

Resistencia

A3

Objetivos

- *Familiarizarse con los parámetros que determinan la resistencia de un elemento y ser capaz de calcular la resistencia a partir de las características del material y de las dimensiones dadas.*
- *Entender los efectos de la temperatura en la resistencia de un material, y cómo calcular su cambio con la temperatura.*
- *Desarrollar cierta comprensión acerca de los superconductores y cómo pueden afectar el desarrollo futuro en la industria.*
- *Familiarizarse con la amplia variedad de resistores comercialmente disponibles en la actualidad y cómo leer su valor a partir del código de colores o etiquetas.*
- *Enterarse de una variedad de elementos como termistores, celdas fotoconductoras y resistores, y cómo se controla su resistencia.*

A3.1 INTRODUCCIÓN

En el anexo anterior vimos que si establecemos un voltaje a través de un alambre o un circuito sencillo se crea un flujo de carga, o corriente eléctrica, a través del cable o del circuito. Sin embargo, la pregunta permanece: ¿qué determina el nivel de la corriente resultante cuando se aplica un voltaje particular? ¿Por qué la corriente eléctrica es más intensa en algunos circuitos que en otros? Las respuestas radican en el hecho de que hay una oposición al flujo de carga en el sistema que depende de los componentes del circuito. Esta oposición al flujo de carga a través de un circuito eléctrico, llamada **resistencia eléctrica**, se mide en **ohms** y se le aplica la letra griega *omega* (Ω) como símbolo. En la figura A3.1 se muestra el símbolo gráfico para la resistencia, el cual se parece al filo de corte de una sierra.

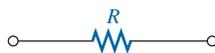
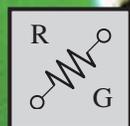


FIG. A3.1

Símbolo y notación de la resistencia.

Esta oposición, debida principalmente a las colisiones y fricción entre los electrones libres y a la presencia de otros electrones, iones y átomos en la trayectoria del movimiento, convierte en **calor** la energía eléctrica suministrada, el cual a su vez eleva la temperatura del componente eléctrico y del medio circundante. El calor que emite un calentador eléctrico y que se percibe, es simplemente el resultado del paso de la corriente eléctrica a través de un material de alta resistencia.

Cada material con su estructura atómica única reacciona de forma diferente a las presiones para establecer una corriente eléctrica a través de su núcleo. Los conductores que permiten un flujo generoso de carga eléctrica con poca presión externa tienen bajos niveles de resistencia, en tanto que los aislantes tienen características de alta resistencia.



A3.2 RESISTENCIA: ALAMBRES CIRCULARES

La resistencia de cualquier material se debe en principio a cuatro factores:

1. *Material*
2. *Longitud*
3. *Área de sección transversal*
4. *Temperatura del material*

Como se señaló en la sección A3.1, la estructura atómica determina la facilidad con que un electrón libre pasará a través de un material. Cuanto más larga sea la trayectoria por la cual deba pasar el electrón, mayor será el factor de resistencia. Los electrones libres pasan más fácilmente a través de conductores con secciones transversales grandes. Además, a mayor elevación de la temperatura de los materiales conductivos, mayores serán la vibración y movimientos internos de los componentes que conforman la estructura atómica del alambre y, en consecuencia, será más difícil para los electrones libres encontrar una trayectoria a través del material.

Los primeros tres elementos están relacionados mediante las siguientes ecuaciones básicas para la resistencia:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad \begin{array}{l} \rho = \text{MC-}\Omega/\text{pie a } T = 20^\circ\text{C} \\ l = \text{pies} \\ A = \text{área en mils circulares (MC)} \end{array} \quad (\text{A3.1})$$

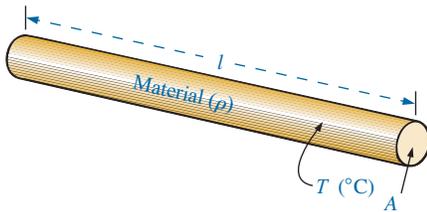


FIG. A3.2

Factores que afectan la resistencia de un conductor.

TABLA A3.1
Resistividad (ρ) de varios materiales

Material	ρ (MC- Ω /pies) @ 20 °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
Nicromo	600.0
Calorita	720.0
Carbón	21,000.0

con cada componente de la ecuación definida por la figura A3.2.

Un factor llamado **resistividad** identifica al material, al cual se le aplica la letra griega *rho* (ρ) como símbolo y se mide en MC- Ω /pies. Su valor a una temperatura de 20 °C (temperatura ambiente = 68 °F) se da en la tabla A3.1 para varios materiales comunes. Puesto que a mayor resistividad, mayor es la resistencia para iniciar un flujo de carga, aparece como un factor multiplicador en la ecuación (A3.1); es decir, aparece en el numerador de la ecuación. Es importante tener en cuenta en este momento que como la resistividad se da a una temperatura particular, la *ecuación (A3.1) es válida sólo a temperatura ambiente*. En la sección A3.4 se considera el efecto de las temperaturas bajas y altas.

Como la resistividad está en el numerador de la ecuación (A3.1), *cuanto más alta sea la resistividad, mayor será la resistencia de un conductor* como se muestra para dos conductores de la misma longitud en la figura A3.3(a). Además,

cuanto más largo es el conductor, mayor es la resistencia

puesto que la longitud también aparece en el numerador de la ecuación (A3.1). Observe la figura A3.3(b). Por último,

cuanto más grande es el área de un conductor, menor es la resistencia

porque el área aparece en el denominador de la ecuación (A3.1). Observe la figura A3.3(c).

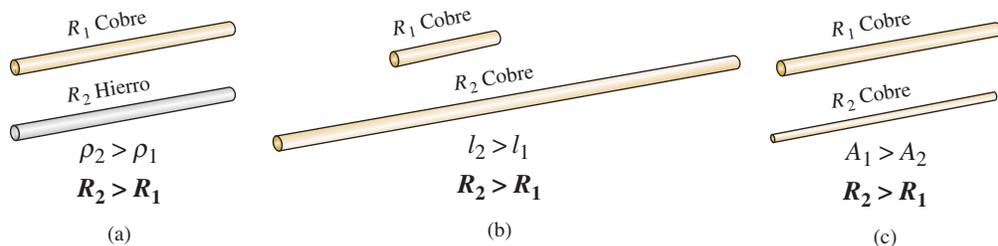


FIG. A3.3

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

Mils circulares (MC)

En la ecuación (A3.1) el área está en **mils circulares (MC)**. Es la unidad que se utiliza en la mayoría de las tablas de conductores comerciales, y por lo tanto tiene que definirse con cuidado. El *mil* (milésimo de pulgada) es una unidad de longitud y está relacionada con la pulgada como sigue

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

o bien,

$$1000 \text{ mils} = 1 \text{ pulg.}$$

Por consiguiente, el mil es una unidad de medición de longitud muy pequeña. Hay 1000 mils en una pulgada, o bien 1 mil es sólo 1/1000 de pulgada. Es una longitud no visible a simple vista, aunque puede medirse con instrumentos especiales. La frase *milling* que se emplea en las fábricas de acero se deriva de que para eliminar algunos mils de material se suele utilizar maquinaria pesada (por ejemplo un torno), y de que por lo general el espesor del acero se mide en mils.

Por definición,

el área de un alambre de 1 mil de diámetro es de 1 MC,

como se muestra en la figura A3.4.

Un resultado interesante de la definición anterior es que el área de un alambre circular en mils circulares puede definirse mediante la siguiente ecuación:

$$A_{MC} = (d_{\text{mils}})^2 \quad (\text{A3.2})$$

En la figura A3.5 aparece la comprobación de esta ecuación, la cual muestra que un alambre de 2 mils de diámetro tiene un área total de 4 MC, y un alambre de 3 mils de diámetro tiene un área total de 9 MC.

Recuerde que para calcular el área de un alambre en mils circulares cuando el diámetro está en pulgadas, primero debe convertir el diámetro en mils escribiéndolo simplemente en forma decimal y recorriendo el punto decimal tres lugares a la derecha. Por ejemplo,

$$\frac{1}{8} \text{ pulg.} = 0.125 \text{ pulg.} = \underset{\substack{\uparrow \\ 3 \text{ lugares}}}{125} \text{ mils}$$

Entonces el área la determina

$$A_{MC} = (d_{\text{mils}})^2 = (125 \text{ mils})^2 = \mathbf{15,625 \text{ MC}}$$

En ocasiones, cuando trabaje con conductores que no sean circulares tendrá que convertir los mils al cuadrado en mils circulares, y viceversa. Aplicando la ecuación básica al área de un círculo y sustituyendo por un diámetro de 1 mil se obtiene

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi}{4} (1 \text{ mil})^2 = \frac{\pi}{4} \text{ mils al cuadrado} \stackrel{\text{por definición}}{\equiv} 1 \text{ MC}$$

por lo que podemos concluir lo siguiente:

$$1 \text{ MC} = \frac{\pi}{4} \text{ mils al cuadrado} \quad (\text{A3.3})$$

o bien

$$1 \text{ mil al cuadrado} = \frac{4}{\pi} \text{ MC} \quad (\text{A3.4})$$

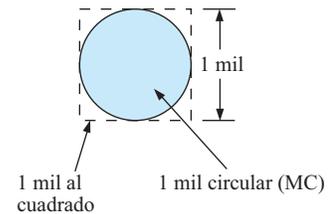


FIG. A3.4

Definición del mil circular (MC).

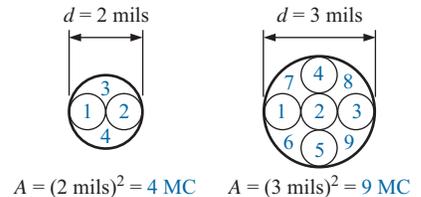


FIG. A3.5

Comprobación de la ecuación (A3.2): $A_{MC} = (d_{\text{mils}})^2$.

EJEMPLO A3.1 ¿Cuál es la resistencia de un alambre de cobre de 100 pies de longitud y diámetro de 0.020 pulg., a 20 °C?

Solución:

$$\rho = 10.37 \frac{\text{MC-}\Omega}{\text{pies}} \quad 0.020 \text{ pulg.} = 20 \text{ mils}$$

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

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

$$R = \mathbf{2.59 \Omega}$$



FIG. A3.6
Ejemplo A3.2.

EJEMPLO A3.2 Del cartón que se muestra en la figura A3.6 se utilizó un número indeterminado de pies de alambre. Determine la longitud del alambre de cobre restante si su diámetro es de 1/16 pulg. y su resistencia de 0.5 Ω.

Solución:

$$\rho = 10.37 \text{ MC-}\Omega/\text{pies} \quad \frac{1}{16} \text{ pulg.} = 0.0625 \text{ pulg.} = 62.5 \text{ mils}$$

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

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

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

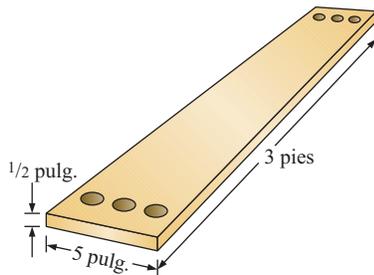


FIG. A3.7
Ejemplo A3.3.

EJEMPLO A3.3 ¿Cuál es la resistencia de una barra conductora de cobre, como las que se utilizan en el tablero de distribución de potencia de un rascacielos de oficinas, con las dimensiones indicadas en la figura A3.7?

Solución:

$$A_{\text{MC}} \left\{ \begin{array}{l} 5.0 \text{ pulg.} = 5000 \text{ mils} \\ \frac{1}{2} \text{ pulg.} = 500 \text{ mils} \\ A = (5000 \text{ mils})(500 \text{ mils}) = 2.5 \times 10^6 \text{ sq mils} \\ = 2.5 \times 10^6 \text{ mils al cuadrado} \left(\frac{4/\pi \text{ MC}}{1 \text{ sq mil}} \right) \\ A = 3.183 \times 10^6 \text{ MC} \end{array} \right.$$

$$R = \rho \frac{l}{A} = \frac{(10.37 \text{ MC-}\Omega/\text{pies})(3 \text{ pies})}{3.183 \times 10^6 \text{ MC}} = \frac{31.11}{3.183 \times 10^6}$$

$$R = \mathbf{9.774 \times 10^{-6} \Omega}$$

(muy pequeña, $0.000009774 \Omega \cong 0 \Omega$)

En los siguientes anexos aprenderá que a menor resistencia de un conductor, menores son las pérdidas de conducción de la fuente a la carga.

Asimismo, dado que la resistividad es un factor importante al determinar la resistencia de un conductor, cuanto más baja es la resistividad, más baja es la resistencia en un conductor respecto de un conductor del mismo tamaño con una resistividad mayor. Según la tabla A3.1 parecería que la plata, el cobre, el oro y el aluminio serían los mejores conductores y los más comunes. Sin embargo, hay otros factores, como la **maleabilidad** (capacidad de un material de ser formado), la **ductilidad** (capacidad de un material de ser estirado en forma de alambres largos y delgados), la sensibilidad a la temperatura, la resistencia al mal trato, y, por supuesto, el costo, que se deben valorar al elegir un conductor para una aplicación particular.

El cobre es el material de más uso porque es bastante maleable, dúctil y abundante; tiene buenas características térmicas, y es menos caro que la plata o el oro, aun cuando en realidad no sea barato. Antes de demoler un edificio, los contratistas se aseguran de retirar el cableado de cobre por su valor de recuperación. El aluminio se utilizó ocasionalmente para cableado general porque es más barato que el cobre, pero sus características térmicas provocaron algunas dificultades. El calentamiento provocado por el flujo de la corriente eléctrica y el enfriamiento que ocurría cuando se apagaba el circuito, hacían que el alambre de aluminio se expandiera y contrajera a tal grado que las conexiones terminaban por aflojarse, lo que daba lugar a efectos secundarios peligrosos. Sin embargo, el aluminio se sigue utilizando en la fabricación de circuitos integrados y en situaciones en que las conexiones pueden hacerse seguras. La plata y el oro son, desde luego, mucho más caros que el cobre o el aluminio, pero el costo se justifica en ciertas aplicaciones. La plata es excelente para enchapar superficies, y el oro se utiliza bastante en circuitos integrados. La resistividad del tungsteno es tres veces la del cobre, pero en ocasiones sus características físicas de durabilidad y dureza son las consideraciones de mayor importancia.

A3.3 TABLAS DE CALIBRES DE CONDUCTORES ELÉCTRICOS

La tabla de calibres de conductores se diseñó en principio para estandarizar el calibre de los conductores, ya sea alambre o cable producido por los fabricantes. En consecuencia, el fabricante tiene un mercado más grande y el consumidor sabe que siempre habrá disponibilidad de calibres estándar. La tabla se diseñó para ayudar al usuario en todas las formas posibles; incluye datos como el área de sección transversal en mils circulares, el diámetro en mils, ohms por 1000 pies a 20 °C, y el peso por 1000 pies.

Los calibres American Wire Gage (AWG) se presentan en la tabla A3.2 para alambre sólido, redondo, de cobre. También se incluyó una columna que indica la corriente eléctrica máxima permisible en amperes, determinada por la National Fire Protection Association estadounidense.

Los calibres seleccionados guardan una interesante relación:

El área se duplica por cada reducción de 3 números de calibre y se incrementa por un factor de 10 para cada reducción de 10 números de calibre.

Si examinamos la ecuación (A3.1), observamos también que *si duplicamos el área, la resistencia se reduce a la mitad, y si la incrementamos por un factor de 10 se reduce 1/10 de su valor original*; todo lo demás se mantiene constante.

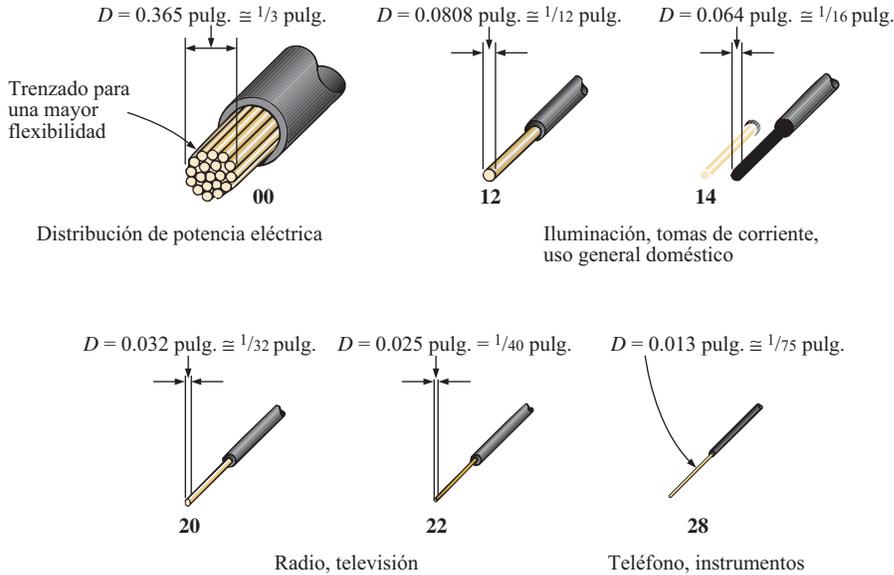
Los calibres reales de algunos conductores listados en la tabla A3.2 se muestran en la figura A3.8 con algunas de sus áreas de aplicación. A continuación se dan algunos ejemplos del uso de la tabla A3.2.

TABLA A3.2
Calibres según la American Wire Gage (AWG).

AWG #	Área (MC)	$\Omega/1000$ pies a 20 °C	Corriente eléctrica máxima permisible para aislamiento de RHW(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	130
	2	66,373	115
	3	52,634	100
	4	41,742	85
	5	33,102	—
	6	26,250	65
	7	20,816	—
	8	16,509	50
	9	13,094	—
	10	10,381	30
	11	8,234.0	—
	12	6,529.9	20
	13	5,178.4	—
	14	4,106.8	15
	15	3,256.7	
	16	2,582.9	
	17	2,048.2	
	18	1,624.3	
	19	1,288.1	
	20	1,021.5	
	21	810.10	
	22	642.40	
	23	509.45	
	24	404.01	
	25	320.40	
	26	254.10	
	27	201.50	
	28	159.79	
	29	126.72	
	30	100.50	
	31	79.70	
	32	63.21	
	33	50.13	
	34	39.75	
	35	31.52	
	36	25.00	
	37	19.83	
	38	15.72	
	39	12.47	
	40	9.89	

*No más de tres conductores en un ducto, cable, o enterrados directamente.

Fuente: Reimpresión con permiso de NFPA No. SPP-6C, National Electrical Code®, derechos reservados © 1996, National Fire Protection Association, Quincy, MA 02269. El material reimpreso no es la posición completa y oficial de la NFPA en relación con el tema citado, la cual está representada sólo por la norma en su totalidad. *National Electrical Code* es una marca registrada de la National Fire Protection Association, Inc., Quincy, MA, para una publicación trienal sobre electricidad. El término *National Electrical Code*, como se utiliza aquí, se refiere a la publicación trienal que constituye el National Electrical Code y se utiliza con permiso de la National Fire Protection Association.


FIG. A3.8

Calibres de conductores de uso común y algunas de sus áreas de aplicación.

EJEMPLO A3.4 Determine la resistencia de 650 pies de alambre de cobre #8 ($T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$).

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

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

EJEMPLO A3.5 ¿Cuál es el diámetro, en pulgadas, de un alambre de cobre #12?

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

$$d_{\text{mils}} = \sqrt{A_{\text{MC}}} = \sqrt{6529.9\ \text{MC}} \approx 80.81 \text{ mils}$$

$$d = \mathbf{0.081 \text{ pulg.}} \text{ (o casi } 1/12 \text{ pulg.)}$$

EJEMPLO A3.6 La resistencia total de cada línea de potencia del sistema mostrado en la figura A3.9 no puede exceder de $0.025\ \Omega$, y la corriente eléctrica máxima absorbida por la carga es de 95 A. ¿Qué calibre de alambre se debe utilizar?

Solución:

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

Para satisfacer el requisito de resistencia, seleccionamos en la tabla de calibres de conductores el alambre con la siguiente área más grande, el cual es el #4. Observamos, sin embargo, que a través de la línea deben fluir 95 A. Esta especificación requiere que se utilice **alambre #3** puesto que el #4 puede transportar una corriente eléctrica máxima de 85 A.

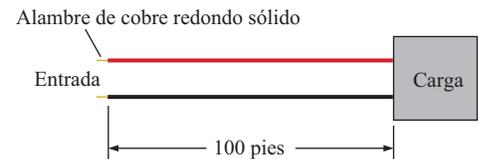


FIG. A3.9
Ejemplo A3.6.

A3.4 EFECTOS DE LA TEMPERATURA

La temperatura tiene un efecto significativo en la resistencia de conductores, semiconductores y aislantes.

Conductores

Los conductores tienen una gran cantidad de electrones libres, y cualquier introducción de energía térmica tendrá poco impacto en el total de portadores libres. De hecho, la energía térmica sólo incrementa la intensidad del movimiento aleatorio de las partículas dentro del material, y hace cada vez más difícil el desplazamiento general de los electrones en cualquier dirección. El resultado es que

para buenos conductores, un aumento en la temperatura eleva el nivel de resistencia. Por consiguiente, los conductores tienen un coeficiente de temperatura positivo.

La curva que se muestra en la figura A3.10(a) tiene un coeficiente de temperatura positivo.

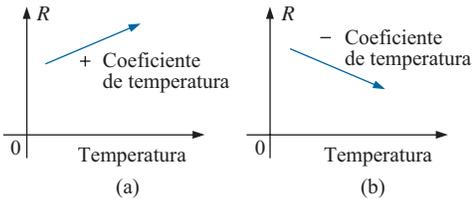


FIG. A3.10

Demostración del efecto de un coeficiente de temperatura positivo y uno negativo sobre la resistencia de un conductor.

Semiconductores

En semiconductores, un aumento en la temperatura imparte una cierta energía térmica al sistema, que a su vez incrementa el número de portadores en el material para conducción. El resultado es que

para materiales semiconductores, un aumento en la temperatura reduce el nivel de la resistencia. Por consiguiente, los semiconductores tienen coeficientes de temperatura negativos.

El termistor y la celda fotoconductor que se estudian en las secciones A3.12 y A3.13, respectivamente, son ejemplos excelentes de dispositivos semiconductores con coeficientes de temperatura negativos. La curva en la figura A3.10(b) tiene un coeficiente de temperatura negativo.

Aislantes

Al igual que con los semiconductores, un aumento en la temperatura reduce la resistencia de un aislante. El resultado es un coeficiente de temperatura negativo.

Temperatura absoluta inferida

La figura A3.11 revela que para el cobre (y la mayoría de otros conductores metálicos) la resistencia se incrementa casi linealmente (en una relación de

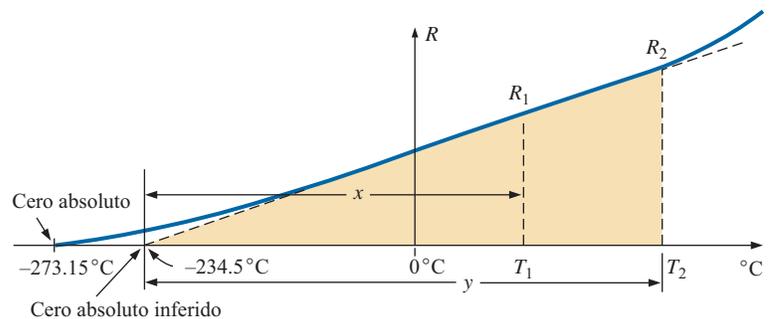


FIG. A3.11

Efecto de la temperatura sobre la resistencia del cobre.

recta) con un aumento en la temperatura. Como la temperatura puede tener un marcado efecto sobre la resistencia de un conductor, es importante que contemos con un método para determinar la resistencia a cualquier temperatura dentro de los límites de operación. Una ecuación para este propósito puede obtenerse aproximando la curva de la figura A3.11 con la línea punteada que corta la escala de temperatura en $-234.15\text{ }^\circ\text{C}$. Aunque la curva real se extiende hasta el **cero absoluto** ($-273.15\text{ }^\circ\text{C}$, o 0 K), la aproximación de recta es bastante precisa para el intervalo de temperatura de operación normal. A dos temperaturas T_1 y T_2 , la resistencia del cobre es R_1 y R_2 , respectivamente, como se indica en la curva. Utilizando la propiedad de triángulos semejantes podemos desarrollar una relación matemática entre estos valores de resistencia a diferentes temperaturas. Sea x la distancia de $-234.5\text{ }^\circ\text{C}$ a T_1 y que y sea la distancia de $-234.5\text{ }^\circ\text{C}$ a T_2 , como se muestra en la figura A3.11. Por los triángulos semejantes,

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

o bien,

$$\boxed{\frac{234.5 + T_1}{R_1} = \frac{234.5 + T_2}{R_2}} \quad (\text{A3.5})$$

La temperatura de $-234.5\text{ }^\circ\text{C}$ se conoce como **temperatura absoluta inferida** del cobre. Para materiales conductores diferentes, la intersección de la aproximación de recta ocurre a diferentes temperaturas. En la tabla A3.3 se enlistan algunos valores comunes.

El signo menos no aparece con la temperatura absoluta inferida en ningún miembro de la ecuación (A3.5) porque x y y son las *distancias* de $-234.5\text{ }^\circ\text{C}$ a T_1 y T_2 , respectivamente y, por consiguiente, son simplemente magnitudes. Para T_1 y T_2 menores que cero, x y y son menores que $-234.5\text{ }^\circ\text{C}$ y las distancias son las diferencias entre la temperatura absoluta inferida y la temperatura de interés.

La ecuación (A3.5) puede adaptarse con facilidad a cualquier material al insertar la temperatura absoluta inferida apropiada. Por consiguiente, puede escribirse como sigue:

$$\boxed{\frac{|T_1| + T_1}{R_1} = \frac{|T_1| + T_2}{R_2}} \quad (\text{A3.6})$$

donde $|T_1|$ indica que la temperatura absoluta inferida del material implicado se inserta como un valor positivo en la ecuación. De modo que asocie el signo sólo con T_1 y T_2 .

EJEMPLO A3.7 Si la resistencia de un alambre de cobre es de $50\ \Omega$ a $20\text{ }^\circ\text{C}$, ¿cuál es su resistencia a $100\text{ }^\circ\text{C}$ (punto de ebullición del agua)?

Solución: Ecuación (A3.5):

$$\frac{234.5\text{ }^\circ\text{C} + 20\text{ }^\circ\text{C}}{50\ \Omega} = \frac{234.5\text{ }^\circ\text{C} + 100\text{ }^\circ\text{C}}{R_2}$$

$$R_2 = \frac{(50\ \Omega)(334.5\text{ }^\circ\text{C})}{254.5\text{ }^\circ\text{C}} = \mathbf{65.72\ \Omega}$$

TABLA A3.3
Temperatura absoluta inferida (T_i).

Material	$^\circ\text{C}$
Plata	- 243
Cobre	- 234.5
Oro	- 274
Aluminio	- 236
Tungsteno	- 204
Níquel	- 147
Hierro	- 162
Nicromo	- 2,250
Constantán	- 125,000



EJEMPLO A3.8 Si la resistencia de un alambre de cobre a la temperatura de congelación ($0\text{ }^{\circ}\text{C}$) es de $30\ \Omega$, ¿cuál es su resistencia a $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$?

Solución: Ecuación (A3.5):

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

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

EJEMPLO A3.9 Si la resistencia de un alambre de aluminio a temperatura ambiente ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$) es de $100\text{ m}\Omega$ (medida por un milióhmetro), ¿a qué temperatura se incrementará su resistencia a $120\text{ m}\Omega$?

Solución: Ecuación (A3.5):

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

y

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

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

TABLA A3.4

Coefficiente de temperatura de la resistencia para varios conductores a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Material	Coefficiente de temperatura (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
Nicromo	0.00044

Coefficiente de temperatura de la resistencia

Hay una segunda ecuación conocida para calcular la resistencia de un conductor a diferentes temperaturas. Definiendo

$$\alpha_{20} = \frac{1}{|T_1| + 20\text{ }^{\circ}\text{C}} \quad (\Omega/^{\circ}\text{C}/\Omega) \quad (\text{A3.7})$$

como el **coeficiente de temperatura de resistencia** a una temperatura de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, y R_{20} como la resistencia de la muestra en $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, determinaremos la resistencia R_1 a una temperatura T_1 según

$$R_1 = R_{20}[1 + \alpha_{20}(T_1 - 20\text{ }^{\circ}\text{C})] \quad (\text{A3.8})$$

Se han evaluado los valores de α_{20} para diferentes materiales y en la tabla A3.4 se dan algunos.

La ecuación (A3.8) puede escribirse como sigue:

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

a partir de las cuales se definen las unidades de $\Omega/^{\circ}\text{C}/\Omega$ para α_{20} .

Dado que $\Delta R/\Delta T$ es la pendiente de la curva en la figura A3.11, podemos concluir que

cuanto más alto es el coeficiente de temperatura de la resistencia de un material, más sensible es el nivel de la resistencia a los cambios de temperatura.

En la tabla A3.3 vemos que el cobre es más sensible a las variaciones de la temperatura que la plata, el oro o el aluminio, aun cuando las diferencias son mínimas. La pendiente definida por α_{20} para el constantán es tan pequeña que la curva es casi horizontal.

Como R_{20} de la ecuación (A3.8) es la resistencia del conductor a $20\text{ }^\circ\text{C}$ y $T_1 - 20\text{ }^\circ\text{C}$ es el cambio de temperatura a partir de $20\text{ }^\circ\text{C}$, la ecuación (A3.8) puede escribirse como sigue:

$$R = \rho \frac{l}{A} [1 + \alpha_{20} \Delta T] \quad (\text{A3.9})$$

la cual es una ecuación para la resistencia en función de todos los parámetros de control.

PPM/ $^\circ\text{C}$

La resistencia de los resistores, como la de los conductores, se modifica con un cambio en la temperatura. Por lo común la especificación se da en partes por millón por grado Celsius (**PPM/ $^\circ\text{C}$**), la que de inmediato indica el nivel de sensibilidad del resistor a la temperatura ambiente de trabajo. Para resistores, un nivel de 5000 PPM se considera alto, mientras que 20 PPM es bastante bajo. Una característica de 1000 PPM/ $^\circ\text{C}$ revela que un cambio de 1° en la temperatura produce un cambio en la resistencia igual a 1000 PPM, o $1000/1,000,000 = 1/1000$ del valor dado por el fabricante en la etiqueta del producto, lo cual es un cambio insignificante en la mayoría de las aplicaciones. El interés, por consiguiente, radica no sólo en el nivel de PPM, sino también con el intervalo de la variación de temperatura esperada.

En forma de ecuación, el cambio de resistencia es

$$\Delta R = \frac{R_{\text{nominal}}}{10^6} (\text{PPM})(\Delta T) \quad (\text{A3.10})$$

donde R_{nominal} es el valor que aparece en la etiqueta del resistor a temperatura ambiente, y ΔT es el cambio de temperatura a partir del nivel de referencia de $20\text{ }^\circ\text{C}$.

EJEMPLO A3.10 Para un resistor de composición de carbono de $1\text{ k}\Omega$ con una PPM de 2500, determine la resistencia a $60\text{ }^\circ\text{C}$.

Solución:

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

y

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

A3.5 TIPOS DE RESISTORES

Resistores fijos

Los resistores se fabrican en muchas formas, pero todos pertenecen a uno de dos grupos: fijos o variables. El más común de los resistores fijos de baja potencia es el resistor de película que se muestra en la figura A3.12. Se construye depositando una capa delgada de material resistivo (típicamente carbón, metal u óxido metálico) sobre una barra de cerámica. La resistencia deseada se obtiene entonces recortando parte del material resistivo de manera helicoidal para establecer una banda larga y continua de material

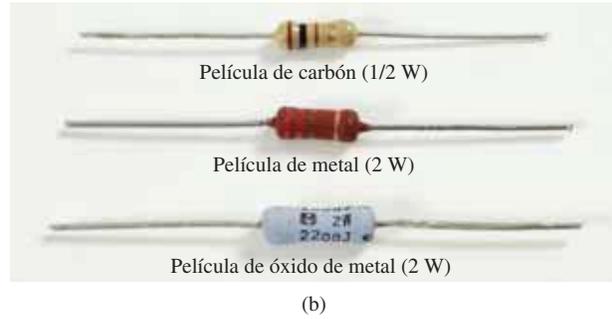
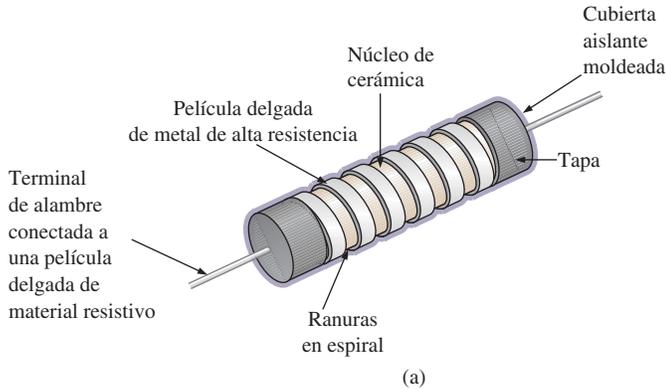


FIG. A3.12 Resistores de película: (a) construcción; (b) tipos.

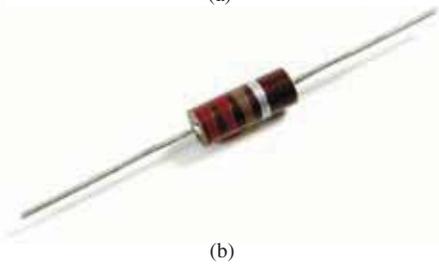
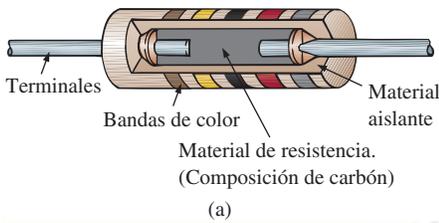


FIG. A3.13 Resistores de composición fija; (a) construcción; (b) apariencia.

de alta resistencia de un extremo del resistor al otro. Por lo general los resistores de película de carbón son de color beige y de baja capacidad de potencia. El resistor de película metálica suele ser de un color más intenso, como rojo ladrillo o verde oscuro, con mayores capacidades de potencia. El resistor de óxido metálico es de un color pastel pálido, y de los tres es el que tiene la capacidad de potencia eléctrica más alta.

Cuando busque en la mayoría de los catálogos de electrónica, o visite una tienda de electrónica como Radio Shack, para comprar resistores, verá que el resistor más común es el de película. Hace algunos años, el resistor de carbón que se muestra en la figura A3.13 era el más común, pero cada vez menos compañías lo fabrican, y sus aplicaciones se redujeron a situaciones en que las altas temperaturas y los efectos inductivos (vea el capítulo 6) pueden ser un problema. El material compuesto de carbón moldeado directamente en cada extremo del resistor determina su resistencia. Las características de alta resistividad del carbón ($\rho = 21,000 \text{ MC-}\Omega/\text{pies}$) crean una trayectoria de alta resistencia para la corriente eléctrica que circula a través del elemento.

Para un estilo y fabricante particulares, el tamaño de un resistor se aumenta con la capacidad de potencia.

El concepto de potencia se aborda minuciosamente en el capítulo 1 del libro; por ahora tenga en cuenta que las capacidades de potencia incrementadas están asociadas con la capacidad de manejar altos niveles de corriente eléctrica y de temperatura. La figura A3.14 ilustra el tamaño real de los resistores de película delgada y óxido metálico en el rango de capacidad de 2.5 a 5 W. Todos los resistores que aparecen en la figura A3.14 son de $1 \text{ M}\Omega$, lo que pone de manifiesto que *el tamaño de un resistor no define su nivel de resistencia.*

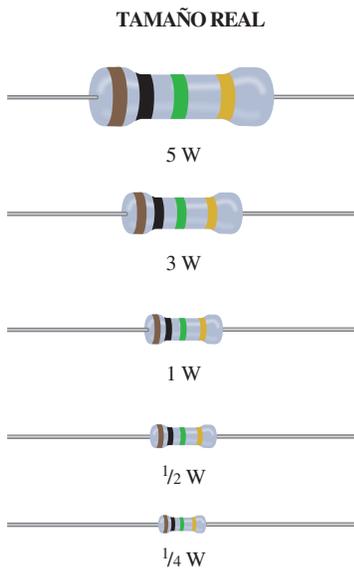
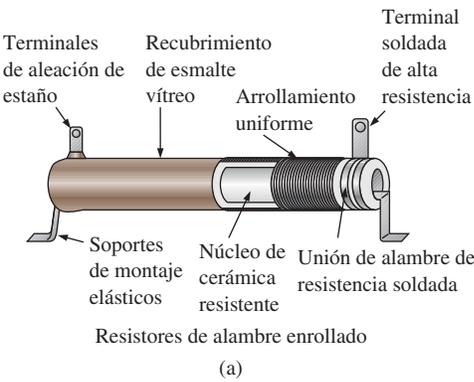


FIG. A3.14 Resistores de óxido de metal fijos de diferentes potencias.

En la figura A3.15 se ilustran otros resistores fijos. Los resistores de alambre enrollado de la figura A3.15(a) se forman enrollando un alambre de alta resistencia alrededor de un núcleo de cerámica. Enseguida toda la estructura se hornea con un cemento de cerámica para crear un recubrimiento protector. Por lo común, los resistores de alambre enrollado se utilizan en aplicaciones de gran potencia eléctrica, aunque también los hay con capacidades de potencia mínimas y muy alta precisión.

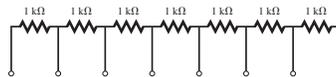
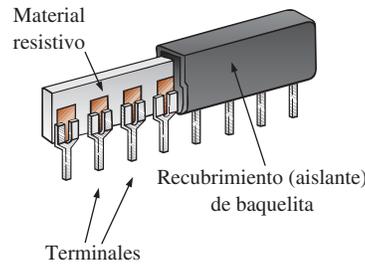
Las figuras A3.15(c) y (g) son tipos especiales de resistores de alambre enrollado con un bajo porcentaje de tolerancia. Observe, en particular, las altas capacidades de potencia eléctrica de los resistores de alambre enrollado para su tamaño relativamente pequeño. Las figuras A3.15(b), (d) y (f) son resistores de película que utilizan una película de material más gruesa que la de los de la figura A3.12. Los resistores de chip ilustrados en la figura A3.15(f) se utilizan donde el espacio es una prioridad, como la superficie



100 MΩ, 0.75 W
Resistor de película de potencia de precisión (d)



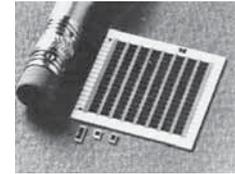
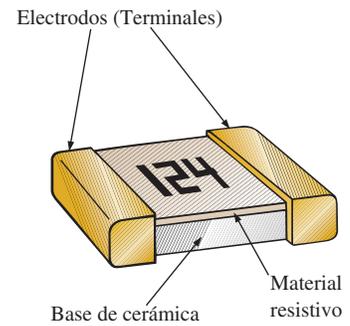
470 Ω, 35 W
Resistor de potencia de película gruesa (b)



Red única de resistores en línea de 1 kΩ transportado (todos conectados en el mismo lado) (e)



1 kΩ, 25 W
Resistor de precisión montado en chasis con cubierta de aluminio (c)



22 kΩ, 1W
Resistores de chip de película gruesa de montaje superficial, con electrodos de oro (f)



25 kΩ, 5 W
Resistor de alambre enrollado con recubrimiento de silicio (g)

FIG. A3.15
Varios tipos de resistores fijos.

de una tarjeta de circuitos. Las unidades de este tipo pueden ser de menos de 1/16 pulg., de longitud o ancho, y de 1/30 pulg. de espesor, y aun así son capaces de manejar 0.5 W de potencia con niveles de resistencia tan altos como 100 MΩ como una demostración clara de que el tamaño no determina el nivel de resistencia. Las terminales del resistor que se muestra en la figura A3.15(c) están fijadas en una capa de material resistivo, y la resistencia entre las terminales está en función de las dimensiones del material resistivo y la colocación de los cojinetes de las terminales.

Resistores variables

Como su nombre lo implica, los resistores variables tienen una resistencia terminal que puede variar al girar una carátula, una perilla, un tornillo, o cualquier otra cosa que parezca apropiada para la aplicación. Pueden constar de dos o tres terminales, aunque la mayoría son de tres. Si el dispositivo de dos o tres terminales se utiliza como resistor variable, se le conoce como **reóstato**. Si se utiliza el de tres terminales para controlar niveles de potencial, se le conoce como **potenciómetro**. Aun cuando un dispositivo de tres terminales pueda utilizarse como reóstato o como potenciómetro (según se conecte), por lo general se le denomina *potenciómetro* en revistas especializadas, o bien cuando se solicita para una aplicación particular.

El símbolo de un potenciómetro de tres terminales aparece en la figura A3.16(a). Cuando se utiliza como resistor variable (o reóstato), puede conectarse en una de dos formas, como se muestra en las figuras A3.16(b) y (c). En la figura A3.16(b), los puntos *a* y *b* se conectan al circuito, y la terminal restante se deja suelta. La parte del elemento resistivo entre los puntos *a* y *b* determina la resistencia introducida. En la figura A3.16(c), la resistencia ocurre de nuevo entre los puntos *a* y *b*, pero ahora la resistencia restante se “pone en cortocircuito” (efecto eliminado) mediante la conexión de *b* a *c*. En la figura A3.16(d) aparece el símbolo universalmente aceptado para un reóstato.

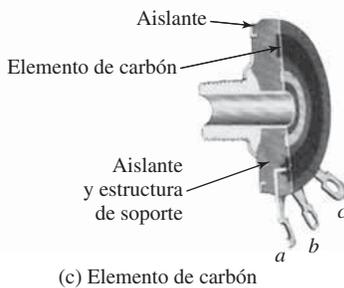
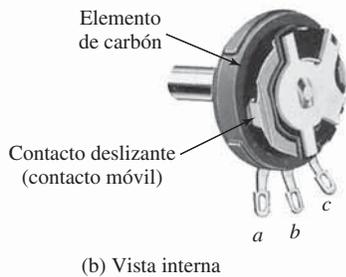
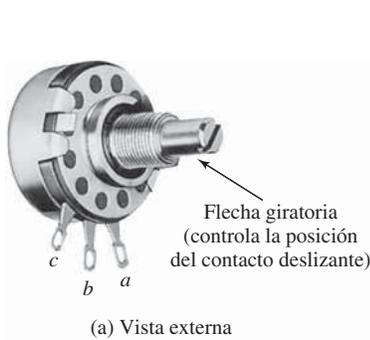


FIG. A3.17
Potenciómetro moldeado.
(Cortesía de Allen-Bradley Co.).

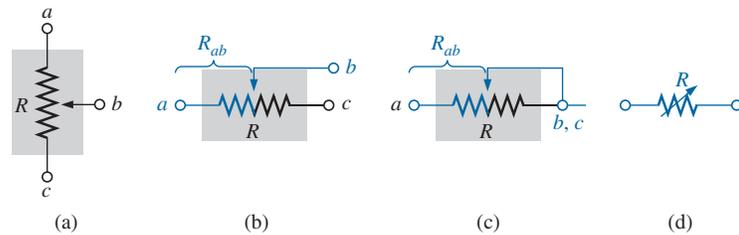


FIG. A3.16
Potenciómetro: (a) símbolo; (b) y (c) conexiones como reóstato,
y (d) símbolo del reóstato.

La mayoría de los potenciómetros tienen tres terminales en las posiciones relativas que se muestran en la figura A3.17. La perilla, carátula, o tornillo que está en el centro de la cubierta controla el movimiento de un contacto que se puede deslizar a lo largo del elemento resistivo conectado entre las dos terminales externas. El contacto está conectado a la terminal central, y establece una resistencia entre el contacto móvil y cada terminal externa.

*La resistencia entre las terminales externas *a* y *c* en la figura A3.18(a) (y figura A3.17) siempre se mantiene en el valor nominal total del potenciómetro, independientemente de la posición del contacto móvil *b*.*

En otras palabras, la resistencia entre las terminales *a* y *c* en la figura A3.18(a) en un potenciómetro de $1\text{ M}\Omega$ siempre será de $1\text{ M}\Omega$, sin que tenga que ver cómo se gire el elemento control y se mueva el contacto. En la figura A3.18(a), el contacto central no forma parte de la configuración de red.

La resistencia entre el contacto móvil y cualquiera de las terminales externas puede variar desde un mínimo de $0\ \Omega$ hasta un valor máximo igual al valor nominal del potenciómetro.

En la figura A3.18(b), el contacto deslizante se colocó a 2.5 W de la distancia hacia abajo del punto *a* al punto *c*. La resistencia resultante entre los puntos *a* y *b* será por consiguiente 2.5 W del total, o $250\text{ k}\Omega$ (en un potenciómetro de $1\text{ M}\Omega$) y la resistencia entre *b* y *c* será 7.5 W de la resistencia total, o $750\text{ k}\Omega$ para un potenciómetro lineal.

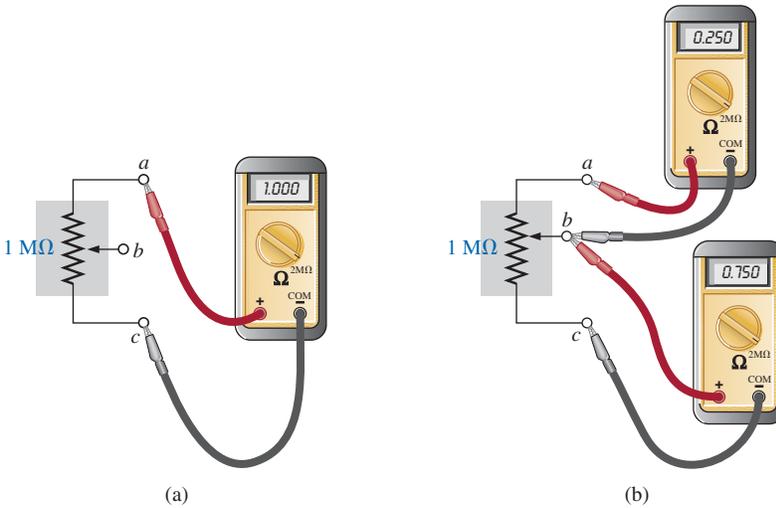


FIG. A3.18

Componentes de la resistencia de un potenciómetro: (a) entre las terminales externas, y (b) entre el contacto móvil y cada terminal externa.

La suma de las resistencias entre el contacto móvil y cada terminal externa es igual a la resistencia nominal del potenciómetro.

Esto se demuestra en la figura A3.18(b), donde $250\text{ k}\Omega + 750\text{ k}\Omega = 1\text{ M}\Omega$. Específicamente,

$$R_{ac} = R_{ab} + R_{bc} \quad (\text{A3.11})$$

Por consiguiente, a medida que se incrementa la resistencia del brazo móvil a un contacto externo, la resistencia entre el contacto móvil y las otras terminales externas debe reducirse como corresponde. Por ejemplo, si la R_{ab} de un potenciómetro de $1\text{ k}\Omega$ es $200\ \Omega$, entonces la resistencia R_{bc} debe ser de $800\ \Omega$. Si la R_{ab} se reduce aún más hasta $50\ \Omega$, entonces la R_{bc} debe incrementarse a $950\ \Omega$, etcétera.

El potenciómetro de carbón moldeado se utiliza en redes con demandas de potencia mínimas. En la figura A3.19(a) aparece un resistor regulador miniatura (menos de 1/4 de pulg. de diámetro), y varios potenciómetros que utilizan un material resistivo cermet aparecen en la figura A3.19(b). La punta de contacto del resistor de alambre enrollado de tres puntas que se ve en la figura A3.19(c) puede moverse para ajustar la resistencia entre las tres terminales.

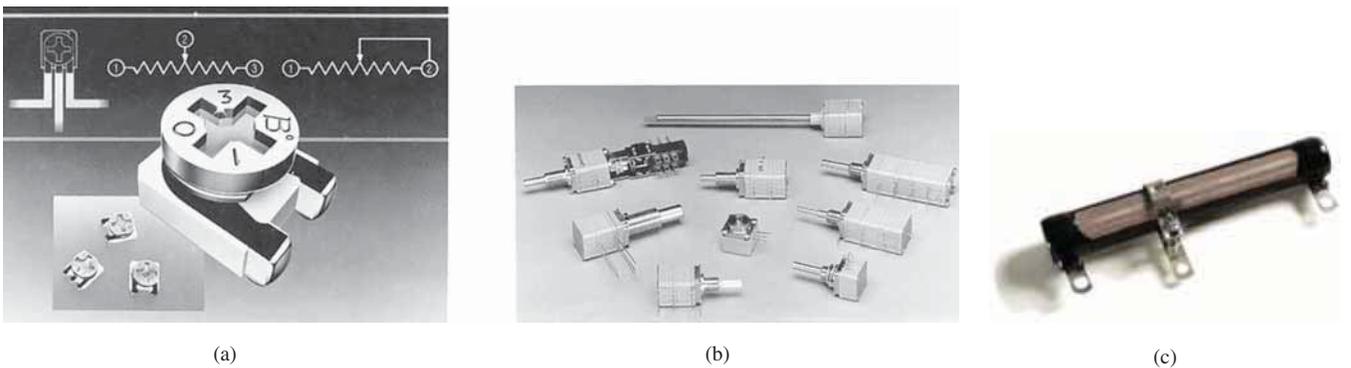


FIG. A3.19

Resistores variables: (a) resistor regulador de 4 mm ($\approx 5/32$ pulg.) (cortesía de Bourns, Inc.); (b) elementos de cermet y plástico conductores (cortesía de Honeywell Clarostat), y (c) resistor de alambre enrollado de tres puntas.

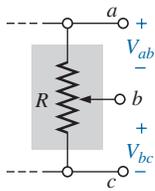


FIG. A3.20

Control de niveles de voltaje con un potenciómetro.



FIG. A3.21

Codificación por colores para resistores fijos.

Número	Color
0	Negro
1	Marrón
2	Rojo
3	Naranja
4	Amarillo
5	Verde
6	Azul
7	Violeta
8	Gris
9	Blanco

Tolerancia de $\pm 5\%$ (si la 3a. banda es oro)		Oro
Tolerancia de $\pm 10\%$ (si la 3a. banda es plata)		Plata

FIG. A3.22

Codificación por colores.



FIG. A3.23

Ejemplo A3.11.

Cuando el dispositivo se utiliza como potenciómetro, las conexiones se hacen como se muestra en la figura A3.20. Puede utilizarse para controlar el nivel de V_{ab} , V_{bc} , o ambos, según la aplicación. En capítulos posteriores se vuelven a abordar los potenciómetros en una situación de carga.

A3.6 CODIFICACIÓN POR COLORES Y VALORES DE RESISTORES ESTÁNDAR

Varios resistores, fijos o variables, son bastante grandes y tienen su resistencia impresa en la cubierta. Algunos, sin embargo, son demasiado pequeños como para tener números impresos, por lo que se utiliza un sistema de **codificación por colores**. Para el resistor de película delgada pueden utilizarse cuatro, cinco o seis bandas. Se describe ahora el esquema de cuatro bandas, y más adelante en esta sección se describirá la finalidad de la quinta y sexta bandas.

En el esquema de cuatro bandas, las bandas *siempre se leen a partir del extremo que tiene una banda más cercana*, como se muestra en la figura A3.21. Las bandas están numeradas como se muestra en referencia a la siguiente explicación.

Las dos primeras bandas representan el primero y segundo dígitos, respectivamente.

Son los primeros dos números reales que definen el valor numérico del resistor.

La tercera banda determina el multiplicador de potencia de diez para los primeros dos dígitos (en realidad el número de ceros después del segundo dígito en el caso de resistores de más de 10Ω).

La cuarta banda es la tolerancia del fabricante, la cual indica la precisión con la cual se elaboró el resistor.

Si se omite la cuarta banda, se supone que la tolerancia es de $\pm 20\%$.

El número correspondiente a cada color se define en la figura A3.22. La cuarta banda corresponderá a una tolerancia de $\pm 5\%$ o de $\pm 10\%$ definida por los colores oro y plata, respectivamente. Para recordar qué color va con qué porcentaje, sólo recuerde que los resistores de $\pm 5\%$ cuestan más, y que el oro es más valioso que la plata.

Recordar qué color va con cada dígito requiere un poco de práctica. Por lo general, los colores comienzan con tonos muy oscuros y prosiguen hacia los más claros. La mejor forma de memorizarlos es repetir una y otra vez que el rojo es 2, el amarillo 4, y así sucesivamente. Practique con un amigo o compañero estudiante, y en poco tiempo aprenderá la mayoría de los colores.

EJEMPLO A3.11 Determine el valor del resistor de la figura A3.23.

Solución: Leyendo a partir de la banda más cercana al borde izquierdo, vemos que los primeros dos colores son el marrón y el rojo que representan los números 1 y 2, respectivamente. La tercera banda es de color naranja, que representa el número 3 para la potencia del multiplicador como sigue:

$$12 \times 10^3 \Omega$$

es decir, un valor de $12 \text{ k}\Omega$. Como se indicó antes, si $12 \text{ k}\Omega$ se escriben como $12,000 \Omega$, la tercera banda indica el número de ceros que van después de los primeros dos dígitos.

La cuarta banda de color oro representa una tolerancia de $\pm 5\%$: Para determinar el rango dentro del cual el fabricante ha garantizado que estará el

resistor, primero convierta el 5% en un número decimal recorriendo el punto decimal dos lugares a la izquierda:

$$5\% \Rightarrow 0.05$$

Luego multiplique el valor del resistor por este número decimal:

$$0.05(12 \text{ k}\Omega) = 600 \Omega$$

Por último, sume el número resultante al valor del resistor para determinar el valor máximo, y réstelo para determinar el valor mínimo. Es decir,

$$\text{Máximo} = 12,000 \Omega + 600 \Omega = 12.6 \text{ k}\Omega$$

$$\text{Mínimo} = 12,000 \Omega - 600 \Omega = 11.4 \text{ k}\Omega$$

$$\text{Rango} = \mathbf{11.4 \text{ k}\Omega \text{ a } 12.6 \text{ k}\Omega}$$

El resultado es que el fabricante ha garantizado con la banda de oro, correspondiente al 5% que el resistor se hallará en el rango que se acaba de determinar. En otras palabras, el fabricante no garantiza que el resistor será exactamente de 12 kΩ, sino que se hallará en un rango como se definió antes.

Utilizando el procedimiento anterior, el resistor más pequeño que puede marcarse con el código de colores es de 10 Ω. Sin embargo,

el rango puede ampliarse para incluir resistores desde 0.1 hasta 10 Ω con sólo utilizar el color oro como color multiplicador (tercera banda) para representar 0.1 y el color plata para representar 0.01.

Esto se demuestra en el siguiente ejemplo.

EJEMPLO A3.12 Determine el valor del resistor que se muestra en la figura A3.24.

Solución: Los primeros dos colores son gris y rojo, y representan los números 8 y 2, respectivamente. El tercer color es oro, y representa un multiplicador de 0.1. Utilizando el multiplicador, obtenemos una resistencia de

$$(0.1)(82 \Omega) = 8.2 \Omega$$

La cuarta banda es plata, y representa una tolerancia de $\pm 10\%$. Si la convertimos en un número decimal y la multiplicamos, obtenemos

$$10\% = 0.10 \quad \text{y} \quad (0.1)(8.2 \Omega) = 0.82 \Omega$$

$$\text{Máximo} = 8.2 \Omega + 0.82 \Omega = 9.02 \Omega$$

$$\text{Mínimo} = 8.2 \Omega - 0.82 \Omega = 7.38 \Omega$$

de modo que **Rango = 7.38 Ω a 9.02 Ω**

Aunque se llevará algún tiempo aprender los números asociados con cada color, es ciertamente motivador saber que

se utiliza el mismo esquema de colores para representar números para todos los elementos importantes de circuitos eléctricos.

Más adelante se verá que el valor numérico asociado con cada color es el mismo para capacitores y para inductores. Por consiguiente, una vez aprendido, el esquema tiene áreas de aplicación repetidas.

Algunos fabricantes prefieren utilizar un **código de colores de cinco bandas**. En esos casos, como se muestra en la parte superior de la figura



FIG. A3.24
Ejemplo A3.12.

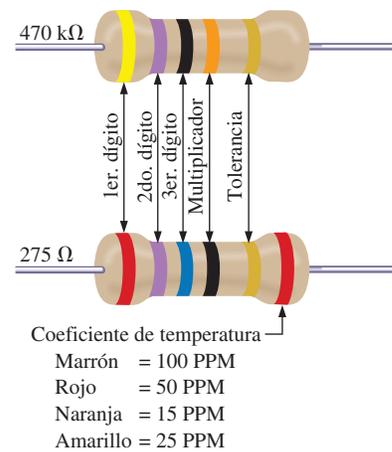


FIG. A3.25
Codificación por colores de cinco bandas para resistores fijos.

A3.25, se utilizan tres dígitos antes del multiplicador. La quinta banda sigue indicando la tolerancia. Si el fabricante decide incluir el coeficiente de temperatura, aparecerá una sexta banda, como se muestra en la parte inferior de la figura A3.25, y el color indica el nivel de PPM.

Para cuatro, cinco o seis bandas, si la tolerancia es menor que $\pm 5\%$, se utilizan los siguientes colores para reflejar las tolerancias en porcentaje:

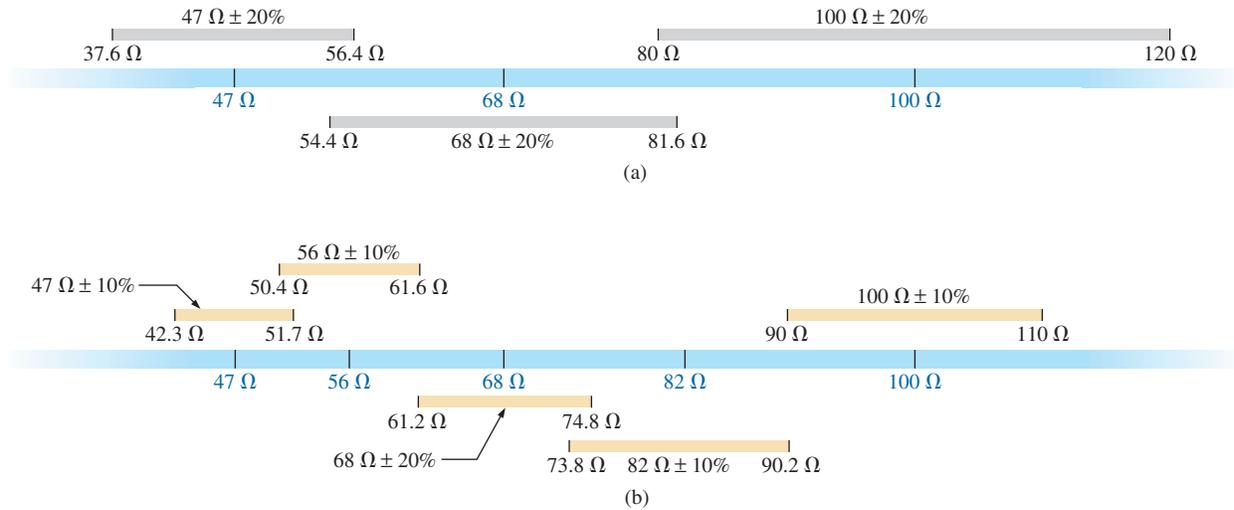
marrón = $\pm 1\%$, *rojo* = $\pm 2\%$, *verde* = $\pm 0.5\%$, *azul* = $\pm 0.25\%$ y *violeta* = $\pm 0.1\%$.

Se esperaría que los resistores estuvieran disponibles en un rango completo de valores como 10, 20, 30, 40, 50 Ω , etcétera. Sin embargo, éste no es el caso, con algunos valores comerciales típicos como 27, 56 y 68 Ω . Hay una razón para los valores escogidos, la cual se demuestra mejor examinando la lista de valores estándar de resistores disponibles comercialmente en la tabla A3.5. Los valores en negritas son los más comunes y suelen estar disponibles con tolerancias de 5, 10 y 20%.

TABLA A3.5
Valores estándar de resistores comercialmente disponibles.

Ohms (Ω)					Kilohms ($k\Omega$)		Megaohms ($M\Omega$)	
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	

Examinando el impacto del nivel de tolerancia entenderemos cómo se seleccionaron los valores comerciales. Considere la secuencia 47 Ω –68 Ω –100 Ω , disponibles con tolerancias de 20%. En la figura A3.26(a), la banda de tolerancia de cada uno se determinó y trazó sobre un solo eje. Observe que con esta tolerancia (la cual es toda la que el fabricante garantizará), el rango completo de valores de resistor está disponible desde 37.6 hasta 120 Ω . En otras palabras, el fabricante está garantizando el rango completo,


FIG. A3.26

Garantía del rango completo de valores de resistor con la tolerancia dada: (a) 20%; (b) 10%.

aplicando la tolerancia para llenar los huecos. Si nos vamos al nivel de 10% se introducen los resistores de 56 y 82 Ω para llenar los huecos, como se muestra en la figura A3.26(b). Si nos vamos al nivel de 5% se requerirían más valores de resistor para llenar los huecos. En suma, los valores se eligieron para garantizar que se cubriera todo el rango, lo cual se determinó con las tolerancias empleadas. Desde luego, si se desea un valor específico pero que no es uno de los valores estándar, a veces al combinar valores estándar se obtiene una resistencia total muy cercana al nivel deseado. Si este método aún no es satisfactorio, puede ajustarse un potenciómetro al valor deseado y luego insertarse en la red de circuitos.

A lo largo del texto se verá que muchos de los valores no son valores estándar. Esto se hizo para reducir la complejidad matemática, la cual podría interferir con el proceso de aprendizaje. Sin embargo, en las secciones de problemas se suelen utilizar valores estándar para que comience a familiarizarse con los valores comerciales disponibles.

Resistores de montaje superficial

Por lo general los resistores de montaje superficial se marcan de tres maneras: por codificación de colores, mediante tres símbolos y por dos símbolos.

La **codificación por colores** es la misma que se acaba de describir al principio de esta sección para resistores insertados en orificios.

El método de **tres símbolos** utiliza tres dígitos. Los primeros dos definen los primeros dos dígitos del valor; el último dígito define la potencia del multiplicador de potencia de diez.

Por ejemplo:

$$820 \text{ es } 82 \times 10^0 \Omega = \mathbf{82 \Omega}$$

$$222 \text{ es } 22 \times 10^2 \Omega = 2200 \Omega = \mathbf{2.2 \text{ k}\Omega}$$

$$010 \text{ es } 1 \times 10^0 \Omega = \mathbf{1 \Omega}$$

La marca de **dos símbolos** utiliza una letra seguida por un número. La letra define el valor como en la lista siguiente. Observe que se incluyen todos los números comercialmente disponibles de la tabla A3.5.



A = 1.0	B = 1.1	C = 1.2	D = 1.3
E = 1.5	F = 1.6	G = 1.8	H = 2
J = 2.2	K = 2.4	L = 2.7	M = 3
N = 3.3	P = 3.6	Q = 3.9	R = 4.3
S = 4.7	T = 5.1	U = 5.6	V = 6.2
W = 6.8	X = 7.5	Y = 8.2	Z = 9.1

El segundo símbolo es la potencia del multiplicador de potencia de diez. Por ejemplo,

$$C3 = 1.2 \times 10^3 \Omega = \mathbf{1.2 \text{ k}\Omega}$$

$$T0 = 5.1 \times 10^0 \Omega = \mathbf{5.1 \Omega}$$

$$Z1 = 9.1 \times 10^1 \Omega = \mathbf{91 \Omega}$$

Símbolos adicionales pueden ir antes o después de los códigos y diferir según el fabricante. Éstos pueden informar sobre la estructura de la resistencia interna, capacidad de potencia a disipar, material superficial, derivación, y tolerancia.

A3.7 CONDUCTANCIA

Si determinamos el recíproco de la resistencia de un material, tenemos una medición de qué tan bien conduce electricidad el material. La cantidad se llama **conductancia**, su símbolo es G , y se mide en *siemens* (S) (observe la figura A3.27). En forma de ecuación, la conductancia es

$$G = \frac{1}{R} \quad (\text{siemens, } S) \quad (\text{A3.12})$$

Una resistencia de $1 \text{ M}\Omega$ equivale a una conductancia de 10^{-6} S , y una resistencia de 10Ω equivale a una conductancia de 10^{-1} S . Por consiguiente, cuanto más grande es la conductancia, menor es la resistencia y mayor es la conductividad.

En forma de ecuación, la conductancia se determina por

$$G = \frac{A}{\rho l} \quad (S) \quad (\text{A3.13})$$

donde se ve que si se incrementan o se reducen el área, la longitud o la resistividad, la conductancia se incrementa.



FIG. A3.27

Werner von Siemens.
© Bettmann/Corbis

Alemán (Lenthe, Berlín)
(1816–1892)

Ingeniero electricista
Fabricante del telégrafo,
Siemens & Halske AG

Desarrolló un *proceso de electrochapeado* durante una breve estancia en prisión por actuar como testigo en un duelo entre dos oficiales del ejército prusiano. Inspirado por el telégrafo electrónico inventado por Sir Charles Wheatstone en 1817, mejoró el diseño y con la ayuda de su hermano Carl procedió a tender cables a través del Mediterráneo y desde Europa hasta India. Sus invenciones incluyeron el primer *generador autoexcitado*, el cual dependía del magnetismo *residual* de su electroimán en lugar del de un ineficiente imán permanente. En 1888 fue promovido al rango de la nobleza con la adición de *von* a su nombre. La firma actual de Siemens AG tiene filiales en 35 países y oficinas de ventas en 125.

EJEMPLO A3.13

- Determine la conductancia de un resistor de 1Ω , uno de $50 \text{ k}\Omega$ y uno de $10 \text{ M}\Omega$.
- ¿Cómo cambia el nivel de conductancia con un incremento en la resistencia?

Solución: Ecuación (A3.12):

$$\text{a. } 1\Omega: G = \frac{1}{R} = \frac{1}{1 \Omega} = \mathbf{1 \text{ S}}$$

$$50 \text{ k}\Omega: G = \frac{1}{R} = \frac{1}{50 \text{ k}\Omega} = \frac{1}{50 \times 10^3 \Omega} = 0.02 \times 10^{-3} \text{ S} = \mathbf{0.02 \text{ mS}}$$

$$10 \text{ M}\Omega: G = \frac{1}{R} = \frac{1}{10 \text{ M}\Omega} = \frac{1}{10 \times 10^6 \Omega} = 0.1 \times 10^{-6} \text{ S} = \mathbf{0.1 \mu\text{S}}$$

- El nivel de conductancia se reduce rápidamente con un incremento significativo en los niveles de resistencia.

EJEMPLO A3.14 ¿Cuál es el incremento o decremento relativo de la conductancia de un conductor si el área se reduce en 30% y la longitud se incrementa en 40%? La resistividad es fija.

Solución: Ecuación (A3.13):

$$G_i = \frac{1}{R_i} = \frac{1}{\frac{\rho_i l_i}{A_i}} = \frac{A_i}{\rho_i l_i}$$

con el subíndice i para el valor inicial. Utilizando el subíndice n para el nuevo valor, obtenemos

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

y
$$G_n = \mathbf{0.5G_i}$$

A3.8 ÓHMMETROS

El **óhmetro** es un instrumento utilizado para realizar las siguientes tareas y varias otras funciones útiles:

1. *Medir la resistencia de elementos individuales o combinados.*
2. *Detectar situaciones de circuito abierto (alta resistencia) y cortocircuito (baja resistencia).*
3. *Verificar la continuidad de conexiones de red e identificar los hilos de que se compone un cable.*
4. *Probar algunos dispositivos (electrónicos) semiconductores.*

Para la mayoría de las aplicaciones, los óhmetros utilizados con más frecuencia son la sección de óhmetro de un VOM (voltímetro) o un DMM (multímetro digital). Los detalles de los circuitos internos y el método de utilizar el medidor se dejan principalmente como ejercicio de laboratorio. Sin embargo, la resistencia eléctrica de un resistor puede medirse con sólo conectar los dos cables del medidor a través del resistor, como se muestra en la figura A3.28. No hay que preocuparse sobre qué cable va en cada extremo; el resultado es el mismo en uno u otro caso, puesto que los resistores oponen la misma resistencia al flujo de carga (corriente eléctrica) en cualquier dirección. Si se utiliza el VOM, el interruptor debe ponerse en el rango de resistencia apropiado, y una escala no lineal (por lo general en la escala superior del medidor) debe leerse correctamente para obtener el valor de la resistencia. El DMM también requiere que se seleccione la mejor escala para la resistencia que se va a medir, pero el resultado numérico aparece en la pantalla, con la colocación apropiada del punto decimal, determinada por la escala seleccionada. Cuando se mide la resistencia de un solo resistor, en general es mejor quitarlo de la red del circuito antes de realizar la medición. Si esto es difícil o imposible, por lo menos un extremo del resistor no debe estar conectado a la red del circuito, de lo contrario la lectura incluiría los efectos de los demás elementos del sistema y la medición sería errónea.

Si los dos cables del medidor se tocan entre sí en el modo de óhmetro, la resistencia resultante es cero. Puede comprobarse una conexión como se muestra en la figura A3.29, conectando el medidor a uno u otro lado de la conexión. Si la resistencia es cero, la conexión es segura. Si es diferente de cero, la conexión podría estar débil; si es infinita, no hay ninguna conexión en absoluto.

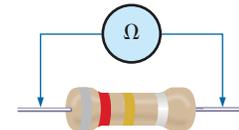


FIG. A3.28

Medición de la resistencia de un solo elemento.

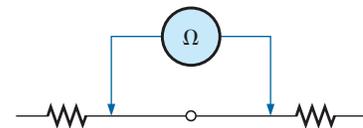


FIG. A3.29

Comprobación de la continuidad de una conexión.

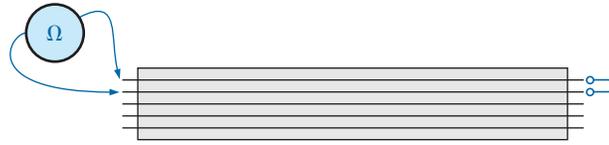


FIG. A3.30

Identificación de los hilos de un cable de varios hilos.

Si se conoce un alambre de un arnés, un segundo puede hallarse como se muestra en la figura A3.30. Simplemente, conecte el extremo del alambre conocido al extremo de cualquier otro alambre. Cuando el óhmetro indica cero ohms (o una resistencia muy baja), el segundo ha sido identificado. El procedimiento anterior también puede utilizarse para determinar el primer alambre conocido con sólo conectar el medidor al extremo de cualquier alambre, y luego tocando el otro extremo de todos los demás alambres hasta que se obtenga una lectura de cero ohms.

Pueden hacerse mediciones preliminares de la condición de algunos dispositivos electrónicos como el diodo y el transistor. El medidor también puede utilizarse para identificar las terminales de tales dispositivos.

Una nota importante sobre el uso de cualquier óhmetro

¡Nunca conecte un óhmetro a un circuito activo!

La lectura no tendrá sentido, y puede dañar el instrumento dada la magnitud de la corriente. La sección de óhmetro de cualquier medidor está diseñada para permitir el paso a una pequeña corriente sensora a través de la resistencia que se va a medir. Además:

Nunca guarde un VOM o un DMM en modo de resistencia.

Si los dos cables del medidor se tocan, la pequeña corriente sensora podría agotar la batería. Los VOM no deben guardarse con el interruptor selector en el rango de voltaje más alto, y el interruptor selector de DMM debe estar en la posición de apagado.

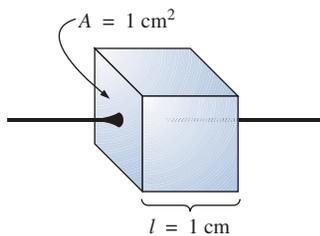


FIG. A3.31

Definición de ρ en ohms-centímetros.

A3.9 RESISTENCIA: UNIDADES MÉTRICAS

El diseño de elementos resistivos para varias áreas de aplicación, incluido el de resistores de película delgada y circuitos integrados, utiliza unidades métricas para las cantidades de la ecuación (A3.1) presentada en la sección A3.2. En unidades SI, la resistividad se mediría en ohms-metros, el área en metros cuadrados, y la longitud en metros. Sin embargo, el metro es una unidad de medición demasiado grande para la mayoría de las aplicaciones, y por lo tanto se suele emplear el centímetro. Las dimensiones resultantes para la ecuación (A3.1) son, por consiguiente,

ρ :	ohms-centímetros
l :	centímetros
A :	centímetros cuadrados

Las unidades para ρ pueden derivarse a partir de

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

La resistividad de un material en realidad es la resistencia de una muestra como la que aparece en la figura A3.31. La tabla A3.6 da una lista de valores

TABLA A3.6

Resistividad (r) de varios materiales.

Material	$\Omega\text{-cm}$
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}
Nicromo	99.72×10^{-6}
Óxido de estaño	250×10^{-6}
Carbón	3500×10^{-6}

de ρ en ohms-centímetros. Observe que ahora el área está en centímetros cuadrados, la cual puede determinarse con la ecuación básica $A = \pi d^2/4$, sin tener que trabajar con mils circulares, la unidad especial de medición asociada con alambres circulares.

EJEMPLO A3.15 Determine la resistencia de 100 pies de cable telefónico de cobre #28 si su diámetro es de 0.0126 pulg.

Solución: Conversiones 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 consiguiente,

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

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

Utilizando las unidades para alambres circulares y la tabla A3.2 para el área de un alambre #28, vemos que

$$R = \rho \frac{l}{A} = \frac{(10.37 \text{ MC-}\Omega/\text{pie})(100 \text{ pie})}{159.79 \text{ MC}} \cong \mathbf{6.5 \Omega}$$

EJEMPLO A3.16 Determine la resistencia del resistor de película delgada que se muestra en la figura A3.32 si la **resistencia laminar** R_s (definida por $R_s = \rho/d$) es de 100 Ω .

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

La ecuación (A3.1) puede escribirse 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 es el ancho. Sustituyendo en la ecuación anterior se obtiene

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

como era de esperarse, puesto que $l = 2w$.

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

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

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

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

como se indica en la tabla A3.6.

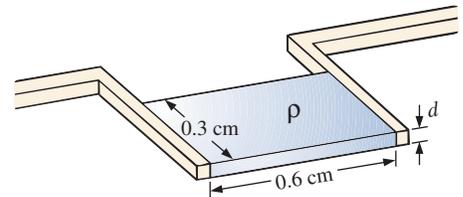


FIG. A3.32

Resistor de película delgada. Ejemplo A3.16.

Por lo común, la resistividad en un diseño de circuito integrado se da en ohms-centímetros, aunque las tablas a menudo dan ρ en ohms-metros, o microhms-centímetros. Utilizando la técnica de conversión del Anexo 1, vemos que el factor de conversión entre ohms-centímetros y ohms-metros es el siguiente:

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

o el valor en ohms-metros es 1/100 del valor en ohms-centímetros, y

$$\rho(\Omega\text{-m}) = \left(\frac{1}{100} \right) \times (\text{valor en } \Omega\text{-cm}) \quad (\text{A3.14})$$

Asimismo,

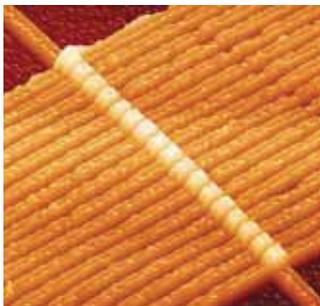
$$\rho(\mu\Omega\text{-cm}) = (10^6) \times (\text{valor en } \Omega\text{-cm}) \quad (\text{A3.15})$$

Para propósitos de comparación, en la tabla A3.7 se dan valores típicos de ρ en ohms-centímetros para conductores, semiconductores y aislantes.

TABLA A3.7
Comparación de niveles de ρ en $\Omega\text{-cm}$.

Conductor ($\Omega\text{-cm}$)	Semiconductor ($\Omega\text{-cm}$)	Aislante ($\Omega\text{-cm}$)
Cobre 1.723×10^{-6}	Ge 50 Si 200×10^3 GaAs 70×10^6	En general: 10^{15}

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



(a)



(b)

FIG. A3.33

(a) Imagen de un circuito con 17 memristores capturada por un microscopio de fuerza atómica. Cada memristor se compone de dos capas de bióxido de titanio emparedadas entre un alambre inferior común y su propio alambre superior. A medida que se aplica voltaje a través de un memristor, la resistencia eléctrica a la señal pequeña de una de las capas de bióxido de titanio cambia, lo que a su vez se utiliza como un método de registrar datos. (b) símbolo.

[(a) Cortesía de J. Joshua Yang y R. Stanley Williams, HP Labs.].

A3.10 EL CUARTO ELEMENTO: EL MEMRISTOR

En mayo de 2008 los investigadores de Hewlett Packard Laboratories dirigidos por el doctor Stanley Williams hicieron un anuncio sorprendente: el descubrimiento del eslabón “perdido” en la teoría de circuitos electrónicos básicos llamado **memristor**, el cual se muestra en la figura A3.33 y en la cubierta de este libro. Hasta este momento los elementos pasivos básicos de la teoría de circuitos eran el resistor, el capacitor y el inductor, y estos dos últimos se analizan en los capítulos 6 y 7 respectivamente. La presencia de este cuarto elemento se postuló en un artículo original y de gran influencia, escrito en 1971 en *IEEE Transactions on Circuit Theory* por Leon Chua de la Universidad de California en Berkeley. Sin embargo, la construcción del dispositivo fue una realidad sólo hasta que se hizo el anuncio del descubrimiento y se viera que funcionaba como se había predicho. Al paso de los años se hicieron muchos intentos para construir un memristor, pero sólo hasta que se trabajó a escala nanométrica fue que se tuvo éxito. Resulta que cuanto más pequeña es la estructura, más prominente es la respuesta de *memresistencia*. El nivel de memresistencia a escala nanométrica es un millón de veces más fuerte que a escala micrométrica, y es casi indetectable a escala milimétrica.

Sin embargo, esta propiedad puede funcionar con ventaja para los diseños de circuitos integrados actuales que ya están en el rango nanométrico.

Las cuatro cantidades básicas de un circuito: carga eléctrica, corriente eléctrica, voltaje y flujo magnético, pueden relacionarse de seis maneras. Tres relaciones se derivan de los elementos básicos del resistor, el capacitor y el inductor. El resistor proporciona una relación directa entre la corriente eléctrica y el voltaje; el capacitor proporciona una relación entre la carga eléctrica y el voltaje, y el inductor proporciona una relación entre la corriente eléctrica y el flujo magnético. Faltaría la relación entre el campo magnético y la carga eléctrica que circula a través de un elemento. Chua buscó un dispositivo que definiera la relación entre flujo magnético y carga eléctrica similar a la que existe entre el voltaje y la corriente eléctrica de un resistor.

Lo que Chua buscaba era un dispositivo cuya resistencia eléctrica fuera una función de la cantidad de carga eléctrica que pasara a través de dicho dispositivo. En el capítulo 6 se describe la relación entre el movimiento de una carga eléctrica y el campo magnético circundante.

El memristor es un dispositivo cuya resistencia aumenta con el incremento del flujo de carga eléctrica en una dirección y disminuye a medida que la carga eléctrica se reduce en la dirección opuesta. Además, y sumamente importante, conserva su nueva resistencia cuando la excitación cesa.

Este comportamiento en el rango nanométrico se descubrió utilizando un bióxido de titanio semiconductor (TiO_2), el cual es un material extremadamente resistivo pero que puede doparse (combinarse) con otros materiales para hacerlo muy conductivo. En este material los dopantes se mueven en respuesta a un campo eléctrico aplicado y se desplazan en la dirección de la corriente eléctrica resultante. Comenzando con un memristor con sólo un lado dopado y TiO_2 puro en el otro, podemos aplicar un voltaje de polarización para establecer una corriente en el memristor. La corriente resultante hará que los dopantes se muevan hacia el lado puro y reducirá la resistencia del elemento. Cuanto mayor es el flujo de carga, menor es la resistencia resultante. En otras palabras, como se mencionó, el TiO_2 tiene una alta resistencia, y cuando los dopantes se dirigen hacia el TiO_2 , la resistencia se reduce. Todo el proceso de mover los dopantes se debe al voltaje aplicado y al movimiento resultante de la carga eléctrica. Si se invierte el voltaje de polarización, la dirección del flujo de corriente eléctrica se invierte, los dopantes regresan al otro lado, y de esta manera el TiO_2 recobra su estado de alta resistencia; a primera vista esto parece ser muy simple y directo.

Una analogía a menudo aplicada para describir la acción de un memristor es la del flujo del agua (que semeja una carga eléctrica) a través de una tubería. La resistencia de la tubería al flujo del agua está en relación directa con el diámetro de la tubería; cuanto menor es el diámetro, mayor es la resistencia, y a mayor amplitud del diámetro, hay una menor resistencia. Para que la analogía sea apropiada para describir la acción de un memristor, el diámetro del tubo también debe ser una función de la velocidad del agua y su dirección. El agua que fluye en una dirección hará que la tubería se expanda y se reduzca la resistencia. Cuanto más rápido es el flujo, mayor es el diámetro. Si el agua fluye en la dirección opuesta, cuanto más rápido es el flujo, menor es el diámetro y mayor es la resistencia. En el momento en que el flujo de agua se detiene en una u otra dirección, la tubería conserva su nuevo diámetro y resistencia.

En la figura A3.33 se muestran 17 memristores alineados en una fila, cada uno con un ancho de aproximadamente 50 nm. Cada uno tiene un alambre inferior conectado a un lado del dispositivo y un alambre superior conectado al lado opuesto por medio de una red de alambres. Cada uno presentará entonces una resistencia eléctrica dependiendo de la dirección y magnitud de la carga eléctrica que pase a través de cada uno. En la figura A3.33 también aparece el

símbolo de corriente eléctrica como símbolo electrónico. Su diseño es similar al símbolo de resistor, pero también marcadamente diferente.

Por lo tanto, tenemos un dispositivo de memoria cuya resistencia dependerá de la dirección y el nivel de la carga eléctrica que fluya a través de él. Si el flujo de carga eléctrica se detiene, mantiene su nuevo nivel de resistencia. El impacto de semejante dispositivo es enorme, pues así las computadoras recordarían la última operación y la mostrarían en el momento en que se apagaran. Regrese en unas horas o días, y la imagen en pantalla sería exactamente la misma que dejó. Lo mismo funcionaría para cualquier sistema que realizara una serie de actividades y aplicaciones, al iniciar exactamente en el instante en que lo dejó. Será muy interesante mantenerse al tanto de cómo afecta este cuarto elemento el campo de la electrónica en general.

Al igual que el transistor, el cual en sus inicios fue cuestionado y que ahora es de tan enorme importancia, el memristor puede estimular el mismo cambio impresionante en toda aplicación electrónica.

A3.11 SUPERCONDUCTORES

El campo de la electricidad y la electrónica es uno de los más apasionantes. Nuevos desarrollos aparecen casi cada semana debido a las extensas actividades de investigación y desarrollo. El impulso de la investigación para desarrollar un superconductor capaz de operar a temperaturas próximas a la temperatura ambiente ha estado recibiendo cada vez más atención en los últimos años debido a la necesidad de reducir las pérdidas de energía.

¿Qué son los superconductores? ¿Por qué es tan importante su desarrollo? En resumen,

los superconductores son conductores de carga eléctrica que, en la práctica, tienen resistencia cero.

En un conductor convencional, los electrones viajan a velocidades promedio de aproximadamente 1000 mi/s (pueden cruzar los Estados Unidos en aproximadamente 3 segundos), aun cuando la teoría de la relatividad de Einstein sugiere que la velocidad máxima de transmisión de información es la velocidad de la luz, es decir 186,000 mi/s (o 299,800 km/s). La relativamente lenta velocidad de conducción convencional se debe a las colisiones con los átomos en el material, fuerzas repelentes entre los electrones (las cargas eléctricas de igual polaridad se repelen), la agitación térmica que da lugar a trayectorias indirectas debido al movimiento incrementado de los átomos vecinos, las impurezas en el conductor, etcétera. En el estado superconductor, ocurre un emparejamiento de electrones, descrito como **efecto de Cooper**, en el cual los electrones viajan en pares y se ayudan entre sí para mantener una velocidad significativamente alta a través del medio. En cierto modo es como el *drafting* (pegarse a la rueda de otro para cortarse el aire) que realizan los ciclistas y los corredores de alto nivel. Hay una oscilación de energía entre compañeros o incluso entre los *nuevos* compañeros (a medida que se presenta la necesidad) para garantizar el paso a través del conductor a la velocidad más alta posible con el mínimo consumo de energía.

Aun cuando el concepto de superconductividad surgió por primera vez en 1911, sólo hasta 1986 fue posible que la superconductividad a temperatura ambiente volviera a ser un objetivo de la comunidad investigadora. Durante más de 70 años la superconductividad sólo se pudo establecer a temperaturas bajas de menos de 23 K. (La temperatura Kelvin es universalmente aceptada como la unidad de medición de temperatura para efectos de superconductividad. Recuerde que $K = 273.15^\circ + ^\circ C$, así que una temperatura de 23 K es $-250^\circ C$, o $-418^\circ F$). En 1986, sin embargo, los físicos Alex Muller y George Bednorz de la IBM en el Zurich Research Center encontraron un material cerámico, el óxido de lantano, bario y cobre, que pre-

sentaba superconductividad a 30 K. Este descubrimiento señaló una nueva dirección para el esfuerzo de investigación y estímulo a otros a mejorar el nuevo estándar. (En 1987 ambos científicos recibieron el premio Nobel por su contribución a una importante área de desarrollo).

En sólo unos pocos meses, los profesores Paul Chu, de la Universidad de Houston, y Man Kven Wu, de la Universidad de Alabama, elevaron la temperatura a 95 K utilizando un superconductor de óxido de itrio, bario y cobre. El resultado fue un nivel de entusiasmo en la comunidad científica que llevó la investigación en la nueva área a un nuevo nivel de esfuerzo e inversión. El impacto más importante de este descubrimiento fue que el nitrógeno líquido (punto de ebullición de 77 K) en lugar del helio líquido (punto de ebullición de 4 K), ahora se podía utilizar para reducir la temperatura del material al nivel requerido. El resultado es un tremendo ahorro en los gastos de enfriamiento. Continuando en la misma dirección, se ha tenido algún éxito a 125 y 162 K utilizando un compuesto de talio (por desgracia, el talio, semejante al plomo, es una sustancia muy venenosa).

La figura A3.34 ilustra cómo el descubrimiento en 1986 del uso de un material cerámico en superconductores llevó a rápidos desarrollos en el campo. En 2008 un superconductor de óxido de estaño-cobre con una pequeña cantidad de indio alcanzó un nuevo máximo de 212 K, lo cual significa un enorme incremento en la temperatura.

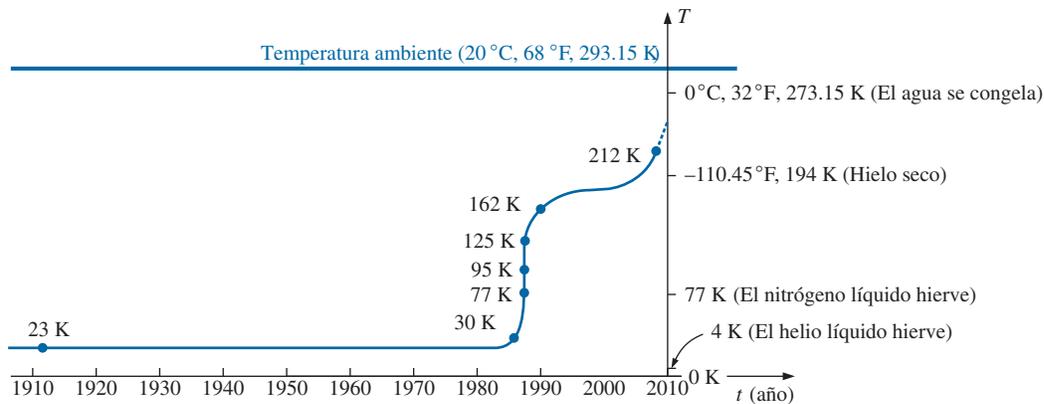


FIG. A3.34

Avance en el aumento de las temperaturas de los superconductores.

La temperatura a la cual un superconductor recupera las características de un conductor normal se llama *temperatura crítica*, indicada por la notación T_c . En la figura A3.35 podemos observar que el nivel de resistividad cambia abruptamente en T_c . La nitidez de la región de transición es una función de la pureza de la muestra. En publicaciones de referencia pueden encontrarse largas listas de temperaturas críticas de compuestos probados que contienen tablas en apoyo a la investigación en los campos de la física, la química, la geología y otros campos relacionados. Dos publicaciones como éstas son el CRC (Chemical Rubber Co.) *Handbook of Tables for Applied Engineering Science* y el CRC *Handbook of Chemistry and Physics*.

Aun cuando todavía no se ha tenido éxito a la temperatura ambiente, se han desarrollado numerosas aplicaciones para algunos de los superconductores. Sólo es cuestión de balancear el costo adicional contra los resultados obtenidos, o decidir si pueden lograrse algunos resultados sin tener que utilizar este estado de resistencia cero. Algunos esfuerzos de investigación requieren aceleradores de alta energía o imanes fuertes alcanzables sólo con materiales superconductivos. Actualmente, la superconductividad se aplica en el diseño de trenes Maglev (trenes que se desplazan a más de 300 mi/h sobre un cojín de aire establecido por polos magnéticos opuestos), a motores y generadores poderosos, en sistemas de formación de imágenes por reso-

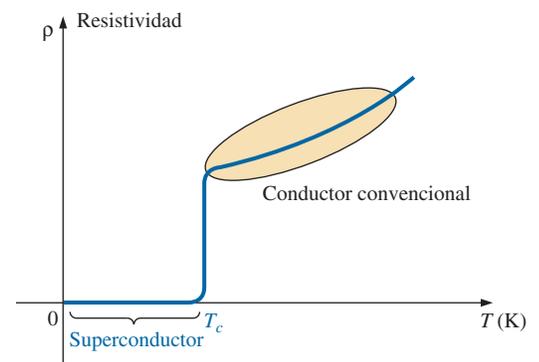


FIG. A3.35

Definición de la temperatura crítica T_c .

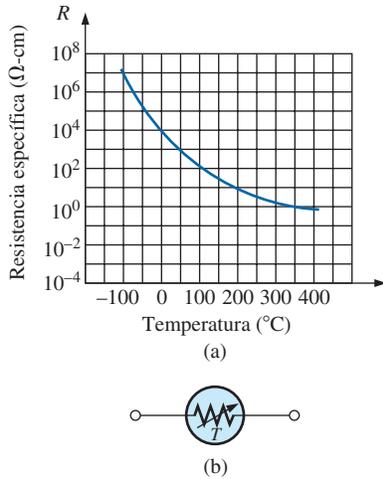


FIG. A3.36

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

nancia magnética nuclear (IRM) para obtener imágenes de corte transversal del cerebro (y otras partes del cuerpo), en el diseño de computadoras con velocidades de operación de cuatro veces la velocidad de los sistemas convencionales, así como a sistemas de distribución de potencia.

A3.12 TERMISTORES

El **termistor** es un dispositivo semiconductor de dos terminales, cuya resistencia, como su nombre lo indica, es sensible a la temperatura. En la figura A3.36 aparece una característica representativa con el símbolo gráfico del dispositivo. Observe la no linealidad de la curva y la reducción de la resistencia de 5000 a 100 Ω para un aumento de temperatura de 20 $^{\circ}\text{C}$ a 100 $^{\circ}\text{C}$. La reducción en la resistencia con un aumento en la temperatura indica un coeficiente de temperatura negativo.

La temperatura del dispositivo puede cambiarse interna o externamente. Un aumento en la corriente que fluye a través del dispositivo eleva su temperatura y reduce su resistencia eléctrica terminal. Cualquier fuente de calor externamente aplicada aumenta la temperatura en su cuerpo y reduce su resistencia. Este tipo de acción (interna o externa) se presta muy bien para controlar mecanismos. En la figura A3.37 se muestran muchos tipos diferentes de termistores. Los materiales utilizados en su fabricación incluyen óxidos de cobalto, níquel, estroncio y manganeso.

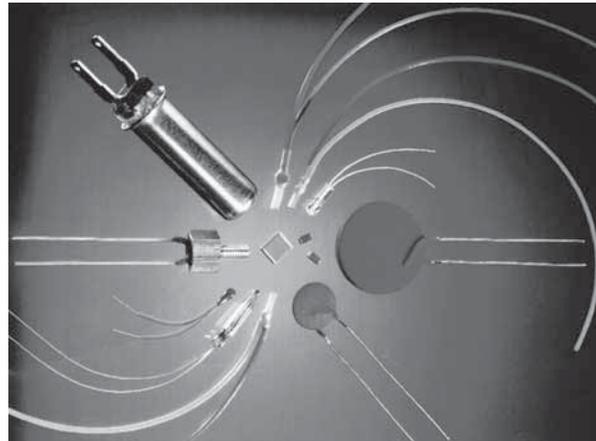


FIG. A3.37

Termistores de NTC (coeficiente de temperatura negativo) y PTC (coeficiente de temperatura positivo).
(Cortesía de Siemens Components, Inc.).

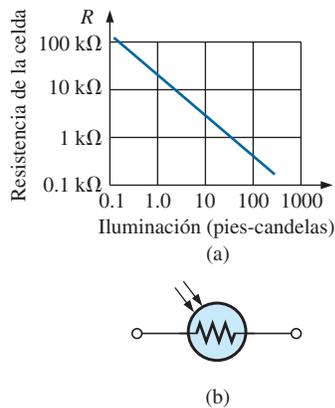


FIG. A3.38

Celda fotoconductor: (a) características y (b) símbolo.

Observe en la figura A3.36 el uso de una escala logarítmica (que se analiza en el capítulo 16) para el eje vertical. La escala logarítmica permite visualizar más niveles de resistencia específica que una escala lineal, por ejemplo el eje horizontal. Observe que se extiende desde 0.0001 hasta 100,000,000 $\Omega\text{-cm}$ a lo largo de un intervalo muy corto. En la figura A3.38 la escala logarítmica se utiliza tanto para el eje vertical como para el eje horizontal.

A3.13 CELDA FOTOCONDUCTORA

La **celda fotoconductor** es un dispositivo semiconductor de dos terminales cuya resistencia terminal está determinada por la intensidad de la luz que incide sobre su superficie expuesta. A medida que se aumenta la iluminación, se

intensifica el estado de energía de los electrones de los átomos de la superficie, con un aumento que resulta en el número de “portadores libres”, así como una reducción en la resistencia eléctrica correspondiente. En la figura A3.38 aparecen un conjunto de características y el símbolo gráfico de la celda fotoconductor. Observe el coeficiente de iluminación negativo. A su vez, en la figura A3.39 se muestran varias celdas fotoconductoras de sulfuro de cadmio.

A3.14 VARISTORES

Los **varistores** son resistores no lineales dependientes del voltaje que se utilizan para suprimir altos voltajes momentáneos; es decir, sus características les permiten limitar el voltaje que puede aparecer a través de las terminales de un dispositivo o sistema sensible. En la figura A3.40(a) aparece un conjunto de características, junto con una característica de resistencia lineal para propósitos de comparación. Observe que en un “voltaje de disparo”, la corriente se eleva con rapidez, pero el voltaje está limitado a un nivel justo por encima de este potencial de disparo. En otras palabras, la magnitud del voltaje que puede aparecer a través de este dispositivo no puede exceder el nivel definido por sus características. Por consiguiente, mediante técnicas de diseño correctas, este dispositivo puede limitar el voltaje que aparece a través de regiones sensibles de una red eléctrica. La corriente eléctrica está limitada simplemente por la red a la cual está conectada. En la figura A3.40(b) se presenta una fotografía de varias unidades comerciales.

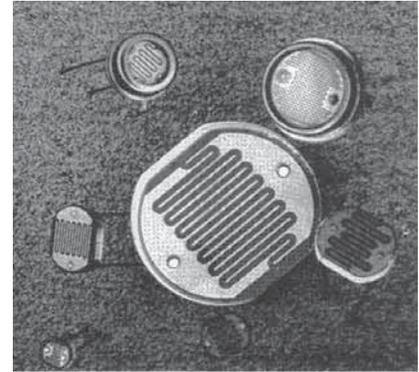


FIG. A3.39
Celdas fotoconductoras.
(Cortesía de PerkinElmer Optoelectronics).

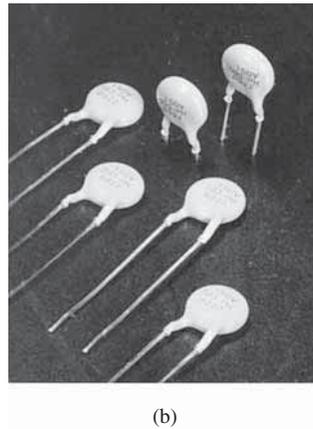
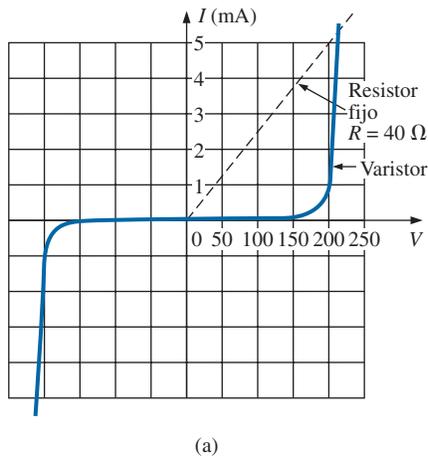


FIG. A3.40

Varistores disponibles con capacidades máximas de voltaje de cd de entre 18 y 615 V.
(Cortesía de Philips Electronics).

A3.15 APLICACIONES

Los siguientes son ejemplos de cómo puede utilizarse la resistencia eléctrica para realizar varias tareas, desde la calefacción doméstica hasta la medición del esfuerzo o deformación en un elemento de soporte de una estructura. Por lo general, la resistencia es un componente de toda aplicación eléctrica o electrónica.

Elemento de calefacción de zócalo eléctrico

Una de las aplicaciones más comunes de la resistencia son los aparatos electrodomésticos como los tostadores y la calefacción de zócalo, donde el calor generado por la corriente que pasa a través de un elemento resistivo se emplea para realizar una función útil.

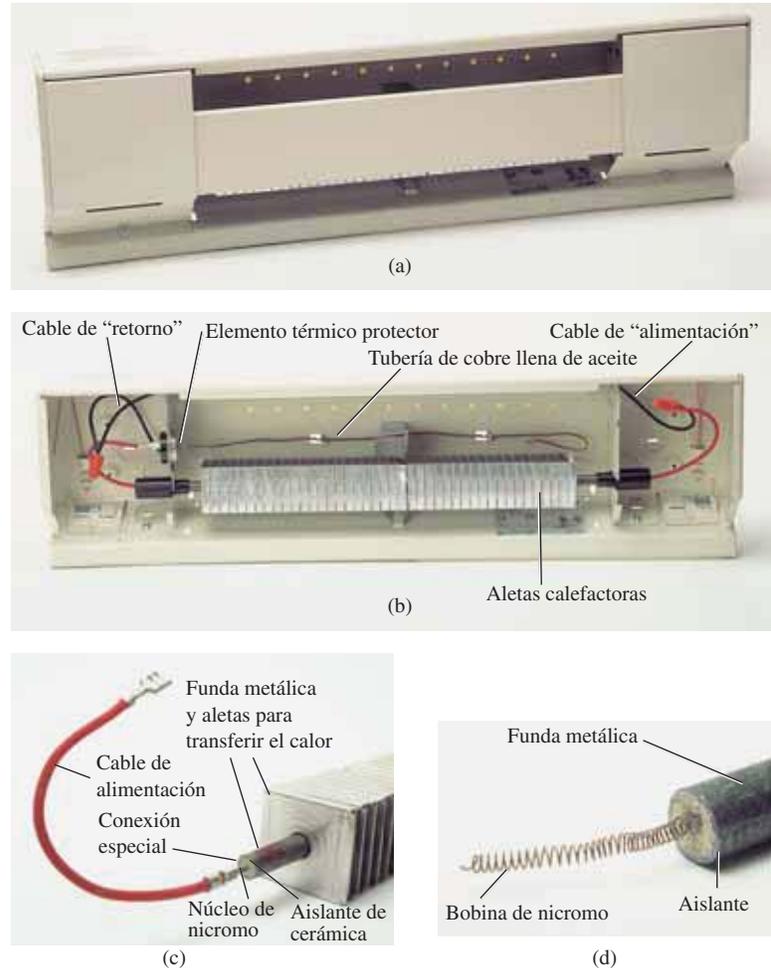


FIG. A3.41

Zócalo eléctrico: (a) sección de 2 pies; (b) interior; (c) elemento calefactor y (d) bobina de nicromo.

Recientemente, cuando remodelamos nuestra casa, el electricista nos informó que estábamos limitados a 16 pies de zócalo eléctrico en un solo circuito. Naturalmente, este informe nos hizo cuestionarnos sobre la potencia eléctrica por pie, el nivel de corriente eléctrica resultante y si la limitación de 16 pies era un estándar nacional. Al leer la etiqueta que viene en la sección de 2 pies que aparece en la figura A3.41(a), encontré lo siguiente: VOLTS AC 240/208, WATTS 750/575 (la capacidad de potencia se describe en el capítulo 1), AMPS 3.2/2.8. Como mi tablero de distribución es de 240 V (como los de la mayoría de las instalaciones domésticas), la potencia eléctrica por pie es de 575 W/2, o de 287.5 W, con una corriente de 2.8 A. Por tanto, la potencia eléctrica total para los 16 pies es de $16 \times 287.5 \text{ W}$ o 4600 W.

En el capítulo 1 se analiza que la potencia ante una carga resistiva está relacionada con la corriente y el voltaje aplicado mediante la ecuación $P = VI$. La carga resultante total puede determinarse entonces utilizando esta ecuación de la siguiente manera: $I = P/V = 4600 \text{ W}/240 \text{ V} = 19.17 \text{ A}$. El resultado fue que necesitábamos un interruptor magnético de más de 19.17 A; de lo contrario el interruptor se activaría cada vez que encendiéramos la calefacción. En mi caso, el electricista utilizó un interruptor de 30 A para satisfacer el requerimiento del National Fire Code que no permite exceder 80% de la corriente eléctrica nominal de un conductor o un interruptor. En la mayoría de los tableros de distribución, un interruptor de 30 A ocupa dos

ranuras del tablero, en tanto que el más común de 20 A ocupa sólo una. Si dispone de un momento, examine su propio tablero y tome nota de la capacidad de interruptores que se utilizan en los diversos circuitos de su casa.

Volviendo a la tabla A3.2, vemos que el alambre #12 comúnmente utilizado en la mayoría de los circuitos domésticos tiene una capacidad máxima de 20 A y no sería adecuado para el zócalo eléctrico. Como el #11 por lo general no está disponible comercialmente, se utilizó un alambre #10 con una capacidad máxima de 30 A. Podría preguntarse por qué la corriente eléctrica absorbida de la fuente es de 19.17 A, en tanto que la requerida para una unidad era de sólo 2.8 A. Esta diferencia se debe a la combinación en paralelo de secciones de los elementos calefactores, una configuración que se describe en el Anexo 5. Ahora está claro por qué el requerimiento especifica una limitación de 16 pies en un solo circuito. Los elementos adicionales incrementarían la corriente a un nivel que excedería el del código para alambre #10 y se aproximaría a la capacidad máxima del interruptor.

La figura A3.41(b) muestra una fotografía de la construcción interna del elemento calefactor. El cable de alimentación (rojo en el aparato real) del lado derecho está conectado al núcleo del elemento calefactor, y el cable en el otro extremo (negro en el aparato real) pasa a través de un elemento calefactor de protección y regresa a la caja de terminales de la unidad (el lugar donde los cables exteriores se reúnen y conectan). Si examina con cuidado el extremo de la unidad calefactora que se muestra en la figura A3.41(c), se dará cuenta que el alambre calefactor que corre a través del núcleo no está conectado directamente a la funda redonda que mantiene a las aletas en su lugar. Un material cerámico (aislante) separa el alambre calefactor de las aletas para eliminar cualquier posibilidad de conducción entre la corriente eléctrica que pasa a través del elemento calefactor desnudo y la estructura externa de las aletas. Se utilizan materiales cerámicos por ser excelentes conductores del calor. También poseen una alta capacidad de retención del calor, así que el área circundante permanece caliente durante un tiempo, incluso después de que la corriente eléctrica se ha interrumpido. Como se muestra en la figura A3.41(d), por lo común el alambre calefactor que corre a través de la funda metálica es un compuesto de nicromo (porque el nicromo puro es bastante frágil) enrollado en forma de bobina para compensar la dilatación y la contracción producidas por el calentamiento, e incluso para permitir un elemento calefactor más largo en zócalos de longitud estándar. Al abrir el núcleo encontramos que el alambre de nicromo en el núcleo de un zócalo de 2 pies en realidad era de 7 pies de largo, es decir, hay una relación de 3.5:1. La delgadez del alambre era en particular digna de hacerse notar, con un diámetro de aproximadamente 8 mils, no más grueso que un cabello. Recuerde que cuanto más largo es un conductor y más delgado es un alambre, mayor es su resistencia. Tomamos una sección del alambre de nicromo y tratamos de calentarlo con un nivel razonable de corriente eléctrica y una secadora de pelo. El cambio en la resistencia fue casi imperceptible. Lo que queremos decir es que todo nuestro esfuerzo para incrementar la resistencia con los elementos básicos que teníamos a nuestro alcance en el laboratorio fue infructuoso. Ésta fue una excelente demostración del significado del coeficiente de temperatura de la resistencia que se indica en la tabla A3.4. Dado que el coeficiente del nicromo es tan pequeño, el cambio de su resistencia no es medible, a menos que el cambio sea verdaderamente significativo. Por tanto, la curva que aparece en la figura A3.11 se aproximaría a la horizontal para el nicromo. Para calefactores de zócalo ésta es una excelente característica porque el calor desarrollado y la potencia disipada no variarán con el tiempo a medida que el conductor se va calentando. El flujo de calor de la unidad permanecerá prácticamente constante.

Hay dos razones por las que se debe evitar soldar los cables o alambres de alimentación y de retorno al alambre calefactor de nicromo. La primera es que no puede soldar alambres de nicromo entre sí o a otros tipos de alambre. La segunda, que si pudiera hacerlo se presentaría un problema porque el



calor de la unidad podría elevarse a más de 880 °F en el punto donde los cables estén conectados, con lo que la soldadura podría fundirse y la conexión se rompería. El nicromo se debe soldar con soldadura de puntos, o plegarse sobre los alambres de cobre de la unidad. Utilizando la ecuación (A3.1) y el diámetro medido de 8 mils, y suponiendo por el momento que es nicromo puro, vemos que la resistencia del tramo de 7 pies es

$$\begin{aligned}
 R &= \frac{\rho l}{A} \\
 &= \frac{(600)(7 \text{ pies})}{(8 \text{ mils})^2} = \frac{4200}{64} \\
 R &= \mathbf{65.6 \Omega}
 \end{aligned}$$

En el capítulo 1 se presenta una ecuación de potencia que relaciona la potencia, la corriente eléctrica y la resistencia eléctrica de la manera siguiente: $P = I^2 R$. Aplicando los datos anteriores y resolviendo la resistencia, obtenemos

$$\begin{aligned}
 R &= \frac{P}{I^2} \\
 &= \frac{575 \text{ W}}{(2.8 \text{ A})^2} \\
 R &= \mathbf{73.34 \Omega}
 \end{aligned}$$

un valor que se aproxima mucho al valor calculado antes aplicando la fórmula geométrica, puesto que no podemos estar plenamente seguros del valor de resistividad del compuesto.

Durante el funcionamiento normal el alambre se calienta y transfiere el calor a las aletas, las que a su vez calientan la habitación por medio del aire que fluye a través de ellas. El flujo de aire de la unidad se incrementa porque el aire caliente se eleva, así que cuando el aire calentado sale por la parte superior de la unidad, absorbe el aire frío de la parte inferior y contribuye al efecto de convección. Si se cerrara la parte superior o la inferior de la unidad, se eliminaría el efecto de convección y la habitación no se calentaría. En tal caso lo que sucedería es que el interior del calefactor se calentaría demasiado y haría que la cubierta metálica también se calentara en exceso. Este problema es la razón principal de que se introduzca el elemento de protección térmica que aparece en la figura A3.41(b). De hecho, la delgada y larga tubería de cobre que se muestra en la figura A3.41 está llena de aceite que se dilata cuando se calienta. Si se calienta en exceso, se dilata y oprime un interruptor en la carcasa, el cual apaga el calefactor con lo que se corta la corriente eléctrica que circula por el alambre calefactor.

Control de atenuación en un automóvil

Un reóstato de dos puntos es el elemento principal en el control de la intensidad de la luz del tablero y accesorios de un automóvil. La red básica aparece en la figura A3.42 con niveles de voltaje y corriente eléctrica característicos. Cuando se cierra el interruptor de las luces (por lo común, girando o tirando de la perilla de control de luces del tablero), se establece una corriente eléctrica a través del reóstato de 50 Ω y luego a través de las diversas luces (entre ellas la del cenicero, la del cuadrante del radio, y la luz de la guantera). A medida que se gira la perilla del interruptor de control, se controla la cantidad de resistencia entre los puntos a y b del reóstato. Cuanto mayor sea la resistencia entre los puntos a y b , menor será la corriente eléctrica que circule, y menor la brillantez de las luces. Observe el interruptor adicional en la luz de la guantera, el cual se activa al abrir la puerta del compartimento. Además de la luz de la guantera, todas las luces que se muestran en la figura A3.42 encienden al mismo tiempo al activarse el interruptor. La

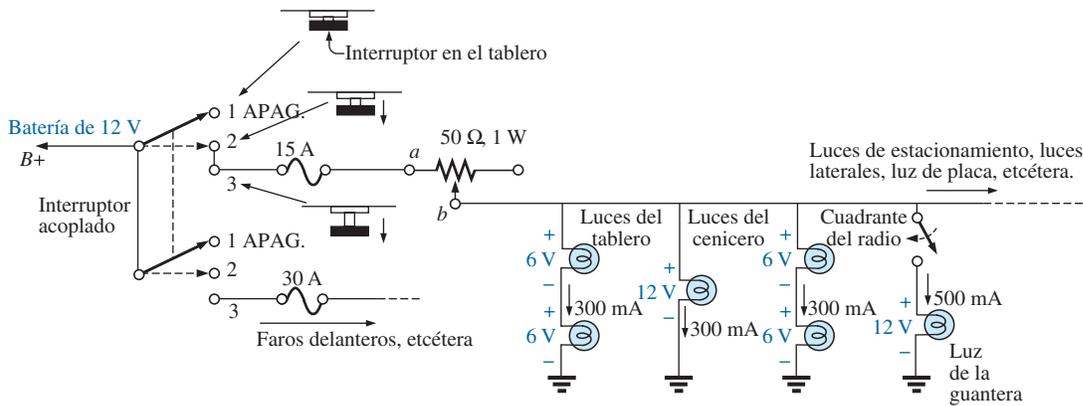


FIG. A3.42

Control de atenuador del tablero de instrumentos de un automóvil.

primera rama después del reóstato contiene dos focos de 6 V en lugar de los focos de 12 V que aparecen en las demás ramas. Los focos más pequeños de esta rama producen una luz más suave y uniforme para áreas específicas del tablero. Observe que la suma de los dos focos (en serie) es de 12 V para igualar la suma a través de las demás ramas. La división del voltaje en cualquier red se aborda detalladamente en los Anexos 4 y 5.

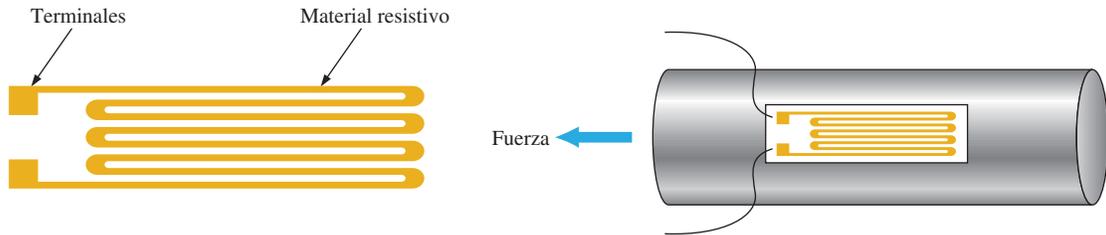
En la figura A3.42 también se dan niveles de corriente propios de las diversas ramas. En el Anexo 5 aprenderá que la corriente eléctrica drenada de la batería y que pasa a través del fusible y el reóstato es aproximadamente igual a la suma de las corrientes eléctricas en las ramas de la red del circuito. El resultado es que el fusible debe ser capaz de manejar la corriente eléctrica en amperes, así que se utilizó un fusible de 15 A (aun cuando los focos aparezcan en la figura A3.42 como focos de 12 V para igualar la capacidad de la batería).

Siempre que se conocen los niveles de voltaje y corriente eléctrica de operación de un componente, la resistencia “caliente” interna de la unidad puede determinarse aplicando la ley de Ohm, que se presenta en el capítulo 1. Básicamente, esta ley relaciona el voltaje, la corriente eléctrica y la resistencia por medio de $I = V/R$. Para el foco de 12 V en una corriente nominal de 300 mA, la resistencia es $R = V/I = 12 \text{ V}/300 \text{ mA} = 40 \Omega$. Para los focos de 6 V, es $6 \text{ V}/300 \text{ mA} = 20 \Omega$. En capítulos posteriores se aborda más información sobre niveles de potencia y resistencia.

La descripción anterior asumió un nivel ideal de 12 V para la batería. En realidad, se utilizan focos de 6.3 V y 14 V para igualar el nivel de carga de la mayoría de los automóviles.

Medidores de deformación

Cualquier cambio en la forma de una estructura puede detectarse utilizando medidores de deformación, cuya resistencia cambia con el esfuerzo o flexión aplicados. En la figura A3.43 se muestra un ejemplo de un medidor de deformación. Los medidores de deformación metálicos se construyen de alambre fino o de lámina metálica delgada en un patrón de cuadrícula. La resistencia terminal del medidor de deformación cambia cuando se somete a compresión o a tensión. Un ejemplo sencillo del uso de medidores de deformación resistivos es el monitoreo de actividad sísmica. Cuando el medidor se coloca a través de un área de presunta actividad sísmica, la más leve separación del terreno cambia la resistencia terminal, y el procesador muestra un resultado sensible a la cantidad de separación. Otro ejemplo se encuentra en los sistemas de alarma, donde el más leve cambio en la forma de una viga de apoyo cuando alguien camina sobre ella produce un cambio de la resistencia termi-



(a) Configuración típica de medidores de deformación.

(b) El medidor de deformación se coloca en la cubierta para su medición a través de la línea de fuerza. Cuando la superficie se alarga, el medidor se estira.

FIG. A3.43

Medidor de deformación resistivo.

nal, y suena una alarma. Otros ejemplos incluyen la colocación de medidores de deformación en puentes para monitorear su rigidez, y en generadores muy grandes para verificar si los diversos componentes móviles están comenzando a separarse por desgaste de los cojinetes o los espaciadores. El pequeño control del ratón en el teclado de una computadora puede ser una serie de medidores de deformación que revelan la dirección, la compresión, o la extensión aplicadas al elemento de control sobre el teclado. El movimiento en una dirección puede extender o comprimir un medidor de resistencia, el cual puede monitorear y controlar el movimiento del ratón en la pantalla.

PROBLEMAS

SECCIÓN A3.2 Resistencia: alambres circulares

- Convierta lo siguiente en mils:
 - 0.5 pulg.
 - 0.02 pulg.
 - 1/4 pulg.
 - 10 mm
 - 0.01 pies
 - 0.1 cm
- Calcule el área en mils circulares (MC) de alambres cuyos diámetros son los siguientes:
 - 30 mils
 - 0.016 pulg.
 - 1/8 pulg.
 - 1 cm
 - 0.02 pies
 - 4 mm
- El área en mils circulares es
 - 1600 MC
 - 820 MC
 - 40,000 MC
 - 625 MC
 - 6.25 MC
 - 0.3×10^6 MC

¿Cuál es el diámetro de cada alambre en pulgadas?
- ¿Cuál es la resistencia de un alambre de cobre de 200 pies de largo y 1/50 pulg. de diámetro ($T = 20^\circ\text{C}$)?
- ¿Cuál es el área en mils circulares de un conductor de aluminio de 80 pies de largo con una resistencia de 2.5Ω ?
 - ¿Cuál es su diámetro en pulgadas?
- Se tiene que fabricar un resistor de 2.2Ω con alambre de nicromo. Si el alambre disponible es de 1/32 pulg. de diámetro, ¿cuánto alambre se requiere?
- ¿Cuál es el diámetro en pulgadas de un alambre de cobre que tiene una resistencia de 3.3Ω y es tan largo como un campo de fútbol (100 yardas) ($T = 20^\circ\text{C}$)?
 - Sin efectuar la solución numérica, determine si el área de un alambre de aluminio será más pequeña o más grande que la del alambre de cobre. Explique.
 - Repita el inciso (b) para un alambre de plata.

- La resistencia de un alambre de 1000 pies de largo es de $0.5 \text{ k}\Omega$ y su área es de 94 MC. ¿De qué material es el alambre ($T = 20^\circ\text{C}$)?
- A un contratista le interesa conocer la longitud de un alambre de cobre que aún está enrollado en el carrete de la figura A3.44. Midió la resistencia y encontró que debe ser de 3.12Ω . Una cinta de medir indicó que el espesor del alambre era de aproximadamente 1/32 pulg. ¿Cuál es la longitud aproximada en pies?
 - ¿Cuál es el peso del alambre enrollado en el carrete?
 - Es común ver rangos de temperatura para materiales listados en grados centígrados en lugar de grados Fahrenheit. ¿Cuál es el rango en grados Fahrenheit? ¿Qué es único respecto a la relación entre grados Fahrenheit y grados centígrados a -40°C ?

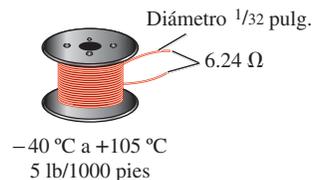


FIG. A3.44

Problema 9.

- ¿Cuál es el área de la sección transversal en mils circulares de una barra de cobre conductora rectangular, si sus dimensiones son 3/8 pulg. \times 4.8 pulg.?
 - Si el área del alambre que se usa comúnmente en instalaciones eléctricas domésticas tiene un diámetro de cerca de 1/12 pulg., ¿cuántos alambres tendrían que combinarse para tener la misma área?

11. a. ¿Cuál es la resistencia de una barra conductora de cobre para un rascacielos con las dimensiones ($T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) que se muestran en la figura A3.45?
- b. Repita el inciso (a) para una barra de aluminio y compare los resultados.

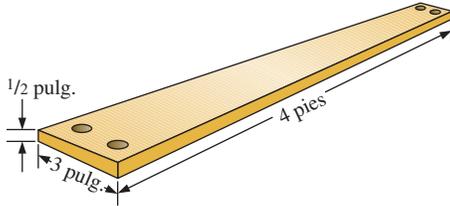


FIG. A3.45
Problema 11.

12. Determine el incremento en la 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 $0.2\ \Omega$. La temperatura permanece fija.
- *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 $40,000\ \text{MC}$ a $0.04\ \text{pulg.}^2$, y la resistencia original era de $800\ \text{m}\Omega$?

SECCIÓN A3.3 Tablas de calibres de conductores eléctricos

14. a. En la construcción, por lo general los dos cables de uso más común en instalaciones eléctricas domésticas son el #12 y el #14, aunque el #12 es el de mayor uso porque es para 20 A. ¿Qué tanto más grande (en porcentaje) en área es el alambre #12 comparado con el #14?
- b. La corriente nominal máxima para el alambre #14 es 15 A. ¿Cómo se compara la relación de niveles de corriente eléctrica máximos con la relación de las áreas de los dos alambres?
15. a. Compare el área de un alambre #12 con el área de un alambre #9. ¿El cambio en el área comprobó la regla general de que una reducción de tres números de calibre duplica el área?
- b. Compare el área de un alambre #12 con la de un alambre #0. ¿Cuántas veces más grande en área es el alambre #0 comparado con el #12? ¿Es significativo el resultado? Compárelo con el cambio de la capacidad de corriente eléctrica máxima para cada uno.
16. a. Compare el área de un alambre #20 con la de un alambre romax #10 doméstico. ¿El cambio en el área comprobó la regla general de que una reducción de 10 números de calibre incrementa 10 veces el área del alambre?
- b. Compare el área de un alambre #20 con la de un alambre #40. ¿Cuántas veces más grande en área es el alambre #20 que el alambre #40? ¿El resultado comprobó la regla del inciso (a)?
17. a. Para el sistema de la figura A3.46, la resistencia de cada línea no puede exceder de $6\ \text{m}\Omega$, y la corriente eléctrica máxima absorbida por la carga es de 110 A. ¿Qué calibre mínimo de alambre debe utilizarse?
- b. Repita el inciso (a) para una resistencia máxima de $3\ \text{m}\Omega$, $d = 30$ pies, y una corriente eléctrica máxima de 110 A.

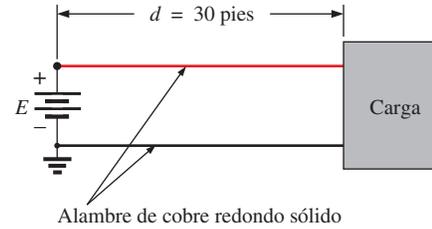


FIG. A3.46
Problema 17.

- *18. a. Con datos de la tabla 3.2, determine la densidad de corriente eléctrica máxima permisible (A/MC) para un alambre AWG #000.
- b. Convierta el resultado de (a) en A/pulg.^2 .
- c. Utilizando el resultado del inciso (b), determine el área de sección transversal requerida para transportar una corriente eléctrica de 5000 A.

SECCIÓN A3.4 Efectos de la temperatura

19. La resistencia de un alambre de cobre es de $2\ \Omega$ a $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. ¿Cuál es su resistencia a $80\text{ }^{\circ}\text{C}$?
20. La resistencia de una barra conductora de aluminio es de $0.02\ \Omega$ a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. ¿Cuál es su resistencia a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$?
21. La resistencia de un alambre de cobre es de $4\ \Omega$ a temperatura ambiente ($68\text{ }^{\circ}\text{F}$). ¿Cuál es su resistencia a una temperatura de congelación de $32\text{ }^{\circ}\text{F}$?
22. La resistencia de un alambre de cobre es de $0.025\ \Omega$ a una temperatura de $70\text{ }^{\circ}\text{F}$.
 - a. ¿Cuál es la resistencia si la temperatura se reduce 10° a $60\text{ }^{\circ}\text{F}$?
 - b. ¿Cuál es la resistencia si se reduce 10° más a $50\text{ }^{\circ}\text{F}$?
 - c. Teniendo en cuenta los resultados de los incisos (a) y (b), ¿cuál es la reducción para cada parte en miliohms? ¿La reducción en la resistencia es lineal o no lineal? ¿Puede predecir la nueva resistencia si ésta se reduce a $40\text{ }^{\circ}\text{F}$, sin utilizar la ecuación de temperatura básica?
 - d. Si la temperatura baja a $-30\text{ }^{\circ}\text{F}$ en el norte de Maine, determine el cambio en la resistencia a partir del nivel de temperatura ambiente del inciso (a). ¿Es significativo el cambio?
 - e. Si la temperatura se eleva a $120\text{ }^{\circ}\text{F}$ en Cairns, Australia, determine el cambio en la resistencia a partir de la temperatura ambiente del inciso (a). ¿Es significativo el cambio?
23. a. La resistencia de un alambre de cobre es de $1\ \Omega$ a $4\text{ }^{\circ}\text{C}$. ¿A qué temperatura ($^{\circ}\text{C}$) será de $1.1\ \Omega$?
- b. ¿A qué temperatura será de $0.1\ \Omega$?
24. a. Si la resistencia de 1000 pies de alambre es aproximadamente de $1\ \Omega$ a temperatura ambiente ($68\text{ }^{\circ}\text{F}$), ¿a qué temperatura duplicará su valor?
- b. ¿Qué calibre de alambre se utilizó?
- c. ¿Cuál es el diámetro aproximado en pulgadas, utilizando la forma fraccionaria más próxima?
25. a. Verifique el valor de α_{20} para cobre en la tabla A3.6 al sustituir la temperatura absoluta inferida en la ecuación (3.9).
- b. Con los datos de la ecuación (A3.10), determine la temperatura a la cual la resistencia de un conductor de cobre se incrementará a $1\ \Omega$ desde un nivel de $0.8\ \Omega$ a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.
26. Utilizando la ecuación (A3.10), determine la resistencia de un alambre de cobre a $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ si su resistencia a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ es de $0.4\ \Omega$.



- *27. Utilizando la ecuación (A3.10), determine la resistencia de una bobina de 1000 pies de alambre de cobre #12 asentada en el desierto a una temperatura de 115 °F.
28. Un resistor de alambre enrollado de 22 Ω se calibró a +200 PPM para un rango de temperatura de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+75\text{ }^{\circ}\text{C}$. Determine su resistencia a 65 °C.
29. Un resistor de alambre enrollado de 100 Ω se calibró a +100 PPM para un rango de temperatura de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Determine su resistencia a 50 °C.

SECCIÓN A3.5 Tipos de resistores

30. a. ¿Cuál es el incremento aproximado en tamaño de un resistor de carbón de 1 a 2 W?
 b. ¿Cuál es el incremento aproximado en tamaño de un resistor de carbón de 1/2 a 2 W?
 c. ¿Podríamos concluir que para el mismo tipo de resistor, un incremento en watts de potencia eléctrica requiere un aumento de tamaño (volumen)? ¿Es casi una relación lineal? Es decir, dos veces la potencia eléctrica requiere un incremento de 2:1?
31. Si la resistencia entre las terminales externas de un potenciómetro lineal es de 10 k Ω , ¿cuál es su resistencia entre el contacto deslizante (móvil) y una terminal externa, si la resistencia entre el contacto deslizante y la otra terminal externa es de 3.5 k Ω ?
32. Si el contacto deslizante de un potenciómetro lineal está a un cuarto de su camino alrededor de la superficie de contacto, ¿cuál es la resistencia entre el contacto deslizante y cada terminal si la resistencia total es de 2.5 k Ω ?
- *33. Muestre las conexiones requeridas para establecer 4 k Ω entre el contacto deslizante y una terminal externa de un potenciómetro de 10 k Ω mientras se tiene sólo cero ohms entre la otra terminal externa y el contacto deslizante.

SECCIÓN A3.6 Codificación por colores y valores de resistores estándar

34. Determine el rango en el cual debe estar un resistor que tenga las siguientes bandas de color para satisfacer la tolerancia del fabricante:

	1a. banda	2a. banda	3a. banda	4a. banda
a.	gris	rojo	marrón	oro
b.	rojo	rojo	marrón	plata
c.	blanco	marrón	naranja	—
d.	blanco	marrón	rojo	oro
e.	naranja	blanco	verde	—

35. Determine el código de colores para los siguientes resistores con 10% de tolerancia.
- a. 68 Ω b. 0.33 Ω
 c. 22 k Ω d. 5.6 M Ω
36. a. ¿Hay un traslape de cobertura entre resistores de 20%? Es decir, determine el rango de tolerancia de un resistor de 10 Ω con 20% de tolerancia y un resistor de 15 Ω con 20% de tolerancia, y observe si sus rangos de tolerancia se traslapan.
 b. Repita el inciso (a) para resistores con tolerancia de 10% del mismo valor.
37. Dado un resistor codificado con amarillo, violeta, marrón y plata, que mide 492 Ω , ¿está dentro de la tolerancia? ¿Cuál es el rango de tolerancia?

38. a. ¿Cómo cambiaría la figura A3.26(a) si los resistores de 47, 68 y 100 Ω se cambiaran a 4.7, 6.8 y 10 k Ω , respectivamente, y la tolerancia permaneciera igual?
 b. ¿Cómo cambiaría la figura A3.26(a) si los resistores de 47, 68 y 100 Ω se cambiaran a 4.7, 6.8 y 10 M Ω , respectivamente, y la tolerancia permaneciera igual?
39. Determine el valor de los siguientes resistores de montaje superficial:
- a. 621 b. 333
 c. Q2 d. C6

SECCIÓN A3.7 Conductancia

40. Determine la conductancia de cada una de las siguientes resistencias:
- a. 120 Ω b. 4 k Ω
 c. 2.2 M Ω d. Compare los tres resultados.
41. Determine la conductancia de 1000 pies de alambre #12 AWG hecho de
- a. cobre b. aluminio
42. a. Determine la conductancia de un resistor de 10, 20 y 100 Ω en milisiemens.
 b. ¿Cómo compara la tasa de cambio de resistencia con la tasa de cambio de conductancia?
 c. ¿La relación entre el cambio de resistencia y el cambio de la conductancia asociada es una relación lineal inversa o una relación no lineal inversa?
- *43. La conductancia de un cable es de 100 S. Si el área se incrementa en dos tercios y la longitud se reduce en la misma cantidad, determine la nueva conductancia del cable si la temperatura permanece fija.

SECCIÓN A3.8 Óhmmetros

44. ¿Por qué **nunca** conecta un óhmetro a una red activa?
45. ¿Cómo comprobaría el estado de un fusible con un óhmetro?
46. ¿Cómo determinaría los estados de encendido y apagado de un interruptor utilizando un óhmetro?
47. ¿Cómo utilizaría un óhmetro para comprobar el estado de un foco?

SECCIÓN A3.9 Resistencia: Unidades métricas

48. Utilizando unidades métricas, determine la longitud de un alambre de cobre cuya resistencia es de 0.2 Ω y el diámetro mide 1/12 pulg.
49. Repita el problema 11 utilizando unidades métricas; es decir, convierta las dimensiones dadas en unidades métricas antes de determinar la resistencia.
50. Si la resistencia laminar de una muestra de óxido de estaño es de 100 Ω , ¿cuál es el espesor de la capa de óxido?
51. Determine el ancho de un resistor de carbón que tiene una resistencia laminar de 150 Ω si la longitud es de 1/2 pulg. y la resistencia es de 500 Ω .
- *52. Derive el factor de conversión entre ρ (MC- Ω /pie) y ρ (Ω -cm).
- a. Resolviendo ρ para el alambre de la figura A3.47 en MC- Ω /pies.
 b. Resolviendo ρ para el mismo alambre de la figura A3.47 en Ω -cm haciendo las conversiones necesarias.
 c. Utilice la ecuación $\rho_2 = k\rho_1$ para determinar el factor de conversión k si ρ_1 es la solución del inciso (a) y ρ_2 es la solución del inciso (b).

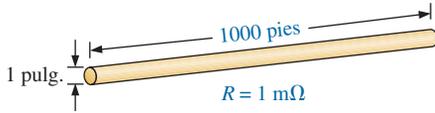


FIG. A3.47
Problema 52.

SECCIÓN A3.11 Superconductores

53. Con sus propias palabras, repase lo que aprendió sobre los superconductores. ¿Siente que es una opción que tendrá un impacto significativo en el futuro de la industria electrónica, o su uso será muy limitado? Explique por qué lo siente de esa manera. ¿Qué podría suceder que cambiara su opinión?
54. Visite la biblioteca de su localidad y busque una tabla que contenga las temperaturas críticas de varios materiales. Enliste por lo menos cinco materiales con temperaturas críticas que no se mencionan en este texto. Elija algunos materiales que tengan temperaturas críticas relativamente altas.
55. Encuentre por lo menos un artículo sobre la aplicación de la superconductividad en el sector comercial, y redacte un resumen que incluya todos los datos y cifras interesantes.
- *56. Utilizando el nivel de densidad de 1 MA/cm^2 requerido para la fabricación de circuitos integrados, determine cuál sería la corriente eléctrica resultante a través de un alambre #12 doméstico. Compare su resultado con el límite permisible de la tabla A3.2.
- *57. Investigue el detector de campo magnético SQUID y repase su modo básico de operación, así como una o dos aplicaciones.

SECCIÓN A3.12 Termistores

- *58. a. Determine la resistencia del termistor que tiene las características de la figura A3.36 a -50°C , 50°C y 200°C . Observe que es una escala logarítmica. Si es necesario, consulte una referencia con una escala logarítmica ampliada.
 - b. ¿Tiene el termistor un coeficiente de temperatura positivo o negativo?
 - c. ¿Es el coeficiente un valor fijo para el rango de -100°C a 400°C ? ¿Por qué?
 - d. ¿Cuál es la tasa aproximada de cambio de ρ con la temperatura a 100°C ?

SECCIÓN A3.13 Celda fotoconductor

59. a. Utilizando las características de la figura A3.38, determine la resistencia de la celda fotoconductor a 10 y 100 pies-candelas de iluminación. Como en el problema 58, observe que es una escala logarítmica.
 - b. ¿Tiene la celda un coeficiente de iluminación positivo o negativo?
 - c. Es el coeficiente un valor fijo en el rango de 0.1 a 1000 pies-candelas? ¿Por qué?
 - d. ¿Cuál es la tasa de cambio aproximada de R con una iluminación de 10 pies-candelas?

SECCIÓN A3.14 Varistores

60. a. Recurriendo a la figura A3.40(a), determine el voltaje terminal del dispositivo en 0.5, 1, 3 y 5 mA.

- b. ¿Cuál es el cambio total en el voltaje para el rango indicado de niveles de corriente eléctrica?
- c. Compare la relación de niveles de corriente eléctrica de máximo a mínimo anteriores con la relación correspondiente de niveles de voltaje.

GLOSARIO

- Celda fotoconductor** Dispositivo semiconductor de dos terminales, cuya resistencia terminal está determinada por la intensidad de la luz que incide en su superficie expuesta.
- Cero absoluto** Temperatura a la cual cesa todo movimiento molecular; -273.15°C .
- Codificación por colores** Técnica que utiliza bandas de color para indicar los niveles de resistencia y tolerancia de resistores.
- Coefficiente de temperatura negativo de la resistencia** Valor que revela que la resistencia de un material se reducirá con un incremento en la temperatura.
- Coefficiente de temperatura positivo de la resistencia** Valor que revela que la resistencia de un material se incrementará con un aumento en la temperatura.
- Conductancia** (G) Indicación de la relativa facilidad con que la corriente puede establecerse en un material. Se mide en siemens (S).
- Ductilidad** Propiedad de un material que permite estirarlo en forma de alambres largos y delgados.
- Efecto de Cooper** "Apareamiento" de electrones cuando viajan a través de un medio.
- Maleabilidad** Propiedad de un material que permite trabajarlo en muchas formas diferentes.
- Memristor** Resistor cuya resistencia es una función de la corriente eléctrica que fluye a través de él; tiene la capacidad de recordar y retener su último valor de resistencia.
- Mil circular (MC)** Área de sección transversal de un alambre de 1 mil de diámetro.
- Ohm (Ω)** Unidad de medición aplicada a la resistencia.
- Óhmetro** Instrumento para medir niveles de resistencia.
- Potenciómetro** Dispositivo de tres terminales con el cual pueden variarse los niveles de potencial de una manera lineal o no lineal.
- PPM/ $^\circ\text{C}$** Sensibilidad a la temperatura de un resistor en partes por millón por grado Celsius.
- Reóstato** Elemento cuya resistencia terminal puede variarse de una manera lineal o no lineal.
- Resistencia eléctrica** Medida de la oposición al flujo de la carga que fluye a través de un material.
- Resistencia laminar** Definida por ρ/d para un diseño de circuito integrado y de película delgada.
- Resistividad** (ρ) Constante de proporcionalidad entre la resistencia de un material y sus dimensiones físicas.
- Superconductor** Conductores de carga eléctrica que para todo efecto práctico tienen cero ohms.
- Temperatura absoluta inferida** Temperatura a través de la cual una aproximación de recta para la curva real de resistencia contra temperatura interseca el eje de temperatura.
- Termistor** Dispositivo semiconductor de dos terminales, cuya resistencia es sensible a la temperatura.
- Varistor** Resistor no lineal, dependiente del voltaje, que se utiliza para suprimir altos voltajes transitorios.

