdas fotoconductoras de sulfuro de cadmio.

3.13 VARISTORES

Los **varistores** son resistores no lineales, dependientes del voltaje, usados para suprimir transitorios de alto voltaje; esto es, sus características son tales que les permiten limitar el voltaje que puede aparecer en las terminales de un dispositivo o sistema sensible. Un conjunto típico de las características de un varistor se muestra en la figura 3.38(a), junto con una característica de resistencia lineal para fines de comparación. Observe que a un particular "voltaje de encendido", la corriente se eleva rápidamente pero el voltaje queda limitado a un nivel justo por arriba de este potencial de encendido. En otras palabras, la magnitud del voltaje que puede aparecer en este dispositivo no puede exceder al nivel definido mediante sus características. Por medio de técnicas apropiadas de diseño, este dispositivo puede entonces limitar el voltaje que aparece en las regiones sensibles de una red. La corriente está simplemente limitada por la red a la que está conectada. En la figura 3.38(b) se muestra una fotografía de varias unidades comerciales.

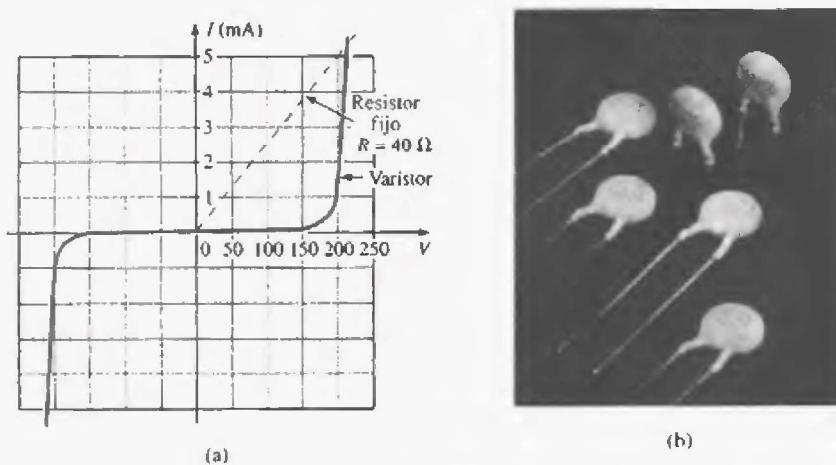


FIGURA 3.38
Varistores disponibles con clasificaciones máximas de voltaje entre
18 V y 615 V. (Cortesía de Philips Components, Inc.)

3.14 APLICACIONES

Los siguientes son ejemplos de cómo puede usarse la resistencia para efectuar diversas tareas, desde el calentamiento hasta la medición del esfuerzo o la deformación en un elemento de una estructura. En general, la resistencia es una componente de toda aplicación eléctrica o electrónica.

Calefactor eléctrico

Una de las aplicaciones más comunes de la resistencia es en dispositivos domésticos como tostadores y calefactores eléctricos, donde el calor generado por la corriente que pasa por un elemento resistivo se emplea para efectuar una función útil.

Recientemente, al remodelar nuestra casa, un electricista nos informó que estábamos limitados a 16 pies de calefactor eléctrico sobre un solo circuito. Eso naturalmente me preocupó acerca de la potencia por pie, el nivel de corriente resultante, y si la limitación de 16 pies era un estándar nacional. Leyendo la etiqueta sobre la sección de 2 pies que aparece en la figura 3.39(a), encontré VOLTS CA 240/208, WATTS 750/575 [la clasificación por potencia se describirá en el capítulo 4] AMPERE 3.2/2.8. Dado que mi panel calefactor está clasificado en 208 V (como en la mayoría de las casas residenciales), la clasificación de la potencia por pie es de 575 W/2 o 287.5 W a una corriente de 2.8 A. La potencia total para los 16 pies es, por tanto, $16 \times 287.5 \text{ W} = 4600 \text{ W}$. En el capítulo 4 se encontrará que la potencia en una carga resistiva está relacionada a la corriente y al voltaje aplicado por la ecuación $P = VI$. La corriente resultante total puede entonces determinarse usando esta ecuación de la siguiente manera: $I = P/V = 4600 \text{ W}/208 \text{ V} = 22.12 \text{ A}$. El resultado fue que necesitábamos un cortacircuito mayor que 22.12 A; de otra manera, el cortacircuito se desconectaría cada vez que encendíramos el calentador. En mi caso, el electricista usó un cortacircuito de 30 A para satisfacer el requisito del Código Nacional sobre Incendios que no permite exceder 80% de la corriente clasificada para un conductor o cortacircuito. En la mayoría de los paneles, un cortacircuito de 30 A toma dos ranuras de su panel, mientras que el cortacircuito más común de 20 A toma sólo una ranura. Si tiene tiempo, fíjese en su propio panel y observe la clasificación de los cortacircuitos usados para los varios circuitos de su casa.

Volviendo a la tabla 3.2, encontramos que el alambre del número 12, usado comúnmente para la mayoría de los circuitos caseros, tiene una clasificación máxima de 20 A y no sería adecuado para el calefactor eléctrico. Como el calibre 11 por lo general no está disponible comercialmente, se usó un alambre del número 10 con una clasificación máxima de 30 A. Usted podría preguntarse por qué la corriente extraída del suministro es de 22.12 A mientras que la requerida para una unidad fue sólo de 2.8 A. Esta diferencia se debe a la combinación en paralelo de secciones de los elementos calefactores, una configuración que será descrita en el capítulo 6. Ahora está claro por qué se especifica una limitación de 16 pies sobre un solo circuito. Elementos adicionales elevarían la corriente a un nivel que excedería el del Código para el alambre calibre 10 y se acercaría a la clasificación máxima del cortacircuito.

La figura 3.39(b) muestra una fotografía de la construcción interior del elemento calefactor. El alambre rojo de alimentación situado a la derecha está conectado al núcleo del elemento calefactor, y el alambre negro en el otro extremo pasa por un elemento calefactor protector y regresa a la caja terminal de la unidad (el lugar donde los alambres exteriores se juntan y conectan). Si se observa cuidadosamente el extremo de la unidad de calefacción que se muestra en la figura 3.39(c), se encontrará que el alambre calefactor que corre

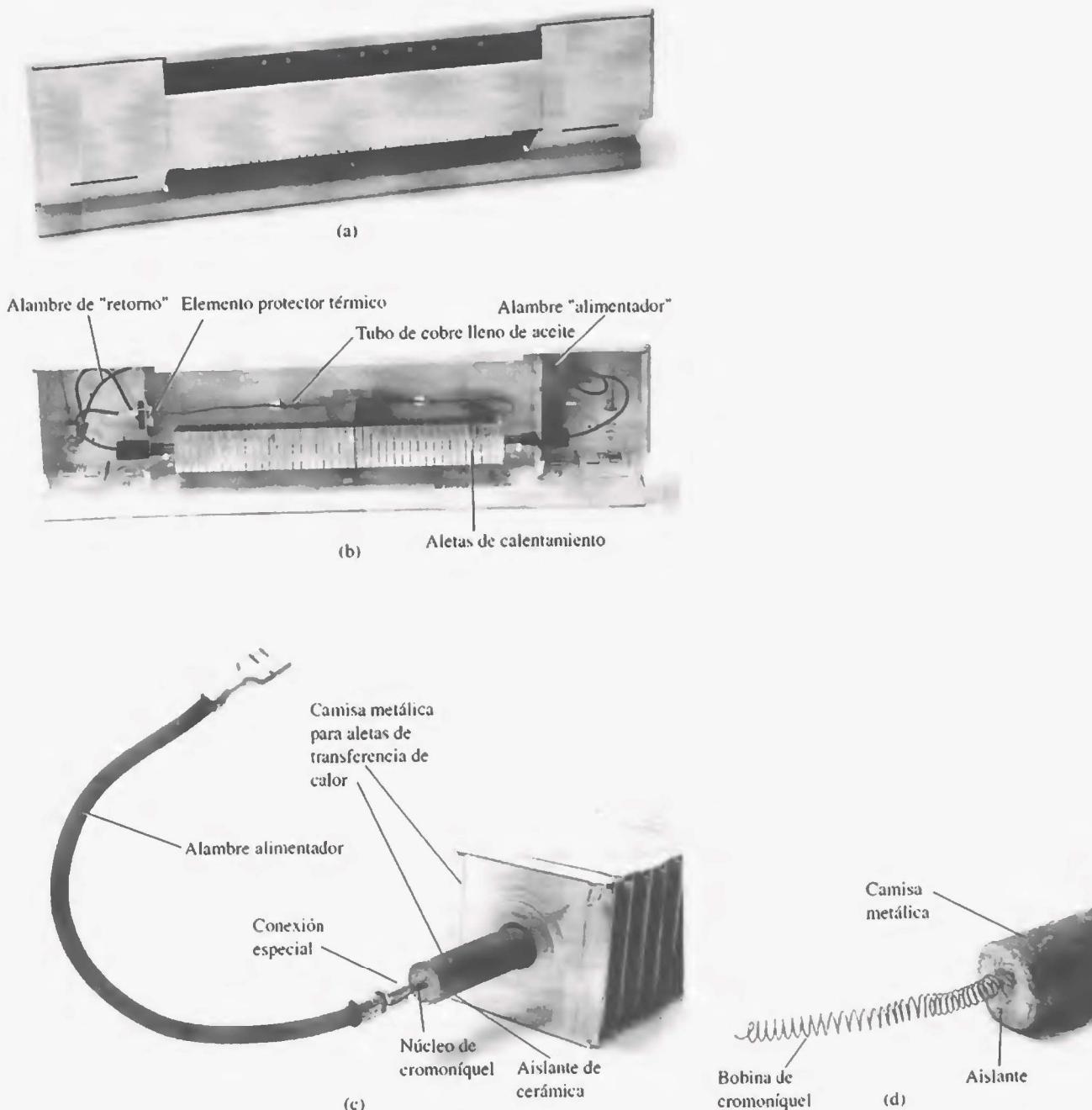


FIGURA 3.39
Calefactor eléctrico: (a) sección de 2 pies; (b) interior; (c) elemento calefactor; (d) bobina de cromoníquel.

a través del núcleo del calentador no está conectado directamente a la camisa redonda que sostiene las aletas en su lugar. Un material cerámico (aislante) separa el alambre calefactor desde las aletas para eliminar cualquier posibilidad de conducción entre la corriente que pasa por el elemento desnudo de calentamiento y la estructura exterior de la aleta. Los materiales de cerámica se usan porque son excelentes conductores del calor y porque tienen una alta capacidad de retención del calor, por lo que el área a su alrededor permanecerá caliente por determinado tiempo aun después de que la corriente haya sido suspendida. Como se muestra en la figura 3.39(d), el alambre de calentamiento que corre a

través de la camisa metálica es normalmente un compuesto de cromoníquel (porque el cromoníquel puro es muy frágil) enrollado en forma de bobina para compensar la expansión y contracción por el calor, y para permitir un elemento más largo de calentamiento en un calefactor de longitud estándar. Por curiosidad, se abrió el núcleo del calefactor y se encontró que el alambre de cromoníquel de 2 pies tenía realmente 7 pies de longitud, o una razón de 3.5: 1 radio. Lo delgado del alambre fue particularmente notable, midió aproximadamente 8 mils de diámetro, no mucho más grueso que un cabello. Recuerde de este capítulo que entre más largo sea el conductor y más delgado el alambre, mayor será la resistencia. Se tomó una sección del alambre de cromoníquel para tratar de calentarlo con un nivel razonable de corriente y, al aplicarlo a un secador de pelo, el cambio en resistencia apenas se notó. En otras palabras, todos los esfuerzos por aumentar la resistencia con los elementos básicos disponibles en el laboratorio resultaron infructuosos. Esto fue una excelente demostración del significado del coeficiente térmico de resistencia dado en la tabla 3.6. Como el coeficiente es tan pequeño para el cromoníquel, la resistencia no cambia en forma medible a menos que el cambio en temperatura sea verdaderamente considerable. La curva de la figura 3.14 es, por tanto, cercana a la horizontal para el cromoníquel. Para calefactores esto es una característica excelente porque el calor desarrollado, y la potencia disipada, no variará con el tiempo conforme el conductor se calienta. El flujo de calor desde la unidad permanecerá bastante constante.

La alimentación y el retorno no pueden ser soldados al alambre calefactor de cromoníquel por dos razones. Primero, no se pueden soldar alambres de cromoníquel entre si o a otros tipos de alambre. Segundo, si se pudiera, se tendría un problema ya que el calor de la unidad se elevaría sobre los 880°F en el punto donde los alambres estuvieran conectados, la soldadura se derretiría y la conexión se rompería. Con el cromoníquel se debe utilizar soldadura de punto o soldadura en frío (crimp) con los alambres de cobre de la unidad. Usando la ecuación (3.1) y el diámetro medido de 8 mils, y suponiendo de momento cromoníquel puro, la resistencia de la longitud de 7 pies es de:

$$\begin{aligned} R &= \frac{\rho l}{A} \\ &= \frac{(600)(7')}{(8 \text{ mils})^2} = \frac{4200}{64} \end{aligned}$$

$$R = 65.6 \Omega$$

En el próximo capítulo presentaremos en detalle una ecuación de potencia que relaciona potencia, corriente y resistencia de la siguiente manera: $P = I^2R$. Usando los datos anteriores y despejando la resistencia obtenemos:

$$\begin{aligned} R &= \frac{P}{I^2} \\ &= \frac{575 \text{ W}}{(2.8 \text{ A})^2} \end{aligned}$$

$$R = 73.34 \Omega$$

que es muy cercano al valor calculado líneas arriba a partir de la forma geométrica ya que no podemos estar absolutamente seguros acerca del valor de la resistividad del compuesto.

Durante una operación normal el alambre se calienta y pasa el calor a las aletas, que a su vez calientan la habitación por medio del aire que fluye por ellas. El flujo de aire a través de la unidad es aumentado por el hecho de que el aire caliente se eleva, y cuando el aire caliente deja la parte superior de la unidad, se extrae aire frío del fondo contribuyendo así al efecto de convección. Si se cierra la parte superior o inferior de la unidad se elimina efectivamente el efecto de convección, y la habitación no se calienta. Puede ocurrir una condición

en la cual el interior del calentador se vuelva muy caliente, ocasionando que la cubierta metálica también se caliente demasiado. Ésta es la razón principal por la que se introduce el elemento térmico protector que se muestra en la figura 3.39(b). El largo y delgado tubo de cobre que aparece en la figura 3.39 se llena con un fluido tipo aceite que se dilata al calentarse. Si está demasiado caliente, se dilatará, accionará un interruptor en el bastidor, y apagará el calentador cortando la corriente al alambre calefactor.

Control de la luz en un automóvil

Un reóstato de dos puntos es el elemento principal en el control de la intensidad de la luz en el tablero y los accesorios de un automóvil. La red básica se aprecia en la figura 3.40 con niveles típicos de voltaje y corriente. Cuando el interruptor de la luz está cerrado (usualmente jalando la perilla de control de la luz en el tablero), se establece una corriente a través del reóstato de 50Ω y luego en las distintas luces del tablero. Cuando se gira la perilla del interruptor de control, se controla la cantidad de resistencia entre los puntos *a* y *b* del reóstato. Entre más resistencia se tenga entre los puntos *a* y *b*, menor será la corriente y menor el brillo de las luces. Observe el interruptor adicional en la luz de la guantera que es activado al abrir la puerta de este compartimiento. Aparte de la luz de la guantera, todas las luces detalladas en la figura 3.40 se encenderán al mismo tiempo cuando el interruptor de luz sea activado. La primera rama después del reóstato contiene dos focos de 6 V en vez de los focos de 12 V que se tienen en las otras ramas. Los focos más pequeños de esta rama producirán una luz más tenue y más uniforme para áreas específicas del tablero. Observe que la suma de los focos (en serie) es de 12 V para concordar con la de las otras ramas. La división del voltaje en cualquier red se verá con todo detalle en los capítulos 5 y 6.

Los niveles normales de corriente para las distintas ramas han sido proporcionados también en la figura 3.40. Veremos en el capítulo 6 que la extracción de corriente de la batería y a través del fusible y el reóstato es aproximadamente igual a la suma de las corrientes en las ramas de la red. El resultado es que el fusible debe ser capaz de manejar corrientes en ampere, por lo que fue empleado un fusible de 15 ampere (aun cuando los focos que aparecen en la figura 3.40 son de 12 V para equiparar la batería).

Siempre que el voltaje de operación y los niveles de corriente de un componente se conocen, la resistencia interna efectiva de la unidad puede ser determinada usando la ley de Ohm, que será presentada con todo detalle en el

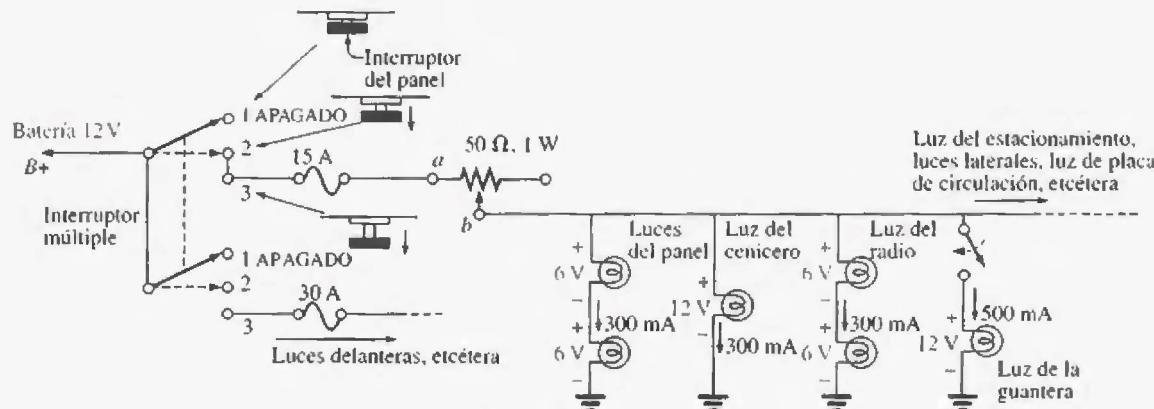


FIGURA 3.40
Control de la iluminación en el tablero de un automóvil.

siguiente capítulo. Básicamente, esta ley relaciona el voltaje, la corriente y la resistencia por medio de $I = V/R$. Para el foco de 12 V a una corriente clasificada de 300 mA, la resistencia es $R = V/I = 12 \text{ V}/300 \text{ mA} = 40 \Omega$. Para los focos de 6 V es de $6 \text{ V}/300 \text{ mA} = 80 \Omega$. Comentarios adicionales relativos a los niveles de potencia y resistencia se reservan para los capítulos subsiguientes.

La descripción precedente supuso un nivel ideal de 12 V para la batería. En realidad, se usan focos de 6.3 V y 14 V para equiparar el nivel de carga en la mayoría de los automóviles.

Extensómetros

Cualquier cambio en la forma de una estructura se puede detectar usando extensómetros cuya resistencia cambiará con las flexiones o esfuerzos aplicados. Un ejemplo de extensómetro se muestra en la figura 3.41. Los extensómetros son dispositivos semiconductores cuya resistencia terminal cambiará de manera no lineal a través de un amplio intervalo de valores al ser sometidos a esfuerzos de compresión o extensión. Como el extensómetro emite una señal, un procesador de señales también debe ser parte del sistema para trasladar el cambio en resistencia a una salida significativa. Un ejemplo sencillo del uso de extensómetros resitivos es el monitoreo de la actividad sísmica. Cuando el extensómetro se coloca a través de un área sospechosa de actividad sísmica, la más ligera separación en la Tierra cambiará la resistencia terminal, y el procesador mostrará un resultado sensible a la cantidad de la separación. Otro ejemplo es un sistema de alarma donde el más ligero cambio en la forma de una viga de soporte, cuando alguien camina por encima, resultará en un cambio de la resistencia terminal, y sonará una alarma. Otros ejemplos incluyen colocar extensómetros sobre puentes para mantener control de su rigidez y sobre generadores muy grandes para verificar si varios componentes móviles comienzan a separarse debido al desgaste de las chumaceras o los espaciadores. El pequeño ratón de control dentro del teclado de una computadora portátil puede estar constituido por una serie de extensómetros de esfuerzo que revelan la dirección del esfuerzo aplicado al elemento de control situado en el teclado. El

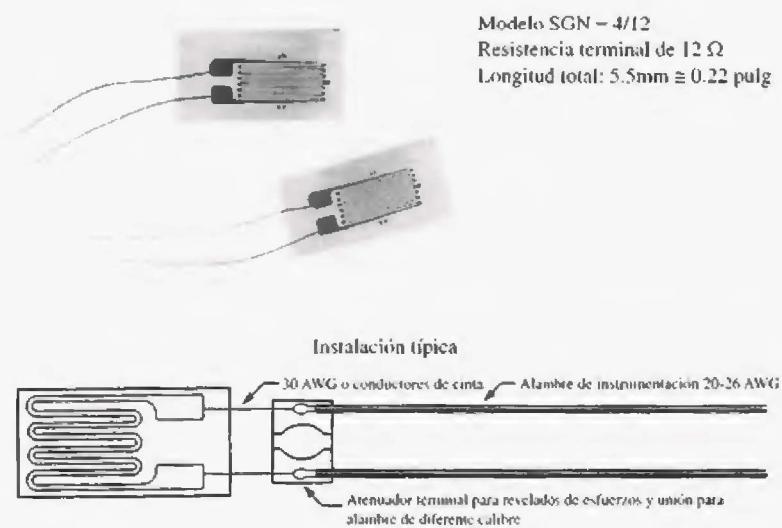


FIGURA 3.41

Extensómetro resistivo. (© Copyright Omega Engineering, Inc. Todos los derechos reservados. Reproducido con permiso de Omega Engineering, Inc., Stamford, CT 06907.)

movimiento en una dirección puede alargar o comprimir un extensómetro de resistencia que a su vez permite monitorear y controlar el movimiento del ratón sobre la pantalla.

3.15 MATHCAD

A lo largo del texto, se usará el paquete de software matemático llamado Mathcad para introducir toda la variedad de operaciones que es posible efectuar con esta avanzada herramienta de cómputo. No hay necesidad de obtener una copia del paquete de software para continuar con el material cubierto en este texto. La cobertura está a un nivel muy introductorio para presentar simplemente el alcance y poder del paquete. Todos los ejercicios que aparecen al final de cada capítulo pueden ser resueltos sin Mathcad.

Una vez instalado el paquete, todas las operaciones comienzan con la pantalla básica que muestra la figura 3.42. Las operaciones deben ser efectuadas en la secuencia que aparece en la figura 3.43, esto es, de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo. Por ejemplo, si una ecuación ubicada en la segunda línea va a operar sobre una variable específica, la variable debe estar definida a la izquierda o arriba de la ecuación.

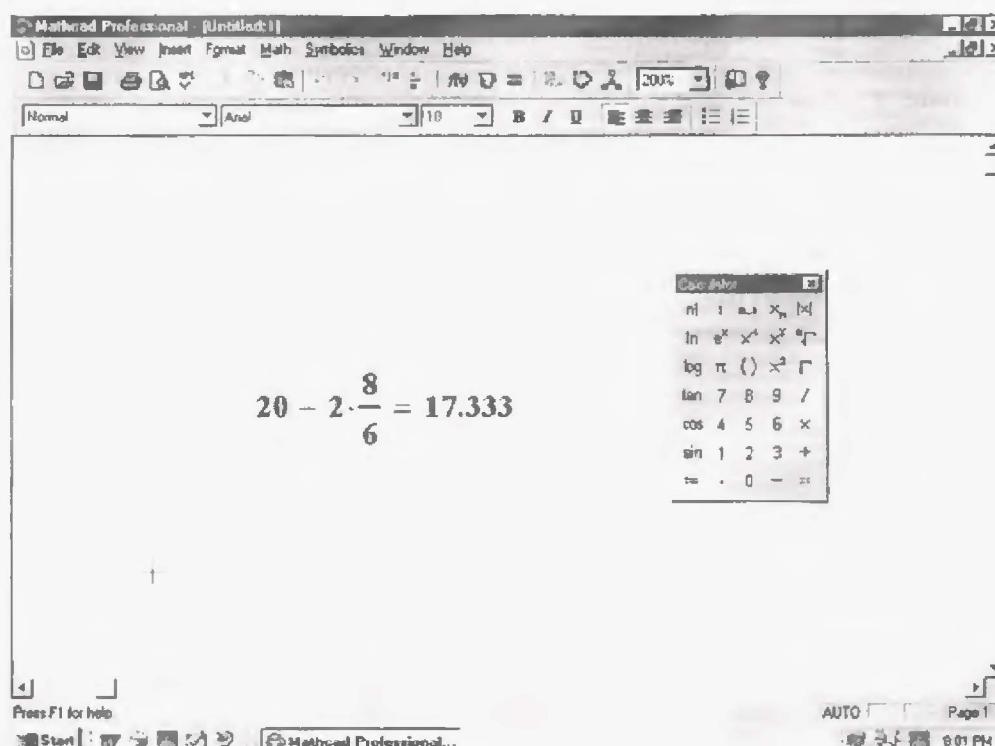
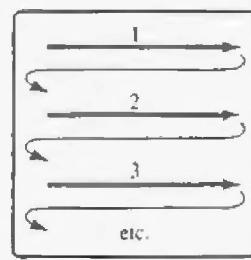


FIGURA 3.42
Uso de Mathcad para efectuar una operación matemática básica.

Para efectuar cualquier cálculo matemático, simplemente haga clic sobre la pantalla en cualquier punto conveniente para colocar un cursor sobre la pantalla (la localidad de la primera entrada). Luego, mecanografe la operación matemática tal como $20 - 2 \cdot 8/6$ como se muestra en la figura 3.42; al instante en que se selecciona el signo de igual, el resultado, 17.333, aparecerá como se muestra en la figura 3.42. La multiplicación se obtiene usando el asterisco (*), que en la mayoría de los teclados aparece arriba de la tecla del número 8.

(debajo de la tecla SHIFT CONTROL). La división se establece con la tecla **/** que en la mayoría de los teclados se ubica al fondo y a la derecha. El signo de igual se puede seleccionar en la esquina superior derecha del teclado. Otra posibilidad es aplicar la secuencia **View-Toolbars-Calculator** para obtener el dispositivo **Calculator** de la figura 3.42. Use entonces esta calculadora para introducir la expresión entera y obtener el resultado oprimiendo el botón izquierdo del ratón.

Como un ejemplo en el cual deben definirse variables, será determinada la resistencia de un tramo de alambre de cobre de 200 pies de largo y diámetro de 0.01 pulg. Primero, como se muestra en la figura 3.44, deben ser definidas las variables de resistividad, longitud y diámetro. Esto se logra llamando primero la paleta **Greek** por medio de **View-Toolbars-Greek** y seleccionando la letra griega rho (ρ) seguida por una operación combinada **Mayúsculas-dos puntos (Shift:)**. Aparecerán dos puntos y un signo de igual, después de lo cual se introduce **10.37**. Para todos los cálculos que siguen, el valor de ρ ha quedado definido. Oprimiendo el botón izquierdo del ratón sobre la pantalla retirará entonces el cerco rectangular y colocará la variable y su valor en la memoria. Proceda de la misma manera para definir la longitud l y el diámetro d . A continuación, se define el diámetro en milímetros multiplicando el diámetro en pulgadas por 1000, y el área se establece por el diámetro en milímetros cuadrados. Observe que m tuvo que ser definida a la izquierda de la expresión para el área, y la variable d fue definida en la línea superior. La potencia de 2 fue obtenida seleccionando primero el símbolo de superíndice (^) e introduciendo luego el número 2 en el corchete Mathcad. O simplemente se mecanografió la letra m y se selecciona **x²** en la paleta **Calculator**. De hecho, todas las operaciones de multiplicación, división, etc., requeridas para determinar la resistencia R pueden ser levantadas de la paleta **Calculator**.



Pantalla de la computadora

FIGURA 3.43
Definición del orden de operaciones matemáticas en Mathcad.

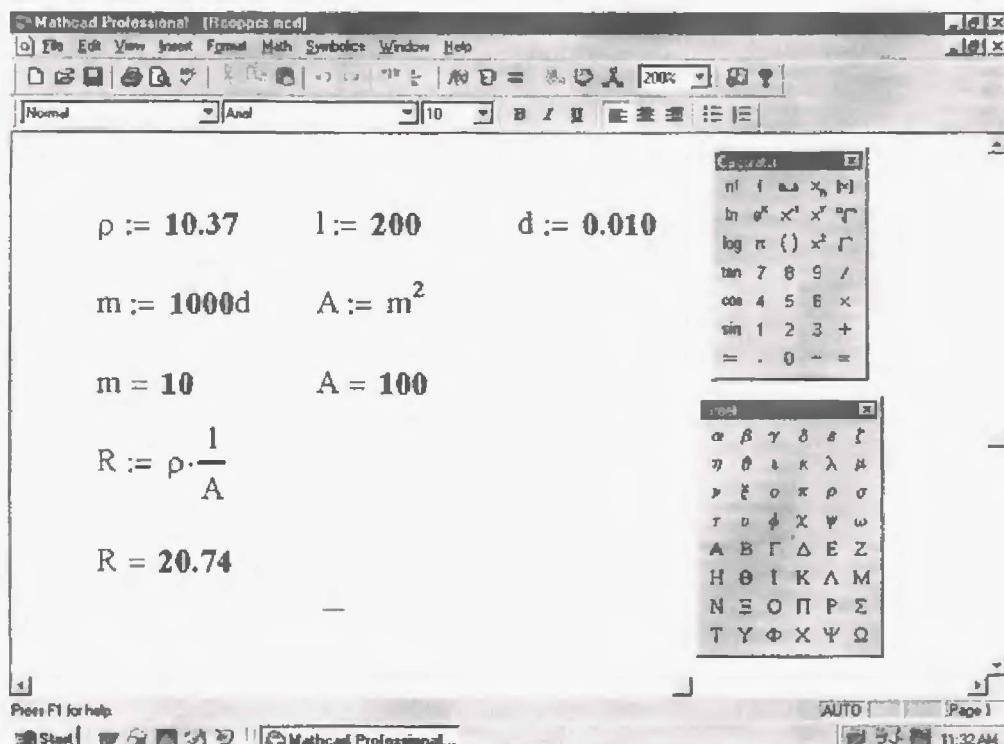


FIGURA 3.44
Uso de Mathcad para calcular la resistencia de un conductor de cobre.

En la figura 3.44, los valores de m y A fueron calculados mecanografiando m y en seguida el signo de igual del teclado. Finalmente, la ecuación para la resistencia R se define en términos de las variables y se obtiene el resultado. El verdadero valor de desarrollar la secuencia descrita reside en que puede colocarse el programa en la memoria y, cuando surja la necesidad, llamarlo, cambiar una variable o dos, y el resultado aparecerá inmediatamente. No es necesario reintroducir todas las definiciones, sino sólo cambiar el valor numérico.

En los capítulos subsiguientes, Mathcad aparecerá en cada oportunidad con el propósito de demostrar su capacidad para efectuar cálculos de manera rápida y efectiva. Probablemente el lector querrá aprender más acerca de esta posibilidad que ahorra tiempo y verifica la precisión.

PROBLEMAS

SECCIÓN 3.2 Resistencia: alambres circulares

1. Convierta lo siguiente a mils:

- | | |
|---------------|--------------|
| a. 0.5 pulg | b. 0.01 pulg |
| c. 0.004 pulg | d. 1 pulg |
| e. 0.02 pies | f. 0.01 cm |

2. Calcule el área, en mils circulares (CM), de alambres con los siguientes diámetros:

- | | |
|---------------|---------------|
| a. 0.050 pulg | b. 0.016 pulg |
| c. 0.30 pulg | d. 0.1 cm |
| e. 0.003 pies | f. 0.0042 m |

3. El área en mils circulares es:

- | | |
|--------------|-----------|
| a. 1600 CM | b. 900 CM |
| c. 40,000 CM | d. 625 CM |
| e. 7.75 CM | f. 81 CM |

¿Cuál es el diámetro de cada alambre en pulgadas?

4. ¿Cuál es la resistencia de un alambre de cobre de 200 pies de longitud y 0.01 pulg de diámetro ($T = 20^\circ\text{C}$)?

5. Encuentre la resistencia de un alambre de plata de 50 yardas de longitud y 0.0045 pulg de diámetro ($T = 20^\circ\text{C}$).

6. a. ¿Cuál es el área en mils circulares de un conductor de aluminio de 80 pies de longitud y resistencia de 2.5Ω ?

b. ¿Cuál es su diámetro en pulgadas?

7. Un resistor de 2.2Ω va a ser fabricado con alambre de cromoníquel. Si el alambre disponible mide $\frac{1}{32}$ pulg de diámetro, ¿cuánto se requiere para el resistor?

8. a. ¿Cuál es el área en mils circulares de un alambre de cobre que tiene una resistencia de 2.5Ω y 300 pies de longitud ($T = 20^\circ\text{C}$)?

b. Sin calcular la solución numérica, determine si el área de un alambre de aluminio será menor o mayor que la de un alambre de cobre. Explique su respuesta.

c. Resuelva (b) para un alambre de plata.

9. En la figura 3.45 se muestran tres conductores de distintos materiales.

a. Sin calcular la solución numérica, determine qué sección tiene la mayor resistencia. Explique su respuesta.

b. Encuentre la resistencia de cada sección y compárela con el resultado de (a) ($T = 20^\circ\text{C}$).

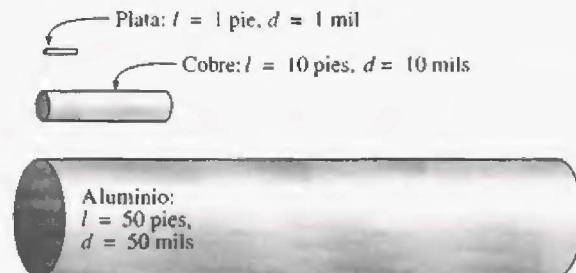


FIGURA 3.45
Problema 9.

10. Un alambre de 1000 pies de longitud tiene una resistencia de $0.5 \text{ k}\Omega$ y área de 94 CM . ¿De qué material está hecho este alambre ($T = 20^\circ\text{C}$)?

- *11. a. ¿Cuál es la resistencia de una placa de cobre con las dimensiones mostradas ($T = 20^\circ\text{C}$) en la figura 3.46?
- b. Resuelva (a) para aluminio y compare los resultados.
- c. Sin calcular la solución numérica, determine si la resistencia de la placa (aluminio o cobre) aumentará o disminuirá con un incremento de longitud. Explique su respuesta.
- d. Resuelva (c) para un incremento del área transversal.

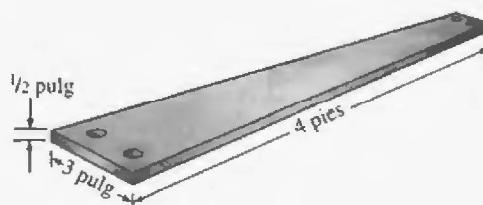


FIGURA 3.46
Problema 11.

12. Determine el incremento en resistencia de un conductor de cobre si el área se reduce por un factor de 4 y la longitud se duplica. La resistencia original era de 0.2Ω . La temperatura permanece constante.

- *13. ¿Cuál es el nuevo nivel de resistencia de un alambre de cobre si la longitud cambia de 200 pies a 100 yardas, el área cambia de 40,000 CM a 0.04 pulg², y la resistencia original era de 800 mΩ?

SECCIÓN 3.3 Tabla de calibres de alambre

14. a. Utilice la tabla 3.2 y encuentre la resistencia de 450 pies de alambre AWG calibres 11 y 14.
 b. Compare las resistencias de los dos tipos de alambre.
 c. Compare las áreas de ambos alambres.
15. a. Utilice la tabla 3.2 para encontrar la resistencia de 1800 pies de alambre AWG calibres 8 y 18.
 b. Compare las resistencias de los dos tipos de alambre.
 c. Compare las áreas de los dos tipos de alambre.
16. a. Para el sistema de la figura 3.47, la resistencia de cada línea no puede exceder de 0.006 Ω, y la corriente máxima extraída por la carga es de 110 A. ¿Qué calibre de alambre debe usarse?
 b. Resuelva (a) para una resistencia máxima de 0.003 Ω, $d = 30$ pies, y una corriente máxima de 110 A.

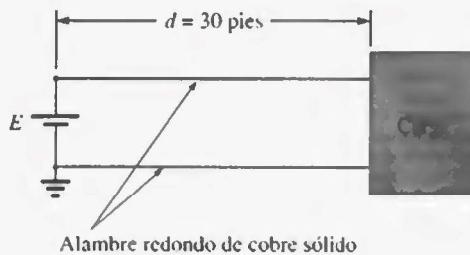


FIGURA 3.47
Problema 16.

- *17. a. A partir de la tabla 3.2, determine la densidad de corriente máxima permisible (A/CM) para un alambre AWG calibre 0000.
 b. Convierta el resultado de (a) a A/pulg².
 c. Utilice el resultado de (b) y determine el área transversal requerida para llevar una corriente de 5000 A.

SECCIÓN 3.4 Resistencia: unidades métricas

18. Utilice unidades métricas para determinar la longitud de un alambre de cobre que tiene una resistencia de 0.2 Ω y diámetro de 1/10 pulg.
 19. Resuelva el problema 11 usando unidades métricas; esto es, convierta las dimensiones dadas a unidades métricas antes de determinar la resistencia.
 20. Si la resistencia laminar de una muestra de óxido de estaño es de 100 Ω, ¿cuál es el espesor de la capa de óxido?
 21. Determine el ancho de un resistor de carbono que tiene resistencia laminar de 150 Ω, longitud de 1/2 pulg y resistencia de 500 Ω.
 *22. Obtenga el factor de conversión entre ρ (CM·Ω/pie) y ρ (Ω·cm) mediante:
 a. La resolución de ρ para el alambre de la figura 3.48 en CM·Ω/pie.

- b. La resolución de ρ para el mismo alambre de la figura 3.48 en Ω·cm, haciendo las conversiones necesarias.
 c. Use la ecuación $\rho_2 = k\rho_1$ para determinar el factor de conversión k si ρ_1 es la solución a la parte (a) y ρ_2 es la solución a la parte (b).

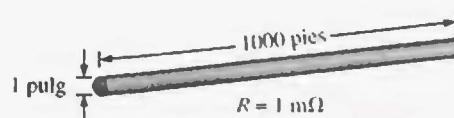


FIGURA 3.48
Problema 22.

SECCIÓN 3.5 Efectos de temperatura

23. La resistencia de un alambre de cobre es de 2 Ω a 10°C. ¿Cuál es su resistencia a 60°C?
 24. La resistencia de una placa de aluminio es de 0.02 Ω a 0°C. ¿Cuál es su resistencia a 100°C?
 25. La resistencia de un alambre de cobre es de 4 Ω a 70°F. ¿Cuál es su resistencia a 32°F?
 26. La resistencia de un alambre de cobre es de 0.76 Ω a 30°C. ¿Cuál es su resistencia a -40°C?
 27. Si la resistencia de un alambre de plata es de 0.04 Ω a -30°C, ¿cuál será su resistencia a 0°C?
 *28. a. La resistencia de un alambre de cobre es de 0.002 Ω a temperatura ambiente (68°F). ¿Cuál es su resistencia a 32°F (congelamiento) y a 212°F (ebullición)?
 b. Para (a), determine el cambio en resistencia por cada cambio de 10° en temperatura entre la temperatura ambiente y 212°F.
 29. a. La resistencia de un alambre de cobre es de 0.92 Ω a 4°C; ¿a qué temperatura (°C) será de 1.06 Ω?
 b. ¿A qué temperatura estará en 0.15 Ω?
 *30. a. Si la resistencia de un alambre de cobre de 1000 pies de longitud es de 10 Ω a temperatura ambiente (20°C), ¿cuál será su resistencia a 50 K (grados Kelvin) usando la ecuación (3.6)?
 b. Resuelva la parte (a) para una temperatura de 38.65 K. Comente los resultados obtenidos mediante el análisis de la curva presentada en la figura 3.14.
 c. ¿Cuál es la temperatura del cero absoluto en unidades Fahrenheit?
 31. a. Verifique el valor de α_{20} para el cobre en la tabla 3.6 sustituyendo la temperatura absoluta inferida en la ecuación (3.7).
 b. Utilice la ecuación (3.8) y encuentre la temperatura a la que la resistencia de un conductor de cobre aumentará a 1 Ω desde un nivel de 0.8 Ω a 20°C.
 32. Utilice la ecuación (3.8) para encontrar la resistencia de un alambre de cobre a 16°C si su resistencia a 20°C es de 0.4 Ω.
 *33. Determine la resistencia de una bobina de 1000 pies de alambre de cobre calibre 12 situada en el desierto a una temperatura de 115°F.
 34. Un resistor de 22 Ω de alambre embobinado está clasificado a +200 PPM para un intervalo de temperatura de -10°C a +75°C. Determine su resistencia a 65°C.

35. Determine la clasificación en PPM del resistor de 10 k Ω de compuesto de carbono que se muestra en la figura 3.19 usando el nivel de resistencia determinado a 90°C.

SECCIÓN 3.6 Superconductores

36. Visite su biblioteca local y encuentre una tabla que dé las temperaturas críticas de varios materiales. Busque por lo menos cinco materiales, con sus temperaturas críticas, que no estén mencionadas en este texto. Escoja algunos materiales que tengan temperaturas críticas relativamente altas.
 37. Encuentre por lo menos un artículo sobre la aplicación de la superconductividad en el sector comercial, y escriba un pequeño resumen, incluyendo todos los hechos y cifras interesantes.
 - *38. Utilice el nivel de densidad requerido de 1 MA/cm^2 para la fabricación de circuitos integrados, determine qué corriente resultante se tendrá a través de un alambre casero del número 12. Compare el resultado obtenido con el límite permisible de la tabla 3.2.
 - *39. Investigue el detector de campo magnético SQUID y repase su modo básico de operación y una o dos aplicaciones.

SECCIÓN 3.7 Tipos de resistores

40. a. ¿Cuál es el aumento aproximado en tamaño de un resistor de carbono de 1 W a otro de 2 W?
b. ¿Cuál es el aumento aproximado en tamaño de un resistor de carbono de 1/2 W a otro de 2 W?
c. En general, ¿podemos concluir que para el mismo tipo de resistor, un incremento en la clasificación por potencia requiere un aumento en el tamaño (volumen)? ¿Se trata de una relación casi lineal? Esto es, ¿una potencia doble requiere un aumento en tamaño de 2:1?

41. Si el resistor de 10 k Ω que muestra la figura 3.19 es exactamente de 10 k Ω a temperatura ambiente, ¿cuál será su resistencia aproximada a -30°C y a 100°C (ebullición)?

42. Resuelva el problema 41 para una temperatura de 120°F.

43. Si la resistencia entre las terminales exteriores de un potenciómetro lineal es de 10 k Ω , ¿cuál es su resistencia entre el brazo deslizable de contacto y una terminal exterior si la resistencia entre el brazo deslizable de contacto y la otra terminal exterior es de 3.5 k Ω ?

44. Si el brazo deslizable de contacto de un potenciómetro lineal es un cuarto de la longitud alrededor de la superficie de contacto, ¿cuál es la resistencia entre el brazo y cada terminal si la resistencia total es de 25 k Ω ?

*45. Muestre las conexiones requeridas para establecer 4 k Ω entre el brazo deslizable de contacto y una terminal exterior de un potenciómetro de 10 k Ω si se tiene cero ohms entre la otra terminal exterior y el brazo deslizable.

SECCIÓN 3.8 Código de color y valores estándar de resistores

46. Encuentre el intervalo en que un resistor con las siguientes bandas de color debe situarse para satisfacer la tolerancia del fabricante:

	1a banda	2a banda	3a banda	4a banda
a.	verde	azul	anaranjado	oro
b.	rojo	rojo	café	plata
c.	café	negro	negro	—

47. Encuentre el código de color para los siguientes resistores de 10%.

a. $220\ \Omega$ b. $4700\ \Omega$
c. $68\ k\Omega$ d. $9.1\ M\Omega$

48. ¿Existe traslape en cobertura entre resistores de 20%? Esto es, determine el intervalo de tolerancia para un resistor de $10\ \Omega$ de 20% y un resistor de $15\ \Omega$ de 20%, y observe si sus intervalos de tolerancia se traslanan.

49. Resuelva el problema 48 para resistores de 10% del mismo valor.

SECCIÓN 3.9 Conductancia

50. Encuentre la conductancia de cada una de las siguientes resistencias:

 - a. 0.086Ω
 - b. $4 \text{ k}\Omega$
 - c. $2.2 \text{ M}\Omega$

Compare los tres resultados.

51. Encuentre la conductancia de 1000 pies de alambre AWG calibre 18 fabricado en:

 - a. cobre
 - b. aluminio
 - c. hierro

*52. La conductancia de un alambre es 100 S. Si el área del alambre se incrementa en $2/3$ y la longitud se reduce en la misma cantidad, encuentre la nueva conductancia del alambre si la temperatura permanece constante.

SECCIÓN 3.10 Ohmímetros

53. ¿Cómo se revisaría la condición de un fusible utilizando un ohmímetro?

54. ¿Cómo se determinarían los estados encendido y apagado de un interruptor usando un ohmímetro?

55. ¿Cómo se usaría un ohmímetro para revisar la condición de un foco eléctrico?

SECCIÓN 3.11 Termistores

- *56. a. Encuentre la resistencia del termistor que tenga las características de la figura 3.34 a -50°C , 50°C y 200°C . Advierta que es una escala logarítmica. De ser necesario, consulte una referencia con una escala logarítmica ampliada.

b. ¿Tiene el termistor un coeficiente térmico positivo o negativo?

c. ¿Es el coeficiente un valor fijo para el intervalo de -100°C a 400°C ? ¿Por qué?

d. ¿Cuál es la razón de cambio aproximada de ρ con la temperatura a 100°C ?

SECCIÓN 3.12 Celda fotoconductora

- *57. a. Usando las características de la figura 3.36, determine la resistencia de la celda fotoconductora a 10 y 100 pie-



- candelas de iluminación. Como en el problema 56, observe que se trata de una escala logarítmica.
- b. ¿Tiene la celda un coeficiente de iluminación positivo o negativo?
 - c. ¿Es el coeficiente un valor fijo para el intervalo de 0.1 a 1000 pie-candelas? ¿Por qué?
 - d. ¿Cuál es la razón de cambio aproximada de R con la iluminación a 10 pie-candelas?

SECCIÓN 3.13 Varistores

58. a. Con referencia a la figura 3.38(a), encuentre el voltaje terminal del dispositivo a 0.5 mA, 1 mA, 3 mA y 5 mA.

GLOSARIO

Celda fotoconductora Dispositivo semiconductor de dos terminales cuya resistencia terminal está determinada por la intensidad de la luz incidente sobre su superficie expuesta.

Cero absoluto Temperatura a la que todo movimiento molecular cesa: -273.15°C .

Código de color Técnica que emplea bandas de color para indicar los valores de resistencia y tolerancia de resistores.

Coeficiente térmico de resistencia negativo Valor indicativo de que la resistencia de un material disminuirá con un incremento en la temperatura.

Coeficiente térmico de resistencia positivo Valor indicativo de que la resistencia de un material aumentará con un incremento en la temperatura.

Conductancia (G) Indicación de la facilidad relativa con que una corriente puede establecerse en un material. Se mide en siemen (S).

Ductilidad Propiedad de un material que le permite ser estirado en forma de alambres largos y delgados.

Efecto Cooper "Enlace" de electrones cuando viajan a través de un medio.

Maleabilidad Propiedad de un material que le permite ser moldeado en muchas formas diferentes.

Mil circular (CM) Área transversal de un alambre con diámetro de un mil.

- b. ¿Cuál es el cambio total en voltaje para el intervalo indicado de niveles de corriente?
- c. Compare la razón de niveles máximo a mínimo de corriente arriba de la razón correspondiente de niveles de voltaje.

SECCIÓN 3.15 Mathcad

- 59. Verifique los resultados del ejemplo 3.3 usando Mathcad.
- 60. Verifique los resultados del ejemplo 3.11 usando Mathcad.

Ohm (Ω) Unidad de medición aplicada a la resistencia.

Ohmímetro Instrumento para medir valores de resistencia.

Potenciómetro Dispositivo de tres terminales a través del cual se pueden variar los niveles de potencial de manera lineal o no lineal.

PPM/ $^{\circ}\text{C}$ Sensibilidad por temperatura de un resistor en partes por millón por grado Celsius.

Reóstato Elemento cuya resistencia terminal puede ser variada de manera lineal o no lineal.

Resistencia Medida de la oposición al flujo de carga a través de un material.

Resistencia laminar Está definida como ρ/d para el diseño de películas delgadas y circuitos integrados.

Resistividad (ρ) Constante de proporcionalidad entre la resistencia de un material y sus dimensiones físicas.

Supercorriente Conductores de carga eléctrica que para todo propósito práctico tienen cero ohms.

Temperatura absoluta inferior Temperatura a través de la cual una aproximación lineal para la curva de resistencia real en función de la temperatura intersecará el eje de temperaturas.

Termistor Dispositivo semiconductor de dos terminales cuya resistencia es sensible a la temperatura.

Varistor Resistor no lineal, dependiente del voltaje, usado para suprimir transitorios de alto voltaje.