



Figura 3.27 Werner von Siemens.

© Smithsonian Institute Library.

Alemão (Lenthe, Berlim)
(1816-1892)

Engenheiro Elétrico, fabricante de Telégrafos
Siemens & Halske AG.

Desenvolveu um *processo de galvanoplastia* durante sua breve passagem pela prisão, por ter sido padrinho em um duelo entre oficiais do exército da Prússia. Inspirado pelo telégrafo eletrônico inventado por sir Charles Wheatstone em 1817, aperfeiçoou o projeto e começou a instalar, com a ajuda de seu irmão Carl, cabos através do Mediterrâneo e da Europa para a Índia. Suas invenções incluem o primeiro *gerador autoexcitado*, que utiliza o magnetismo residual de seu eletroímã em vez de um ímã permanente, de baixa eficiência. Em 1888, ascendeu à nobreza e pode acrescentar o *von* ao nome. A atual empresa Siemens AG possui unidades de fabricação em mais de 35 países, e escritórios de vendas em cerca de 125 países.

EXEMPLO 3.13

- Determine a condutância de resistores de $1\ \Omega$, de $50\ \text{k}\Omega$ e de $10\ \text{M}\Omega$.
- Como o nível de condutância muda com o aumento da resistência?

Solução:

Equação 3.12:

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

$$50\ \text{k}\Omega: G = \frac{1}{R} = \frac{1}{50\ \text{k}\Omega} = \frac{1}{50 \times 10^3\ \Omega} \\ = 0,02 \times 10^{-3}\ \text{S} = \mathbf{0,02\ \text{mS}}$$

$$10\ \text{M}\Omega: G = \frac{1}{R} = \frac{1}{10\ \text{M}\Omega} = \frac{1}{10 \times 10^6\ \Omega} \\ = 0,1 \times 10^{-6}\ \text{S} = \mathbf{0,1\ \mu\text{S}}$$

- O nível de condutância cai rapidamente com o aumento significativo nos níveis de resistência.

EXEMPLO 3.14

Qual a variação relativa da condutividade de um condutor se sua área é reduzida em 30 por cento e seu com-

primento aumentado em 40 por cento? A resistividade é mantida constante.

Solução:

Equação 3.13:

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

com o subscrito i indicando o valor inicial. Usando o subscrito n para indicar o novo valor, obtemos:

$$G_n = \frac{A_n}{\rho_n l_n} = \frac{0,70 A_i}{\rho_i (1,4 l_i)} = \frac{0,70}{1,4} \frac{A_i}{\rho_i l_i} = \frac{0,70 G_i}{1,4}$$

e $G_n = \mathbf{0,5 G_i}$

3.8 OHMÍMETROS

O **ohmímetro** é um instrumento usado para realizar, dentre outras, as seguintes tarefas:

1. Medir a resistência de um elemento individual ou de elementos combinados.
2. Detectar situações de ‘circuito aberto’ (resistência alta) e de ‘curto-circuito’ (resistência baixa).
3. Verificar a continuidade das conexões de um circuito e identificar fios em um cabo com múltiplas vias.
4. Testar alguns dispositivos semicondutores (eletrônicos).

Na maioria das aplicações, os ohmímetros usados mais frequentemente fazem parte de um VOM (multímetro analógico) ou de um DMM (multímetro digital). Os detalhes dos circuitos internos e os métodos de utilização do aparelho serão deixados para as aulas de laboratório. Entretanto, em geral, a resistência do resistor pode ser medida conectando, simplesmente, as pontas de prova do medidor aos terminais do resistor, conforme mostra a Figura 3.28. Não é necessário se preocupar com qual fio se conecta a qual extremidade; o resultado será o mesmo em ambos os casos, pois os resistores oferecem a mesma resistência ao fluxo de cargas (corrente) em qualquer sentido. Se for

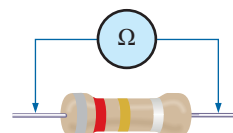


Figura 3.28 Medição da resistência de um único elemento.

usado um multímetro analógico, a chave seletora deverá ser colocada na faixa de resistência adequada, e a leitura será feita em uma escala não linear (normalmente a escala superior do medidor), que deve ser lida apropriadamente para se obter o valor da resistência. O multímetro digital também necessita que seja escolhida a escala adequada para a resistência a ser medida, mas o resultado aparece como um número no visor do aparelho, e o ponto decimal é determinado pela escala escolhida. Quando se mede a resistência de um único resistor, em geral, é aconselhável remover a resistência do circuito antes de fazer a medição. Se isso for difícil ou impossível, pelo menos uma extremidade do resistor deve ser desconectada do circuito para que a leitura não seja influenciada pelos outros componentes.

Se as duas pontas de prova do instrumento estiverem se tocando com a chave seletora do medidor colocada nas posições para medir resistências, a leitura resultante será zero. Uma conexão pode ser testada, como mostra a Figura 3.29, ao se ligar o ohmímetro aos dois lados da conexão. Se a resistência for zero, a conexão é segura. Se for diferente de zero, pode ser que a conexão não esteja firme; caso a resistência medida seja infinita, não há conexão (circuito aberto).

Se um fio de um cabo é conhecido, a extremidade de um segundo fio podem ser identificadas segundo mostra a Figura 3.30. Simplesmente conecte uma das extremidades do fio conhecido a uma extremidade de qualquer outro fio. Quando o ohmímetro indicar zero ohm (ou uma resistência muito baixa), a segunda extremidade do outro fio terá sido identificada. Esse procedimento pode ser usado também para identificar as extremidades do primeiro fio somente encostando uma das pontas do medidor em uma extremidade de um fio qualquer e tocando todos os fios do outro extremo do cabo com a outra ponta de prova até que uma leitura de zero ohm seja obtida.

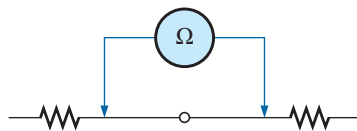


Figura 3.29 Verificação da continuidade de uma conexão.

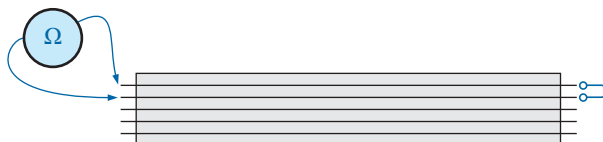


Figura 3.30 Identificação dos fios de um cabo com múltiplas vias.

Medidas preliminares das condições de alguns dispositivos eletrônicos, como diodos e transistores, podem ser tomadas usando-se o ohmímetro. Esse medidor também pode ser usado para identificar os terminais desses mesmos dispositivos.

Uma nota importante sobre o uso de qualquer ohmímetro:

Jamais conecte um ohmímetro a um circuito energizado!

A leitura não fará sentido e o instrumento poderá ser danificado. A seção do ohmímetro de qualquer instrumento é projetada para fazer passar uma pequena corrente pela resistência a ser medida. Uma grande corrente externa pode danificar o mecanismo responsável pelo movimento do ponteiro e certamente prejudicará a calibragem do aparelho. Além disso:

Jamais guarde um multímetro com a chave posicionada para medidas de resistência.

As duas pontas de prova do medidor podem se tocar, fazendo com que a pequena corrente gerada descarregue a bateria. Multímetros analógicos devem ser guardados com o seletor na maior escala de tensão, e a chave seletora dos multímetros digitais deve estar na posição OFF (desligado).

3.9 RESISTÊNCIA: UNIDADES MÉTRICAS

Os projetos de elementos resistivos para várias áreas de aplicação, incluindo os resistores de filmes finos e circuitos integrados, utilizam unidades métricas para as grandezas da Equação 3.1 introduzidas na Seção 3.2. Em unidades do sistema SI, a resistividade seria medida em ohms-metros, a área em metros quadrados e o comprimento em metros. Entretanto, o metro é uma unidade de medida muito grande para a maioria das aplicações e, portanto, geralmente é empregado o centímetro. As dimensões resultantes para a Equação 3.1 são:

ρ : ohms-centímetros
 l : centímetros
 A : centímetros quadrados

As unidades de ρ podem ser derivadas de:

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

A resistividade de um material é, na verdade, a resistência de uma amostra tal como a que aparece na

Figura 3.31. A Tabela 3.6 fornece uma lista de valores de \boxtimes em ohms-centímetros. Observe que a área é expressa agora em centímetros quadrados, podendo ser determinada usando-se a equação básica $A = \pi d^2/4$, eliminando assim a necessidade de trabalhar com mils circulares, a unidade de medida especial associada a tais fios.

EXEMPLO 3.15

Determine a resistência de 100 pés do fio de telefone de cobre #28 se o seu diâmetro for de 0,0126 polegada.

Solução:

Conversões de unidades:

$$l = 100 \cancel{\text{pés}} \left(\frac{12 \cancel{\text{pés}}}{1 \cancel{\text{pé}}} \right) \left(\frac{2,54 \text{ cm}}{1 \cancel{\text{pés.}}} \right) = 3.048 \text{ cm}$$

$$d = 0,0126 \cancel{\text{pol.}} \left(\frac{2,54 \text{ cm}}{1 \cancel{\text{pol.}}} \right) = 0,032 \text{ cm}$$

Portanto,

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{(3,1416)(0,032 \text{ cm})^2}{4} = 8,04 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$$

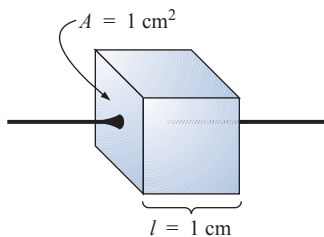


Figura 3.31 Definição de \boxtimes em ohm-centímetros.

Tabela 3.6 Resistividade (r) de vários materiais.

Material	$\Omega\text{-cm}$
Prata	$1,645 \times 10^{-6}$
Cobre	$1,723 \times 10^{-6}$
Ouro	$2,443 \times 10^{-6}$
Alumínio	$2,825 \times 10^{-6}$
Tungstênio	$5,485 \times 10^{-6}$
Níquel	$7,811 \times 10^{-6}$
Ferro	$12,299 \times 10^{-6}$
Tântalo	$15,54 \times 10^{-6}$
Nicromo	$99,72 \times 10^{-6}$
Óxido de estanho	250×10^{-6}
Carbono	3.500×10^{-6}

$$R = \rho \frac{l}{A} = \frac{(1,723 \times 10^{-6} \Omega\text{-cm})(3.048 \text{ cm})}{8,04 \times 10^{-4} \text{ cm}^2} \cong 6,5 \Omega$$

Usando as unidades para fios circulares e a Tabela 3.2 para a área de um fio #28, encontramos:

$$R = \rho \frac{l}{A} = \frac{(10,37 \text{ CM-}\Omega/\cancel{\text{pés}})(100 \cancel{\text{pés}})}{159,79 \text{ CM}} \cong 6,5 \Omega$$

EXEMPLO 3.16

Determine a resistência do resistor de filme fino mostrado na Figura 3.32 se a **resistência laminar** R_s (definida por $R_s = \rho/d$) for 100 Ω .

Solução:

Para materiais depositados de mesma espessura, o fator de resistência laminar é geralmente empregado no projeto de resistores de filme fino. A Equação 3.1 pode ser escrita como:

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

onde l é o comprimento da amostra e w , sua largura. Substituindo na equação anterior, temos:

$$R = R_s \frac{l}{w} = \frac{(100 \Omega)(0,6 \text{ cm})}{0,3 \text{ cm}} = 200 \Omega$$

como era de se esperar, já que $l = 2w$.

O fator de conversão entre resistividade em mils circulares-ohms e pés e ohms-centímetros é o seguinte:

$$\boxtimes(\Omega\text{-cm}) = (1,662 \times 10^{-7}) \times (\text{valor em CM-}\Omega/\cancel{\text{pés}})$$

Por exemplo, para o cobre, $\boxtimes = 10,37 \text{ CM-}\Omega/\cancel{\text{pés}}$:

$$\begin{aligned} \boxtimes(\Omega\text{-cm}) &= 1,662 \times 10^{-7} (10,37 \text{ CM-}\Omega/\cancel{\text{pés}}) \\ &= 1,723 \times 10^{-6} \Omega\text{-cm} \end{aligned}$$

conforme indicado na Tabela 3.6.

A unidade de resistividade no projeto de CIs é geralmente expressa em ohms-centímetros, embora as ta-

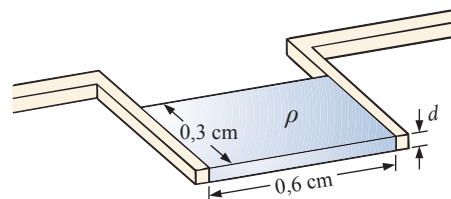


Figura 3.32 Resistor de filme fino (veja o Exemplo 3.16).

belas frequentemente forneçam ρ em ohms-metros ou microhms-centímetros. Usando a técnica de conversão apresentada no Capítulo 1, vemos que o fator de conversão entre ohms-centímetros e ohms-metros é o seguinte:

$$1,723 \times 10^{-6} \Omega\text{-cm} \left[\frac{1\text{m}}{100\text{cm}} \right] = \frac{1}{100} [1,723 \times 10^{-6}] \Omega\text{-m}$$

ou seja, o valor em ohms-metros é 1/100 do valor em ohms-centímetros, e

$$\rho(\Omega\text{-m}) = \left(\frac{1}{100} \right) \times (\text{valor em } \Omega\text{-cm}) \quad (3.14)$$

De forma similar,

$$\boxtimes(\mu\Omega\text{-cm}) = (10^6) \times (\text{valor em } \Omega\text{-cm}) \quad (3.15)$$

Para fins de comparação, valores típicos de ρ em ohms-centímetros para condutores, semicondutores e isolantes são fornecidos na Tabela 3.7.

Observe, em particular, a diferença de ordens de grandeza entre condutores e isolantes (10^{21}) — uma diferença de proporção enorme. Há uma diferença significativa nos valores de ρ para os semicondutores listados, mas a diferença em ordem de grandeza entre os valores da resistividade nos semicondutores e os valores da resistividade nos condutores e isolantes é de pelo menos 10^6 para todos os semicondutores listados.

Tabela 3.7 Comparação entre os valores de \boxtimes em $\Omega\text{-cm}$.

Condutor ($\Omega\text{-cm}$)	Semicondutor ($\Omega\text{-cm}$)	Isolante ($\Omega\text{-cm}$)
Cobre $1,723 \times 10^{-6}$	Ge 50	Em geral: 10^{15}
	Si 200×10^3	
	GaAs 70×10^6	

3.10 O QUARTO ELEMENTO — O MEMRISTOR

Em maio de 2008, pesquisadores dos Laboratórios Hewlett-packard, liderados pelo Dr. Stanley Williams, tinham um anúncio incrível a fazer — a descoberta do elo ‘perdido’ da teoria básica de circuitos eletrônicos chamado **memristor**, mostrado na Figura 3.33. Até aquele momento, os elementos passivos básicos da teoria de circuitos eram o resistor, o capacitor e o indutor, sendo que os últimos dois serão introduzidos mais tarde neste livro. A presença desse quarto elemento foi postulada em uma tese seminal de 1971, *IEEE Transactions on Circuit*

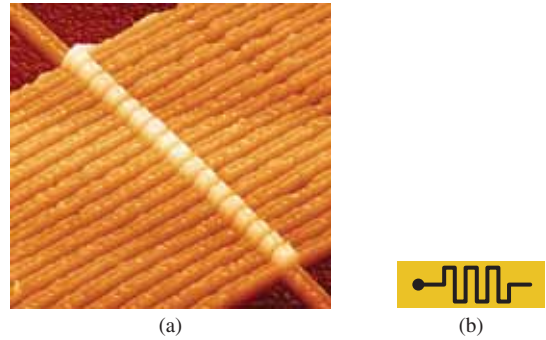


Figura 3.33 (a) Imagem de um circuito com 17 memristores capturada por um microscópio de força atômica. Cada memristor é composto de duas camadas de dióxido de titânio prensadas entre um fio comum inferior e seu próprio fio superior. Na medida em que uma tensão é aplicada em um memristor, o pequeno sinal de resistência de uma das camadas de dióxido de titânio é modificado, o que por sua vez é usado como um método para registrar dados. (b) Símbolo. [(a) Cortesia de J. Joshua Yang e R. Stanley Williams, HP Labs.]

Theory (Transações IEEE na Teoria de Circuitos), de Leon Chua, da Universidade da Califórnia, em Berkeley. Entretanto, foi somente a partir desse anúncio que o dispositivo foi realmente construído e colocado em funcionamento. Muitas tentativas foram feitas para construir um memristor ao longo dos anos, mas foi somente depois da realização de um teste em uma escala nanométrica que o sucesso foi obtido. Descobriu-se que quanto menor a estrutura, mais proeminente é a resposta de *memresistência*. O nível de memresistência na escala do nanômetro é um milhão de vezes mais forte do que na escala do micrômetro, e é quase impossível de ser detectado na escala de milímetros. Entretanto, essa propriedade pode funcionar em prol de projetos de CI atuais que já estão no raio de ação do nanômetro.

As quatro quantidades de circuitos básicas de carga, corrente, tensão e fluxo magnético podem ser relacionadas de seis maneiras. Três relações são derivadas dos elementos básicos do resistor, do capacitor e do indutor. O resistor fornece uma relação direta entre a corrente e a tensão, o capacitor fornece uma relação entre a carga e a tensão, e o indutor fornece uma relação entre a corrente e o fluxo magnético. Isso deixa a relação entre o campo magnético e a carga em movimento através de um elemento. Chua buscou um dispositivo que definisse a relação entre o fluxo magnético e a carga que fosse similar à relação entre a tensão e a corrente de um resistor.

Em geral, Chua estava procurando por um dispositivo cuja resistência fosse uma função de toda carga passasse por ele. No Capítulo 11, a relação entre o movimento da carga e o campo magnético circundante será

descrita de acordo com a necessidade de encontrar um dispositivo relacionando o fluxo de carga ao campo magnético circundante.

O memristor é um dispositivo cuja resistência aumenta com o aumento no fluxo de carga em uma direção e diminui na medida em que o fluxo de carga diminui na direção inversa. Além disso, e de suma importância, ele mantém seu nível novo de resistência quando a excitação é removida.

Esse comportamento na escala nanométrica foi descoberto usando-se o semicondutor dióxido de titânio (TiO_2), que é um material altamente resistivo, mas que pode ser dopado com outros materiais para torná-lo condutivo. Nesse material, os dopantes se deslocam em resposta a um campo elétrico aplicado e derivam na direção da corrente resultante. Começando com um memristor com dopantes apenas em um lado e TiO_2 puro do outro, você pode aplicar uma tensão polarizadora para estabelecer uma corrente no memristor. A corrente resultante vai fazer com que os dopantes se desloquem para o lado puro e reduzam a resistência do elemento. Quanto maior for o fluxo de carga, mais baixa será a resistência resultante. Em outras palavras, como mencionado, TiO_2 tem uma alta resistência, e deslocando os dopantes para o TiO_2 puro, a resistência cai. O processo inteiro de deslocamento dos dopantes é devido à tensão aplicada e ao movimento de carga resultante. Inverter a tensão polarizadora inverte também a direção do fluxo de corrente e traz os dopantes de volta para o outro lado, deixando que o TiO_2 retorne a seu estado de alta resistência; superficialmente, isso parece bastante simples e direto.

Uma analogia frequentemente aplicada para descrever a ação de um memristor é o fluxo de água (análogo à carga) através de um cano. Em geral, a resistência de um cano ao fluxo de água está diretamente relacionada ao diâmetro do cano: quanto menor o cano, maior sua resistência, e quanto maior o diâmetro, menor é a resistência. Para a analogia ser apropriada na descrição da ação de um memristor, o diâmetro do cano tem de ser também uma função da velocidade da água e sua direção. A água fluindo em uma direção vai fazer com que o cano se expanda e a resistência seja reduzida. Quanto mais rápido for o fluxo, maior será o diâmetro. Para a água fluindo na direção oposta, quanto mais rápido for o fluxo, menor será o diâmetro e maior será a resistência. No instante em que o fluxo de água for interrompido em qualquer uma das direções, o cano manterá diâmetro e resistência novos.

Há 17 memristores na Figura 3.33 alinhados em uma fileira, cada um com uma largura em torno de 50 nm. Cada um tem um fio inferior conectado de um lado do dispositivo e um fio superior conectado do lado oposto através de um circuito de fios. Cada memristor, então, vai exibir

uma resistência dependendo da direção e da magnitude da carga através de cada um. A escolha atual para o símbolo eletrônico também é fornecida pela Figura 3.33. Ela é similar em design ao símbolo do resistor, mas também é distintamente diferente.

Desse modo, temos um dispositivo de memória que terá uma resistência dependente da direção e do nível de carga fluindo através dele. Remova o fluxo de carga e ele manterá seu novo nível de resistência. O impacto de um dispositivo como esse é enorme — computadores se lembrariam das últimas operação e exibição quando fossem desligados. Você voltaria em algumas horas ou dias e a exibição estaria exatamente como você a havia deixado. O mesmo seria verdadeiro para qualquer sistema funcionando em uma série de atividades e aplicações — como reinício instantâneo exatamente onde você o havia deixado. Será bastante interessante ver como esse quarto elemento afetará o campo da eletrônica em geral.

Assim como o transistor, que foi inicialmente questionado e agora tem uma importância tão significativa, o memristor pode estimular a mesma mudança extraordinária em todas as aplicações eletrônicas.

3.11 SUPERCONDUTORES

O campo da eletroeletrônica é um dos mais empolgantes de nosso tempo. Novos desenvolvimentos aparecem quase semanalmente em função das intensas atividades de pesquisa e desenvolvimento. O ímpeto de pesquisa para desenvolver um supercondutor capaz de operar a temperaturas próximas da temperatura ambiente tem recebido uma atenção cada vez maior em anos recentes devido à necessidade de cortar as perdas de energia.

O que são supercondutores? Por que seu desenvolvimento é tão importante? Em poucas palavras,

supercondutores são condutores de eletricidade que, para todos os fins práticos, têm resistência zero.

Em um condutor convencional, os elétrons se movimentam a velocidades médias próximas de 1.600 km/s (eles podem atravessar os Estados Unidos em cerca de 3 segundos), ainda que a teoria da relatividade de Einstein sugira que a velocidade máxima para a transmissão de informação seja a velocidade da luz no vácuo, cerca de 300.000 km/s. A velocidade relativamente baixa da condução convencional deve-se, entre outras coisas, a colisões com outros átomos no material, a forças repulsivas entre os elétrons (como repulsão de cargas), aos efeitos de agitação térmica que resultam em trajetórias irregulares em função do aumento do movimento de átomos próximos e à presença de impurezas no condutor. No estado supercondutor, há um emparelhamento de elétrons, denominado

efeito Cooper, no qual os elétrons se movimentam em pares ‘ajudando-se’ mutuamente a manter uma velocidade mais alta através do meio. De certa maneira, isso é como ‘aproveitar o vácuo’ de outros ciclistas ou corredores. Há uma troca de energia entre parceiros, ou mesmo entre ‘novos’ parceiros (conforme a necessidade), para garantir a passagem dos portadores de carga com a maior velocidade possível e com o menor gasto total de energia.

Embora o conceito de supercondutividade tenha surgido inicialmente em 1911, foi apenas a partir de 1986 que a possibilidade da supercondutividade à temperatura ambiente se tornou um objetivo da comunidade científica. Por cerca de 70 anos, a supercondutividade somente podia ser conseguida em temperaturas abaixo de 23 K. (A unidade de temperatura universalmente aceita para estudos de supercondutividade é o Kelvin. Lembre-se de que $K = 273,15^\circ + ^\circ C$, de modo que uma temperatura de 23 K corresponde a $-250^\circ C$, ou $-418^\circ F$.) Entretanto, em 1986, os físicos Alex Muller e George Bednorz, do Centro de Pesquisa da IBM, em Zurique, encontraram um material cerâmico, óxido de cobre, bário e lantânio, que apresentava propriedades de supercondutividade a 30 K. Essa descoberta introduziu uma nova direção para as pesquisas e incentivou outros pesquisadores a baterem o novo recorde. (Em 1987, os dois cientistas receberam o Prêmio Nobel por sua contribuição a uma importante área de desenvolvimento.)

Em apenas alguns meses, os professores Paul Chu, da Universidade de Houston, e Man Kven Wu, da Universidade do Alabama, aumentaram a temperatura para 95 K usando um supercondutor de óxido de cobre, bário e ítrio. O resultado foi um aumento de interesse da comunidade científica que levou as pesquisas na área a um novo patamar de empenho e investimentos. O maior impacto de tal descoberta foi o fato de que o nitrogênio líquido (ponto

de ebulição em 77 K) agora poderia ser usado para baixar a temperatura do material até o valor necessário, em vez de hélio líquido (que evapora a 4 K). O resultado é uma grande economia nos custos de resfriamento, visto que o hélio líquido é pelo menos dez vezes mais caro do que o nitrogênio líquido. Prosseguindo na mesma linha de pesquisa, alguns sucessos foram obtidos a 125 K e a 162 K, utilizando um composto de tálio (mas o tálio é, infelizmente, uma substância extremamente venenosa).

A Figura 3.34 ilustra como a descoberta do uso de um material cerâmico em supercondutores em 1986 levou a rápidos desenvolvimentos no campo. Em 2008, um supercondutor de óxido de estanho-cobre com uma pequena quantidade de índio alcançou um novo pico de 212 K — um aumento enorme de temperatura.

A temperatura na qual um supercondutor volta a ter as características de um condutor convencional é denominada *temperatura crítica*, e é simbolizada por T_c . Observe na Figura 3.35 que o valor de resistividade muda abruptamente em T_c . A largura da região da transição depende da pureza da amostra. Extensas tabelas de temperaturas críticas, para uma grande variedade de compostos testados, podem ser encontradas nos manuais de referências que auxiliam pesquisas em Física, Química, Geologia e campos correlatos. Duas dessas publicações são o *CRC (Chemical Rubber Co.) Handbook of Tables for Applied Engineering Science* e o *CRC Handbook of Chemistry and Physics*.

Embora ainda não se tenha conseguido fabricar supercondutores à temperatura ambiente, há diversas aplicações para alguns dos supercondutores já desenvolvidos. É tudo uma questão de comparar o custo adicional com os resultados obtidos ou averiguar se quaisquer desses resultados poderiam ter sido obtidos sem o uso desse estado de resistência zero. Algumas áreas de pesquisa necessitam de aceleradores de alta energia ou de campos magnéticos

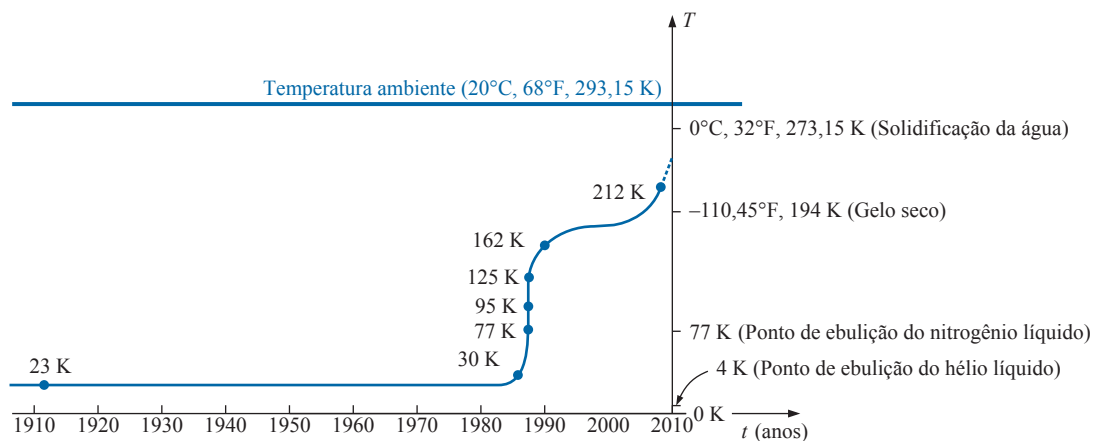


Figura 3.34 Aumento da temperatura dos supercondutores.

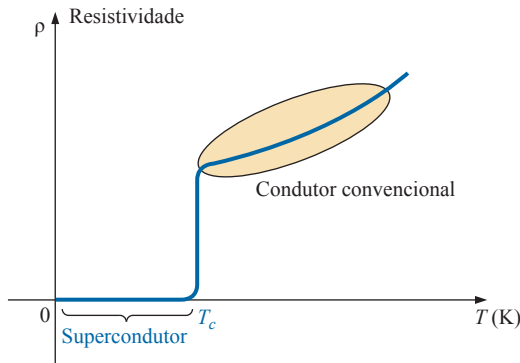


Figura 3.35 Definição da temperatura crítica T_c .

extremamente intensos que só podem ser obtidos com o uso de materiais supercondutores. A supercondutividade é atualmente aplicada no projeto dos trens Maglev (trens que deslizam em um ‘colchão de ar’ formado por polos magnéticos opostos), que atingem velocidades de até 480 km/h, usando poderosos motores e geradores, em sistemas de ressonância magnética nuclear, para se obter imagens detalhadas do cérebro (e de outras partes do corpo), no projeto de computadores com velocidade de operação quatro vezes maior do que os computadores convencionais e em sistemas avançados de distribuição de energia.

3.12 TERMISTORES

Um **termistor** é um dispositivo semicondutor de dois terminais cuja resistência, como o próprio nome sugere, é sensível à variação de temperatura. A curva característica típica de um termistor aparece na Figura 3.36, juntamente com seu símbolo gráfico. Observe a não linearidade da curva e a diminuição da resistência de cerca de 5.000Ω para 100Ω , quando a temperatura aumenta de 20°C para 100°C . A diminuição da resistência com o aumento da temperatura indica um coeficiente de temperatura negativo.

A temperatura do dispositivo pode ser alterada interna ou externamente. Um aumento da corrente que passa através do dispositivo eleva sua temperatura, provocando a diminuição de sua resistência. Qualquer fonte externa de calor aumenta sua temperatura e faz cair a resistência. Os dois tipos de ação (interna e externa) possibilitam o uso do termistor em um sistema de controle. Vários tipos de termistores são mostrados na Figura 3.37. Os materiais empregados na fabricação de termistores incluem óxidos de cobalto, níquel, estrôncio e manganês.

Observe o uso de uma escala logarítmica (a ser discutida no Capítulo 21) para o eixo vertical da Figura 3.36. Essa escala permite representar um intervalo maior de

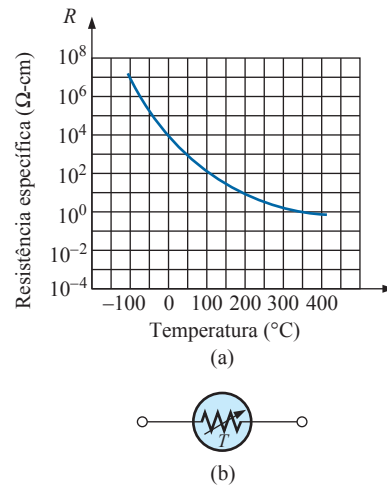


Figura 3.36 Termistor: (a) características; (b) símbolo.



Figura 3.37 Termistores NTC (Coeficiente de Temperatura Negativo, do inglês *Negative Temperature Coefficient*) e PTC (Coeficiente de Temperatura Positivo, do inglês *Positive Temperature Coefficient*). (Cortesia da Siemens Components, Inc.)

valores de resistência específica do que uma escala linear, como a do eixo horizontal. Veja que os valores passam de $0,0001 \Omega\text{-cm}$ para $100.000.000 \Omega\text{-cm}$ em um intervalo de tempo muito curto. A escala logarítmica é usada para os eixos vertical e horizontal na Figura 3.38.

3.13 CÉLULA FOTOCONDUTORA

A **célula fotocondutora** (também denominada LDR, do inglês *Light Dependent Resistor*) é um dispositivo semicondutor de dois terminais cuja resistência é determinada pela intensidade da luz incidente em sua superfície. À medida que a iluminação aumenta de intensidade, aumenta o estado de energia dos elétrons e átomos

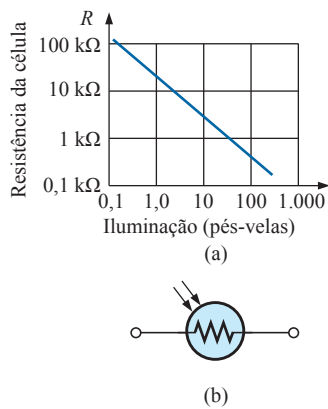


Figura 3.38 Célula fotocondutora: (a) características; (b) símbolo.

da superfície, provocando também o aumento do número de ‘portadores livres’ e a correspondente diminuição na resistência. A curva característica típica de uma célula fotocondutora e seu símbolo gráfico aparecem na Figura 3.38. Observe que o coeficiente de iluminação é negativo. Várias células fotocondutoras de sulfeto de cádmio são mostradas na Figura 3.39.

3.14 VARISTORES

Varistores são resistores não lineares, cuja resistência depende da tensão aplicada, usados para suprimir transientes de alta tensão; ou seja, suas características fazem com que limitem a tensão que pode aparecer entre os terminais de um dispositivo ou de um sistema sensível. A curva característica de um varistor típico é mostrada na Figura 3.40(a), juntamente com a curva característica de um resistor linear, para fins de comparação. Observe que para uma determinada ‘tensão de disparo’, a corrente cresce rapidamente, mas a tensão é limitada a um valor um



Figura 3.39 Células fotocondutoras. (Cortesia da PerkinElmer Optoelectronics.)

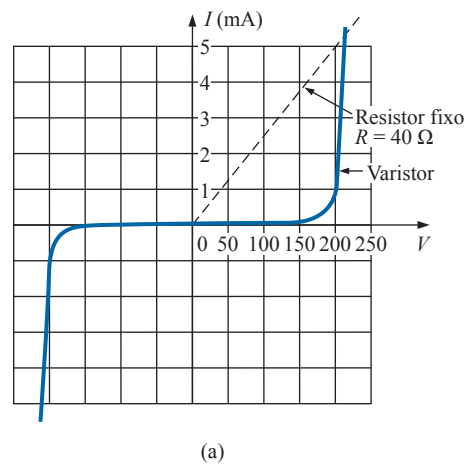
pouco abaixo dessa tensão de disparo. Em outras palavras, o módulo da tensão entre os terminais desse dispositivo não pode exceder o valor definido por suas características. Através de técnicas adequadas de projeto, esse dispositivo pode, portanto, limitar a tensão aplicada a partes sensíveis de um circuito. A corrente é simplesmente limitada pelo circuito ao qual está conectada. Uma foto mostrando algumas unidades comerciais aparece na Figura 3.40(b).

3.15 APLICAÇÕES

A seguir, serão apresentados exemplos de como as resistências podem ser usadas para realizar uma variedade de tarefas, desde o aquecimento à medição de tração e tensão mecânicas em uma unidade de suporte de uma estrutura. Em geral, a resistência é um componente de muitas aplicações em eletroeletrônica.

Aquecedor elétrico

Uma das aplicações mais comuns da resistência é feita em aparelhos domésticos para preparação de alimentos



(b)

Figura 3.40 Varistores com tensão máxima entre 18 V e 615 V. (Cortesia da Philips Electronics.)

como torradeiras e aquecedores elétricos, nos quais o calor é gerado por uma corrente que passa por um elemento resistivo usado para realizar uma função útil.

Recentemente, quando reformamos nossa casa, o electricista nos informou de que havia uma limitação de 16 pés (4,88 m) no comprimento de um aquecedor elétrico de perfil baixo a ser ligado em um único circuito. É claro que isso me fez querer saber sobre a potência em watts por pés, o nível de corrente resultante e se a limitação de 16 pés era um padrão nos Estados Unidos. Lendo a etiqueta em um dos módulos do aquecedor que tem 2 pés (61 cm) de comprimento, e que é mostrado na Figura 3.41(a), encontrei a especificação: VOLTS AC 240/208, WATTS 750/575 (uma abordagem sobre potência elétrica é feita no Capítulo 4), AMPS 3,2/2,8. Visto que o quadro de distribuição da casa tem um valor nominal de tensão de 240 V (como na maioria das residências),¹ a especificação de potência por pés é 575 W/2 ou 287,5 W a uma corrente de 2,8 A. A potência total para 8 módulos de aquecedor (16 pés) é, portanto, de $16 \times 287,5 \text{ W}$, que é igual a 4.600 W.

No Capítulo 4, será explicado que a potência para uma carga resistiva está relacionada à tensão e à corrente na carga pela equação $P = VI$. A corrente total resultante pode então ser determinada usando-se essa equação da seguinte maneira: $I = P/V = 4.600 \text{ W}/240 \text{ V} = 19,17 \text{ A}$. Portanto, precisamos de um disjuntor para um valor de

corrente maior do que 19,17 A; caso contrário, o disjuntor desarmará todas as vezes que ligarmos o aquecedor. Nesse caso, o electricista usou um disjuntor de 30 A para atender aos requisitos do National Fire Code, que não permite que este exceda 80 por cento da corrente especificada para um condutor ou disjuntor. Na maioria dos quadros de distribuição, um disjuntor de 30 A ocupa duas seções, enquanto a maioria dos disjuntores comuns de 20 A ocupa apenas uma seção. Caso você tenha tempo, observe o quadro de distribuição de sua casa e note a especificação dos disjuntores usados para os diversos circuitos da casa.

Voltando à Tabela 3.2, vemos que o fio #12, normalmente usado na maioria dos circuitos da casa, tem especificação máxima de 20 A, sendo, portanto, inadequado para aquecedores desse tipo. Visto que o fio #11 normalmente não está disponível no comércio, um fio #10 com uma especificação máxima de 30 A foi usado. Você pode sentir curiosidade em saber por que a corrente drenada da fonte é de 19,17 A, enquanto uma unidade necessita de apenas 2,8 A. Essa diferença é causada por uma combinação em paralelo de elementos de aquecimento, que é uma configuração a ser estudada no Capítulo 6. Agora está claro por que especificaram como 16 pés a limitação no comprimento máximo do aquecedor ligado a um único circuito. Módulos de aquecimento adicionais em paralelo provocariam a elevação da corrente a níveis

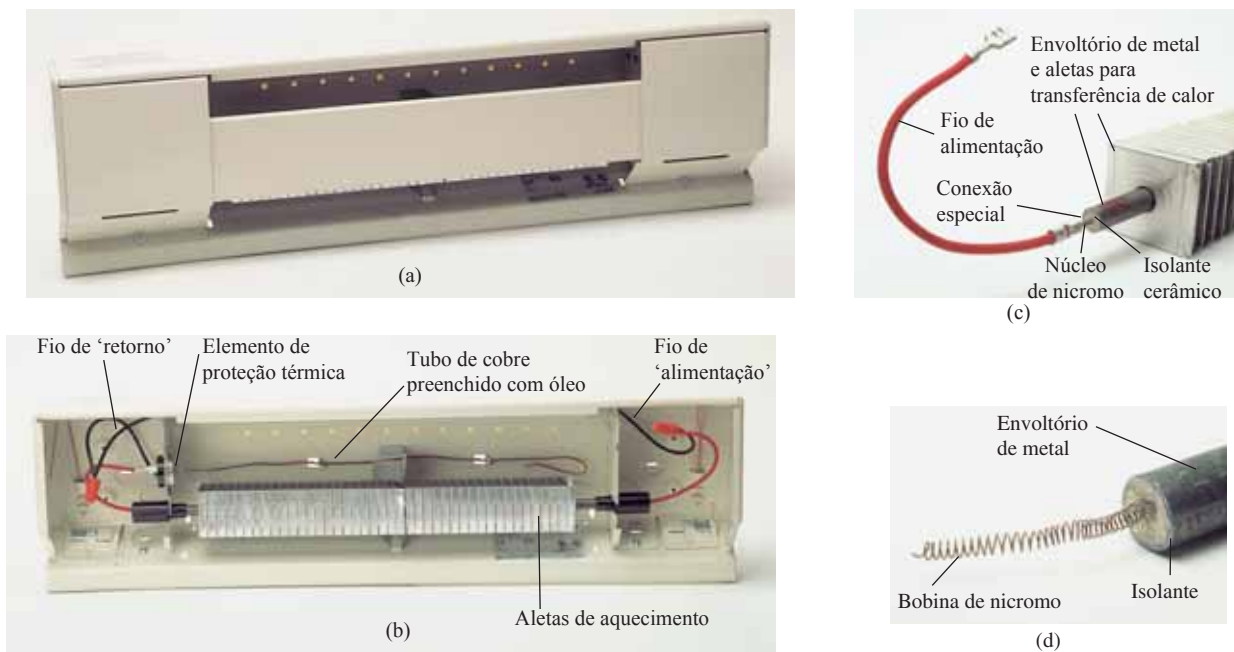


Figura 3.41 Aquecedor elétrico: (a) módulo com comprimento de 2 pés; (b) interior; (c) elemento de aquecimento; (d) bobina de nicromo.

1. O texto refere-se a residências nos Estados Unidos.

que seriam superiores ao do fio #10 e se aproximariam da especificação máxima do disjuntor.

A Figura 3.41(b) exibe uma foto que mostra a parte interna de um elemento de aquecimento. O fio de alimentação, no lado direito, está conectado ao núcleo do elemento de aquecimento, e o fio na outra extremidade passa por um elemento de proteção do aquecedor e retorna para o conector da unidade (local em que os fios externos de alimentação são conectados). Se for observado atentamente, na extremidade do elemento de aquecimento, conforme mostra a Figura 3.41(c), poderemos ver que o fio da resistência, que se aquece e se estende através do núcleo do aquecedor, não está conectado diretamente ao envoltório metálico, de forma cilíndrica, à qual estão fixadas as aletas. Um material cerâmico (isolante) separa o fio aquecedor das aletas para evitar qualquer possibilidade de condução elétrica entre a corrente que passa pelo elemento de aquecimento e a estrutura das aletas externas. Materiais cerâmicos são usados porque são excelentes condutores de calor, e também possuem um alto grau de retenção de calor, de modo que a área ao redor se mantém aquecida por certo período de tempo após a corrente ter sido desligada. Como se vê na Figura 3.41(d), o fio aquecedor no interior do envoltório de metal é normalmente um composto à base de nicromo (porque o nicromo puro é bastante frágil) enrolado no formato de uma bobina para compensar a expansão e a contração provocadas pelo aquecimento e também para se ter um elemento de aquecimento mais longo em um módulo aquecedor de comprimento-padrão. Ao abrir o núcleo, constatamos que o fio de nicromo de um desses módulos aquecedores de 2 pés tem, na realidade, um comprimento de 7 pés, o que significa uma razão, entre o comprimento do fio de nicromo e o comprimento do módulo, de 3,5:1. A espessura do fio é particularmente notável, medindo cerca de 8 mils de diâmetro, não muito mais espesso do que um fio de cabelo. Lembre-se de que foi mencionado neste capítulo que quanto maior e mais fino um condutor, maior sua resistência. Pegamos um pedaço de fio de nicromo e fizemos uma experiência para aquecê-lo com um valor de corrente considerável e também com o uso de um secador de cabelo. A alteração no valor da resistência foi quase imperceptível. Em outras palavras, todos nossos esforços para aumentar a resistência com os elementos básicos disponíveis no laboratório foram inócuos. Essa é uma excelente demonstração do significado do coeficiente de temperatura da resistência mostrado na Tabela 3.4. Visto que o coeficiente é muito pequeno para o nicromo, a resistência não varia de forma mensurável, a menos que a variação na temperatura seja bastante significativa. A curva mostrada na Figura 3.11 seria bem próxima da horizontal para o caso do nicromo. No caso de aquecedores, essa é uma característica excelente porque o aquecimento gerado

e a potência dissipada não variam com o tempo à medida que o aquecedor esquenta. O fluxo de calor da unidade se mantém praticamente constante.

Os fios de alimentação e retorno não podem ser soldados ao fio de nicromo do aquecedor por duas razões. Primeiro, não é possível soldar fios de nicromo entre si ou com outros tipos de fios. Segundo, mesmo que fosse, haveria um problema porque o aquecimento da unidade poderia passar de 880°F (471°C) no ponto em que os fios estiverem conectados; assim, a solda derreteria e a conexão se abriria. O nicromo tem de ser soldado por solda de ponto ou prensado com fios de cobre. Usando a Equação 3.1 e um diâmetro medido de 8 mils, e ainda considerando um fio de nicromo puro, a resistência de um fio de 7 pés de comprimento é:

$$\begin{aligned} R &= \frac{\rho l}{A} \\ &= \frac{(600)(7 \text{ p\`{e}s)}{(8 \text{ mils})^2} = \frac{4.200}{64} \\ R &= \mathbf{65,6 \Omega} \end{aligned}$$

No próximo capítulo, uma equação de potência será apresentada em detalhes relacionando potência, corrente e resistência da seguinte forma: $P = I^2R$. Usando os dados anteriores e isolando a resistência, temos:

$$\begin{aligned} R &= \frac{P}{I^2} \\ &= \frac{575 \text{ W}}{(2,8 \text{ A})^2} \\ R &= \mathbf{73,34 \Omega} \end{aligned}$$

que está muito próximo do valor calculado anteriormente a partir da forma geométrica, já que não podemos estar absolutamente seguros em relação ao valor da resistividade do composto a base de nicromo.

Durante a operação normal, o fio se aquece e o calor passa para as aletas, que por sua vez aquecem o ambiente pelo ar que passa através delas. O fluxo de ar pela unidade é melhorado pelo fato de que o ar quente sobe; assim, quando o ar aquecido sai pela parte superior da unidade, ele puxa o ar frio de baixo, contribuindo para o efeito de convecção. Se a parte superior ou a inferior da unidade fosse obstruída, o efeito de convecção seria eliminado efetivamente, e com isso a temperatura do ambiente não se elevaria. Isso poderia fazer com que o interior do aquecedor se tornasse tão quente que transferisse tal temperatura para o gabinete de metal. Essa preocupação é a principal razão da introdução do dispositivo de proteção térmica que é mostrado na Figura 3.41(b). O longo e fino tubo

de cobre mostrado na Figura 3.41 é, na realidade, preenchido com um tipo de óleo líquido que expande quando aquecido. Caso fique muito aquecido, ele comprime uma chave interna ao gabinete, desligando o aquecedor pela interrupção de corrente no fio.

Controle de luminosidade em automóveis

Um reostato de dois pontos é o elemento principal no controle da intensidade da luz no painel de instrumentos de um carro. O circuito básico é mostrado na Figura 3.42 com os valores típicos de tensões e correntes. Quando a chave da iluminação é acionada (normalmente por um botão de controle fora do painel), uma corrente é estabelecida passando através do reostato de $50\ \Omega$ e pelas diversas lâmpadas do painel (incluindo as luzes do painel, do cinzeiro, do porta-luvas e visor do rádio). À medida que o botão da chave de controle é girado, a quantidade de resistência entre os pontos a e b do reostato varia. Quanto maior a resistência entre os pontos a e b , menor a corrente, e, conseqüentemente, menor o brilho das diversas lâmpadas. Observe a chave adicional no porta-luvas que é acionada ao abrir a porta desse compartimento. Exceto a lâmpada do porta-luvas, todas as outras, vistas na Figura 3.42, serão acionadas ao mesmo tempo em que a chave das lâmpadas for ativada. O primeiro ramo após o reostato contém duas lâmpadas com especificação de $6\ \text{V}$ em vez de $12\ \text{V}$, como acontece em outros ramos. As lâmpadas de tensões menores desse ramo produzem uma iluminação mais fraca para áreas específicas do painel. Observe que a soma de duas lâmpadas (em série) é $12\ \text{V}$ para ser compatível com os outros ramos. A divisão de tensão em um circuito é abordada em detalhes nos capítulos 5 e 6.

Os níveis típicos de corrente para os diversos ramos também aparecem na Figura 3.42. Será estudado no Capítulo 6 que a corrente que é drenada da bateria e que passa pelo fusível e o reostato é aproximadamente igual à soma das correntes nos ramos do circuito. A consequência

é que o fusível tem de ser capaz de suportar uma corrente da ordem de ampères. Dessa forma, um fusível de $15\ \text{A}$ foi empregado (mesmo que as lâmpadas apareçam na Figura 3.42 como sendo de $12\ \text{V}$ para serem compatíveis com a bateria).

Quando são conhecidos os níveis de corrente e tensão de operação de um componente, a resistência ‘a quente’ pode ser determinada usando a lei de Ohm, que será tratada detalhadamente no próximo capítulo. Basicamente, essa lei relaciona tensão, corrente e resistência pela equação $I = V/R$. Para uma lâmpada de $12\ \text{V}$ e uma corrente especificada de $300\ \text{mA}$, a resistência é $R = V/I = 12\ \text{V}/300\ \text{mA} = 40\ \Omega$. Para lâmpadas de $6\ \text{V}$, sua resistência vale $6\ \text{V}/300\ \text{mA} = 20\ \Omega$. Comentários posteriores relativos aos níveis de potência e resistência serão reservados para o próximo capítulo.

A descrição anterior considera um nível de tensão ideal de $12\ \text{V}$ para a bateria. Na realidade, lâmpadas de $6,3\ \text{V}$ e de $14\ \text{V}$ são usadas para serem compatíveis com os níveis de tensão que as baterias carregadas têm na maioria dos automóveis.

Strain gauges

Qualquer alteração na forma de uma estrutura pode ser detectada usando *strain gauges*, cuja resistência varia com a tensão ou com a tração mecânicas. Um exemplo de um *strain gauge* é mostrado na Figura 3.43. Os dispositivos *strain gauge* são feitos usando-se um semicondutor cuja resistência varia de forma não linear (a variação da resistência não é representada por uma linha reta) por uma faixa bem ampla de valores quando eles são deformados por compressão ou tração. Visto que o *strain gauge* não emite sinal, um processador de sinal também tem de fazer parte do sistema para traduzir as variações de resistência em alguma informação significativa de saída. Um exemplo simples do uso de *strain gauges* resistivos é o monitoramento de atividades sísmicas. Quando o *strain gauge* é

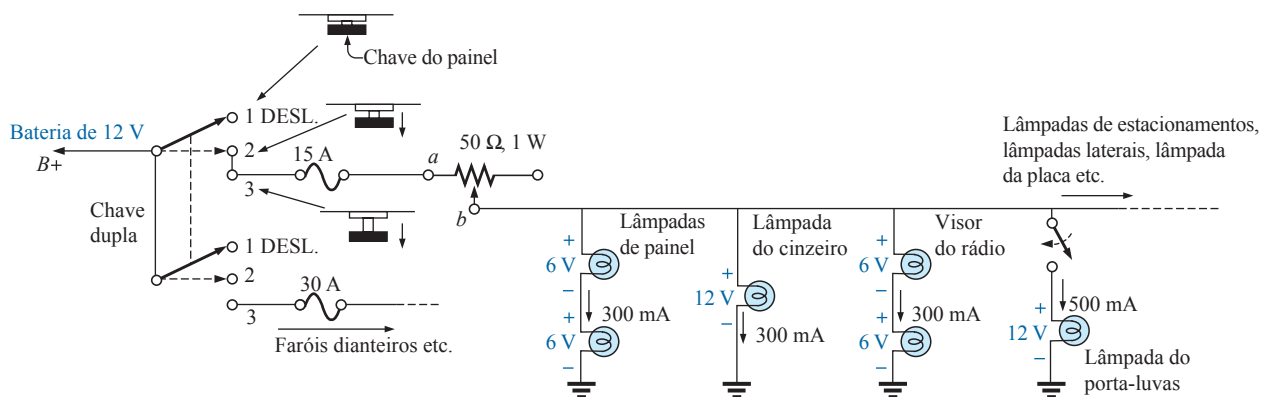
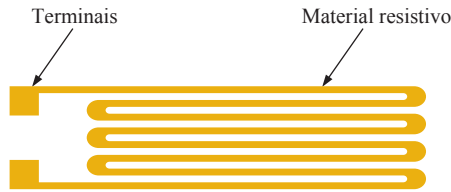
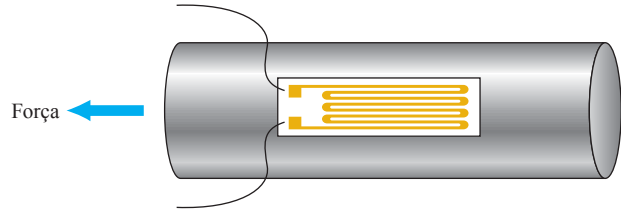


Figura 3.42 Controle de luminosidade do painel de um automóvel.



(a) Configuração de *strain gauge* típica.



(b) O *strain gauge* é ligado à superfície a ser medida ao longo da linha da força. Quando a superfície aumenta seu comprimento, o *strain gauge* se alonga.

Figura 3.43 *Strain gauge* resistivo.

colocado em uma área com suspeita de atividade sísmica, um pequeno movimento do terreno provoca uma variação de resistência nos terminais do *strain gauge*, e o processador mostrará um resultado que indica a intensidade do movimento. Outro exemplo é um sistema de alarme no qual uma pequena variação na forma de um travessão de sustentação, em que pessoas passam embaixo dele, resulta em uma variação na resistência entre os terminais do *strain gauge* que gera o acionamento do alarme. Outro exemplo é a colocação de *strain gauges* em pontes para

monitorar sua rigidez e também em grandes geradores para verificar se as diversas partes móveis estão começando a se desprender em função do desgaste dos enrolamentos ou dos espaçadores. O pequeno *mouse* em um teclado de um computador portátil pode ser uma série de dispositivos *strain gauges* que revelam em que direção a pressão é aplicada no elemento de controle no meio do teclado. O movimento em uma direção pode comprimir ou tracionar o *strain gauge*, o qual permite acompanhar e controlar o movimento da seta do *mouse* na tela.

PROBLEMAS

Seção 3.2 Resistência: fios circulares

- Converta em mils:

a) 0,5 polegada	d) 10 mm
b) 0,02 polegada	e) 0,01 pé
c) 1/4 polegada	f) 0,1 cm
- Calcule em mils circulares a área (CM) de fios com os seguintes diâmetros:

a) 30 mils	d) 1 cm
b) 0,016 polegada	e) 0,02 pé
c) 1/8 polegada	f) 4 mm
- A área em mils circulares é:

a) 1.600 CM	d) 625 CM
b) 820 CM	e) 6,25 CM
c) 40.000 CM	f) $0,3 \times 10^6$ CM

Qual o diâmetro de cada fio em polegadas?
- Qual a resistência de um fio de cobre de 200 pés de comprimento e 1/50 polegada de diâmetro ($T = 20^\circ\text{C}$)?
 - Qual a área em mils circulares de um condutor de alumínio com 80 pés de comprimento e uma resistência de 2,5 Ω ?
 - Qual seu diâmetro em polegadas?
- Um resistor de 2,2 Ω deve ser construído usando-se fio de nicromo. Se o fio disponível tem um diâmetro de 1/32 polegada, qual o comprimento de fio necessário?
 - Qual é o diâmetro em polegadas de um fio de cobre que possui resistência 3,3 Ω e tem o comprimento de um campo de futebol (100 jardas) ($T = 20^\circ\text{C}$)?
 - Sem realizar nenhum cálculo, determine se a área de um fio de alumínio será maior ou menor do que a do fio de cobre. Explique.
 - Repita (b) para um fio de prata.
- Um fio de 1.000 pés de comprimento tem uma resistência de 0,5 k Ω e uma área de 94 CM. De que material o fio é feito ($T = 20^\circ\text{C}$)?
 - Um empreiteiro está preocupado com o comprimento de um cabo de cobre ainda no rolo da Figura 3.44. Ele mediu a resistência e descobriu que ela é de 3,14 Ω . Uma fita métrica indicou que a espessura do cabo enrolado gira em torno de 1/32 polegada. Qual é seu comprimento aproximado em pés?
 - Qual o peso do cabo no rolo?
 - É comum ver intervalos de temperaturas para materiais listados em graus centígrados em vez de Fahrenheit. Qual é o intervalo em graus Fahrenheit? Qual é a questão excepcional a respeito da relação entre graus Fahrenheit e graus centígrados a -40°C ?

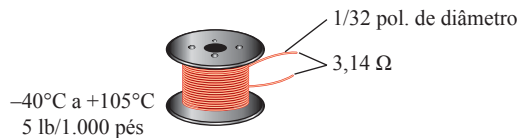


Figura 3.44 Problema 9.

10. a) Qual a área de corte transversal em mils circulares de uma barra coletora de cobre retangular se as dimensões são 3/8 polegadas por 4,8 polegadas?
 b) Se a área do fio comumente usado na fiação doméstica tem um diâmetro próximo de 1/12 polegada, quantos fios teriam de ser combinados para que se tivesse a mesma área?
11. a) Qual é a resistência de uma barra coletora de cobre para um prédio alto com as dimensões mostradas ($T = 20^\circ\text{C}$) na Figura 3.45?
 b) Repita (a) para o alumínio e compare os resultados.
12. Determine o aumento na resistência de um condutor de cobre se sua área for reduzida por um fator 4 e seu comprimento for duplicado. A resistência original era $0,2\ \Omega$. A temperatura permanece constante.
- *13. Qual o novo valor de resistência de um fio de cobre se seu comprimento aumentar de 200 pés para 100 jardas, a área mudar de $40.000\ \text{CM}$ para $0,04\ \text{polegada}^2$ e a resistência original for $800\ \text{m}\Omega$?

Seção 3.3 Tabelas de fios

14. a) Na construção civil, os dois fios mais comuns empregados na fiação doméstica são o #12 e o #14, apesar de o #12 ser mais comum por ter uma especificação de 20 A. Quão maior em área (percentualmente) é o cabo #12 em relação ao cabo #14?
 b) A corrente especificada máxima para um cabo #14 é 15 A. Como a razão de níveis de corrente máxima se compara à razão das áreas dos dois fios?
15. a) Compare a área de um fio #12 com aquela de um fio #9. A mudança na área condiz com a regra geral de que uma redução de três números de medida resulta na duplicação da área?
 b) Compare a área de um fio #12 com aquela de um fio #0. Quantas vezes maior em área é o fio #0 comparado ao fio #12? O resultado é significativo? Compare-o com a mudança em especificação de corrente máxima para cada um.
16. a) Compare a área de um cabo #20 a um fio doméstico *romax* #10. A mudança em área condiz com a regra geral de que uma diminuição de 10 números de medida resulta em um aumento de dez vezes na área do fio?
 b) Compare a área de um fio #20 com aquela de um fio #40. Quantas vezes o fio #20 é maior em área do que o fio #40? O resultado corrobora a regra da parte (a)?
17. a) Para o sistema na Figura 3.46, a resistência de cada linha não pode exceder $6\ \text{m}\Omega$, e a corrente máxima drenada pela carga é 110 A. Que tamanho de medida mínima de fio deve ser usado?
 b) Repita (a) para uma resistência máxima de $3\ \text{m}\Omega$, $d = 30\ \text{pés}$, e uma corrente máxima de 110 A.

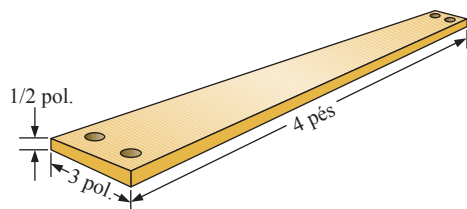


Figura 3.45 Problema 11.

- *18. a) Baseando-se na Tabela 3.2, determine a densidade de corrente permissível máxima (A/CM) para um fio AWG #0000.
 b) Converta o resultado de (a) para A/polegadas².
 c) Usando o resultado de (b), determine a área de corte transversal exigida para suportar uma corrente de 5.000 A.

Seção 3.4 Efeitos da temperatura

19. A resistência de um fio de cobre é $2\ \Omega$ a 10°C . Qual sua resistência a 80°C ?
20. A resistência de uma barra de alumínio é $0,02\ \Omega$ a 0°C . Qual sua resistência a 100°C ?
21. A resistência de um fio de cobre é $4\ \Omega$ à temperatura ambiente (68°F). Qual sua resistência a uma temperatura de congelamento de 32°F ?
22. A resistência de um fio de cobre é $0,025\ \Omega$ a uma temperatura de 70°F .
 a) Qual é a resistência se a temperatura cair 10° para 60°F ?
 b) Qual é a resistência se ela cair mais 10° para 50°F ?
 c) Observando os resultados das partes (a) e (b), qual será a queda para cada parte em miliohms? A queda em resistência é linear ou não linear? Você pode prever a nova resistência se ela cair para 40°F , sem usar a equação de temperatura básica?
 d) Se a temperatura cair para -30°F no norte do Maine, encontre a mudança em resistência do nível de temperatura ambiente da parte (a). A mudança é significativa?
 e) Se a temperatura aumentar para 120°F em Cairns, Austrália, encontre a mudança em resistência da temperatura ambiente da parte (a). A mudança é significativa?
23. a) A resistência de um fio de cobre é $1\ \Omega$ a 4°C . A que temperatura ($^\circ\text{C}$) ela será $1,1\ \Omega$?
 b) A que temperatura ela será $0,1\ \Omega$?
24. a) Se a resistência de 1.000 pés de um fio gira em torno de $1\ \Omega$ na temperatura ambiente (68°F), em qual temperatura ela vai dobrar de tamanho?
 b) Qual medida de fio será usada?
 c) Qual é o diâmetro aproximado em polegadas, usando-se a forma fracional mais próxima?
25. a) Verifique o valor de α_{20} para o cobre na Tabela 3.6 substituindo o valor da temperatura absoluta inferida na Equação 3.9.
 b) Usando a Equação 3.10, determine a temperatura na qual a resistência de um condutor de cobre aumentará para $1\ \Omega$, supondo que ela era de $0,8\ \Omega$ a 20°C .
26. Usando a Equação 3.10, encontre a resistência de um fio de cobre a 16°C , sabendo que sua resistência a 20°C é $0,4\ \Omega$.
- *27. Usando a Equação 3.10, determine a resistência de um rolo de 1.000 pés de fio de cobre #12 parado em um deserto a uma temperatura de 115°F .

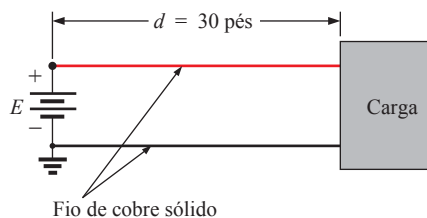


Figura 3.46 Problema 17.

28. Um resistor de fio de $22\ \Omega$ possui uma especificação em PPM de +200 para a faixa de temperatura de -10°C a $+75^\circ\text{C}$. Determine sua resistência a 65°C .
29. Um resistor de fio de $100\ \Omega$ possui uma especificação em PPM de +100 para a faixa de temperatura de 0°C a $+100^\circ\text{C}$. Determine sua resistência a 50°C .

Seção 3.5 Tipos de resistores

30. a) Qual a diferença aproximada entre as dimensões de um resistor de carbono de 1 W e outro de 2 W?
 b) Qual é, aproximadamente, a diferença entre as dimensões de um resistor de carbono de 1/2 W e outro de 2 W?
 c) Em geral, podemos concluir que, para o mesmo tipo de resistor, um aumento na especificação da potência implica um aumento nas dimensões (volume)? Isso é uma relação linear? Ou seja, se a potência for duplicada, implicará um aumento nas dimensões na proporção de 2:1?
31. Se a resistência entre os terminais externos de um potenciômetro linear é $10\ \text{k}\Omega$, qual a resistência entre o contato deslizante (móvel) e um dos terminais externos, se a resistência entre o contato deslizante e outro terminal externo é $3,5\ \text{k}\Omega$?
32. Se o cursor de um potenciômetro linear se deslocou um quarto de seu deslocamento máximo, qual a resistência entre o cursor e cada um dos terminais se a resistência total for $2,5\ \text{k}\Omega$?
- *33. Desenhe as conexões necessárias para estabelecer uma resistência de $4\ \text{k}\Omega$ entre o contato deslizante e um dos terminais externos de um potenciômetro de $10\ \text{k}\Omega$, mantendo ao mesmo tempo zero ohm entre o outro terminal externo e o contato móvel.

Seção 3.6 Código de cores e valores padronizados de resistores

34. Determine os valores máximos e mínimos de resistências que o resistores com as faixas coloridas a seguir podem apresentar sem exceder a tolerância especificada pelo fabricante:

	1ª faixa	2ª faixa	3ª faixa	4ª faixa
a)	cinza	vermelho	marrom	ouro
b)	vermelho	vermelho	marrom	prata
c)	branco	marrom	laranja	—
d)	branco	marrom	vermelho	ouro
e)	laranja	branco	verde	—

35. Determine o código de cores para os seguintes resistores com tolerância de 10 por cento:
- a) $68\ \Omega$
 b) $0,33\ \Omega$
 c) $22\ \text{k}\Omega$
 d) $5,6\ \text{M}\Omega$
36. a) Há uma superposição entre resistores com 20 por cento de tolerância? Para responder a essa pergunta, determine o intervalo de tolerância para um resistor de $10\ \Omega$ de 20 por cento e um resistor de $15\ \Omega$ de 20 por cento e verifique se os dois intervalos de tolerância se superpõem.

- b) Repita a parte (a) para resistores de 10 por cento de tolerância com os mesmos valores de resistência.
37. Um resistor com os códigos de cores amarelo, violeta, marrom e prata que mede $492\ \Omega$ está dentro da tolerância? Qual é o intervalo de variação de tolerância?
38. a) Como a Figura 3.26(a) mudaria se os resistores de $47\ \Omega$, $68\ \Omega$ e $100\ \Omega$ fossem mudados para $4,7\ \text{k}\Omega$, $6,8\ \text{k}\Omega$ e $10\ \text{k}\Omega$, respectivamente, se a tolerância permanecesse a mesma?
 b) Como a Figura 3.26(a) mudaria se os resistores de $47\ \Omega$, $68\ \Omega$ e $100\ \Omega$ fossem mudados para $4,7\ \text{M}\Omega$, $6,8\ \text{M}\Omega$ e $10\ \text{M}\Omega$, respectivamente, se a tolerância permanecesse a mesma?
39. Descubra o valor dos seguintes resistores de montagem em superfície:
- a) 621
 b) 333
 c) Q2
 d) C6

Seção 3.7 Condutância

40. Determine a condutância de cada um dos resistores a seguir:
- a) $120\ \Omega$
 b) $4\ \text{k}\Omega$
 c) $2,2\ \text{M}\Omega$
 d) Compare os três resultados.
41. Determine a condutância de um fio #12 AWG cujo comprimento é 1.000 pés, supondo que ele seja feito de:
- a) cobre
 b) alumínio
42. a) Descubra a condutância de um resistor de $10\ \Omega$, $20\ \Omega$ e $100\ \Omega$ em milisiemens.
 b) Como comparar a taxa de mudança na resistência com essa taxa na condutância?
 c) A relação entre a mudança na resistência e na condutância é associada a uma relação inversa linear ou não linear?
- *43. A condutância de um fio é $100\ \text{S}$. Sabendo que a seção reta do fio foi aumentada em 2/3 e seu comprimento reduzido pelo mesmo fator, determine a nova condutância do fio, considerando que a temperatura permaneceu constante.

Seção 3.8 Ohmímetros

44. Por que **nunca** se deve aplicar um ohmímetro a um circuito ligado?
45. Como é possível verificar o estado de um fusível utilizando um medidor de resistência?
46. Como se pode determinar o estado ligado e desligado de uma chave usando um medidor de resistência?
47. Como se pode usar um medidor de resistência para verificar o estado de uma lâmpada incandescente?

Seção 3.9 Resistência: unidades métricas

48. Usando unidades métricas, determine o comprimento de um fio de cobre que possui resistência $0,2\ \Omega$ e diâmetro 1/12 polegada.
49. Repita o Problema 11 usando unidades métricas, ou seja, converta as dimensões fornecidas em unidades métricas antes de determinar a resistência.
50. Se a resistência de uma película de óxido de estanho é $100\ \Omega$, qual a espessura da película de óxido?
51. Determine a largura de um resistor de carbono usando uma resistência laminar igual a $150\ \Omega$, sendo seu comprimento 1/2 polegada e sua resistência, $500\ \Omega$.

- *52. Deduza o fator de conversão entre Ω (CM- Ω /pés) e Ω (Ω -cm) para:
- Obter o valor de Ω para o fio da Figura 3.47 em CM- Ω /pés.
 - Obter o valor de Ω para o mesmo fio da Figura 3.47 em Ω -cm, depois de fazer as conversões necessárias.
 - Usando a equação $\Omega_2 = k\Omega_1$, determine o fator de conversão k se Ω_1 for a solução da parte (a) e Ω_2 , a solução da parte (b).

Seção 3.11 Supercondutores

53. Em suas próprias palavras, analise o que você aprendeu a respeito dos supercondutores. Você acredita que eles podem representar uma opção que terá um impacto significativo no futuro da indústria eletrônica, ou seu uso será muito limitado? Explique sua opinião. O que poderia acontecer para que você mudasse de opinião?
54. Visite uma biblioteca e procure uma tabela com as temperaturas críticas de vários materiais. Liste pelo menos cinco materiais cujas temperaturas críticas não foram mencionadas neste livro. Escolha alguns materiais com temperaturas críticas relativamente altas.
55. Encontre pelo menos um artigo sobre aplicações da supercondutividade no setor comercial e escreva um pequeno resumo, incluindo todos os fatos e cálculos interessantes.
- *56. Usando um valor de densidade de corrente 1 MA/cm², necessário para a fabricação de circuitos integrados, qual seria a corrente de um fio doméstico #12? Compare o resultado com o limite permitido na Tabela 3.2.

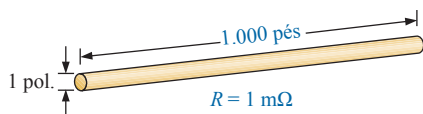


Figura 3.47 Problema 52.

- *57. Faça uma pesquisa sobre o detector de campo magnético SQUID e descreva seu modo básico de operação, além de uma ou duas de suas aplicações.

Seção 3.12 Termistores

- *58. a) Determine a resistência de um termistor com as características mostradas na Figura 3.36 a -50°C , 50°C e 200°C . Note que a escala é logarítmica. Se necessário, consulte uma referência na qual exista uma escala logarítmica expandida.
- O termistor tem um coeficiente de temperatura positivo ou negativo?
 - O coeficiente é um valor fixo para o intervalo de -100°C a 400°C ? Por quê?
 - Qual é a taxa de variação aproximada de ρ com a temperatura a 100°C ?

Seção 3.13 Célula fotocondutora

59. a) Usando as características da Figura 3.38, determine a resistência de uma célula fotocondutora a 10 e a 100 pés-velas de iluminação. Como no Problema 58, observe que a escala é logarítmica.
- A célula tem um coeficiente de iluminação positivo ou negativo?
 - O coeficiente tem um valor fixo para o intervalo de 0,1 a 1.000 pés-velas? Por quê?
 - Qual a taxa de variação aproximada de R com a iluminação a 10 pés-velas?

Seção 3.14 Varistores

60. a) Observando a Figura 3.40(a), determine a tensão entre os terminais do dispositivo para correntes de 0,5 mA, 1 mA, 3 mA e 5 mA.
- Qual a variação total da tensão para o intervalo indicado de correntes?
 - Compare a razão entre os valores de corrente máxima e mínima anteriores com a razão correspondente dos valores de tensão.

GLOSSÁRIO

Célula fotocondutora: Dispositivo semicondutor de dois terminais cuja resistência depende da intensidade da luz incidente em sua superfície exposta.

Código de cores: Sistema que utiliza faixas coloridas para indicar valores de resistência e tolerância dos resistores.

Coefficiente de temperatura negativo da resistência: Valor que revela que a resistência do material diminui em decorrência de um aumento na temperatura.

Coefficiente de temperatura positivo da resistência: Valor que revela que a resistência do material aumenta em decorrência de um aumento na temperatura.

Condutância (G): Indicação da facilidade com que uma corrente elétrica pode ser estabelecida em um material. É medida em siemens (S).

Ductilidade: Propriedade de um material que o permite ser transformado em fio longo e fino.

Efeito Cooper: 'Emparelhamento' de elétrons enquanto se deslocam em um meio.

Maleabilidade: Propriedade de um material que permite que ele seja moldado em diferentes formatos.

Memristor: Resistor cuja resistência é determinada através da corrente através dele; capaz de se 'lembrar' e de 'reter' seu último valor de resistência.

Mil circular (CM): Área da seção reta de um fio com um diâmetro de um mil.

Ohm (Ω): Unidade de medida de resistência.

Ohmímetro: Instrumento usado para medir valores de resistência.

Potenciômetro: Dispositivo de três terminais por meio do qual podem ser variados os níveis de potencial de modo linear ou não linear.

PPM/ $^\circ\text{C}$: Sensibilidade à temperatura de um resistor em partes por milhão por graus Celsius.

Reostato: Elemento cuja resistência entre os terminais pode ser variada de maneira linear ou não linear.

Resistência: Medida de oposição à passagem de cargas elétricas através de um material.

Resistência laminar: Definida por ρ/d para filmes finos e projetos de circuitos integrados.

Resistividade (ρ): Constante de proporcionalidade entre a resistência de um material e suas dimensões físicas.

Supercondutor: Condutor de carga elétrica que possui, para efeitos práticos, resistência zero.

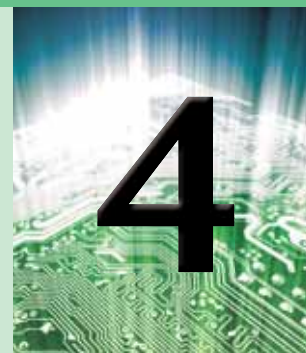
Temperatura absoluta inferida: Temperatura correspondente ao ponto em que uma aproximação linear para a curva de variação da resistência com a temperatura intercepta o eixo da temperatura.

Termistor: Dispositivo semiconductor de dois terminais cuja resistência é sensível à temperatura.

Varistor: Resistor não linear, com resistência dependente da tensão a ele aplicada, usado para suprimir transientes de alta tensão.

Zero absoluto: Temperatura na qual não há vibração de moléculas: $-273,15^{\circ}\text{C}$.

Lei de Ohm, potência e energia



Objetivos

- Compreender a importância da lei de Ohm e aprender como aplicá-la.
- Ser capaz de representar graficamente a lei de Ohm e compreender como 'ler' uma representação gráfica da tensão em relação à corrente.
- Tomar conhecimento das diferenças entre os níveis de potência e de energia e aprender a lidar com cada um.
- Compreender o fluxo de potência e energia de um sistema, incluindo como o fluxo afeta a eficiência da operação.
- Tomar conhecimento da operação de uma série de fusíveis e disjuntores e onde cada um é empregado.

4.1 INTRODUÇÃO

Agora que as três quantidades importantes de um circuito elétrico foram introduzidas, este capítulo revela como elas se inter-relacionam. A equação mais importante no estudo de circuitos elétricos é introduzida e várias outras equações que nos permitem descobrir níveis de potência e energia são discutidas em detalhes. Trata-se do primeiro capítulo em que juntamos o que foi visto e temos uma ideia de como um circuito elétrico se comporta e o que afeta o seu comportamento. Pela primeira vez, os dados fornecidos nos rótulos dos aparelhos domésticos e a maneira como sua conta de luz é calculada farão algum sentido. Trata-se realmente de um capítulo que deve abrir seus olhos para uma ampla gama de experiências relacionadas com sistemas elétricos.

4.2 LEI DE OHM

Como mencionado, a primeira equação a ser descrita é, sem dúvida, uma das mais importantes a ser aprendida nesse campo. Ela não é particularmente difícil matematicamente, mas é muito poderosa, pois pode ser aplicada a qualquer circuito em qualquer escala de tempo. Isto é, ela é aplicável a circuitos CC, circuitos CA, circuitos digitais e de micro-ondas, e, na realidade, a qualquer tipo de sinal

aplicado. Além disso, ela pode ser usada em um período de tempo ou em respostas instantâneas. A equação pode ser obtida diretamente da equação básica a seguir e usada em todos os sistemas físicos:

$$\text{Efeito} = \frac{\text{causa}}{\text{oposição}} \quad (4.1)$$

Qualquer processo de conversão de energia pode ser relacionado a essa equação. Em circuitos elétricos, o *efeito* que desejamos estabelecer é o fluxo de cargas ou a *corrente*. A *diferença de potencial*, ou tensão, entre dois pontos é a *causa* ('pressão'), e a oposição ao fluxo de cargas representa a *resistência* encontrada.

Uma excelente analogia para o mais simples dos circuitos elétricos é um sistema constituído de uma mangueira com água conectada a uma válvula de pressão, como discutido no Capítulo 2. Imagine os elétrons no fio de cobre como sendo a água na mangueira, a válvula de pressão como a tensão aplicada e a seção reta da mangueira como o fator que determina a resistência. Se a válvula de pressão for fechada, a água simplesmente para de se mover na mangueira, o que se assemelha aos elétrons em um condutor sem tensão aplicada. Quando abrimos a válvula de pressão, a água flui através da mangueira de maneira semelhante aos elétrons em um fio de cobre quando apli-

camos tensão. Em outras palavras, a ausência de ‘pressão’ em um sistema e de tensão em outro resulta em um sistema sem movimento ou reação. A taxa com que a água flui na mangueira é uma função de seu diâmetro. Uma mangueira com diâmetro muito pequeno limitará a taxa com que a água poderá fluir por ela, da mesma maneira que um fio de cobre de pequeno diâmetro terá uma alta resistência e limitará a corrente.

Portanto, em resumo, a ausência de uma ‘pressão’ como uma tensão em um circuito elétrico não resultará em reação, pois nenhuma corrente percorrerá o circuito. A corrente é uma reação à tensão aplicada, e não o fator que coloca o sistema em movimento. Mantendo essa analogia, quanto maior a pressão na torneira, maior a quantidade de água que flui através da mangueira, do mesmo modo que a aplicação de uma tensão maior, no mesmo circuito, resulta em uma corrente maior.

Substituindo os termos apresentados na Equação 4.1, obtemos:

$$\text{Corrente} = \frac{\text{diferença de potencial}}{\text{resistência}}$$

e

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

A Equação 4.2 é conhecida como **lei de Ohm**, em homenagem a Georg Simon Ohm (veja a Figura 4.1). Essa expressão mostra claramente que, para uma resistência fixa, quanto maior a tensão (ou pressão) aplicada aos terminais de um resistor, maior a corrente, e que, para uma tensão fixa, quanto maior for a resistência, menor será a corrente. Em outras palavras, a corrente é proporcional à tensão aplicada e inversamente proporcional à resistência.

Por meio de manipulações matemáticas simples, a tensão e a resistência podem ser determinadas em função das outras grandezas:

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

e

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

Todas as quantidades da Equação 4.2 aparecem no circuito elétrico simples da Figura 4.2. Um resistor foi conectado diretamente por meio de uma bateria para estabelecer uma corrente através do resistor e da fonte. Observe que

o símbolo E é aplicado a todas as fontes de tensão

e

o símbolo V é aplicado a todas as quedas de tensão através de componentes do circuito.



Figura 4.1 Georg Simon Ohm.
Cortesia da Biblioteca de Nuremberg.

Alemão (Erlangen, Colônia)
(1789-1854)

Físico e matemático, professor de Física, Universidade de Colônia.

Em 1827, descobriu uma das mais importantes leis relativas a circuitos elétricos: a *lei de Ohm*. Quando publicou seus resultados pela primeira vez, Ohm apresentou uma documentação que foi considerada incompleta e incoerente, o que fez com que perdesse seu emprego de professor, passando a ganhar a vida realizando as mais diferentes tarefas, além de dar algumas aulas particulares. Foram necessários aproximadamente 22 anos para que seu trabalho fosse reconhecido como uma importante contribuição para esse campo do conhecimento. Ganhou, então, uma cátedra na Universidade de Munique e recebeu a Medalha Copley da Royal Society, de Londres, em 1841. Suas pesquisas também se estenderam nas áreas de Física molecular, acústica e comunicação telegráfica.

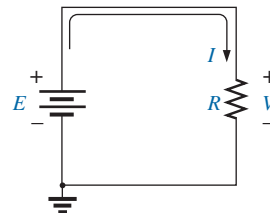


Figura 4.2 Circuito básico.

Ambos são medidos em volts e podem ser aplicados de maneira alternada nas equações 4.2 a 4.4.

Tendo em vista que a bateria na Figura 4.2 está conectada diretamente no resistor, a tensão V_R nos terminais do resistor tem de ser igual àquela da fonte de tensão. Aplicando a lei de Ohm, obtemos:

$$I = \frac{V_R}{R} = \frac{E}{R}$$

Observe, na Figura 4.2, que a fonte de tensão pressiona a corrente (corrente convencional) em um sentido que deixa o terminal positivo da fonte e retorna para o terminal negativo da bateria. *Esse será sempre o caso*

para circuitos de fonte única. (O efeito provocado por mais de uma fonte no circuito será analisado em um capítulo posterior.) Observe também que a corrente entra no terminal positivo e deixa o terminal negativo para o resistor de carga R .

Para qualquer resistor, em qualquer rede, a direção da corrente através de um resistor definirá a polaridade da queda de tensão sobre o resistor

como mostrado na Figura 4.3 para dois sentidos de corrente. Polaridades conforme estabelecido pela direção atual se tornam cada vez mais importantes nas análises a seguir.

EXEMPLO 4.1

Determine a corrente resultante da conexão de uma bateria de 9 V aos terminais de um circuito cuja resistência é $2,2 \Omega$.

Solução:

A partir da Equação 4.2:

$$I = \frac{V_R}{R} = \frac{E}{R} = \frac{9\text{ V}}{2,2\Omega} = \mathbf{4,09\text{ A}}$$

EXEMPLO 4.2

Calcule a resistência do filamento de uma lâmpada de 60 W se uma corrente de 500 mA for estabelecida em função de uma tensão aplicada de 120 V.

Solução:

A partir da Equação 4.4:

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

EXEMPLO 4.3

Calcule a corrente através do resistor de $2\text{ k}\Omega$ mostrado na Figura 4.4 caso a queda de tensão entre seus terminais seja de 16 V.

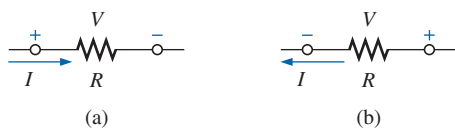


Figura 4.3 Definição de polaridades.

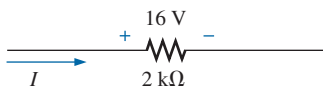


Figura 4.4 Exemplo 4.3.

Solução:

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

EXEMPLO 4.4

Calcule a tensão que tem de ser aplicada ao ferro de solda mostrado na Figura 4.5 para estabelecer uma corrente de 1,5 A, sendo sua resistência interna 80Ω .

Solução:

$$E = V_R = IR = (1,5\text{ A})(80\ \Omega) = \mathbf{120\text{ V}}$$

Em diversos exemplos deste capítulo, como o Exemplo 4.4, a tensão aplicada é, na realidade, obtida de uma tomada CA de uma residência, escritório ou laboratório. Esse recurso foi usado no exemplo para dar ao estudante a oportunidade de se defrontar com situações do mundo real sempre que for possível e demonstrar que diversas equações derivadas desse estudo são aplicáveis também em circuitos CA. O Capítulo 13 apresentará a relação direta entre tensões CA e CC que permitem substituições matemáticas usadas neste capítulo. Em outras palavras, não se preocupe com o fato de que algumas das tensões e das correntes que aparecem nos exemplos deste capítulo sejam, na realidade, tensões e correntes CA, porque as equações para os circuitos CC têm exatamente o mesmo formato, e todas as soluções estarão corretas.

4.3 GRÁFICO DA LEI DE OHM

A representação gráfica desempenha uma função importante em todos os campos da ciência e da tecnologia como uma forma pela qual uma visão ampla do comportamento ou a resposta de um sistema pode ser convenientemente apresentada. Portanto, é importante desenvolver as habilidades necessárias para a leitura de dados e sua representação gráfica, de modo que eles possam ser interpretados facilmente.

Para a maioria dos conjuntos de características de dispositivos semicondutores, a corrente é representada no eixo vertical (ordenada), e a tensão, no eixo horizontal

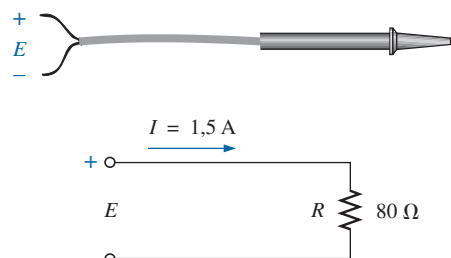


Figura 4.5 Exemplo 4.4.

(abscissa), como mostra a Figura 4.6. Primeiro observe que o eixo vertical é expresso em ampères, e o eixo horizontal, em volts. Para alguns gráficos, I pode estar expresso em miliampères (mA), microampères (μA) ou qualquer unidade que seja mais apropriada para o sistema em questão. O mesmo vale para os níveis de tensão no eixo horizontal. Observe também que para os parâmetros escolhidos é necessário que o espaçamento entre os valores numéricos do eixo vertical seja diferente do espaçamento entre os valores numéricos do eixo horizontal. O gráfico linear (linha reta) revela que a resistência não varia com os níveis de tensão e de corrente; ao contrário, ela é uma grandeza que se mantém fixa. O sentido da corrente e a polaridade da tensão que aparecem no topo da Figura 4.6 estão definidos de acordo com o gráfico fornecido. Se o sentido da corrente fosse invertido, a região abaixo do eixo horizontal seria a região de interesse para a corrente I . Se a polaridade da tensão fosse invertida, a região à esquerda do eixo da corrente seria a região de interesse. Para resistores fixos comerciais, o primeiro quadrante, ou região, da Figura 4.6 é a única região de interesse. Entretanto, poderão ser encontrados muitos dispositivos no curso de eletrônica que usarão os outros quadrantes do gráfico.

Uma vez que um gráfico, como o da Figura 4.6, esteja disponível, qualquer valor de corrente ou de tensão pode ser determinado quando se conhece uma das grandezas envolvidas. Por exemplo, para $V = 25\text{ V}$, se uma linha vertical for traçada na Figura 4.6 do ponto 25 do eixo horizontal até a curva característica, a corrente resultante pode ser encontrada traçando-se uma reta horizontal até o eixo vertical, obtendo-se assim um resultado de 5 A. Da mesma maneira, para $V = 10\text{ V}$, se traçarmos uma reta vertical até a curva característica e uma reta horizontal até

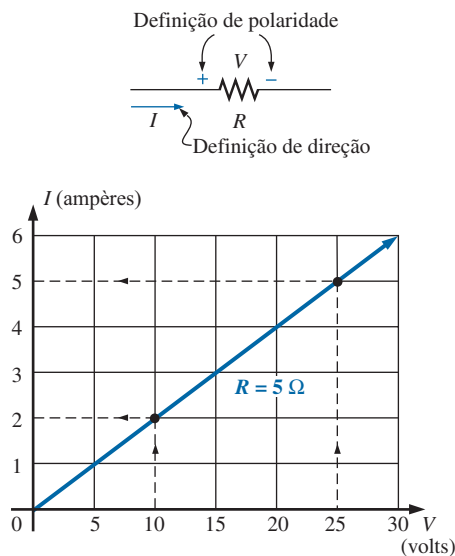


Figura 4.6 Gráfico da lei de Ohm.

o eixo vertical, descobriremos que a corrente no resistor será de 2 A, conforme determina a lei de Ohm.

Se a resistência de um componente representado por um gráfico V - I for desconhecida, ela pode ser determinada em cada ponto do gráfico, visto que uma linha reta indica uma resistência fixa. Encontre a tensão e a corrente resultantes em qualquer ponto do gráfico, substituindo esses valores na equação a seguir:

$$R_{CC} = \frac{V}{I} \tag{4.5}$$

Para testar a Equação 4.5, considere um ponto no gráfico onde $V = 20\text{ V}$ e $I = 4\text{ A}$. A resistência resultante é $R_{CC} = 20\text{ V}/I = 20\text{ V}/4\text{ A} = 5\ \Omega$. Para fins de comparação, as curvas características de resistores de $1\ \Omega$ e $10\ \Omega$ foram traçadas no gráfico mostrado na Figura 4.7. Observe que quanto menor a resistência, maior a inclinação (próxima do eixo vertical) da curva.

Se escrevermos a lei de Ohm da forma mostrada a seguir, relacionando-a com a equação fundamental de uma reta, teremos:

$$I = \frac{1}{R} \cdot E + 0$$

$$\downarrow \quad \downarrow \quad \downarrow$$

$$y = m \cdot x + b$$

e descobriremos que a inclinação da reta é igual a 1 dividido pelo valor da resistência do componente, como indica a equação a seguir:

$$m = \text{inclinação da reta} = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{\Delta I}{\Delta V} = \frac{1}{R} \tag{4.6}$$

onde Δ significa uma pequena variação da grandeza correspondente.

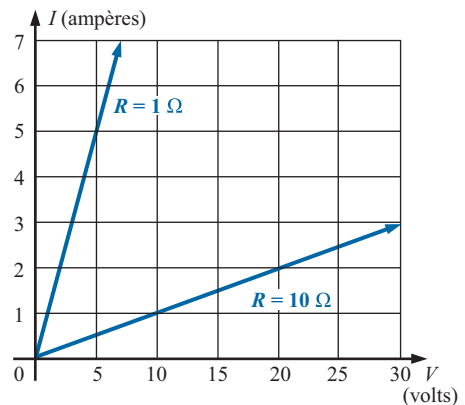


Figura 4.7 Gráfico V - I mostrando que, quanto menor for a resistência, maior será a inclinação da reta.

A Equação 4.6 revela claramente que quanto maior a resistência, menor a inclinação. Caso seja escrita da forma mostrada a seguir, a Equação 4.6 pode ser usada para determinar a resistência a partir de um gráfico V - I linear:

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

Essa equação nos diz que, se escolhermos um certo ΔV (ou ΔI), o ΔI (ou ΔV) correspondente pode ser obtido do gráfico, como ilustra a Figura 4.8, e a resistência pode então ser determinada. Se o gráfico V - I for uma reta, a Equação 4.7 fornecerá o mesmo resultado, não importando em que parte do gráfico a equação é aplicada. Entretanto, se o gráfico não for uma reta, a resistência mudará.

EXEMPLO 4.5

Determine a resistência associada ao gráfico da Figura 4.9 usando as equações 4.5 e 4.7, e compare os resultados.

Solução:

Para $V = 6 \text{ V}$, $I = 3 \text{ mA}$ e:

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

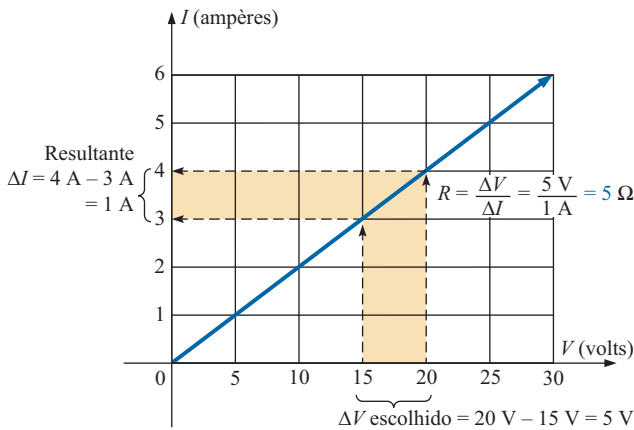


Figura 4.8 Aplicação da Equação 4.7.

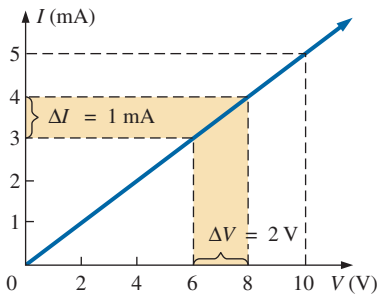


Figura 4.9 Exemplo 4.5.

Para o intervalo entre 6 e 8 V:

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

Os resultados são idênticos.

Antes de encerrar esse assunto, primeiro analisaremos a curva característica de um dispositivo semicondutor muito importante, o **diodo**, que será estudado com mais detalhes em cursos de eletrônica básica. Esse dispositivo se comporta como uma resistência baixa para a corrente elétrica passando em um sentido, e como uma resistência alta para a corrente que tenta passar no sentido oposto, muito parecido com o comportamento elétrico de uma chave. Uma curva característica de um diodo típico é mostrada na Figura 4.10. Sem qualquer operação matemática, pode-se notar a proximidade que a curva característica tem do eixo da tensão para valores negativos de tensão aplicada, indicando que existe uma região de baixa condutância (alta resistência, como acontece com uma chave aberta). Observe que essa região se estende até aproximadamente 0,7 V positivo. Entretanto, para valores de tensão aplicada maiores que 0,7 V, uma subida quase vertical na curva característica indica região de alta condutividade (baixa resistência, como acontece com uma chave fechada). Aplicaremos agora a lei de Ohm para verificar as conclusões citadas:

Para $V_D = +1 \text{ V}$,

$$R_{\text{diodo}} = \frac{V_D}{I_D} = \frac{1 \text{ V}}{50 \text{ mA}} = \frac{1 \text{ V}}{50 \times 10^{-3} \text{ A}} = 20 \Omega$$

(um valor relativamente baixo para a maioria das aplicações)

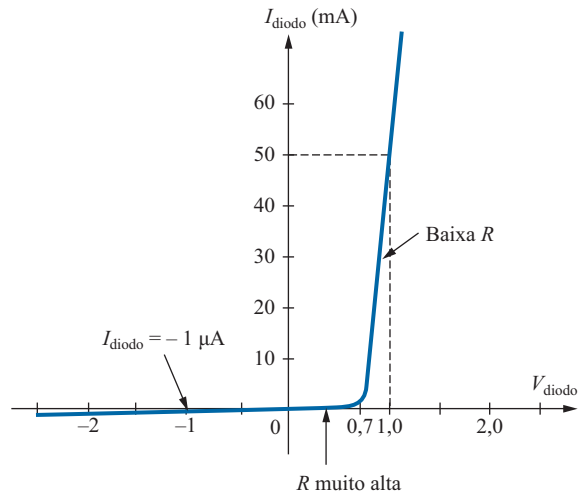


Figura 4.10 Curva característica de um diodo semicondutor.

Para $V_D = -1 \text{ V}$,

$$R_{\text{diodo}} = \frac{V_D}{I_D} = \frac{1 \text{ V}}{1 \mu\text{A}} = 1 \text{ M}\Omega$$

(que é frequentemente representado por um equivalente de circuito aberto)

4.4 POTÊNCIA

Em geral,

o termo potência é aplicado para fornecer uma indicação da quantidade de trabalho (conversão de energia) que pode ser realizado em um determinado período de tempo; isto é, a potência é a velocidade com que um trabalho é executado.

Por exemplo, um grande motor elétrico tem mais potência do que um pequeno porque é capaz de converter uma quantidade maior de energia elétrica em energia mecânica no mesmo intervalo de tempo. Como a energia convertida é medida em joules (J) e o tempo em segundos (s), a potência é medida em joules/segundo (J/s). A unidade elétrica de medida de potência é o watt (W), definida por:

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

Na forma de equação, a potência é determinada por:

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

com a **energia** (W) medida em joules e o tempo t em segundos.

A unidade de medida, o watt, é derivada do sobrenome de James Watt (Figura 4.11), que realizou trabalhos fundamentais para o estabelecimento de padrões de medida de potência. Ele introduziu a unidade chamada **horsepower** (hp) para representar a potência média desenvolvida por um cavalo robusto ao puxar uma carroça durante um dia inteiro de trabalho. Essa potência corresponde aproximadamente a 50 por cento mais do que se pode esperar de um cavalo mediano. As unidades hp e watt se relacionam da seguinte forma:

$$1 \text{ horsepower} \cong 746 \text{ watts}$$

A potência consumida por um sistema ou por um dispositivo elétrico pode ser determinada em função dos valores de corrente e de tensão ao se substituir, primeiramente, a Equação 2.5 na Equação 4.9:



Figura 4.11 James Watt.

Cortesia da Henry Howard, 1882, National Portrait Gallery, Londres.

Escocês (Greenock, Birmingham)
(1736-1819)

Construtor de instrumentos e inventor
Eleito membro da Royal Society de Londres em 1785.

Em 1757, com 21 anos de idade, usou seu talento inovador para projetar instrumentos matemáticos como o *transferidor*, o *compasso* e vários tipos de *escalas*. Em 1765, introduziu o uso de um *condensador* para aumentar a eficiência de máquinas a vapor. Registrou nos anos seguintes um grande número de patentes importantes referentes a inovações no projeto de máquinas, incluindo o movimento giratório para a máquina a vapor (em oposição ao movimento alternativo) e uma máquina de dupla ação, na qual o pistão empurrava e também puxava ao realizar seu movimento cíclico. Introduziu o termo **horsepower** para designar a potência média desenvolvida por um cavalo robusto ao puxar uma pequena carroça durante um dia de trabalho.

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

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

de forma que
$$P = VI \quad (\text{watts, W}) \quad (4.10)$$

Pela substituição direta da lei de Ohm, a equação para o cálculo da potência pode ser expressa de outras duas maneiras:

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

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

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

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

Portanto, a potência absorvida pelo resistor mostrado na Figura 4.12 pode ser calculada diretamente, dependendo das informações disponíveis. Em outras palavras, se

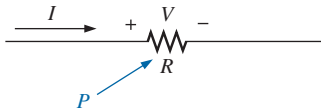


Figura 4.12 Potência dissipada por um elemento resistivo.

os valores de corrente e de resistência forem conhecidos, será conveniente usar diretamente a Equação 4.12; se os valores de V e I forem conhecidos, é mais apropriado o uso da Equação 4.10. Isso evita que tenhamos de aplicar a lei de Ohm antes de determinar a potência.

A potência fornecida por uma bateria pode ser determinada ao inserir a tensão de suprimento na Equação 4.10 para produzir:

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

A importância da Equação 4.13 não pode ser superestimada. Ela claramente declara o seguinte:

A potência associada a qualquer suprimento não é simplesmente uma função da tensão de suprimento. Ela é determinada pelo produto da tensão de suprimento e sua especificação de corrente máxima.

O exemplo mais simples é a bateria do carro — grande, difícil de manusear e relativamente pesada. Ela tem apenas 12 V, um nível de tensão que poderia ser fornecido por uma bateria ligeiramente maior do que a bateria de rádio portátil pequena de 9 V. Entretanto, para fornecer a **potência** necessária para dar a partida em um carro, a bateria tem de ser capaz de suprir a alta corrente repentina na partida — um componente que exige tamanho e massa. No total, portanto, não é a tensão ou a especificação de corrente de um suprimento que determina suas capacidades de potência; é o produto dos dois.

Em todo o texto, a abreviação para energia (W) pode ser distinta daquela do watt (W) porque a utilizada para representar energia é escrita em itálico, enquanto a notação para o watt é em romano. Na realidade, todas as variáveis na seção CC aparecem em itálico, enquanto as unidades aparecem em tipo romano.

EXEMPLO 4.6

Determine a potência entregue ao motor de corrente contínua ilustrado na Figura 4.13.

Solução:

$$P = EI = (120 \text{ V})(5 \text{ A}) = 600 \text{ W} = \mathbf{0,6 \text{ kW}}$$

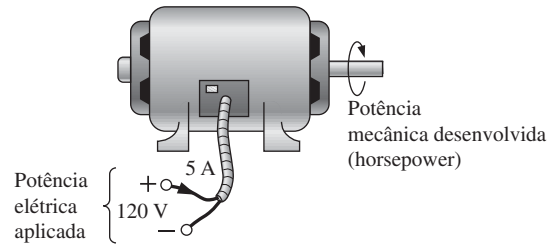


Figura 4.13 Exemplo 4.6.

EXEMPLO 4.7

Qual a potência dissipada por um resistor de 5Ω se a corrente nele for de 4 A?

Solução:

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

EXEMPLO 4.8

A curva característica I - V de uma lâmpada de filamento é mostrada na Figura 4.14. Observe a não linearidade da curva, indicando grande variação no valor da resistência do filamento com a tensão aplicada. Se a tensão nominal de operação da lâmpada é 120 V, determine a potência dissipada. Calcule também a resistência da lâmpada sob essas condições de funcionamento.

Solução:

Para uma tensão de 120 V:

$$I = 0,625 \text{ A}$$

e

$$P = VI = (120 \text{ V})(0,625 \text{ A}) = \mathbf{75 \text{ W}}$$

Para a mesma tensão de 120 V:

$$R = \frac{V}{I} = \frac{120 \text{ V}}{0,625 \text{ A}} = \mathbf{192 \Omega}$$

Algumas vezes conhecemos a potência e desejamos determinar a corrente ou a tensão. Por meio de manipula-

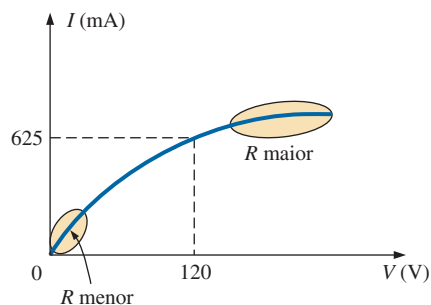


Figura 4.14 Gráfico I - V não linear de uma lâmpada de filamento de 75 W (Exemplo 4.8).

ções algébricas, podemos obter expressões para cada uma dessas grandezas, como segue:

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

e

$$I = \sqrt{\frac{P}{R}} \quad (\text{ampères, A}) \quad (4.14)$$

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

e

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

EXEMPLO 4.9

Determine a corrente através de um resistor de 5 kΩ quando ele dissipa uma potência de 20 mW.

Solução:

A partir da Equação 4.14:

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

= 2 mA

4.5 ENERGIA

Para que uma potência, que determina a velocidade com que um trabalho é realizado, produza uma conversão de uma forma de energia em outra, *é preciso que ela seja usada por um certo período*. Por exemplo, um motor pode ter de acionar uma grande carga, porém, a menos que ele seja usado ao longo de um intervalo de tempo, não haverá conversão de energia. Além disso, quanto mais o motor for usado para acionar uma carga, maior será a energia utilizada.

A **energia** (*W*) consumida ou fornecida por um sistema é, portanto, determinada por:

$$W = Pt \quad (\text{watt-segundos, Ws, ou joules}) \quad (4.16)$$

Como a potência é medida em watts (ou joules por segundo) e o tempo em segundos, a unidade de energia é o *watt-segundo* ou o *joule* (leia a nota na Figura 4.15), conforme indicado anteriormente. Entretanto, a unidade watt-segundo é uma quantidade muito pequena para a maioria dos propósitos práticos, de modo que as unidades *watt-hora* (Wh) e *kilowatt-hora* (kWh) foram definidas da seguinte maneira:

$$\text{Energia (Wh)} = \text{potência (W)} \times \text{tempo (h)} \quad (4.17)$$



Figura 4.15 James Prescott Joule.
© Biodiversity Heritage Library. Arquivo Nacional, USA.

Inglês (Salford, Manchester) (1818-1889)
Físico, doutor *honoris causa* pelas Universidades de Dublin e de Oxford.

Contribuiu para uma lei importante e fundamental: *a lei da conservação da energia*, estabelecendo que diversas formas de energia, seja elétrica, mecânica ou térmica, são da mesma natureza, e podem ser convertidas de uma forma em outra. Em 1841, publicou a *lei de Joule*, segundo a qual a potência dissipada termicamente em um fio é igual ao produto do quadrado da intensidade da corrente pela resistência do fio (I^2R). Além disso, comprovou experimentalmente que a quantidade de calor produzida é equivalente à potência absorvida e, portanto, o calor é uma forma de energia.

$$\text{Energia (kWh)} = \frac{\text{potência (W)} \times \text{tempo (h)}}{1.000} \quad (4.18)$$

Observe que certa quantidade de energia em kilowatts-horas é expressa pelo número que exprime essa mesma quantidade de energia em watts-horas dividido por 1.000. Para que você tenha uma ideia da quantidade de energia que essa unidade representa, saiba que *1 kWh é a quantidade de energia dissipada por uma lâmpada de 100 W ligada durante 10 horas*.

O **medidor de kilowatts-horas** é um instrumento destinado a medir a energia elétrica fornecida a consumidores residenciais e comerciais. Normalmente, esse medidor é instalado no painel de distribuição do edifício. A Figura 4.16 mostra a fotografia de um desses medidores, do tipo analógico, juntamente com o desenho de um conjunto de mostradores. Conforme indicado, as potências de dez abaixo de cada mostrador estão todas em kilowatts-horas. Quanto mais rápido o disco de alumínio gira, maior é o consumo indicado pelo medidor. Os ponteiros estão ligados ao eixo de rotação desse disco por engrenagens. A Figura 4.16 também mostra uma fotografia de um medidor digital construído com dispositivos semicondutores, que pode ser utilizado em diversas situações.



(a)



(b)

Figura 4.16 Medidores de kilowatts-horas: (a) analógico; (b) digital. [Cortesia de (a) Bill Fehr/Shutterstock e (b) Jeff Wilber/Shutterstock.]

EXEMPLO 4.10

Considerando as posições dos ponteiros vistos na Figura 4.16(a), calcule o valor a ser pago se a leitura anterior foi 4.650 kWh, sendo o custo médio em sua área de 11 centavos por kilowatt-hora.

Solução:

$$5.360 \text{ kWh} - 4.650 \text{ kWh} = 710 \text{ kWh usados}$$

$$710 \text{ kWh} \left(\frac{11 \text{ ¢}}{\text{kWh}} \right) = \$ 78,10$$

EXEMPLO 4.11

Calcule a quantidade de energia (em kilowatts-horas) necessária para manter uma lâmpada de filamento 60 W acesa continuamente durante um ano (365 dias).

Solução:

$$W = \frac{Pt}{1.000} = \frac{(60 \text{ W})(24 \text{ h/dia})(365 \text{ dias})}{1.000} = \frac{525.600 \text{ Wh}}{1.000} = 525,60 \text{ kWh}$$

EXEMPLO 4.12

Durante quanto tempo uma TV de plasma de 340 W teria de ficar ligada para consumir 4 kWh?

Solução:

$$W = \frac{Pt}{1.000} \Rightarrow t(\text{horas}) = \frac{(W)(1.000)}{P} = \frac{(4 \text{ kWh})(1.000)}{340 \text{ W}} = 11,76 \text{ h}$$

EXEMPLO 4.13

Qual é o custo da utilização de um motor de 5 hp durante 2 horas se a tarifa é de 11 centavos por kWh? Solução:

$$W \text{ (kilowatt-hora)} = \frac{Pt}{1.000} = \frac{(5 \text{ hp} \times 746 \text{ W/hp})(2 \text{ h})}{1.000} = 7,46 \text{ kWh}$$

$$\text{Custo} = (7,46 \text{ kWh})(11 \text{ ¢/kWh}) = 82,06 \text{ centavos}$$

EXEMPLO 4.14

Qual é o custo total da utilização dos itens a seguir, considerando uma tarifa de 11 centavos por kWh?

- Uma torradeira de 1.200 W durante 30 minutos.
- Seis lâmpadas de 50 W durante 4 horas.
- Uma máquina de lavar de 500 W durante 45 minutos.
- Uma secadora de roupas elétrica de 4.800 W durante 20 minutos.
- Um PC de 80 W por 6 horas.

Solução:

$$W = \frac{(1200 \text{ W})(\frac{1}{2} \text{ h}) + (6)(50 \text{ W})(4 \text{ h}) + (500 \text{ W})(\frac{3}{4} \text{ h}) + (4300 \text{ W})(\frac{1}{3} \text{ h}) + (80 \text{ W})(6 \text{ h})}{1000}$$

$$= \frac{600 \text{ Wh} + 1.200 \text{ Wh} + 375 \text{ Wh} + 1.433 \text{ Wh} + 480 \text{ Wh}}{1.000}$$

$$= \frac{4.088 \text{ Wh}}{1.000}$$

$$W = 4,09 \text{ kWh}$$

$$\text{Custo} = (4,09 \text{ kWh})(11 \text{ ¢/kWh}) \cong 45 \text{ centavos}$$

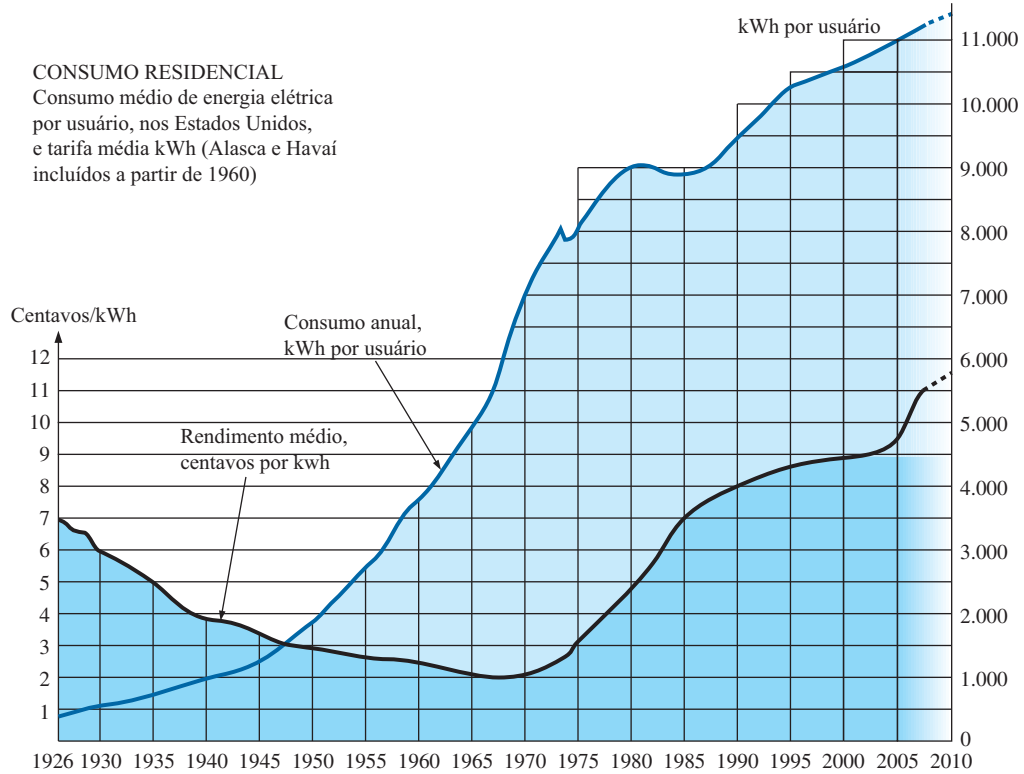


Figura 4.17 Custo por kWh e consumo médio em kWh por usuário em função do tempo. (Baseado em dados de Edison Electric Institute.)

O gráfico visto na Figura 4.17 mostra o custo médio nacional por kilowatt-hora comparado ao consumo médio em kilowatts-horas por consumidor nos Estados Unidos. Observe que o custo hoje em dia está acima do valor cobrado em 1926, e que o consumo médio anual é hoje superior a 20 vezes ao que se consumia em 1926. Tenha em mente que o gráfico da Figura 4.17 representa o custo médio para todo o país. Em alguns estados dos Estados Unidos, a tarifa é de cerca de 7 centavos por quilowatt-hora, enquanto em outros é quase 20 centavos por kilowatt-hora.

Na Tabela 4.1 temos uma relação de alguns dos eletrodomésticos de uso mais comum, juntamente com as respectivas especificações de potência. Pode ser interessante para o leitor calcular o custo de operação de alguns desses aparelhos ao longo de um intervalo de tempo usando o gráfico ilustrado na Figura 4.17 para calcular o custo por kilowatt-hora.

4.6 EFICIÊNCIA

A Figura 4.18 ilustra o fluxo de energia em um sistema no qual a energia muda de forma. Observe em particular que a quantidade de energia na saída é sempre menor do que a que entrou no sistema devido às perdas e, às vezes, ao armazenamento de energia no interior do

sistema. A melhor situação que se pode esperar é que os valores absolutos de W_o e W_i sejam relativamente próximos um do outro.

De acordo com a conservação da energia:

$$\text{Entrada de energia} = \text{saída de energia} + \text{energia perdida e/ou armazenada no sistema}$$

Dividindo ambos os lados dessa igualdade por t , obtemos:

$$\frac{W_{\text{entrada}}}{t} = \frac{W_{\text{saída}}}{t} + \frac{W_{\text{perdida ou armazenada no sistema}}}{t}$$

Como $P = W/t$, temos a seguinte expressão:

$$P_i = P_o + P_{\text{perdida ou armazenada}} \quad (W) \quad (4.19)$$

A **eficiência** (η) de um sistema é então determinada pela seguinte equação:

$$\text{Eficiência} = \frac{\text{potência de saída}}{\text{potência de entrada}}$$

$$e \quad \eta = \frac{P_o}{P_i} \quad (\text{número decimal}) \quad (4.20)$$

onde η (letra grega *eta* minúscula) é um número decimal.

Tabela 4.1 Potências típicas de alguns eletrodomésticos comuns.

Aparelho	Potência em watts	Aparelho	Potência em watts
Ar-condicionado (sala)	1.400	Laptop:	
Secadora (jato de ar)	1.300	Consumo baixo	<1 W (tipicamente 0,3 a 0,5)
Telefone celular:		Consumo médio	80
Modo <i>standby</i>	≅ 35 mW	Forno de micro-ondas	1.200
Modo conversação	≅ 4,3 W	Nintendo Wii	19
Relógio	2	Rádio	70
Secadora de roupa (elétrica)	4.300	Fogão (autolimpante)	12.200
Cafeteira	900	Refrigerador (com degelo automático)	1.800
Máquina de lavar louça	1.200	Barbeador	15
Ventilador:		Lâmpada solar	280
Portátil	90	Torradeira	1.200
De teto	200	Compactador de lixo	400
Aquecedor central	1.500	TV:	
Aparelhos para aquecimento:		Plasma	340
Aquecedor portátil	320	LCD	220
Aquecedor a óleo	230	VCR/DVD	25
Ferro elétrico (seco ou a vapor)	1.000	Máquina de lavar roupas	500
		Aquecedor de água (boiler)	4.500
		Xbox 360	187

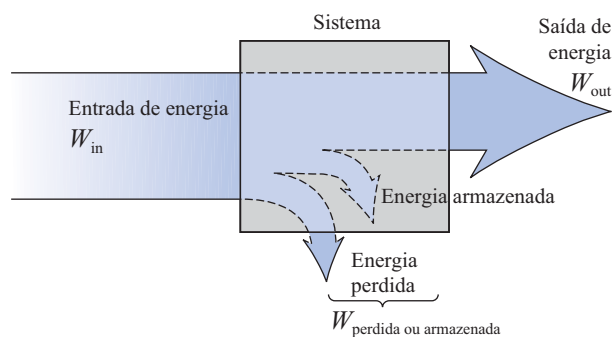


Figura 4.18 Fluxo de energia em um sistema.

Em termos percentuais:

$$\eta\% = \frac{P_o}{P_i} \times 100\% \quad (\text{porcentagem}) \quad (4.21)$$

Em termos de energia de entrada e saída, a eficiência percentual é dada por:

$$\eta\% = \frac{W_o}{W_i} \times 100\% \quad (\text{porcentagem}) \quad (4.22)$$

A máxima eficiência possível é 100 por cento, o que equivale a $P_o = P_i$, ou seja, nenhuma energia é armazenada

ou perdida pelo sistema. Obviamente, quanto maior for a perda interna do sistema, menor será a eficiência.

EXEMPLO 4.15

Um motor de 2 hp opera com uma eficiência de 75 por cento. Qual é a potência de entrada em watts? Se a tensão aplicada ao motor é de 220 V, qual é a corrente na entrada?

Solução:

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

$$0,75 = \frac{(2 \text{ hp})(746 \text{ W/hp})}{P_i}$$

e
$$P_i = \frac{1.492 \text{ W}}{0,75} = \mathbf{1.989,33 \text{ W}}$$

$$P_i = EI \text{ ou } I = \frac{P_i}{E} = \frac{1.989,33 \text{ W}}{220 \text{ V}} = \mathbf{9,04 \text{ A}}$$

EXEMPLO 4.16

Qual a potência de saída, em hp, de um motor com uma eficiência de 80 por cento e uma corrente de entrada de 8 A a uma tensão de 120 V?

Solução:

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

$$0,80 = \frac{P_o}{(120\text{ V})(8\text{ A})}$$

e $P_o = (0,80)(120\text{ V})(8\text{ A}) = 768\text{ W}$

com $768\text{ W} \left(\frac{1\text{ hp}}{746\text{ W}} \right) = \mathbf{1,03\text{ hp}}$

EXEMPLO 4.17

Se $\eta = 0,85$, determine o nível de energia de saída se a energia fornecida ao sistema for de 50 J.

Solução:

$$\eta = \frac{W_o}{W_i} \Rightarrow W_o = \eta W_i = (0,85)(50\text{ J}) = \mathbf{42,5\text{ J}}$$

A Figura 4.19 ilustra esquematicamente os componentes básicos de um sistema de geração de energia elétrica. A fonte de energia mecânica é uma roda de pás que gira impulsionada por uma queda-d'água potencializada por uma barragem. Um conjunto de engrenagens faz com que o eixo do gerador gire sempre na velocidade angular adequada. Uma linha de transmissão transporta a energia elétrica até o consumidor final (carga). Para cada componente do sistema há indicações das potências de entrada e de saída. A eficiência de cada um desses subsistemas é dada por:

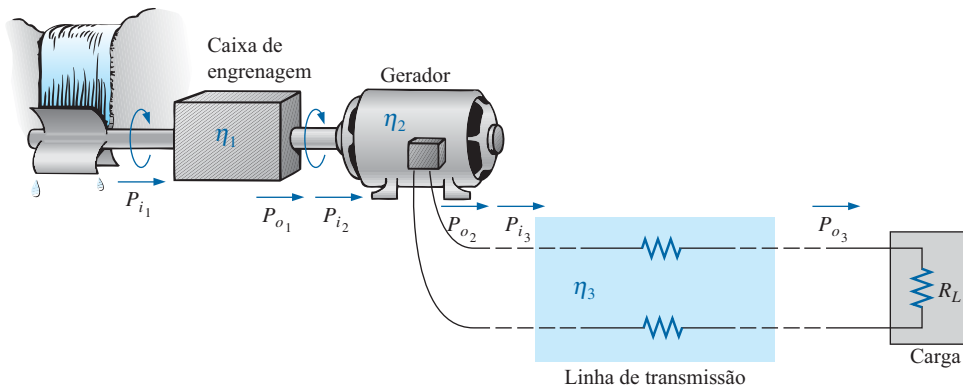


Figura 4.19 Componentes básicos de um sistema de geração de energia elétrica.



Figura 4.20 Sistema em cascata.

$$\eta_1 = \frac{P_{o1}}{P_{i1}} \quad \eta_2 = \frac{P_{o2}}{P_{i2}} \quad \eta_3 = \frac{P_{o3}}{P_{i3}}$$

Se efetuarmos o produto dessas três eficiências:

$$\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 = \frac{P_{o1}}{P_{i1}} \cdot \frac{P_{o2}}{P_{i2}} \cdot \frac{P_{o3}}{P_{i3}} = \frac{P_{o3}}{P_{i1}}$$

e levamos em conta que $P_{i2} = P_{o1}$ e $P_{i3} = P_{o2}$, as simplificações resultantes levarão ao resultado final P_{o3}/P_{i1} , que expressa a eficiência do sistema como um todo.

Em geral, para sistemas em cascata, como ilustra a Figura 4.20, temos:

$$\eta_{\text{total}} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \dots \eta_n \tag{4.23}$$

EXEMPLO 4.18

Calcule a eficiência total do sistema mostrado na Figura 4.19, sabendo que $\eta_1 = 90\%$, $\eta_2 = 85\%$ e $\eta_3 = 95\%$.

Solução:

$$\eta_T = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 = (0,90)(0,85)(0,95) = 0,727, \text{ ou } \mathbf{72,7\%}$$

EXEMPLO 4.19

Se a eficiência η_1 cair para 40 por cento, calcule a nova eficiência total e compare esse resultado com o obtido no exemplo anterior.