

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.

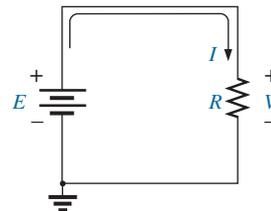


Figura 4.2 Circuito básico.

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.

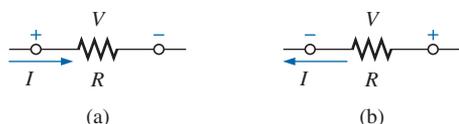


Figura 4.3 Definição de polaridades.

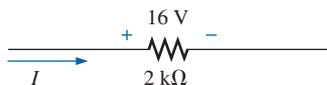


Figura 4.4 Exemplo 4.3.

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

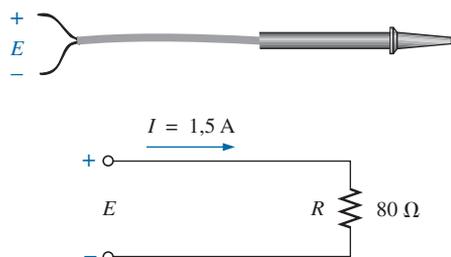


Figura 4.5 Exemplo 4.4.

(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

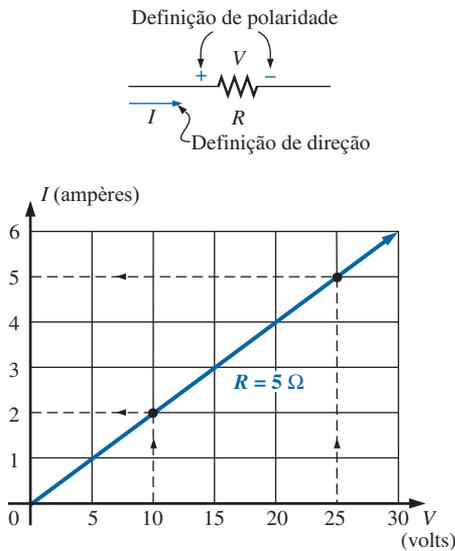


Figura 4.6 Gráfico da lei de Ohm.

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.

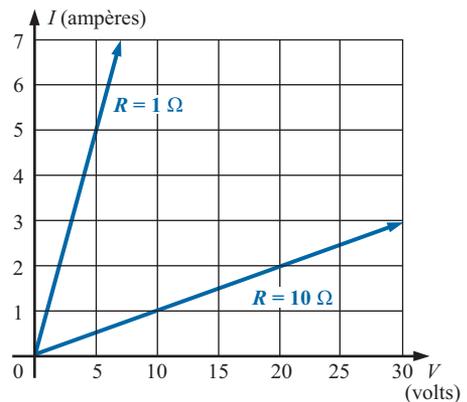


Figura 4.7 Gráfico V - I mostrando que, quanto menor for a resistência, maior será a inclinação da reta.

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:

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

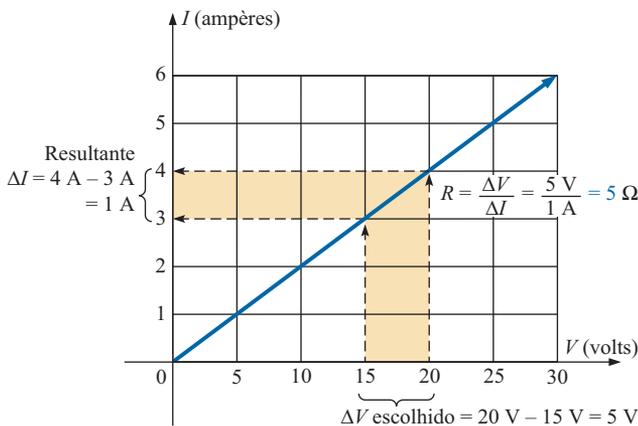


Figura 4.8 Aplicação da Equação 4.7.

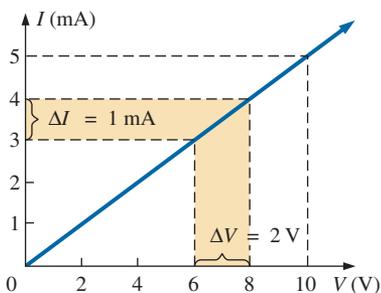


Figura 4.9 Exemplo 4.5.

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)

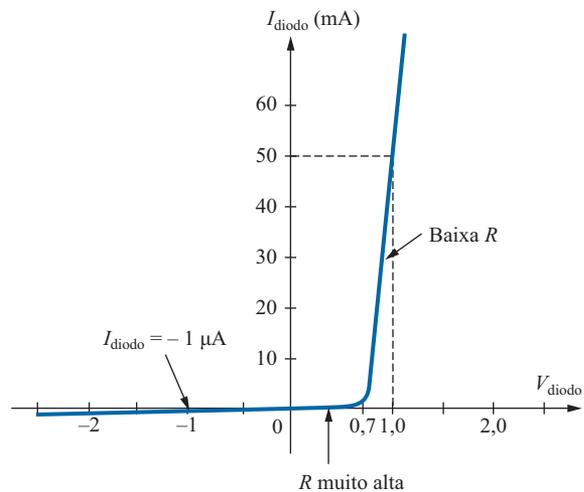


Figura 4.10 Curva característica de um diodo semicondutor.

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

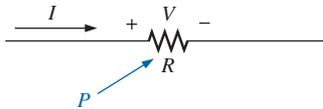


Figura 4.12 Potência dissipada por um elemento resistivo.

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:

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

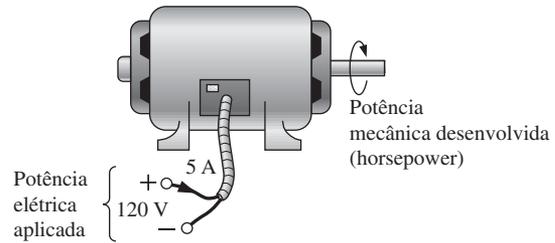


Figura 4.13 Exemplo 4.6.

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-

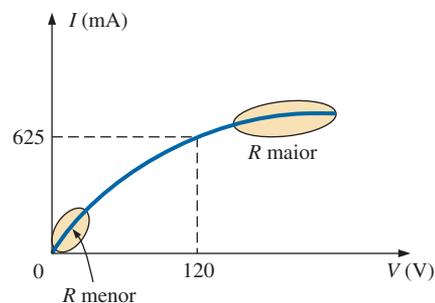


Figura 4.14 Gráfico I - V não linear de uma lâmpada de filamento de 75 W (Exemplo 4.8).

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:

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

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:

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

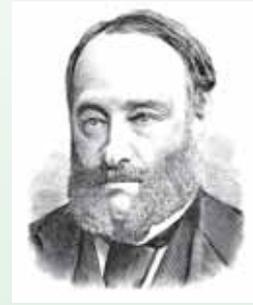


Figura 4.15 James Prescott Joule.

© 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:

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

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

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:

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

EXEMPLO 4.12

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

Solução:

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

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:

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

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

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:

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

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

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

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

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

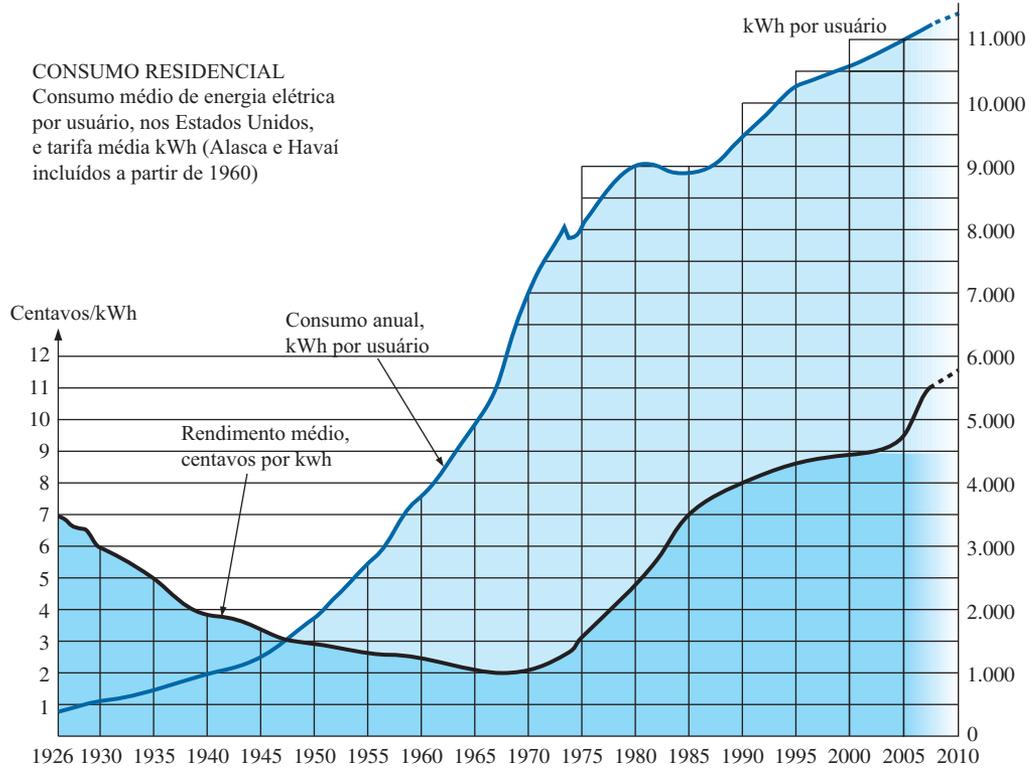


Figura 4.17 Custo por kWh e consumo médio em kWh por usuário em função do tempo. (Baseado em dados de Edison Electric Institute.)

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

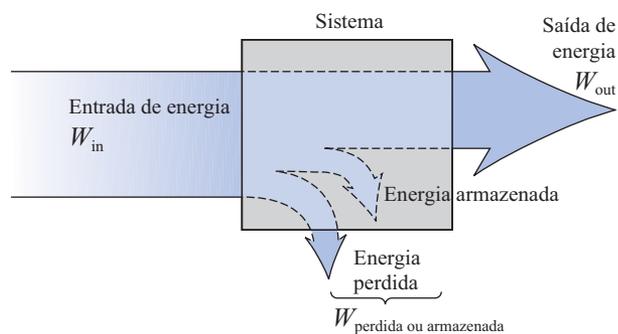


Figura 4.18 Fluxo de energia em um sistema.

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:

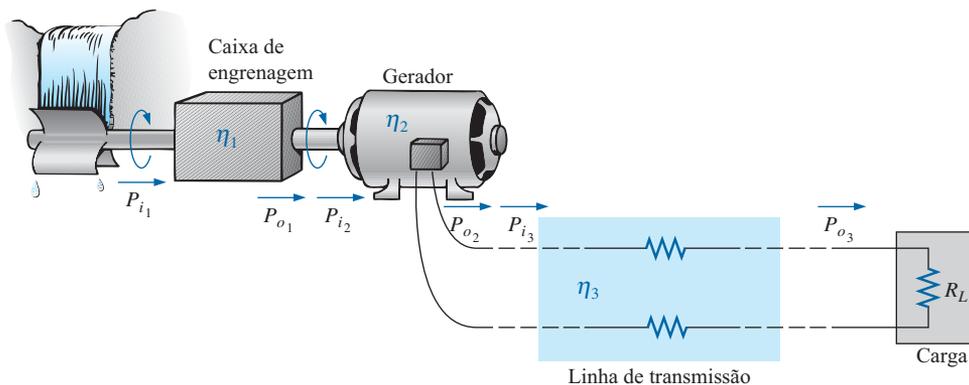


Figura 4.19 Componentes básicos de um sistema de geração de energia elétrica.



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.

Solução:

$$\eta_T = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 = (0,40)(0,85)(0,95) = 0,323, \text{ ou } 32,3\%$$

Certamente, 32,3 por cento é muito menor do que 72,7 por cento. Portanto, a eficiência total de um sistema em cascata é determinada principalmente pela menor eficiência (*weakest link*), sendo menor que (ou igual, caso as outras eficiências sejam de 100 por cento) a menor das eficiências do sistema.

4.7 DISJUNTORES, ICFA_s E FUSÍVEIS

A potência de entrada dos grandes complexos industriais, que usam equipamentos de alto consumo, dos circuitos residenciais e dos medidores utilizados em laboratório deve ser limitada de modo a assegurar que a corrente não ultrapasse os valores especificados. Caso não exista essa limitação, os condutores elétricos e/ou equipamentos eletrônicos podem ser seriamente danificados, havendo, além disso, o risco de incêndio e de intoxicação causada por fumaça.

Para limitar os níveis de corrente, são instalados **fusíveis** ou **disjuntores** no local onde a rede de alimentação é conectada ao circuito interno do usuário, como no quadro de distribuição da maioria das residências. Os fusíveis mostrados na Figura 4.21 possuem um condutor metálico interno através do qual passa a corrente que entra no sistema; o condutor interno do fusível começará a se fundir (abrir) caso a corrente do sistema ultrapasse o valor especificado que aparece impresso no corpo do fusível. É claro que se a fusão desse condutor for completa o caminho da corrente será interrompido e toda a carga ligada ao circuito estará protegida.

Nas construções mais recentes, os fusíveis foram substituídos por disjuntores como os que aparecem na Figura 4.22. Quando a corrente excede o valor especificado, o campo magnético gerado por um eletroímã atinge intensidade suficiente para causar a abertura de uma chave, interrompendo assim o circuito. Quando a corrente volta ao normal o disjuntor pode ser rearmado, estando pronto para ser reutilizado.

Atualmente, o Código Nacional de Eletricidade dos Estados Unidos impõe que os dispositivos de proteção utilizados nos banheiros e em outras áreas críticas sejam do tipo interruptor de corrente por falha no aterramento (ICFA); esses dispositivos são projetados para que respondam mais rapidamente do que os disjuntores. O ICFA da Figura 4.23 interrompe o circuito em 5 ms. Sabe-se que 6 mA é a maior corrente a que a maioria dos indivíduos pode ser exposta por um intervalo reduzido de tempo sem

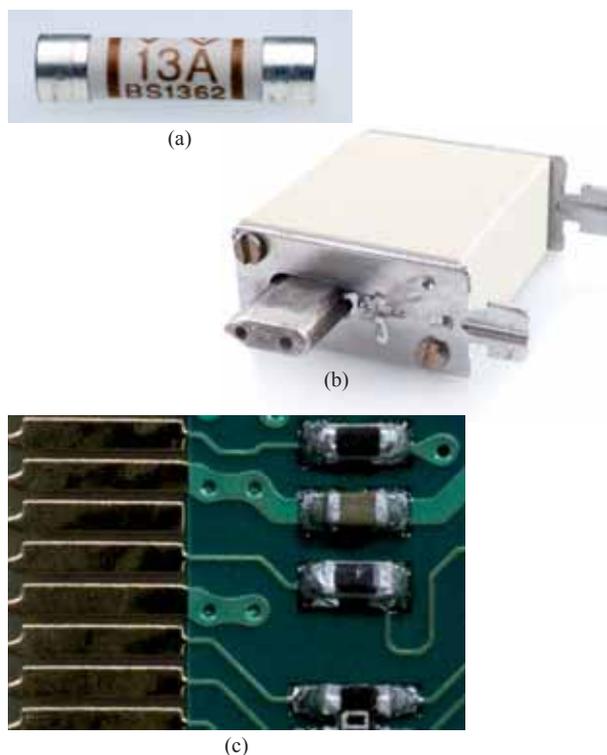


Figura 4.21 Fusíveis: (a) CC-TRON[®] (0-10 A); (b) Semitron (0-600 A); (c) fusíveis de chips de montagem em superfície subminiaturizados. [Cortesia de (a) Paul Reid/Shutterstock; (b) e (c) iStockphoto/Getty Images.]



Figura 4.22 Disjuntores. (Reimpresso com permissão da Tyco Electronics Corporation, uma divisão da Potter and Brumfield.)

sofrer consequências graves. Uma corrente maior que 11 mA pode causar contração involuntária dos músculos não permitindo que a pessoa se solte do condutor, podendo levá-la ao estado de choque. Correntes ainda mais altas percorrendo o corpo por mais de um segundo podem fazer o músculo cardíaco entrar em fibrilação, levando à morte em poucos minutos. A rapidez da resposta do ICFA deve-se à sensibilidade desse dispositivo quanto à diferença entre as correntes de entrada e de saída; essas correntes devem ser iguais em condições normais de operação. Quando um caminho adicional para a corrente é introduzido no circui-

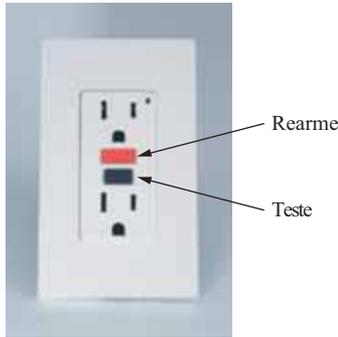


Figura 4.23 Interruptor de corrente por falha no aterramento (ICFA). Tomada de 125 V CA, 60 Hz, 15 A. (Reimpresso com permissão da Leviton Manufacturing Company, Leviton SmartLock™ GFC.)

to, por exemplo, através de um corpo humano, surge uma diferença entre essas correntes, o que leva o interruptor a abrir o circuito, desconectando a fonte.

4.8 APLICAÇÕES

Fluorescente *versus* incandescente

Um tópico controverso na discussão da conservação de energia é a crescente pressão para que as lâmpadas incandescentes sejam substituídas pelas lâmpadas fluorescentes, como a mostrada na Figura 4.24. Países mundo



Figura 4.24 Lâmpada fluorescente compacta (LFC) de 23 W, 380 mA.

afora estabeleceram metas para o futuro próximo determinando o banimento do uso de lâmpadas incandescentes até 2012. Atualmente, o Japão já conta com uma taxa de adoção de 80 por cento, e os vilarejos de Shirakawa-go e Gokayama, Patrimônios da Humanidade, tiveram toda sua iluminação incandescente retirada em 2007 em um esforço corajoso de reduzir as emissões de dióxido de carbono próximas dessas aldeias. A Alemanha tem uma taxa de adoção de 50 por cento, o Reino Unido, de 20 por cento, e os Estados Unidos, em torno de 6 por cento. A Austrália anunciou o banimento completo da iluminação incandescente até 2009, e o Canadá, até 2012.

Essa mudança enorme nos costumes se deve fundamentalmente à maior eficiência das lâmpadas fluorescentes em termos de energia, assim como sua vida útil mais longa. Pelo mesmo número de lúmens (unidade de medida de luz), a energia dissipada por uma luz incandescente pode ser aproximadamente de quatro a seis vezes maior do que a de uma lâmpada fluorescente. O intervalo de variação é uma função do nível de lúmens. Quanto maior o número de lúmens disponíveis por lâmpada, menor a razão. **Em outras palavras, a energia poupada aumenta com a diminuição na especificação de potência da lâmpada fluorescente.** A Tabela 4.2 compara as especificações de potência de lâmpadas fluorescentes e de lâmpadas incandescentes para o mesmo número de lúmens gerados. Para o mesmo período de tempo, a razão da energia usada exige que simplesmente dividamos as especificações de tensão no mesmo nível de lúmens.

Como mencionado, o outro benefício das lâmpadas fluorescentes é a longevidade. Uma lâmpada incandescente de 60 W terá uma vida nominal de 1.500 h, enquanto é esperado que uma lâmpada fluorescente de 13 W, com um

Tabela 4.2 Comparação entre os lúmens gerados por lâmpadas incandescentes e por lâmpadas fluorescentes.

Incandescentes	Lúmens	Fluorescentes
100 W (950 h) —	1.675	
	1.600	— 23 W (12.000 h)
	1.100	— 15 W (8.000 h)
75 W (1.500 h) —	1.040	
	870	— 13 W (10.000 h)
60 W (1.500 h) —	830	
	660	— 11 W (8.000 h)
	580	— 9 W (8.000 h)
40 W (1.250 h) —	495	
	400	— 7 W (10.000 h)
25 W (2.500 h) —	250	250 — 4 W (8.000 h)
15 W (3.000 h) —	115	

nível de lúmens equivalente, dure 10.000 h — uma proporção de vida de 6,67 vezes. Uma lâmpada incandescente de 25 W pode ter uma vida útil de 2.500 h, mas uma lâmpada fluorescente de 4 W de emissão de lúmens similar tem uma vida útil de 8.000 horas — uma proporção de vida de apenas 3,2. É interessante observar na Tabela 4.2 que a vida útil de lâmpadas fluorescentes permanece bastante alta em todas as especificações de potência, enquanto a vida útil de lâmpadas incandescentes aumenta de maneira substancial com a queda no nível de potência. Por fim, temos de considerar o custo da compra e seu uso. Atualmente, uma lâmpada incandescente de 60 W pode ser comprada por um valor em torno de 80 centavos de dólar, enquanto uma lâmpada fluorescente de 13 W com uma emissão de lúmens similar pode custar \$ 2,50 — um aumento a uma proporção de 3:1. Para a maioria das pessoas, esse é um fator importante e teve sem dúvida algum efeito sobre os números da adoção de lâmpadas fluorescentes. Entretanto, é preciso considerar também o custo do uso das lâmpadas que acabamos de descrever por um período de 1 ano. Considere que cada uma seja usada 5 h/dia por 365 dias a um custo de 11 centavos de dólar/kWh.

Para a lâmpada incandescente, o custo é determinado como mostrado a seguir:

$$\text{kWh} = \frac{(5\text{h})(365\text{dias})(60\text{W})}{1.000} = 109,5 \text{ kWh}$$

$$\text{Custo} = (109,5 \text{ kWh})(11 \text{ ¢/kWh}) = \text{\$ } 12,05/\text{ano}$$

Para a lâmpada fluorescente o custo é determinado como mostrado a seguir:

$$\text{kWh} = \frac{(5\text{h})(365\text{dias})(13\text{W})}{1.000} = 23,73 \text{ kWh}$$

$$\text{Custo} = (23,73 \text{ kWh})(11 \text{ ¢/kWh}) = \text{\$ } 2,61/\text{ano}$$

A razão de custo entre as lâmpadas fluorescentes e as incandescentes gira em torno de 4,6, o que é certamente significativo, indicando que o custo de iluminação fluorescente equivale a 22 por cento daquele da iluminação incandescente. Retornando ao custo inicial, está claro que a lâmpada pagaria a si mesma quase quatro vezes no período de 1 ano.

O outro fator positivo em relação ao uso de lâmpadas de potência mais baixa é a economia em emissões de dióxido de carbono no processo de produzir a energia elétrica necessária. Para os dois vilarejos no Japão mencionados anteriormente, onde em torno de 700 lâmpadas foram substituídas, a economia será de aproximadamente 24 toneladas em 1 ano. Imagine a economia que seria feita caso essa política fosse adotada no mundo todo.

Assim como com todas as abordagens inovadoras para poupar energia, há algumas preocupações a respeito de sua adoção no mundo todo. Elas incluem o mercúrio que é inerente design de uma lâmpada fluorescente. Cada lâmpada contém em torno de 5 mg de mercúrio, um elemento que pode provocar danos ao sistema nervoso e ao desenvolvimento do cérebro. Os efeitos de se quebrar uma lâmpada estão sob investigação, e a preocupação é tamanha que as agências de proteção ambiental na maioria dos países estão estabelecendo padrões para o processo de limpeza. Todas as abordagens descritas concordam que um aposento em que ocorreu a quebra de uma lâmpada deve ser limpo e as janelas, **abertas para ventilação**. Então, os materiais **não devem ser aspirados**, mas, sim, cuidadosamente varridos e colocados dentro de um recipiente pequeno fechado. Algumas agências vão bem além dessas duas medidas simples de limpeza, mas realmente trata-se de um processo que tem de ser analisado com cuidado. A outra preocupação é como jogar fora as lâmpadas gastas. No momento, esse talvez não seja um grande problema porque a adoção de lâmpadas fluorescentes começou recentemente, e as lâmpadas vão durar por alguns anos. Entretanto, chegará o dia em que a disposição apropriada desse lixo terá de ser definida. Felizmente, a maioria dos países desenvolvidos está tratando cuidadosamente desse problema e construindo instalações projetadas especificamente para dispor desse tipo de equipamento. Quando o lixo dessas lâmpadas alcançar um nível mais alto, como as 350 milhões de lâmpadas por ano projetadas em um país como o Japão, ele vai representar níveis que terão de ser tratados de maneira eficiente e correta para remover os níveis de mercúrio que resultarão de seu descarte.

Outras questões relacionam-se à luz emitida pelas lâmpadas fluorescentes em relação às lâmpadas incandescentes. Em geral, a luz emitida pelas luzes incandescentes (mais componentes vermelhos que azuis) assemelha-se mais à luz natural do que àquela de lâmpadas fluorescentes, que emitem uma tonalidade azulada. Entretanto, ao se aplicar o fósforo correto na parte interna da lâmpada, é possível se obter uma **luz branca** mais confortável aos olhos. Outra questão é que os dimmers (variadores de luminosidade) atuais — uma fonte de conservação de energia em muitos casos — só podem ser usados em lâmpadas fluorescentes especialmente projetadas. Entretanto, há pesquisas em andamento que provavelmente resolverão esse problema em um futuro próximo. Outra questão importante é o fato de as lâmpadas fluorescentes emitirem raios ultravioleta (UV) (como a luz usada em clínicas de bronzeamento), que não são um componente de luz visível, mas são uma preocupação para pessoas com problemas de pele, como indivíduos com lúpus; entretanto, novamente, estudos ainda estão sendo feitos. Por muitos anos, as lâm-

padas fluorescentes foram relegadas a aparelhos de teto, pois a distância acabava com a maioria das preocupações a respeito dos raios UV, mas agora elas foram trazidas mais para perto do consumidor. Lembre-se também que o desenvolvimento de plantas em um espaço interior escuro só pode ser conseguido a partir de lâmpadas fluorescentes devido à radiação UV. Por fim, assim como ocorre com todos os produtos, você recebe pelo que pagou: lâmpadas mais baratas parecem não cumprir sua garantia de vida útil e emitem um espectro de luz mais pobre.

O debate poderia seguir por muitas páginas, comparando benefícios e desvantagens. Por exemplo, considere que o calor gerado pelas lâmpadas incandescentes proporcione parte do aquecimento em grandes instituições e, portanto, mais aquecimento teria de ser fornecido se a troca para lâmpadas fluorescentes fosse feita. Entretanto, nos meses de calor, as lâmpadas fluorescentes, mais frias, exigiriam menos resfriamento, proporcionando economia. Em última análise, pelo visto, a decisão cairá sobre cada indivíduo (a não ser que seja algo compulsório) e o que ele achar melhor para si. Mas não se preocupe; qualquer forte reação a uma troca proposta será bem estudada, e não deve ser motivo de temor.

O crescimento exponencial do interesse nas lâmpadas fluorescentes nos últimos anos deve-se fundamentalmente à introdução de circuitos eletrônicos que podem ‘disparar’ ou provocar a ‘ignição’ da lâmpada de maneira que proporcionem uma ligação mais rápida e unidades menores. Uma descrição completa da variedade mais antiga de lâmpadas fluorescentes aparece na seção Aplicações do Capítulo 22, que descreve o tamanho grande do reator magnético e a necessidade de um mecanismo de partida. Uma ideia do mecanismo de partida eletrônico relativamente pequeno de uma lâmpada fluorescente compacta (CFL) é fornecida na Figura 4.25. A seção do

bulbo permanece completamente isolada, com apenas quatro leads disponíveis para conectar aos circuitos, o que reduz a possibilidade de exposição quando a lâmpada está sendo construída. O conjunto de circuitos foi virado de sua posição na base do bulbo. O lead preto e branco nas bordas está conectado à base do bulbo, onde ele está conectado a uma fonte de 120 V. Observe que os dois componentes maiores são o transformador e o capacitor eletrolítico próximos do centro da placa de circuito impresso. Uma série de outros elementos a serem descritos no texto foi identificada.

Forno de micro-ondas

É provável que possamos dizer que a maioria das casas hoje em dia tem um forno de micro-ondas (veja a Figura 4.26). A maioria dos usuários não está preocupada com sua eficiência operacional. Entretanto, é interessante aprender como as unidades operam e como aplicar parte da teoria estudada neste capítulo.

Vejamos primeiro alguns comentários gerais. A maioria dos fornos de micro-ondas tem especificações de potência desde 500 W até 1.200 W a uma frequência de 2,45 GHz (praticamente 2,5 bilhões de ciclos por segundo que podem ser comparados aos 60 ciclos por segundo de uma tensão CA alternada típica das residências, abordada em detalhes no Capítulo 13). O aquecimento ocorre porque as moléculas de água contidas nos alimentos passam a vibrar em uma alta frequência em que a fricção entre as moléculas vizinhas provoca o efeito de aquecimento. Visto que é a alta frequência de vibração das moléculas que aquece os alimentos, não há a necessidade de um material que seja condutor de eletricidade. Entretanto, qualquer metal colocado no interior do forno de micro-ondas pode se comportar como uma antena (especialmente se ele possuir pontas ou bordas delgadas) que atrai a energia das micro-

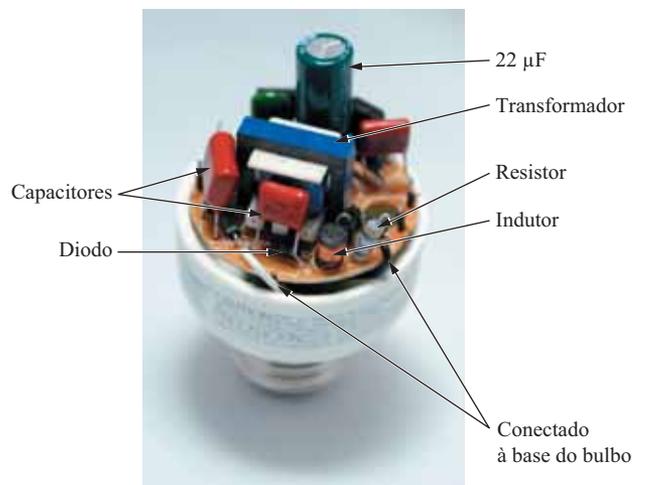


Figura 4.25 Construção interna da CFL da Figura 4.24.

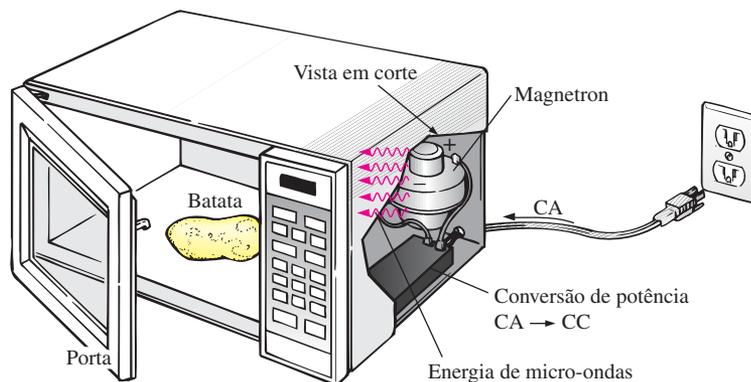


Figura 4.26 Forno de micro-ondas.

-ondas, fazendo com que o metal atinja temperaturas muito altas. Na realidade, o que uma frigideira faz para dourar agora pode ser feito pelos fornos de micro-ondas, que possuem partes metálicas embutidas nas laterais e na parte de baixo para atrair a energia das micro-ondas, elevando a temperatura da superfície do alimento em contato com o prato dourador, para dar a ele uma cor dourada e uma textura crocante. Mesmo que o metal não fizesse o papel de uma antena, ele seria um bom condutor de calor e poderia esquentar à medida que drenasse calor do alimento.

Qualquer recipiente com baixo teor de umidade pode ser usado para aquecer alimentos em um forno de micro-ondas. Devido a essa necessidade, os fabricantes desenvolveram uma linha completa de vasilhas para uso em fornos de micro-ondas que possuem baixíssimo teor de umidade. Mas mesmo assim, quando levadas ao forno por um minuto ou mais, elas se aquecem. Talvez isso ocorra por causa da umidade do ar em contato com a superfície dos recipientes ou devido ao óxido de chumbo usado em bons cristais. De qualquer forma, os fornos de micro-ondas devem ser usados apenas para preparar alimentos. Eles não foram projetados para serem usados como secadores ou vaporizadores.

As instruções que acompanham cada forno de micro-ondas especificam que o forno não deve ser ligado quando estiver vazio. Ainda que o forno possa estar vazio, uma energia em forma de micro-ondas será gerada, e ela buscará um meio que a absorva. Se o forno estiver vazio, tal energia poderá ser atraída pelo próprio forno, podendo danificá-lo. Para demonstrar que um recipiente de vidro vazio e seco ou um de plástico não absorverão uma quantidade significativa da energia de micro-ondas, coloque dois recipientes de vidro em um forno, um deles contendo água e o outro, vazio. Após um minuto terá notado que o vidro contendo água estará bastante quente por causa do aquecimento da água, enquanto o outro estará próximo de sua temperatura inicial. Em outras palavras, a

água absorveu a maior parte da energia das micro-ondas, deixando o vidro vazio como um caminho pouco atrativo para a condução térmica. Toalhas de papel secas e embalagens plásticas podem ser usadas no forno para cobrir as vasilhas, já que elas têm baixo teor de moléculas de água e não apresentam boa condução de calor. Entretanto, seria muito inseguro colocar apenas um papel toalha dentro do forno, pois, de acordo com o que foi dito antes, a energia das micro-ondas procurará um meio que as absorva, e o papel poderia até pegar fogo.

O preparo de alimentos em fornos convencionais é feito de maneira que o aquecimento ocorra de fora para dentro dos alimentos. O mesmo é verdade para os fornos de micro-ondas, mas estes oferecem uma vantagem adicional: são capazes de penetrar alguns centímetros no interior dos alimentos, reduzindo substancialmente o tempo de cozimento. Esse tempo, em um forno de micro-ondas, está relacionado à quantidade de alimento dentro do forno. Dois copos de água levariam mais tempo para serem aquecidos do que um copo d'água, ainda que isso não seja uma relação linear, de modo que não levaria o dobro do tempo — talvez de 75 a 90 por cento a mais. Assim, se colocarmos uma quantidade suficiente de alimento no forno de micro-ondas e compararmos com o tempo mais longo de cozimento de um forno convencional, poderemos identificar o ponto em que seria melhor usar um forno convencional e obter a textura do alimento que talvez seja a que você deseja.

A construção básica de um forno de micro-ondas é ilustrada na Figura 4.26. Ele usa uma alimentação CA de 120 V, que é convertida em alta tensão por um transformador, tendo valores de pico de aproximadamente 5.000 V (com níveis substanciais de corrente) — advertência suficiente para deixar o conserto do forno de micro-ondas para a assistência técnica. Por meio de um processo de retificação, descrito resumidamente no Capítulo 2, uma alta tensão contínua de algumas centenas de volts é gerada

e aplicada em uma válvula magnetron. Essa válvula, em função de seu design muito especial (atualmente usa-se o mesmo design desenvolvido na época da Segunda Guerra Mundial, quando foi inventado na Inglaterra para seus equipamentos de radar de alta potência), gera um sinal de 2,45 GHz necessário para ser usado no forno. Deve-se ressaltar também que a válvula magnetron tem um nível específico de potência de operação que não pode ser controlado — uma vez ligada, ela atinge o valor de potência especificado. Pode-se perguntar então como o tempo e a temperatura de cozimento podem ser controlados. Isso é feito através de um circuito de controle que determina os intervalos de tempo ligado (*on*) e desligado (*off*) durante o ciclo da tensão de alimentação de 120 V. Altas temperaturas são atingidas ajustando-se uma relação alta entre os intervalos de tempo ligado e desligado, enquanto baixas temperaturas são ajustadas de forma contrária.

Uma desvantagem do magnetron é que no processo de conversão ela gera grande quantidade de calor que não contribui para o aquecimento do alimento e tem de ser absorvido pelo dissipador ou dispersado por um pequeno ventilador. Eficiências típicas de conversão se situam entre 55 e 75 por cento. Considerando outras perdas inerentes a qualquer sistema, é razoável considerar que a maioria dos fornos de micro-ondas tem uma eficiência entre 50 e 60 por cento. Entretanto, um forno convencional que opera continuamente com seu exaustor e o aquecimento, entre outras coisas, do forno, da vasilha e do ar ao redor, também tem perdas significativas, ainda que elas sejam menos sensíveis à quantidade de alimento a ser preparado. De modo geral, o fator de conveniência é provavelmente outro fator bastante significativo nessa discussão. Ele também levanta a questão de como o nosso tempo é inserido na equação da eficiência.

Para termos numéricos, consideremos a energia associada com o preparo de uma porção de cerca de 142 gramas de batata em um forno de micro-ondas de 1.200 W por 5 minutos, tendo como eficiência de conversão um valor médio de 55 por cento. Primeiro, é importante perceber que quando um equipamento tem uma especificação de 1.200 W, é essa a potência drenada da rede elétrica durante o processo de cozimento. Se o forno de micro-ondas for ligado a uma tomada de 120 V, a corrente drenada será de:

$$I = P/V = 1.200 \text{ W}/120 \text{ V} = 10,0 \text{ A}$$

que é um valor significativo de corrente. Em seguida, podemos determinar a quantidade de potência destinada

somente ao processo de cozimento usando o valor da eficiência. Ou seja:

$$P_o = \eta P_i = (0,55)(1.200 \text{ W}) = 600 \text{ W}$$

A energia transferida para a porção de batata durante um período de 5 minutos pode então ser determinada a partir de:

$$W = Pt = (600 \text{ W})(5 \text{ min})(60 \text{ s}/1 \text{ min}) = 198 \text{ kJ}$$

que é cerca da metade da energia (valor nutricional) que se adquire ao comer os 142 g de batata. O número de kilowatts-horas drenado da rede elétrica pelo equipamento é determinado a partir de:

$$W = Pt/1.000 = (1.200 \text{ W})(5 /60 \text{ h})/1.000 = 0,1 \text{ kWh}$$

A um custo de 10 centavos/kWh, calculamos que podemos cozinhar essa porção de batatas por 1 centavo; em termos relativos, isso é muito barato. Um forno elétrico típico de 1.550 W levaria cerca de uma hora para aquecer a mesma porção de batatas, resultando em um consumo de 1,55 kWh a um custo de 15,5 centavos, ou seja, haveria um aumento significativo de custo.

Instalação elétrica residencial

Diversas observações sobre instalações elétricas residenciais podem ser discutidas sem que se analise a forma utilizada para implementá-las fisicamente. Nos capítulos que se seguem, será feita uma abordagem adicional para garantir que seja desenvolvida uma compreensão fundamental sólida do sistema de instalação elétrica residencial como um todo. No mínimo, estabeleceremos um conhecimento fundamental que permitirá a você solucionar questões que um estudante dessa área seria capaz de resolver.

Uma das especificações que definem o sistema como um todo é a corrente máxima que pode ser drenada da rede elétrica, já que a tensão é fixa em 120 ou 240 V (às vezes, 208 V¹). Para residências mais antigas, com um sistema de calefação que não seja elétrico, a norma especifica uma corrente de serviço de 100 A. Hoje em dia, com todos os sistemas eletrônicos se tornando comuns em casa, muitas pessoas optam por uma corrente de serviço de 200 A, mesmo que elas não possuam um aquecedor elétrico. Uma especificação de corrente de serviço de 100 A significa que a corrente máxima que pode ser drenada da rede elétrica por sua casa é 100 A. Usando o valor nominal de tensão entre fases e a corrente de serviço máxima (e conside-

1. Todas as informações relativas a sistemas elétricos neste livro se referem aos Estados Unidos. O sistema elétrico brasileiro apresenta valores de tensão diferentes e também segue normas diferentes. Entretanto, o leitor pode estudar esse tema aqui e pesquisar, em outras fontes, características e normas relativas ao sistema elétrico no Brasil para poder estabelecer um comparativo e, com isso, enriquecer seus conhecimentos.

rando todas as cargas resistivas), podemos determinar a potência máxima a ser entregue usando a equação básica de potência:

$$P = EI = (240 \text{ V})(100 \text{ A}) = 24.000 \text{ W} = 24 \text{ kW}$$

Esse número revela que o valor total de tudo o que consome energia elétrica em casa, quando ligados, não deve exceder a 24 kW em nenhum momento. Caso esse valor seja ultrapassado, podemos esperar que o disjuntor principal, na parte superior do quadro de distribuição, desarme (abra o circuito). À primeira vista, 24 kW pode parecer um valor muito grande, mas quando se considera o fato de que um forno elétrico autolimpante drena 12,2 kW, uma máquina secadora de roupas, 4,8 kW, um aquecedor de água, 4,5 kW e uma máquina de lavar louças, 1,2 kW, isso já soma 22,7 kW (se todos estiverem operando na demanda máxima), sem ainda ter ligado as lâmpadas e o aparelho de TV. Obviamente, apenas o uso de um forno elétrico já sugere a consideração de uma corrente de serviço de 200 A. Entretanto, temos de saber que raramente todas as bocas de um fogão são usadas de uma só vez, e que o forno possui um termostato para controlar a temperatura de forma que ele não permaneça ligado todo o tempo. O mesmo acontece com o aquecedor de água e a máquina de lavar louças, portanto a chance de que todas as unidades que consomem energia elétrica em uma residência tenham uma demanda máxima ao mesmo tempo é muito pequena. Certamente que, para uma residência típica com um aquecedor elétrico que pode drenar 16 kW apenas para aquecimento na estação de frio, é preciso considerar uma corrente de serviço de 200 A. Outra coisa que deve ser entendida é que existe alguma margem de manobra nas especificações máximas para fins de segurança. Em outras palavras, um sistema projetado para uma carga máxima de 100 A pode aceitar uma corrente um pouco maior durante intervalos curtos de tempo sem que haja danos significativos. Entretanto, para um tempo prolongado, o valor máximo não deve ser excedido.

Uma alteração na corrente de serviço para 200 A não se resume simplesmente em substituir o quadro de distribuição; uma nova linha, de maior capacidade, tem de ser colocada desde a linha externa até a residência. Em algumas áreas, os cabos de alimentação são de alumínio porque são mais baratos e pesam menos. Em outras áreas, não é permitido o uso do alumínio devido a sua sensibilidade à temperatura (dilatação e contração), e o cobre tem de ser usado. Em todo caso, quando o alumínio é usado, o empreiteiro deve ter certeza de que as conexões em ambas as extremidades estão bem firmes. O National Electric Code especifica que para uma corrente de serviço de 100 A, deve-se usar um condutor de cobre #4 AWG ou um condutor de alumínio #2 AWG. Para uma corrente de serviço de 200 A, um fio de cobre 2/0 ou um condutor de alumínio 4/0 (mostrados na Figura 4.27(a)) deve ser usado. Para uma corrente de serviço de 100 A ou de 200 A, deve haver duas fases e um neutro, conforme mostra a Figura 4.27(b). Observe nessa figura que os condutores das fases são revestidos e isolados um do outro, e o neutro, que é um trançado, envolve os condutores revestidos. Na extremidade do cabo, a trança, que constitui o neutro, é reunida e presa de forma segura no quadro de distribuição. Está bastante claro que os cabos mostrados na Figura 4.27(a) são trançados para permitir flexibilidade.

Dentro do sistema, a potência de entrada é dividida em diversos circuitos com especificações de corrente menores usando disjuntores de 15, 20, 30 e 40 A. Visto que a carga em cada disjuntor não deve exceder 80 por cento da especificação, para um disjuntor de 15 A, a corrente máxima deve ser limitada a 80 por cento de 15 A, ou seja, 12 A; para um disjuntor de 20 A, 16 A; para um disjuntor de 30 A, 24 A; e para um disjuntor de 40 A, 32 A. O resultado é que uma residência com uma corrente de serviço de 200 A pode ter, teoricamente, um máximo de 12 circuitos ($200 \text{ A}/16 \text{ A} = 12,5$) usando uma especificação máxima de corrente de 16 A associada a disjuntores de 20 A. Mas se a carga de cada circuito for conhecida, o electricista pode instalar quantos circuitos ele achar adequado. A

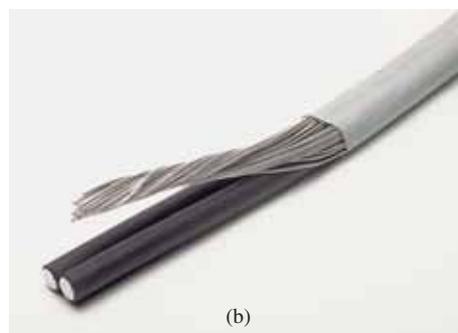


Figura 4.27 Condutores para correntes de serviço de 200 A: (a) alumínio 4/0 e cobre 2/0; (b) três fios 4/0 de alumínio.

norma específica que um fio #14 não deve comportar uma corrente superior a 15 A, um fio #12 não deve exceder 20 A e um fio #10 não deve exceder 30 A. Assim, o fio #12 é, hoje, a bitola mais comum para instalações elétricas residenciais em geral, que assegura sua operação com qualquer excursão além de 15 A com um disjuntor de 20 A (o mais comum). O fio #14 é frequentemente usado em conjunto com o fio #12 em áreas em que se sabe que os níveis de corrente são menores. O fio #10 é normalmente usado em aparelhos de alta demanda como fornos elétricos e máquinas de secar.

Os circuitos são geralmente separados em iluminação, tomadas, entre outros. Alguns circuitos (como os de máquinas de secar e fornos) necessitam de uma tensão mais alta (240 V), obtida usando-se duas fases e o neutro. A tensão maior reduz a corrente necessária para a mesma especificação de potência, tendo como consequência o uso de aparelhos menores. Por exemplo, o tamanho de um condicionador de ar com a mesma capacidade de ventilação é comparativamente menor quando projetado para uma rede elétrica de 240 V do que quando projetado para uma rede de 120 V. Entretanto, a maioria das linhas de 240 V demanda um nível de corrente que requer disjuntores de 30 A ou de 40 A, além de tomadas especiais para garantir que os aparelhos de 120 V não sejam conectados na mesma tomada. Se você tiver tempo, verifique o quadro de distribuição de sua casa e anote o número de circuitos; em particular, anote a especificação de cada disjuntor e o número de fases indicado pelos disjuntores que necessitam de duas seções no quadro de distribuição. Determine a corrente total especificada de todos os disjuntores do quadro de distribuição de sua casa e explique, usando as informações anteriores, por que o valor total excede o valor de serviço especificado.

Como a finalidade é a segurança, o aterramento é uma das partes mais importantes do sistema elétrico de sua casa. O National Electric Code recomenda que o fio neutro do sistema discutido anteriormente seja aterrado por meio de uma barra de metal enterrada no solo, um sistema metálico de encanamento de água de 3 m ou mais, ou uma placa de metal enterrada. Esse fio terra acompanha o circuito elétrico pela residência como proteção adicional. Em um capítulo posterior, os detalhes das conexões e dos métodos de aterramento serão apresentados.

4.9 ANÁLISE COMPUTACIONAL

Agora que um circuito completo foi apresentado e analisado em detalhes, podemos começar a aplicação de métodos computacionais. Conforme mencionado no Capítulo 1, dois pacotes de software serão apresentados para demonstrar as opções disponíveis e as diferenças

existentes em cada um. Os dois têm amplo suporte dos ambientes educacional e industrial. A versão estudantil do PSpice (OrCAD Versão 16.2 da Cadence Design Systems) receberá uma atenção principal, seguida do software Multisim. Cada método tem sua característica própria, e procedimentos que devem ser rigorosamente seguidos; caso contrário, aparecerá na tela uma mensagem de erro. Não pense que é possível ‘forçar’ o sistema a responder da maneira que você deseja; todos os passos são bem-definidos, sendo que um erro na entrada pode resultar em respostas sem sentido. De vez em quando, você poderá pensar que o sistema está apresentando problemas, por estar certo de que está seguindo todos os passos corretamente. Nesses casos, considere o fato de que algo foi inserido incorretamente e faça uma revisão cuidadosa de todo o trabalho. Basta trocar uma vírgula por um ponto final ou por um ponto decimal para gerar resultados incorretos.

Seja paciente durante o processo de aprendizagem, guarde as anotações das táticas específicas que aprender e não tenha medo de solicitar ajuda quando precisar. Todos os métodos provocam uma preocupação inicial em relação a como iniciar e proceder nas primeiras etapas da análise. No entanto, esteja certo de que com tempo e experiência você fará uso das táticas necessárias a uma velocidade que jamais esperou. No momento apropriado, você ficará satisfeito com os resultados que podem ser obtidos usando métodos computacionais.

Nesta seção, estudaremos a lei de Ohm utilizando os pacotes de software PSpice e Multisim para analisar o circuito mostrado na Figura 4.28. Ambos necessitam que primeiro o circuito seja ‘desenhado’ na tela do computador para então ser analisado (simulado), para que se obtenham os resultados desejados. Conforme mencionado anteriormente, o programa usado na análise não pode ser alterado pelo usuário. Um usuário habilidoso é aquele capaz de aproveitar ao máximo a maioria dos pacotes de software de computador.

Embora o autor ache que um estudante iniciante no assunto encontrará informações suficientes ao longo dos programas abordados neste livro, esteja ciente de que não se trata de um livro específico de computação.

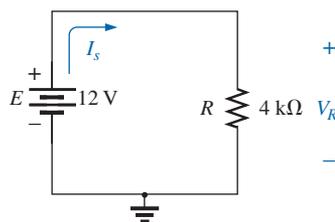


Figura 4.28 Circuito a ser analisado usando os softwares PSpice e Multisim.

Particularmente, é um livro cujo propósito principal é apresentar métodos diferentes e mostrar como eles podem ser aplicados de maneira efetiva. Hoje, alguns livros e manuais excelentes disponíveis abordam o assunto de maneira muito mais detalhada e, talvez, até a um ritmo mais lento. De fato, a qualidade da literatura disponível evoluiu muito nos últimos anos.

PSpice

Os leitores que estiverem familiarizados com outras versões do PSpice verão que as mais importantes mudanças nessa recente versão 16.2 foram feitas principalmente na interface com o usuário e no processo de simulação. Após a execução de alguns programas, veremos que a maioria dos procedimentos que foram aprendidos em versões anteriores aplica-se a essa também; pelo menos, o processo sequencial é muito similar.

O processo de instalação do software OrCAD exige um sistema de computador com capacidade para DVD e as exigências de sistema mínimas indicadas pelo Apêndice B. Após o disco ser instalado, a pergunta que aparece durante o processo de licença pode ser respondida simplesmente com **port1@host1**. Uma resposta **Yes** (Sim) para as perguntas seguintes, seguida pela escolha de **Finish** (Concluir) vai instalar o software; trata-se de um processo muito simples e direto.

Uma vez que o OrCAD Versão 16.2 tenha sido instalado, o primeiro procedimento que se faz necessário é o de abrir um **Folder** (Pasta) na unidade **C:** para armazenar os arquivos do circuito resultantes da análise. Entretanto, saiba que

uma vez definida a pasta, não é necessário que se defina uma para cada projeto, a menos que se queira. Se estiver satisfeito com uma pasta para todos seus projetos, essa operação será realizada uma só vez, e não deverá se repetir para cada circuito.

Para criar uma pasta, simplesmente clique com o botão esquerdo do mouse em **Start** (Iniciar) para obter uma lista na qual se inclui o **Explore**. Selecione **Explore** para obter a caixa de diálogo **Start Menu** e então use a sequência **File-New Folder** (Arquivo-Nova Pasta) para criar uma nova pasta na tela. Digite **PSpice** (nome escolhido pelo autor) seguido de um clique com o botão esquerdo do mouse para confirmar. Em seguida, finalize (usando o **X** no canto superior direito da tela). A pasta PSpice foi criada para guardar todos os projetos que forem feitos ao longo do estudo deste livro.

Agora, nosso primeiro projeto pode ser iniciado ao clicar duas vezes o ícone **OrCAD 16.2 Demo** situado na tela, ou então usando a sequência **Start All Programs-CAPTURE CIS DEMO**. A tela resultante tem apenas alguns botões ativos na barra de ferramentas na parte superior. O primeiro botão à esquerda nessa barra de ferramentas é o **Create document** (ou você pode usar a sequência **File-New Project**). Ao selecionar esse botão, abre-se a caixa de diálogo **New Project**, na qual o nome (**Name**) do projeto tem de ser digitado. Para nossos propósitos, escolheremos **PSpice 4-1**, conforme mostrado no título na Figura 4.29, e selecionaremos **Analog or Mixed A/D** (a ser usado em todas as análises deste livro). Note

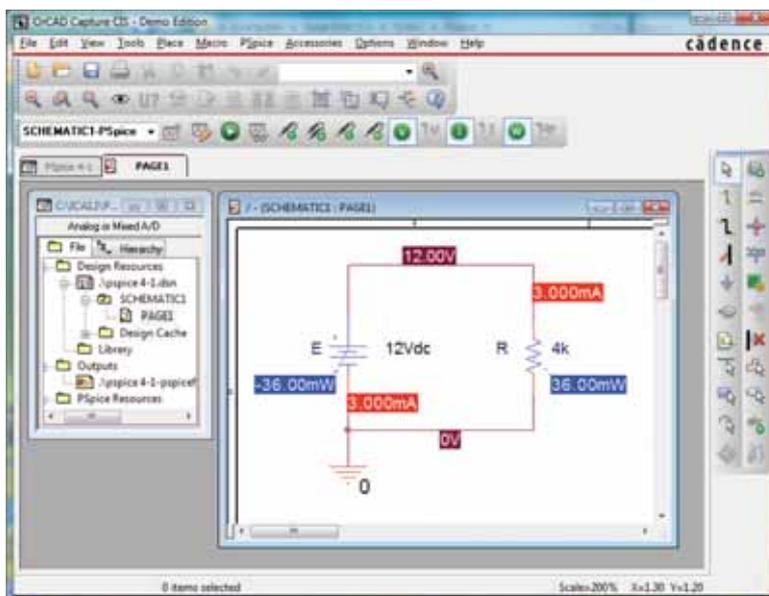


Figura 4.29 Uso do PSpice para determinar os valores de tensão, corrente e potência para o circuito da Figura 4.28.

que, na parte inferior dessa caixa de diálogo, **Location** aparece como a pasta destino **PSpice**, segundo determinado anteriormente. Clique em **OK** e uma outra caixa de diálogo, intitulada **Create PSpice Project**, aparecerá. Selecione **Create a blank project** (a ser usada também em todas as análises realizadas neste livro). Clique em **OK** e aparecerá uma terceira barra de ferramentas na parte superior da tela com alguns dos botões habilitados. Uma janela, **Project Manager Window**, aparecerá com o título **PSpice 4-1** próxima de um ícone e o sinal '+' associado em um pequeno quadrado. Clicando no sinal '+' teremos uma listagem do próximo nível, chegando em **SCHEMATIC1**. Clique novamente no sinal '+' e **PAGE1** aparecerá; ao clicar no sinal '-' o processo é revertido. Um duplo clique em **PAGE1** criará uma janela de trabalho intitulada **SCHEMATIC1: PAGE1**, revelando que um projeto pode ter mais do que um arquivo esquemático e mais do que uma página associada. A largura e a altura da janela podem ser ajustadas passando o cursor na borda da janela de modo a obter uma seta de duas pontas e arrastando a borda até a posição desejada. Qualquer janela pode ser movida na tela clicando na barra de título da janela escolhida, para que se torne azul-escuro, e em seguida arrastando-a para a posição desejada.

Agora, estamos prontos para construir o circuito simples ilustrado na Figura 4.28. Selecione o botão **Place a part** (o botão na barra de ferramentas a direita, com um pequeno sinal de + e uma estrutura IC) para obter a janela de diálogo **Place Part**. Como esse é o primeiro circuito a ser construído, temos de garantir que as partes apareçam na lista de bibliotecas ativas. Selecione **Add Library- Browse File** e em seguida selecione **analog.olb**, e quando ela aparecer sob o título **File name**, selecione **Open**. Ela agora aparecerá na lista **Libraries** na parte de baixo à esquerda da caixa de diálogo. Repita o mesmo procedimento para as bibliotecas **source.olb** e **special.olb**. Todos esses três arquivos serão necessários para construir os circuitos que aparecem neste livro. Entretanto, é importante perceber que

*uma vez que os arquivos da biblioteca forem selecionados, eles aparecerão na listagem ativa de cada projeto novo sem que seja necessário acrescentá-los todas as vezes; esse é um passo semelhante à criação de um **Folder**, realizada anteriormente, que não tem de ser repetido a cada projeto similar.*

Agora podemos colocar componentes na tela. No caso da fonte de tensão contínua, selecione primeiro o botão **Place a part** e então selecione **SOURCE** na listagem da biblioteca. Embaixo de **Part List** aparece uma lista de fontes disponíveis; selecione **VDC** para esse projeto. Uma

vez selecionada, aparecerão o símbolo, o rótulo e o valor na parte inferior direita dessa caixa de diálogo. Clique no ícone com o sinal '+' e na estrutura IC à esquerda da tecla **Help** na caixa de diálogo **Place Part**, e a fonte **VDC** seguirá o cursor pela tela. Mova o cursor para o local conveniente, clique com o botão esquerdo do mouse e a fonte será posicionada conforme mostra a Figura 4.29. Como apenas uma fonte é necessária, um clique no botão direito do mouse resultará em uma lista de opções, entre as quais aparecerá **End Mode** na parte superior. Ao escolher essa opção, o procedimento será finalizado, deixando a fonte em um retângulo tracejado vermelho. O fato é que a cor vermelha indica que ela está no modo ativo, e que é possível manipulá-la. Mais um clique no botão esquerdo do mouse fixará a fonte na área de trabalho, sendo que o estado ativo, indicado pela cor vermelha, será removido.

Um dos passos mais importantes nesse procedimento é garantir que um potencial de 0 V seja definido para o circuito, de modo que as tensões em qualquer ponto do circuito tenham um ponto de referência. *A conclusão é a necessidade de que todos os circuitos têm uma referência (GND) definida.* Para nossos propósitos, a opção **0/SOURCE** será nossa escolha quando o botão **GND** for selecionado. Ele garante que um dos lados da fonte seja definido como 0 V. Ele é obtido selecionando o símbolo de referência da barra de ferramentas no canto direito da tela. Uma caixa de diálogo **Place ground** aparece sob a qual **0/SOURCE** pode ser selecionado, seguido por um **OK** para inseri-lo na tela. Finalmente, você precisa acrescentar um resistor ao circuito selecionando a tecla **Place a part** novamente, e então selecionar a biblioteca **ANALOG**. Acionando a barra de rolagem das opções, note que **R** aparece e deve ser selecionado. Ao clicar em **OK**, o resistor aparecerá próximo ao cursor na tela. Mova-o para o local desejado e clique, com o botão esquerdo do mouse, nesse local. A seguir, clique com o botão direito do mouse e escolha **End Mode**, assim o resistor entrará na memória do diagrama. Infelizmente, o resistor acaba ficando na posição horizontal, sendo que no circuito mostrado na Figura 4.28 o resistor está na posição vertical. Isso não é problema: simplesmente selecione de novo o resistor, de maneira que ele se torne vermelho, e clique com o botão direito do mouse. Aparecerá uma lista em que existe uma opção denominada **Rotate**. A seleção dessa opção fará com que o resistor gire 90° no sentido horário.

Todos os elementos necessários estão na tela, mas eles precisam ser conectados. Isso é realizado selecionando o botão **Place a wire**, que parece com o desenho de um degrau e fica do lado direito da barra de ferramentas. O resultado é o surgimento de uma cruz que deve ser colocada no ponto a ser conectado. Coloque a cruz na parte superior da fonte de tensão e clique uma vez com o botão

esquerdo do mouse para conectá-lo nesse ponto. Em seguida, desenhe uma linha até a extremidade do próximo elemento e clique novamente com o botão esquerdo do mouse quando a cruz estiver no ponto correto. Isso resultará no aparecimento de uma linha vermelha com ângulos retos junto às extremidades conectadas, confirmando que a conexão foi realizada. Em seguida, mova a cruz para outros elementos e construa o circuito. Uma vez que todos os elementos estejam conectados, um clique com o botão direito do mouse fará aparecer a opção **End Mode**. Não se esqueça de conectar a fonte ao GND da maneira ilustrada na Figura 4.29.

Agora temos todos os elementos posicionados, mas seus rótulos e valores não estão corretos. Para alterar qualquer parâmetro, clique duas vezes no parâmetro desejado (rótulo ou valor) para obter a caixa de diálogo **Display Properties**. Digite o rótulo (*label*) e o valor (*value*) corretos e clique em **OK** para que os parâmetros sejam alterados na tela. Digite o rótulo ou valor correto, clique em **OK**, e a quantidade será modificada na tela. Antes de selecionar **OK**, não deixe de conferir o **Display Format** para especificar o que aparecerá na tela. Os rótulos e os valores podem ser movidos clicando no centro do parâmetro até que ele seja envolvido por quatro pequenos quadrados, para então arrastá-lo para uma nova posição. Outro clique com o botão esquerdo do mouse o fixará nesse novo local.

Finalmente, podemos iniciar o processo de análise, denominado **Simulation**, acionando o botão **New simulation profile** próximo à parte superior esquerda da tela, que se parece com uma página que possui uma forma de onda variável e uma estrela no canto superior direito. A caixa de diálogo **New Simulation** aparecerá e perguntará, em primeiro lugar, qual o nome (**Name**) da simulação. A caixa de diálogo **New Simulation** também pode ser obtida inserindo a sequência **PSpice-New Simulation Profile-Bias Point** para uma análise CC, e **none** é deixado como opção em **Inherit From**. A seguir, selecione **Create** e a caixa de diálogo **Simulation Setting** aparecerá, na qual se deverá selecionar sequencialmente **Analysis-Analysis Type-Bias Point**. Clique em **OK** e selecione o botão **Run PSpice** (que se parece com a extremidade de uma seta na cor verde) ou escolha **PSpice-Run** a partir da barra de menu. Uma janela de saída vai aparecer com as tensões CC do circuito: **12 V** e **0 V**. As correntes CC e os níveis de potência podem ser exibidos como mostra a Figura 4.29, simplesmente selecionando-se as teclas circulares verdes com **I** e **W** na barra de ferramentas inferior no alto da tela. Os valores individuais podem ser removidos selecionando-se apenas o valor e pressionando-se a tecla **Delete** ou ativando o botão, que tem o desenho de uma tesoura, na barra superior do menu. Os valores resultantes podem ser movidos clicando-se com o botão esquerdo

do mouse sobre o valor e o arrastando para a posição desejada.

Observe na Figura 4.29 que a corrente é 3 mA (conforme esperado) em cada ponto do circuito, e que a potência entregue pela fonte é igual à dissipada pelo resistor, 36 mW. Existe também uma tensão de 12 V sobre o resistor, conforme determinado pela configuração.

Não há dúvidas de que a descrição anterior foi longa para um circuito simples. Entretanto, tenha em mente que precisamos introduzir muitos detalhes do uso do PSpice que não serão mencionados novamente. No momento em que a análise do terceiro ou do quarto circuito for concluída, o procedimento citado será feito rotineiramente e com facilidade.

Multisim

Para fins de comparação, o software Multisim também é usado para analisar o circuito mostrado na Figura 4.28. Embora existam diferenças entre o PSpice e o Multisim, como o processo de inicialização, construção do circuito, realização das medidas e o procedimento de simulação, existem similaridades suficientes entre os dois métodos que tornam fácil o aprendizado de um se já houver uma familiaridade com o outro. As similaridades serão óbvias apenas se houver um esforço em aprender ambos. Uma das principais diferenças entre os dois é a opção de usar instrumentos reais no Multisim para fazer as medidas, um aspecto positivo na preparação para experiências em laboratório. No entanto, você talvez não encontre no Multisim uma lista extensiva de opções disponíveis como no PSpice. Mas, em geral, os dois pacotes de software estão bem preparados para nos guiar nos tipos de análises que serão encontrados neste livro. O processo de instalação para o **Multisim** não é tão direto quanto o da versão demo **OrCAD**, pois o pacote de software tem de ser comprado para que se obtenha um número serial. Na maioria dos casos, o pacote **Multisim** será disponibilizado pela instituição educacional local.

Quando o ícone **Multisim** é selecionado a partir da janela inicial, uma tela aparece com o título **Multisim-Circuit 1**. Uma barra de menu aparece na parte superior da tela, com sete barras de ferramentas adicionais: **Standard**, **View**, **Main**, **Components**, **Simulation Switch**, **Simulation** e **Instruments**. Ao selecionar **View** da barra de menu superior seguido por **Toolbars**, você pode acrescentar ou apagar barras de ferramentas. O título pode ser mudado para **Multisim 4-1** selecionando **File-Save As** para abrir a caixa de diálogo **Save As**. Insira **Multisim 4-1** como o **File Name** para obter a lista da Figura 4.30.

Para a colocação de componentes, foi selecionado **View-Show Grid**, de maneira que uma grade apareça na tela. À medida que os elementos são colocados, eles são

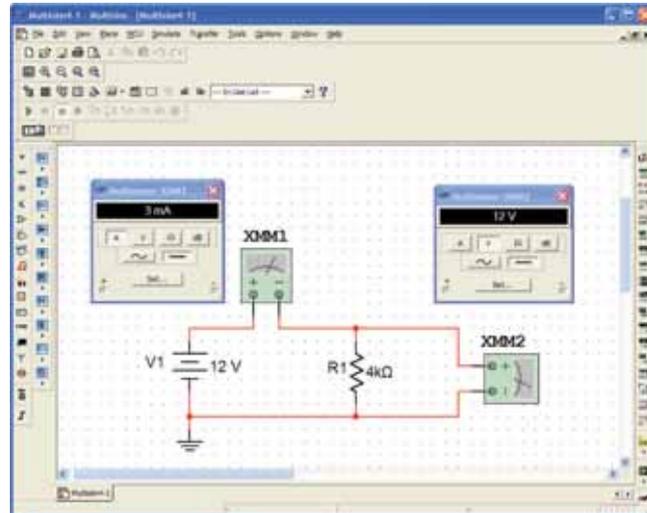


Figura 4.30 Uso do Multisim para determinar a tensão e o nível de corrente do circuito da Figura 4.28.

automaticamente posicionados em relação à estrutura específica da grade.

Para construir o circuito mostrado na Figura 4.28, primeiro posicione o cursor sobre o símbolo da bateria em **Component toolbar**. Clique uma vez com o botão esquerdo do mouse e uma caixa de diálogo **Component** vai aparecer, fornecendo uma lista de fontes. Sob **Component**, selecione **DC-POWER**. O símbolo aparece na área adjacente. Clique em **OK**. O símbolo da bateria aparecerá na tela próximo à posição do cursor. Mova o cursor para o local desejado e, com um único clique no botão esquerdo do mouse, a bateria será inserida. A operação está completa. Caso queira apagar a fonte, clique novamente com o botão esquerdo do mouse para criar um retângulo tracejado em torno da fonte. Esses retângulos indicam que a fonte está no modo ativo, e que é possível realizar operações com ela. Se desejar apagá-la, acione a tecla **Delete** ou selecione o botão cujo desenho é uma tesoura estampada, na barra de ferramenta superior. Caso queira modificar a fonte, clique com o botão direito do mouse *fora* do retângulo e você obterá uma lista. Clique com o botão direito do mouse *dentro* do retângulo e você terá um conjunto diferente de opções. De qualquer maneira, se desejar remover o estado ativo, clique com o botão esquerdo do mouse em qualquer lugar da tela. Se quiser mover a fonte, clique no símbolo da fonte para obter o retângulo (estado ativo), porém não libere o botão do mouse. Segure-o acionado e arraste a fonte para o local desejado. Quando a fonte estiver no local desejado, libere o botão do mouse, sendo que um clique a mais remove o estado ativo. *De agora em diante, sempre que possível, a palavra clique implicará um clique com o botão esquerdo do mouse.* A necessidade de um clique com o botão direito do mouse continuará a ser descrita.

Para construir o circuito simples mostrado na Figura 4.30, precisamos de um resistor. Selecione o teclado em **Components toolbar** que parece com o símbolo de um resistor. Uma caixa de diálogo **Select a Component** vai abrir com uma lista **Family**. A seleção de **RESISTOR** resultará em uma lista de valores-padrão que podem ser rapidamente selecionados para o resistor depositado. Entretanto, nesse caso, você quer usar um resistor de 4 k Ω , que não é um valor-padrão, mas pode ser modificado para 4 k Ω simplesmente ao se modificar o valor uma vez que ele tenha sido colocado na tela. Outro método é adicionar **Virtual toolbar** (também chamada de **Basic toolbar**), que fornece uma lista de componentes para os quais o valor pode ser estabelecido. A seleção do símbolo do resistor de **Virtual toolbar** resultará na colocação de um resistor com um valor inicial de 1 k Ω . Uma vez colocado na tela, o valor do resistor pode ser modificado clicando-se duas vezes sobre o valor do resistor para se obter uma caixa de diálogo que permita a mudança. A colocação de um resistor é feita exatamente da mesma forma que para a fonte anterior.

Na Figura 4.28, o resistor está na posição vertical, de modo que uma rotação tem de ser realizada. Clique sobre o resistor para obter o estado ativo, e então clique com o botão direito dentro do retângulo. Uma série de opções vai aparecer, incluindo **Flip Horizontal**, **Flip Vertical**, **90° Clockwise** e **90° Counter CW**. Para rotacioná-lo 90° no sentido anti-horário, selecione a última opção, e o resistor será automaticamente rotacionado em 90°.

Finalmente, precisamos de uma referência (GND) para todo o circuito. Ative novamente o botão **Sources**, encontre **GROUND**, que é a quarta opção sob **Component**. Selecione o **GROUND**, situado do lado esquerdo,

e coloque-o na tela abaixo da fonte de tensão, conforme ilustra a Figura 4.30. Agora, antes de interconectar os componentes, mova os rótulos e os valores de todos os componentes para as posições mostradas na Figura 4.30. Isso é feito clicando-se no rótulo ou no valor para criar um conjunto de pequenos quadrados em torno do elemento e, em seguida, arrastando-o para o local desejado. Libere o botão do mouse e clique novamente para fixar o elemento no local. Para alterar o rótulo ou o valor, clique duas vezes no rótulo (por exemplo, **V1**) e a caixa de diálogo **DC_POWER** aparecerá. Selecione **Label** e digite **E** no campo relativo a **Reference Designation (Ref Des)**. Em seguida, antes de fechar essa caixa de diálogo, vá para **Value** e altere o valor, se necessário. É muito importante saber que não se pode digitar uma unidade em que agora aparece **V**. O prefixo é controlado pelos botões de rolagem à esquerda da unidade de medida. Para praticar, experimente acionar os botões de rolagem, observando que é possível ajustar desde **pV** até **TV**. Por enquanto, deixe a unidade em **V**. Clique em **OK** e veja que ambos mudarão na tela. O mesmo processo pode ser aplicado ao elemento resistivo para o rótulo e o valor que aparecem na Figura 4.30.

Em seguida, informaremos ao sistema que tipos de resultados devem ser gerados, e como eles serão apresentados. Para esse exemplo, usaremos um multímetro para medir a corrente e a tensão no circuito. O multímetro (**Multimeter**) é a primeira opção de instrumentos que aparece na barra de ferramentas no lado direito da tela. Quando este é selecionado, ele aparece na tela e pode ser colocado em qualquer lugar na área de trabalho usando-se o mesmo procedimento definido anteriormente para os componentes. Um duplo clique em qualquer um dos símbolos dos medidores faz com que a janela de diálogo **Multimeter** apareça, na qual as funções do medidor têm de ser definidas. Como o medidor **XMM1** será usado como um amperímetro, o botão com a letra **A** será ativado, assim como o botão com uma linha horizontal para indicar valores CC. Não há necessidade de ativar **Set** para alterar os valores default (valores preestabelecidos), visto que eles foram escolhidos para uma ampla gama de aplicações. A caixa de diálogo de qualquer dos medidores pode ser movida para qualquer local clicando em sua barra de título, o que a tornará azul-escuro, e arrastando-a para a posição desejada. Para o voltímetro, os botões **V** e a linha horizontal são selecionados conforme mostra a Figura 4.30. O voltímetro foi rotacionado na direção horária 90° usando-se o mesmo procedimento descrito para o resistor descrito anteriormente.

Finalmente, os elementos precisam ser conectados. Isso é feito colocando o cursor em uma das extremidades de um elemento, digamos, a extremidade superior da fonte de tensão, resultando no surgimento de um pequeno ponto sobre uma cruz. Clique uma vez com o mouse, percorra o caminho desejado e coloque a cruz sobre o terminal positivo do amperímetro. Em seguida, clique novamente e o fio aparecerá no local.

Nesse ponto, já devemos saber que o pacote de software tem uma preferência própria de como ele ‘quer’ que os elementos sejam conectados. Ou seja, pode-se tentar desenhar um fio de uma forma, mas o computador pode ‘escolher’ outro caminho. Logo você aprenderá sobre essas preferências, bem como será capaz de posicionar adequadamente o circuito para as conexões. Agora, continue a fazer as conexões mostradas na Figura 4.30 movendo os elementos de modo a ajustar as linhas quando necessário. Certifique-se de que os pequenos pontos apareçam em quaisquer dos pontos em que se deseja fazer uma conexão. A ausência desse pequeno ponto sugere que a conexão não foi feita, e que o programa do software não aceitou a inserção.

Agora, estamos prontos para executar o programa e ver os resultados. A análise pode ser iniciada de diversas maneiras. Uma opção é selecionar **Simulate** na barra de ferramentas superior, seguida de **RUN**. Outra é selecionar o botão **Simulate** (a seta verde) na **Simulation toolbar**. A última opção, e a que mais usamos, é utilizar a chave **OFF/ON, 0/1 Simulation** no canto superior direito da tela. Usando essa última opção, a análise (denominada **Simulation**) é inicializada colocando o cursor sobre o local em que está estampado o número 1 na chave e clicando com o botão esquerdo do mouse. A análise é iniciada e os valores de corrente e de tensão aparecem nos medidores conforme mostra a Figura 4.30. Note que ambos fornecem os valores esperados.

Nesse momento, uma das coisas mais importantes a ser aprendida sobre o uso do Multisim é:

Sempre pare ou finalize a simulação (clitando em 0 ou em OFF) antes de fazer uma alteração no circuito. Quando a simulação é iniciada, o software se mantém nesse modo até que a simulação seja desligada.

Obviamente, é preciso aprender uma grande quantidade de informações nesse primeiro exercício usando o Multisim. Entretanto, esteja certo de que à medida que apresentarmos mais exemplos, você descobrirá o procedimento mais direto e interessante de ser aplicado.

PROBLEMAS

Seção 4.2 Lei de Ohm

1. Qual é a tensão através de um resistor de $220\ \Omega$ se a corrente que passa por ele é de $5,6\ \text{mA}$?
2. Qual a corrente que passa por um resistor de $6,8\ \Omega$ se a queda de tensão entre seus terminais é de $24\ \text{V}$?
3. Qual deverá ser o valor da resistência necessária para limitar a corrente em $1,5\ \text{mA}$ se a diferença de potencial entre os terminais do resistor for de $24\ \text{V}$?
4. Qual a corrente solicitada pelo motor de arranque de um carro ao dar a partida, sendo a bateria de $12\ \text{V}$ e a resistência do motor de arranque de $40\ \text{M}\Omega$?
5. Se a corrente através de um resistor de $0,02\ \text{M}\Omega$ é $3,6\ \mu\text{A}$, qual é a queda de tensão através desse resistor?
6. Sabendo que um voltímetro tem uma resistência interna de $50\ \text{k}\Omega$, calcule a corrente através do medidor quando a leitura de tensão for $120\ \text{V}$.
7. Um refrigerador operando a $120\ \text{V}$ solicita $2,2\ \text{A}$. Qual o valor de sua resistência?
8. Se um relógio elétrico tem uma resistência interna de $8\ \text{k}\Omega$, determine a corrente através do relógio se ele estiver ligado em uma tomada de $120\ \text{V}$.
9. Uma máquina de lavar tem uma especificação de $4,2\ \text{A}$ a $120\ \text{V}$. Qual sua resistência interna?
10. Um CD player drena $125\ \text{mA}$ quando $4,5\ \text{V}$ são aplicados. Qual sua resistência interna?
11. A corrente de entrada em um transistor é $20\ \mu\text{A}$. Se a tensão aplicada na entrada for $24\ \text{mV}$, determine a resistência de entrada do transistor.
12. A resistência interna de um gerador de CC é $0,5\ \Omega$. Determine a queda de tensão sobre a resistência interna se a corrente for de $12\ \text{A}$.
- *13. a) Se um aquecedor elétrico drena $9,5\ \text{A}$ quando ligado a uma fonte de $120\ \text{V}$, qual a resistência interna do aquecedor?
b) Usando as relações básicas mostradas no Capítulo 2, calcule a quantidade de energia em joules (J) que é convertida se o aquecedor for usado por $2\ \text{h}$ durante o dia.
14. Em uma câmera de TV, uma corrente de $2,4\ \mu\text{A}$ passa por um resistor de $3,3\ \text{M}\Omega$. Qual é a queda de tensão através do resistor?

Seção 4.3 Gráfico da lei de Ohm

15. a) Trace a curva de I (eixo vertical) em função de V (eixo horizontal) para um resistor de $120\ \Omega$. Use uma escala de 0 a $100\ \text{V}$ e uma escala vertical de 0 a $1\ \text{A}$.
b) Usando o gráfico da parte (a), descubra a corrente a uma tensão de $20\ \text{V}$ e a uma tensão de $50\ \text{V}$.
16. a) Trace a curva $I-V$ para um resistor de $5\ \Omega$ e um de $20\ \Omega$ no mesmo gráfico. Use uma escala horizontal de 0 a $40\ \text{V}$ e uma escala vertical de 0 a $2\ \text{A}$.
b) Qual é a curva mais acentuada? Você pode oferecer alguma conclusão geral baseada nos resultados?
c) Se as escalas horizontal e vertical fossem trocadas, qual delas teria a curva mais acentuada?
17. a) Trace as características $I-V$ de um resistor de $1\ \Omega$, $100\ \Omega$ e $1.000\ \Omega$ no mesmo gráfico. Use um eixo horizontal de 0 a $100\ \text{V}$ e um eixo vertical de 0 a $100\ \text{A}$.
b) Comente a inclinação de uma curva com níveis cada vez maiores de resistência.

- *18. Desenhe as características de resistência internas de um dispositivo que tenha uma resistência interna de $20\ \Omega$ de 0 a $10\ \text{V}$, uma resistência interna de $4\ \Omega$ de 10 a $15\ \text{V}$, e uma resistência interna de $1\ \Omega$ para qualquer tensão maior do que $15\ \text{V}$. Utilize uma escala horizontal que vá de 0 a $20\ \text{V}$ e uma escala vertical que permita traçar o gráfico da corrente para todos valores de tensão de 0 a $20\ \text{V}$.
- *19. a) Trace as características $I-V$ de um resistor de $2\ \text{k}\Omega$, $1\ \text{M}\Omega$ e $100\ \Omega$ no mesmo gráfico. Use um eixo horizontal de 0 a $20\ \text{V}$ e um eixo vertical de 0 a $10\ \text{mA}$.
b) Comente a inclinação da curva com níveis cada vez menores de resistência.
c) As curvas são lineares ou não lineares? Por quê?

Seção 4.4 Potência

20. Se $540\ \text{J}$ de energia são absorvidos por um resistor em 4 minutos, qual é a potência dissipada para o resistor em watts?
21. A potência dissipada por um componente é 40 joules por segundo (J/s). Quanto tempo será necessário para que sejam dissipados $640\ \text{J}$?
22. a) Quantos joules uma pequena lâmpada de $2\ \text{W}$ dissipa em $8\ \text{h}$?
b) Qual o valor da energia dissipada no item (a) em kilowatts-horas?
23. Durante quanto tempo um resistor deve ser percorrido por uma corrente estacionária de $1,4\ \text{A}$, a qual gera uma tensão de $3\ \text{V}$ sobre o resistor, para que ele dissipe uma quantidade de energia igual a $12\ \text{J}$?
24. Qual a potência entregue por uma bateria de $6\ \text{V}$ se a corrente escoada é de $750\ \text{mA}$?
25. A corrente através de um resistor de $4\ \text{k}\Omega$ é $7,2\ \text{mA}$. Qual a potência dissipada pelo resistor?
26. Se a potência consumida por um resistor de $2,2\ \text{k}\Omega$ é $240\ \text{mW}$, qual a corrente através do resistor?
27. Qual a corrente permissível máxima em um resistor de $120\ \Omega$ e $2\ \text{W}$? Qual é a tensão máxima que pode ser aplicada através do resistor?
28. A queda de tensão através de um circuito transistor é de $22\ \text{V}$. Se a resistência total é $16,8\ \text{k}\Omega$, qual é o nível de corrente? Qual é a potência fornecida? Quanta energia é dissipada em $1\ \text{h}$?
29. Se a potência aplicada a um sistema é $324\ \text{W}$, qual é a tensão através da linha se a corrente é de $2,7\ \text{A}$?
30. Um resistor de $1\ \text{W}$ tem uma resistência de $4,7\ \text{M}\Omega$. Qual o nível máximo de corrente para o resistor? Se a especificação de potência for aumentada para $2\ \text{W}$, a especificação de corrente dobrará?
31. Um resistor de $2,2\ \text{k}\Omega$ em um aparelho de som estéreo dissipa $42\ \text{mW}$ de potência. Qual é a tensão através do resistor?
32. Qual o valor da resistência 'a quente' de uma lâmpada de filamento de $100\ \text{W}$ ligada a uma rede de $120\ \text{V}$?
33. Quais os valores da resistência interna e da tensão especificada de uma lavadora automática de $450\ \text{W}$ que drena uma corrente de $3,75\ \text{A}$?
34. Uma calculadora que usa uma bateria interna de $3\ \text{V}$ consome $0,4\ \text{mW}$ quando está em pleno funcionamento.
a) Qual a corrente drenada pela calculadora?

- b) Se a calculadora é projetada para operar 500 horas com a mesma bateria, qual é a capacidade dessa bateria em ampères-horas?
35. Um resistor de 20 k Ω tem uma potência especificada de 100 W. Qual a maior corrente que ele suporta e qual a maior tensão que pode ser aplicada a seus terminais?
36. Qual a especificação em hp (horsepower) total de uma série de ventiladores de teto comerciais que drenam 30 A a 22 V?

Seção 4.5 Energia

37. Um resistor de 10 Ω está ligado a uma bateria de 12 V.
- a) Quanta energia, em joules, ele dissipa em 1 minuto?
- b) Se o resistor é deixado conectado por 2 minutos em vez de 1 minuto, a energia dissipada aumentará? O nível de dissipação de potência aumentará?
38. Calcule a energia necessária em kWh para manter um motor a óleo de 230 W funcionando 12 horas por semana durante 5 meses. (Use 4 semanas = 1 mês.)
39. Durante quanto tempo um aquecedor de 1.500 W deve ficar ligado para consumir 12 kWh de energia?
40. Uma lâmpada de 60 W está ligada há 10 horas.
- a) Qual a energia usada em watt-segundos?
- b) Qual a energia dissipada em joules?
- c) Qual a energia transferida em watt-horas?
- d) Quantos kilowatts-horas de energia foram dissipados?
- e) A 11 centavos por kWh, qual foi o custo total?
41. a) Em 10 horas, um sistema elétrico converte 1.200 kWh de energia elétrica em calor. Qual a potência do sistema?
- b) Se a tensão aplicada for 208 V, qual a corrente fornecida pela fonte?
- c) Se a eficiência do sistema é 82 por cento, quanto de energia é perdido ou armazenado em 10 horas?
42. Se a tarifa de energia elétrica fosse 11 centavos por kWh, durante quanto tempo poderíamos manter ligada uma televisão em cores de 250 W para gastar o equivalente a \$ 1,00?
43. A conta mensal de luz de uma família é \$ 74.
- a) Presumindo 31 dias no mês, qual é o custo por dia?
- b) Baseado em dias de 15 horas, qual é o custo por hora?
- c) Quantos kilowatts-horas são usados por hora se o custo é de 11 centavos por kWh?
- d) Quantas lâmpadas de 60 W (número aproximado) você poderia ter ligadas para gastar tanta energia por hora?
- e) Em sua opinião, o custo da eletricidade é excessivo?
44. Por quanto tempo você pode usar um Xbox 360 por \$ 1 se ele consome 187 W e o custo é de 11 centavos por kWh?
45. A TV de plasma média utiliza 339 W de potência, enquanto a TV LCD média utiliza 213 W. Se cada aparelho foi usado 5 h/dia por 365 dias, qual seria a economia de custo para a unidade LCD durante o ano se o custo é de 11 centavos por kWh?
46. O PC médio utiliza 78 W. Qual é o custo de se utilizar o PC por 4 h/dia por um mês de 31 dias se o custo é de 11 centavos kWh?
- *47. a) Se uma casa é servida com 120 V e 100 A, descubra a capacidade máxima de potência.
- b) O proprietário da casa pode operar de maneira segura as cargas a seguir ao mesmo tempo?
- Motor de 5 hp
Secadora de roupas de 3.000 W
Fogão elétrico de 2.400 W

- Ferro de passar de 1.000 W
- c) Se todos os aparelhos forem usados por 2 horas, quanta energia será convertida em kWh?

- *48. Qual é o custo total do uso dos aparelhos a seguir a 11 centavos por kWh?
- a) Ar condicionado de 1.600 W por 6 horas.
- b) Secador de cabelo de 1.200 W por 15 minutos.
- c) Secadora de roupas de 4.800 W por 30 minutos.
- d) Cafeteira de 900 W por 10 minutos.
- e) PlayStation 3 de 200 W por 2 horas.
- f) Aparelho de som estéreo de 50 W por 3,5 horas.
- *49. Qual o custo total do uso dos aparelhos a seguir a 11 centavos por kWh?
- a) Ventilador de 200 W por 4 horas.
- b) Seis lâmpadas de 60 W por 6 horas.
- c) Secador de 1.200 W por 20 minutos.
- d) Computador de mesa de 175 W por 3,5 horas.
- e) Aparelho de televisão colorida de 250 W por 2 horas e 10 min.
- f) Antena de 30 W por 8 horas.

Seção 4.6 Eficiência

50. Qual a eficiência de um motor com uma saída de 0,5 hp se a potência de entrada é de 410 W?
51. O motor de uma serra elétrica tem uma eficiência especificada de 68,5 por cento. Se a potência necessária para cortar uma tábua é 1,8 hp, qual a corrente solicitada pela serra a uma fonte de 120 V?
52. Qual a eficiência do motor de uma secadora que fornece 0,8 hp quando a corrente e a tensão na entrada são 4 A e 220 V, respectivamente?
53. Um aparelho estéreo drena 1,8 A a uma tensão de 120 V. A potência de áudio de saída é de 50 W.
- a) Quanto de potência é perdido em forma de calor no interior do sistema?
- b) Qual é a eficiência do sistema?
54. Se um motor elétrico tem uma eficiência de 76 por cento e opera em uma linha de 220 V fornecendo 3,6 hp, qual a corrente drenada pelo motor?
55. Um motor é especificado para fornecer 2 hp.
- a) Se ele opera em 110 V e sua eficiência é 90 por cento, quantos watts o motor consome da fonte de alimentação?
- b) Qual é a corrente de entrada?
- c) Qual seria a corrente de entrada se a eficiência do motor fosse apenas 70 por cento?
56. Um motor elétrico usado em um sistema de elevador tem uma eficiência de 90 por cento. Se a tensão na entrada é 220 V, qual é a corrente solicitada pelo motor quando a potência fornecida é 15 hp?
57. O motor usado em uma esteira transportadora tem uma eficiência de 85 por cento. Se a eficiência do sistema como um todo é de 75 por cento, qual é a eficiência do conjunto da esteira transportadora?
58. Um motor de 2 hp aciona uma correia transportadora. Se a eficiência do motor é 87 por cento, enquanto a da correia, devido ao deslizamento, é 75 por cento, qual é a eficiência do sistema como um todo?
59. A eficiência como um todo de dois sistemas em cascata é 78 por cento. Se a eficiência de um é 0,9, qual é a eficiência, em porcentagem, do outro?
60. a) Qual é a eficiência total de três sistemas em cascata com eficiências de 93, 87 e 21 por cento, respectivamente?

- b) Se o sistema com a menor eficiência (21 por cento) fosse removido e substituído por um com uma eficiência de 80 por cento, qual seria o aumento percentual em eficiência total?
- *61. Se as potências totais de entrada e de saída de dois sistemas em cascata são 400 e 128 W, respectivamente, qual é a eficiência de cada sistema se um deles tem o dobro da eficiência do outro?

Seção 4.9 Análise computacional

62. Usando o PSpice ou o Multisim, repita a análise do circuito mostrado na Figura 4.28 com $E = 400$ mV e $R = 0,04$ M Ω .
63. Usando o PSpice ou o Multisim, repita a análise do circuito mostrado na Figura 4.28, mas inverta a polaridade da bateria e use $E = 8$ V e $R = 220$ Ω .

GLOSSÁRIO

Disjuntor: Um dispositivo de dois terminais projetado para garantir que os níveis de corrente não excedam os níveis seguros. Caso seja ‘desarmado’, ele pode ser ‘rearmado’ por meio de uma chave ou de um botão.

Diodo: Dispositivo semicondutor cujo comportamento é muito parecido com o de uma chave, ou seja, em termos ideais ele permite a passagem de corrente em apenas um sentido, operando dentro de determinados limites.

Eficiência (η): A razão entre as potências de saída e de entrada que informa sobre a característica de conversão de energia de um sistema.

Energia (W): Grandeza cuja variação de estado é determinada pelo produto da taxa de conversão (P) e o período envolvido (t). Essa medida é expressa em joules (J) ou watt-segundos (Ws).

Fusível: Dispositivo de dois terminais cujo único propósito é garantir que os níveis de corrente em um circuito não excedam os valores seguros.

Horsepower (hp): Equivale a 746 watts em um sistema elétrico.

Medidor de kilowatt-hora: Instrumento usado para a medição de consumo de energia elétrica dos consumidores residenciais e comerciais.

Lei de Ohm: Uma equação que estabelece uma relação entre corrente, tensão e resistência de um sistema elétrico.

Potência: Uma indicação da quantidade de trabalho que pode ser realizado em um intervalo específico de tempo; a velocidade com que o trabalho é realizado. Sua unidade de medida é joules/segundo (J/s) ou watts (W).