

Circuitos em paralelo



Objetivos

- Familiarizar-se com as características de um circuito em paralelo e aprender como solucionar problemas relativos a tensão, a corrente e a potência de cada elemento.
- Desenvolver uma compreensão clara da lei de Kirchhoff para tensões e sua importância na análise de circuitos elétricos.
- Informar-se de como a corrente fornecida pela fonte se dividirá entre elementos paralelos e de como aplicar de maneira apropriada a regra do divisor de corrente.
- Entender o impacto de circuitos abertos e curtos-circuitos no comportamento de circuitos.
- Aprender a usar um ohmímetro, um voltímetro e um amperímetro para medir os importantes parâmetros de um circuito paralelo.

6.1 INTRODUÇÃO

Duas configurações básicas para circuitos, em série e em paralelo, constituem a essência de alguns dos circuitos mais complexos. Uma compreensão clara de cada uma delas será de enorme proveito quando estudarmos métodos e circuitos mais complexos. A conexão em série foi estudada em detalhes no capítulo anterior. Agora, analisaremos o **circuito em paralelo**, juntamente com todos os métodos e leis associados a essa importante configuração.

6.2 RESISTORES EM PARALELO

O termo *paralelo* é usado com tanta frequência para descrever um arranjo físico entre dois elementos que a maioria dos indivíduos tem noção de suas características gerais.

Em geral,

dois elementos, ramos ou resistores estão em paralelo se tiverem dois pontos em comum.

Por exemplo, na Figura 6.1(a), os dois resistores estão em paralelo porque estão conectados nos pontos *a* e *b*. Se ambas as extremidades *não* estivessem conecta-

das como mostra a figura, os resistores não estariam em paralelo. Na Figura 6.1(b), os resistores R_1 e R_2 estão em paralelo porque novamente têm os pontos *a* e *b* em comum. O resistor R_1 não está em paralelo com R_3 porque eles estão conectados somente em um ponto (*b*). Ademais, R_1 e R_3 não estão em série porque uma terceira conexão aparece no ponto *b*. O mesmo pode ser dito dos resistores R_2 e R_3 . Na Figura 6.1(c), os resistores R_1 e R_2 estão em série porque eles têm apenas um ponto em comum que não está conectado em outro lugar no circuito. Os resistores R_1 e R_3 não estão em paralelo porque eles têm apenas o ponto *a* em comum. Além disso, eles não estão em série devido à terceira conexão ao ponto *a*. O mesmo pode ser dito dos resistores R_2 e R_3 . Em um contexto mais amplo, pode-se dizer que a combinação em série dos resistores R_1 e R_2 está em paralelo com o resistor R_3 (essa opção será aprofundada no Capítulo 7). Mais ainda, apesar dessa discussão ter sido apenas sobre resistores, ela pode ser aplicada a quaisquer elementos de dois terminais, como fontes de tensão e medidores.

Em representações esquemáticas, a combinação em paralelo pode aparecer de vários modos, como mostra a Figura 6.2. Em cada caso, os três resistores estão em paralelo. Todos eles têm os pontos *a* e *b* em comum.

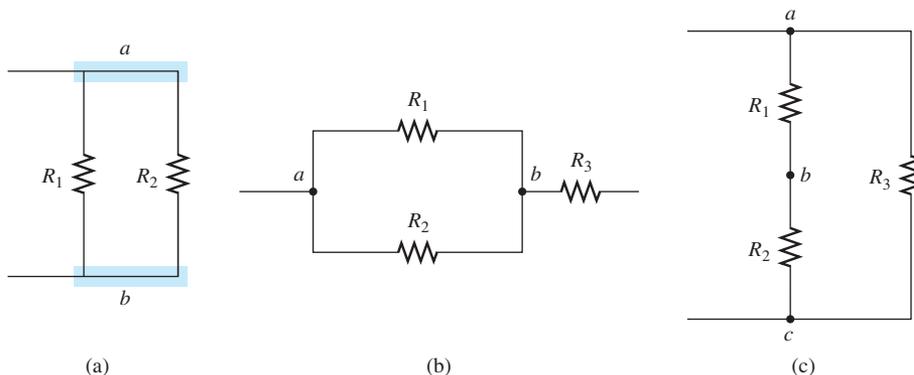


Figura 6.1 (a) Resistores em paralelo; (b) R_1 e R_2 estão em paralelo; (c) R_3 está em paralelo com a combinação em série de R_1 e R_2 .

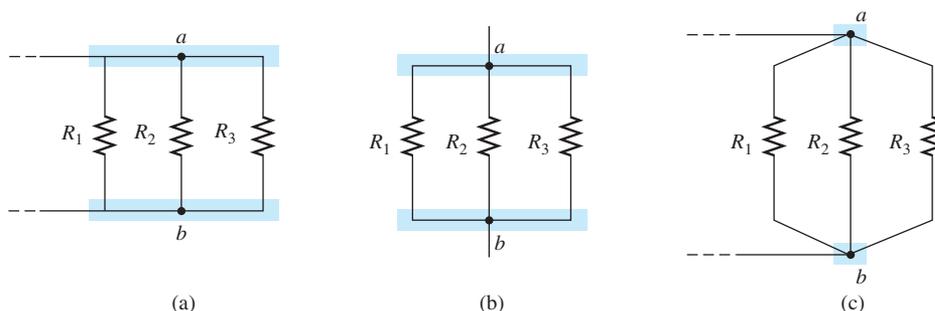


Figura 6.2 Representações esquemáticas de três resistores em paralelo.

Para resistores em paralelo como os mostrados na Figura 6.3, a resistência total é determinada a partir da seguinte equação:

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_N} \quad (6.1)$$

Tendo em vista que $G = 1/R$, a equação também pode ser escrita em termos dos níveis de condutância como a seguir:

$$G_T = G_1 + G_2 + G_3 + \dots + G_N \quad (\text{siemens, S}) \quad (6.2)$$

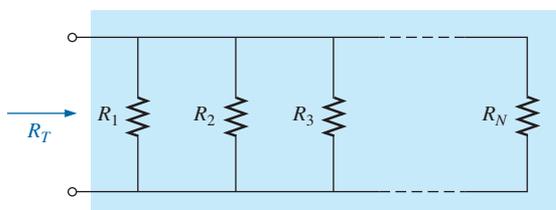


Figura 6.3 Combinação em paralelo de resistores.

que é coerente com o formato com a equação para a resistência total de resistores em série: $R_T = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_N$. O resultado dessa dualidade é que você pode ir de uma equação para a outra ao intercambiar, simplesmente, R por G .

Em geral, entretanto, quando a resistência total é desejada, o formato a seguir deve ser aplicado:

$$R_T = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_N}} \quad (6.3)$$

De maneira bastante óbvia, a Equação 6.3 não é tão ‘limpa’ quanto a equação para a resistência total de resistores em série. Você tem de tomar cuidado ao lidar com todas as divisões em 1. A característica mais importante dessa equação, entretanto, é que ela pode ser aplicada a qualquer número de resistores em paralelo.

EXEMPLO 6.1

- a) Descubra a condutância total do circuito em paralelo na Figura 6.4.
- b) Descubra a resistência total do mesmo circuito usando os resultados da parte (a) e a Equação 6.3.

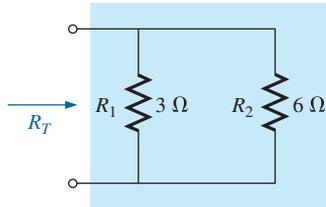


Figura 6.4 Resistores em paralelo para o Exemplo 6.1.

Soluções:

$$a) G_{1\pi} = \frac{1}{R_1} = \frac{1}{3\ \Omega} = 0,333\ \text{S}$$

$$G_2 = \frac{1}{R_2} = \frac{1}{6\ \Omega} = 0,167\ \text{S}$$

$$e) G_T = G_1 + G_2 = 0,333\ \text{S} + 0,167\ \text{S} = \mathbf{0,5\ \text{S}}$$

$$b) R_T = \frac{1}{G_T} = \frac{1}{0,5\ \text{S}} = \mathbf{2\ \Omega}$$

A aplicação da Equação 6.3 resulta em:

$$R_T = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} = \frac{1}{\frac{1}{3\ \Omega} + \frac{1}{6\ \Omega}}$$

$$= \frac{1}{0,333\ \text{S} + 0,167\ \text{S}} = \frac{1}{0,5\ \text{S}} = \mathbf{2\ \Omega}$$

EXEMPLO 6.2

- a) Por inspeção, qual elemento em paralelo na Figura 6.5 tem a menor condutância? Determine a condutância total do circuito e observe se sua conclusão foi comprovada.
- b) Determine a resistência total a partir dos resultados da parte (a) e da aplicação da Equação 6.3.

Soluções:

- a) Tendo em vista que o resistor de 1 kΩ tem a maior resistência e, portanto, a maior oposição ao fluxo de carga (nível de condutividade), ele terá o nível mais baixo de condutância.

$$G_1 = \frac{1}{R_1} = \frac{1}{2\ \Omega} = 0,5\ \text{S}$$

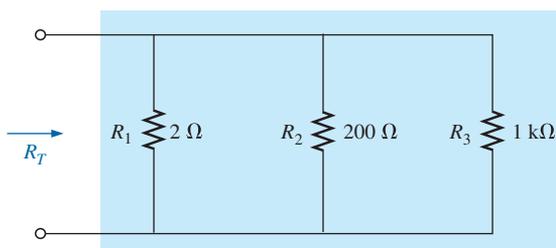


Figura 6.5 Resistores em paralelo para o Exemplo 6.2.

$$G_2 = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{200\ \Omega} = 0,005\ \text{S} = 5\ \text{mS}$$

$$G_3 = \frac{1}{R_3} = \frac{1}{1\ \text{k}\Omega} = \frac{1}{1.000\ \Omega} = 0,001\ \text{S} = 1\ \text{mS}$$

$$G_T = G_1 + G_2 + G_3 = 0,5\ \text{S} + 5\ \text{mS} + 1\ \text{mS} = \mathbf{506\ \text{mS}}$$

Observe a diferença no nível de condutância entre o resistor de 2 Ω (500 mS) e o resistor de 1 kΩ (1 mS).

$$b) R_T = \frac{1}{G_T} = \frac{1}{506\ \text{mS}} = \mathbf{1,976\ \Omega}$$

A aplicação da Equação 6.3 resulta em

$$R_T = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} = \frac{1}{\frac{1}{2\ \Omega} + \frac{1}{200\ \Omega} + \frac{1}{1\ \text{k}\Omega}}$$

$$= \frac{1}{0,5\ \text{S} + 0,005\ \text{S} + 0,001\ \text{S}} = \frac{1}{0,506\ \text{S}} = \mathbf{1,98\ \Omega}$$

EXEMPLO 6.3

Descubra a resistência total da configuração na Figura 6.6.

Solução:

Primeiro, o circuito é redesenhado como mostra a Figura 6.7, para demonstrar claramente que todos os resistores estão em paralelo.

A aplicação da Equação 6.3 resulta em:

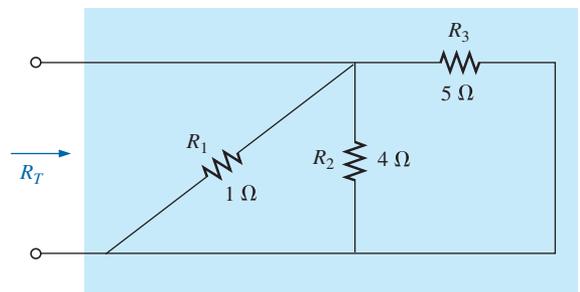


Figura 6.6 Circuito a ser investigado no Exemplo 6.3.

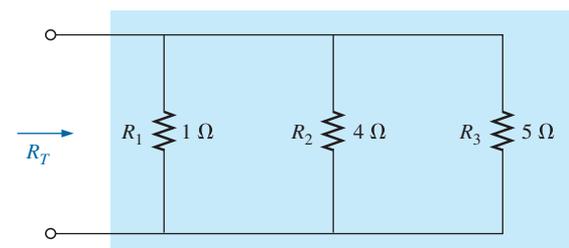


Figura 6.7 Circuito da Figura 6.6 redesenhado.

$$R_T = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} = \frac{1}{\frac{1}{1\ \Omega} + \frac{1}{4\ \Omega} + \frac{1}{5\ \Omega}}$$

$$= \frac{1}{1\ \text{S} + 0,25\ \text{S} + 0,2\ \text{S}} = \frac{1}{1,45\ \text{S}} \cong \mathbf{0,69\ \Omega}$$

Se você analisar novamente os exemplos anteriores, verá que a resistência total é menor do que o menor resistor em paralelo. Isto é, no Exemplo 6.1, 2 Ω é menos do que 3 Ω ou 6 Ω . No Exemplo 6.2, 1,976 Ω é menos do que 2 Ω , 100 Ω e 1 k Ω ; e no Exemplo 6.3, 0,69 Ω é menos do que 1 Ω , 4 Ω ou 5 Ω . Em geral, portanto,

a resistência total de resistores em paralelo é sempre menor que o valor do menor resistor.

Isso é particularmente importante quando você quer uma rápida estimativa da resistência total de uma combinação em paralelo. Para isso, simplesmente descubra o menor valor, pois você já sabe que a resistência total será menor do que esse valor. Também é uma ótima maneira de checar seus cálculos. Além disso, você descobrirá que

se a menor resistência de uma combinação em paralelo é muito menor que a dos outros resistores em paralelo, a resistência total será muito próxima do menor valor de resistência.

Esse fato fica óbvio no Exemplo 6.2, em que a resistência total de 1,976 Ω é muito próxima da menor resistência de 2 Ω .

Outra característica interessante dos resistores em paralelo é demonstrada no Exemplo 6.4.

EXEMPLO 6.4

- Qual é o efeito da adição de outro resistor de 100 Ω em paralelo aos resistores em paralelo do Exemplo 6.1, como mostra a Figura 6.8?
- Qual é o efeito da adição de um resistor em paralelo de 1 Ω à configuração na Figura 6.8?

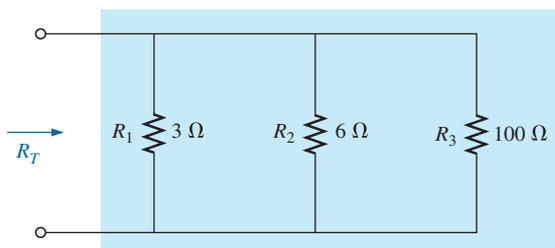


Figura 6.8 Adição de um resistor de 100 Ω em paralelo ao circuito na Figura 6.4.

Soluções:

a) A aplicação da Equação 6.3 resulta em:

$$R_T = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} = \frac{1}{\frac{1}{3\ \Omega} + \frac{1}{6\ \Omega} + \frac{1}{100\ \Omega}}$$

$$= \frac{1}{0,333\ \text{S} + 0,167\ \text{S} + 0,010\ \text{S}} = \frac{1}{0,510\ \text{S}} = \mathbf{1,96\ \Omega}$$

A combinação em paralelo dos resistores de 3 Ω e 6 Ω resultou em uma resistência total de 2 Ω no Exemplo 6.1. O efeito da adição de um resistor em paralelo de 100 Ω teve pouco efeito sobre a resistência total, pois seu nível de resistência é significativamente mais alto (e o nível de condutância significativamente menor) que aquele dos dois outros resistores. A mudança total na resistência foi de menos de 2 por cento. Entretanto, observe que a resistência total caiu com a adição do resistor de 100 Ω .

b) A aplicação da Equação 6.3 resulta em:

$$R_T = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}} = \frac{1}{\frac{1}{3\ \Omega} + \frac{1}{6\ \Omega} + \frac{1}{100\ \Omega} + \frac{1}{1\ \Omega}}$$

$$= \frac{1}{0,333\ \text{S} + 0,167\ \text{S} + 0,010\ \text{S} + 1\ \text{S}} = \frac{1}{0,51\ \text{S}}$$

$$= \mathbf{0,66\ \Omega}$$

A introdução do resistor de 1 Ω reduziu a resistência total de 2 Ω para apenas 0,66 Ω — uma redução de quase 67 por cento. O fato de que o resistor adicionado tem uma resistência menor que aquela dos outros elementos em paralelo e um terço daquela do menor elemento contribuiu para a queda significativa no nível de resistência.

Na parte (a) do Exemplo 6.4, a resistência total caiu de 2 Ω para 1,96 Ω . Na parte (b), ela caiu para 0,66 Ω . Os resultados revelam claramente que

a resistência total dos resistores em paralelo sempre cairá na medida em que novos resistores forem adicionados em paralelo, não importando seus valores.

Lembre-se de que isso é o oposto do que ocorre com os resistores em série, no qual resistores adicionais de qualquer valor aumentam a resistência total.

Para resistores iguais em paralelo, a equação para a resistência total torna-se significativamente mais fácil de ser aplicada. Para N resistores iguais em paralelo, a Equação 6.3 se transforma em:

$$R_T = \frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{1}{R} + \frac{1}{R} + \dots + \frac{1}{R_N}}$$

$$= \frac{1}{N\left(\frac{1}{R}\right)} = \frac{1}{\frac{N}{R}}$$

e $R_T = \frac{R}{N}$ (6.4)

Em outras palavras,

a resistência total de N resistores em paralelo de valor igual é a resistência de um resistor dividida pelo número (N) de resistores em paralelo.

EXEMPLO 6.5

Descubra a resistência total dos resistores em paralelo na Figura 6.9.

Solução:

A aplicação da Equação 6.4 resulta em:

$$R_T = \frac{R}{N} = \frac{12 \Omega}{3} = 4 \Omega$$

EXEMPLO 6.6

Descubra a resistência total da configuração na Figura 6.10.

Solução:

Redesenhar o circuito resulta no circuito em paralelo da Figura 6.11.

A aplicação da Equação 6.4 resulta em:

$$R_T = \frac{R}{N} = \frac{2 \Omega}{4} = 0,5 \Omega$$

Caso especial: dois resistores em paralelo

Na vasta maioria dos casos, apenas dois ou três resistores em paralelo terão de ser combinados. Tendo isso em mente, uma equação foi derivada para dois resistores em paralelo que é fácil de aplicar e acaba com a

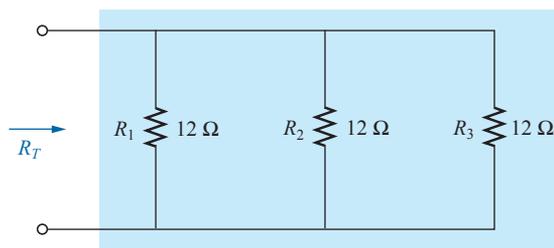


Figura 6.9 Três resistores iguais em paralelo a serem investigados no Exemplo 6.5.

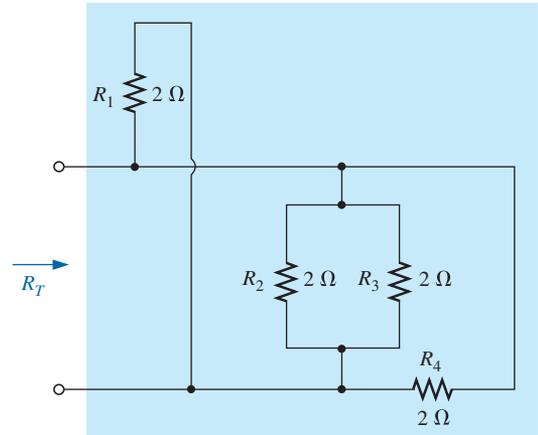


Figura 6.10 Configuração em paralelo para o Exemplo 6.6.

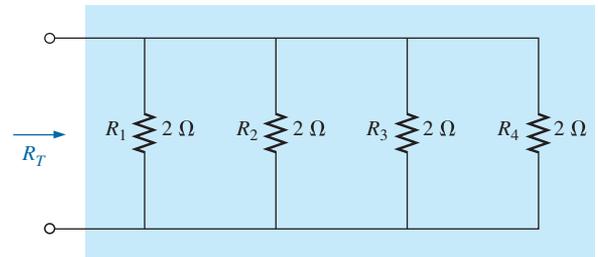


Figura 6.11 Circuito da Figura 6.10 redesenhado.

necessidade de continuamente se preocupar com dividir em relação à unidade e possivelmente errar a colocação da vírgula decimal. Para três resistores em paralelo, a equação a ser derivada aqui pode ser aplicada duas vezes, ou a Equação 6.3 pode ser usada.

Para dois resistores em paralelo, a resistência total é determinada pela Equação 6.1:

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

A multiplicação da parte de cima e da parte de baixo de cada termo do lado direito da equação pela outra resistência resulta em:

$$\frac{1}{R_T} = \left(\frac{R_2}{R_2}\right) \frac{1}{R_1} + \left(\frac{R_1}{R_1}\right) \frac{1}{R_2} = \frac{R_2}{R_1 R_2} + \frac{R_1}{R_1 R_2}$$

$$\frac{1}{R_T} = \frac{R_2 + R_1}{R_1 R_2}$$

e $R_T = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$ (6.5)

Isto é, a equação quer dizer que

a resistência total de dois resistores em paralelo é simplesmente o produto de seus valores divididos por sua soma.

EXEMPLO 6.7

Repita o Exemplo 6.1 usando a Equação 6.5.

Solução:

A Equação 6.5 resulta em:

$$R_T = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{(3 \Omega)(6 \Omega)}{3 \Omega + 6 \Omega} = \frac{18}{9} \Omega = 2 \Omega$$

que combina com a solução anterior.

EXEMPLO 6.8

Determine a resistência total da combinação em paralelo na Figura 6.7 usando duas aplicações da Equação 6.5.

Solução:

Primeiro, os resistores de 1 Ω e 4 Ω são combinados usando-se a Equação 6.5, o que resulta no circuito reduzido da Figura 6.12.

Equação 6.4:

$$R_T' = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{(1 \Omega)(4 \Omega)}{1 \Omega + 4 \Omega} = \frac{4}{5} \Omega = 0,8 \Omega$$

Então, a Equação 6.5 é aplicada novamente usando-se o valor equivalente:

$$R_T = \frac{R_T' R_3}{R_T' + R_3} = \frac{(0,8 \Omega)(5 \Omega)}{0,8 \Omega + 5 \Omega} = \frac{4}{5,8} \Omega = 0,69 \Omega$$

O resultado se iguala àquele obtido no Exemplo 6.3.

Lembre-se de que os elementos em série podem ser intercambiados sem afetar o valor absoluto da resistência total. Em circuitos paralelos,

resistores em paralelo podem ser intercambiados sem afetar a resistência total.

O próximo exemplo demonstra isso e revela como redesenhar um circuito pode frequentemente definir quais operações ou equações devem ser aplicadas.

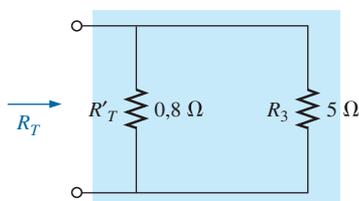


Figura 6.12 Equivalente reduzido da Figura 6.7.

EXEMPLO 6.9

Determine a resistência total dos elementos paralelos na Figura 6.13.

Solução:

O circuito é redesenhado na Figura 6.14.

Equação 6.4:

$$R_T' = \frac{R}{N} = \frac{6 \Omega}{3} = 2 \Omega$$

Equação 6.5:

$$R_T'' = \frac{R_2 R_4}{R_2 + R_4} = \frac{(9 \Omega)(72 \Omega)}{9 \Omega + 72 \Omega} = \frac{648}{81} \Omega = 8 \Omega$$

Equação 6.5:

$$R_T = \frac{R_T' R_T''}{R_T' + R_T''} = \frac{(2 \Omega)(8 \Omega)}{2 \Omega + 8 \Omega} = \frac{16}{10} \Omega = 1,6 \Omega$$

Os exemplos anteriores envolvem uma substituição direta; isto é, assim que a equação apropriada é definida, resta apenas inserir os números e realizar as manipulações exigidas. Os dois exemplos a seguir têm uma orientação de design, na qual parâmetros de circuito específicos são definidos e os elementos do circuito têm de ser determinados.

EXEMPLO 6.10

Determine o valor de R_2 na Figura 6.15 para estabelecer uma resistência total de 9 kΩ.

Solução:

$$R_T = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

$$R_T(R_1 + R_2) = R_1 R_2$$

$$R_T R_1 + R_T R_2 = R_1 R_2$$

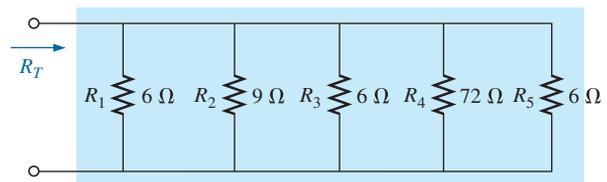


Figura 6.13 Circuito em paralelo para o Exemplo 6.9.

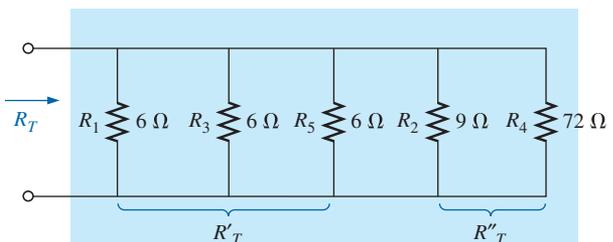


Figura 6.14 Circuito da Figura 6.13 (Exemplo 6.9) redesenhado.

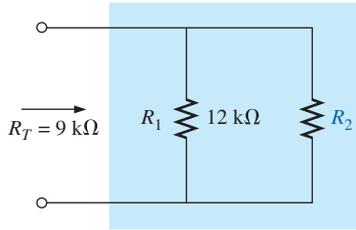


Figura 6.15 Circuito em paralelo para o Exemplo 6.10.

$$R_T R_1 = R_1 R_2 - R_T R_2$$

$$R_T R_1 = (R_1 - R_T) R_2$$

$$e \quad R_2 = \frac{R_T R_1}{R_1 - R_T}$$

A substituição dos valores resulta em:

$$R_2 = \frac{(9 \text{ k}\Omega)(12 \text{ k}\Omega)}{12 \text{ k}\Omega - 9 \text{ k}\Omega} = \frac{108}{3} \text{ k}\Omega = 36 \text{ k}\Omega$$

EXEMPLO 6.11

Determine os valores de R_1 , R_2 e R_3 na Figura 6.16 se $R_2 = 2R_1$, $R_3 = 2R_2$, e a resistência total for 16 kΩ.

Solução:

A Equação 6.1 afirma que:

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

entretanto, $R_2 = 2R_1$ e $R_3 = 2R_2 = 2(2R_1) = 4R_1$

de maneira que $\frac{1}{16 \text{ k}\Omega} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{2R_1} + \frac{1}{4R_1}$

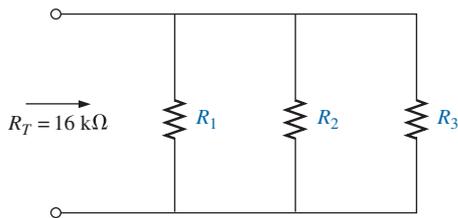


Figura 6.16 Circuito em paralelo para o Exemplo 6.11.

$$e \quad \frac{1}{16 \text{ k}\Omega} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_1} \right) + \frac{1}{4} \left(\frac{1}{R_1} \right)$$

$$\text{ou} \quad \frac{1}{16 \text{ k}\Omega} = 1,75 \left(\frac{1}{R_1} \right)$$

resultando em $R_1 = 1,75(16 \text{ k}\Omega) = 28 \text{ k}\Omega$
 de maneira que $R_2 = 2R_1 = 2(28 \text{ k}\Omega) = 56 \text{ k}\Omega$
 e $R_3 = 2R_2 = 2(56 \text{ k}\Omega) = 112 \text{ k}\Omega$

Analogias

Analogias foram efetivamente usadas para introduzir o conceito de elementos em série. Elas também podem ser usadas para ajudar a definir uma *configuração em paralelo*. Em uma escada de mão, os degraus formam uma configuração em paralelo. Quando cordas são amarradas juntas entre um gancho e uma carga, elas efetivamente absorvem o estresse em uma configuração em paralelo. Os cabos de uma ponte suspensa formam uma configuração em paralelo. Há inúmeras outras analogias que demonstram como conexões entre os mesmos dois pontos permitem uma distribuição do estresse entre elementos em paralelo.

Instrumentação

Como mostra a Figura 6.17, a resistência total de uma combinação em paralelo de elementos resistivos pode ser encontrada ao se usar um ohmímetro. Não há polaridade em relação à resistência, de maneira que qualquer um dos fios do ohmímetro pode ser conectado a qualquer um dos lados do circuito. Apesar de não haver fontes na Figura 6.17, sempre tenha em mente que ohmímetros nunca podem ser usados em um circuito ‘vivo’. Configurar a fonte para 0 V ou desligá-la não é o suficiente. Ela, mesmo assim, ainda pode descarregar (mudar a configuração) do circuito e modificar a leitura. É melhor remover a fonte e usar o ohmímetro nos dois terminais resultantes. Tendo em vista que todos os resistores estão na faixa do kilohm, a escala de 20 kΩ foi escolhida primeiro. Então, baixamos para a escala de 2 kΩ para uma precisão maior. Baixar para a escala de 200 Ω resultou em uma indicação ‘OL’, tendo em vista que estávamos abaixo do valor de resistência medido.

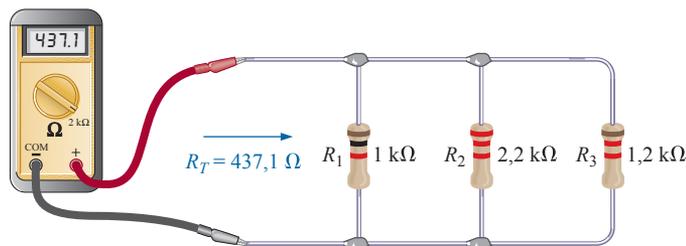


Figura 6.17 Uso de um ohmímetro para medir a resistência total de um circuito em paralelo.

6.3 CIRCUITOS EM PARALELO

Um **circuito em paralelo** pode agora ser estabelecido ao se conectar uma fonte através de um conjunto de resistores em paralelo como mostra a Figura 6.18. O terminal positivo da fonte é diretamente conectado ao topo de cada resistor, enquanto o terminal negativo é conectado à parte de baixo de cada resistor. Portanto, deve ficar bastante claro que a tensão aplicada é a mesma através de cada resistor. Em geral,

a tensão é sempre a mesma através de elementos em paralelo.

Portanto, lembre-se de que

se dois elementos estão em paralelo, a tensão através deles deve ser a mesma. Entretanto, se a tensão através de dois elementos vizinhos é a mesma, os dois elementos podem ou não estar em paralelo.

A razão para esse comentário qualificador na declaração anterior é discutida em detalhes no Capítulo 7.

Para as tensões do circuito na Figura 6.18, o resultado é:

$$V_1 = V_2 = E \quad (6.6)$$

Uma vez que o suprimento tenha sido conectado, uma corrente fornecida pela fonte é estabelecida pelo suprimento que passa através dos resistores em paralelo. A corrente resultante é uma função direta da resistência total do circuito em paralelo. Quanto menor a resistência total, maior a corrente, como também ocorreu com os circuitos em série.

Lembre-se de que, assim como nos circuitos em série, a fonte não ‘vê’ a combinação em paralelo dos elementos. Ela reage somente à resistência total do circuito, como mostra a Figura 6.19. A corrente fornecida pela fonte pode então ser determinada usando-se a lei de Ohm:

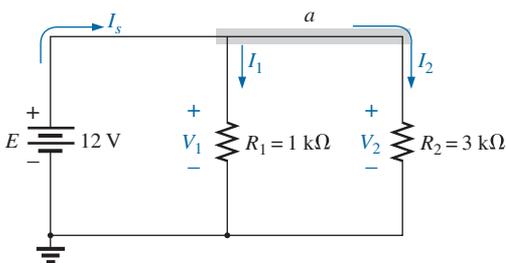


Figura 6.18 Circuito em paralelo.

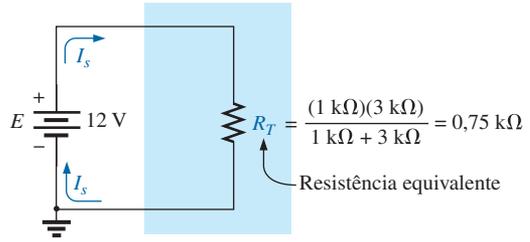


Figura 6.19 Substituição dos resistores em paralelo na Figura 6.18 pela resistência total equivalente.

$$I_s = \frac{E}{R_T} \quad (6.7)$$

Tendo em vista que a tensão é a mesma nos elementos em paralelo, a corrente em cada resistor também pode ser determinada usando-se a lei de Ohm. Isto é,

$$I_1 = \frac{V_1}{R_1} = \frac{E}{R_1} \quad \text{e} \quad I_2 = \frac{V_2}{R_2} = \frac{E}{R_2} \quad (6.8)$$

O sentido para a corrente é ditado pela polaridade da tensão através dos resistores. Lembre-se de que, para um resistor, a corrente entra do lado positivo de uma queda potencial e sai pelo lado negativo. O resultado, como mostra a Figura 6.18, é que a corrente fornecida pela fonte entra pelo ponto *a*, e as correntes *I*₁ e *I*₂ saem pelo mesmo ponto. Uma analogia excelente para descrever o fluxo de carga através do circuito da Figura 6.18 é o fluxo de água nos canos paralelos da Figura 6.20. O cano maior, com menos ‘resistência’ ao fluxo de água, terá um fluxo de água maior. O cano mais fino, com seu nível de ‘resistência’ aumentado, terá menos água fluindo através dele. De qualquer maneira, o total de água entrando pelos canos no topo *Q*_T tem de ser igual àquele que sai pela parte de baixo, com *Q*_T = *Q*₁ + *Q*₂.

A relação entre a corrente fornecida pela fonte e as correntes dos resistores paralelos pode ser derivada simplesmente ao se tomar a equação para a resistência total na Equação 6.1:

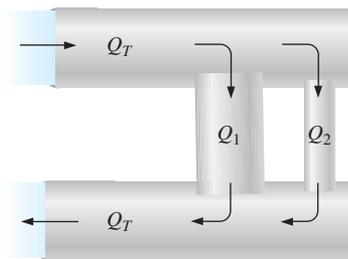


Figura 6.20 Analogia mecânica para a Figura 6.18.

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

A multiplicação de ambos os lados pela tensão aplicada resulta em:

$$E \left(\frac{1}{R_T} \right) = E \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

o que resulta em:

$$\frac{E}{R_T} = \frac{E}{R_1} + \frac{E}{R_2}$$

Então, observe que $E/R_1 = I_1$ e $E/R_2 = I_2$ para se obter:

$$I_s = I_1 + I_2 \tag{6.9}$$

O resultado revela uma propriedade muito importante de circuitos em paralelo:

Para circuitos em paralelo de fonte única, a corrente fornecida pela fonte (I_s) é sempre igual à soma das correntes de ramos individuais.

A dualidade que existe entre os circuitos em série e em paralelo continua a aparecer na medida em que empregamos as equações básicas para circuitos elétricos. Isso é interessante porque proporciona uma maneira de se lembrar das características de um usando os resultados do outro. Na Figura 6.21(a), por exemplo, temos um circuito em paralelo em que está claro que $I_T = I_1 + I_2$. Ao substituir as correntes da equação na Figura 6.21(a) por um nível de tensão, como mostra a Figura 6.21(b), temos a lei de Kirchhoff para tensões para um circuito em série: $E = V_1 + V_2$. Em outras palavras,

para um circuito em paralelo, a corrente fornecida pela fonte é igual à soma das correntes dos ramos, enquanto para um circuito em série, a tensão aplicada é igual à soma das quedas de tensão.

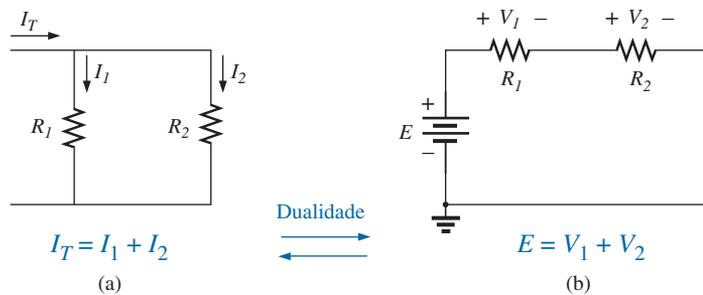


Figura 6.21 Demonstração da dualidade que existe entre circuitos em série e em paralelo.

EXEMPLO 6.12

Para o circuito em paralelo na Figura 6.22:

- a) descubra a resistência total;
- b) calcule a corrente fornecida pela fonte;
- c) determine a corrente através de cada ramo em paralelo;
- d) demonstre que a Equação 6.9 foi satisfeita.

Soluções:

a) Ao usarmos a Equação 6.5, obtemos:

$$R_T = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{(9 \Omega)(18 \Omega)}{9 \Omega + 18 \Omega} = \frac{162}{27} \Omega = 6 \Omega$$

b) Ao aplicar a lei de Ohm, obtemos:

$$I_s = \frac{E}{R_T} = \frac{27 \text{ V}}{6 \Omega} = 4,5 \text{ A}$$

c) Ao aplicar a lei de Ohm, obtemos:

$$I_1 = \frac{V_1}{R_1} = \frac{E}{R_1} = \frac{27 \text{ V}}{9 \Omega} = 3 \text{ A}$$

$$I_2 = \frac{V_2}{R_2} = \frac{E}{R_2} = \frac{27 \text{ V}}{18 \Omega} = 1,5 \text{ A}$$

d) Ao substituir os valores das partes (b) e (c), obtemos:

$$I_s = 4,5 \text{ A} = I_1 + I_2 = 3 \text{ A} + 1,5 \text{ A} = 4,5 \text{ A} \quad (\text{confere})$$

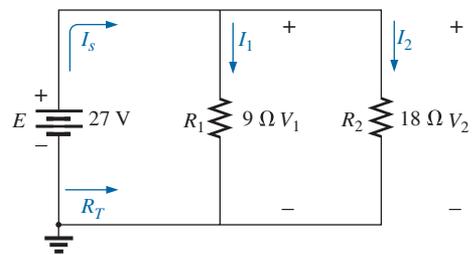


Figura 6.22 Circuito em paralelo para o Exemplo 6.12.

EXEMPLO 6.13

Para o circuito em paralelo na Figura 6.23:

- a) descubra a resistência total;
- b) calcule a corrente fornecida pela fonte;
- c) determine a corrente através de cada fonte.

Soluções:

a) A aplicação da Equação 6.3 resulta em:

$$R_T = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} = \frac{1}{\frac{1}{10 \Omega} + \frac{1}{220 \Omega} + \frac{1}{1,2 \text{ k}\Omega}}$$

$$= \frac{1}{100 \times 10^{-3} + 4,545 \times 10^{-3} + 0,833 \times 10^{-3}}$$

$$= \frac{1}{105,38 \times 10^{-3}}$$

$R_T = 9,49 \Omega$

Observe que a resistência total é menor que aquela do menor resistor em paralelo, e seu valor absoluto é muito próximo da resistência do menor resistor, pois os outros resistores são maiores por um fator maior do que 10:1.

b) Usar a lei de Ohm resulta em:

$$I_S = \frac{E}{R_T} = \frac{24 \text{ V}}{9,49 \Omega} = 2,53 \text{ A}$$

c) A aplicação da lei de Ohm resulta em:

$$I_1 = \frac{V_1}{R_1} = \frac{E}{R_1} = \frac{24 \text{ V}}{10 \Omega} = 2,4 \text{ A}$$

$$I_2 = \frac{V_2}{R_2} = \frac{E}{R_2} = \frac{24 \text{ V}}{220 \Omega} = 0,11 \text{ A}$$

$$I_3 = \frac{V_3}{R_3} = \frac{E}{R_3} = \frac{24 \text{ V}}{1,2 \text{ k}\Omega} = 0,02 \text{ A}$$

Um exame cuidadoso dos resultados do Exemplo 6.13 revela que quanto maior o resistor em paralelo, mais baixa a corrente do ramo. Em geral, portanto,

para resistores em paralelo, a maior corrente vai existir no ramo com a menor resistência.

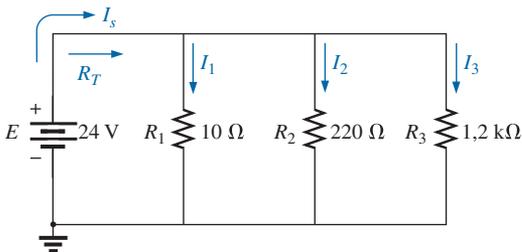


Figura 6.23 Circuito em paralelo para o Exemplo 6.13.

Uma declaração mais direta é a de que

a corrente sempre busca o caminho da menor resistência.

EXEMPLO 6.14

Dadas as informações fornecidas pela Figura 6.24:

- a) determine R_3 ;
- b) descubra a tensão aplicada E ;
- c) descubra a corrente fornecida pela corrente I_s ;
- d) descubra I_2 .

Soluções:

a) A aplicação da Equação 6.1 resulta em

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

A substituição resulta em: $\frac{1}{4 \Omega} = \frac{1}{10 \Omega} + \frac{1}{20 \Omega} + \frac{1}{R_3}$

de maneira que $0,25 \text{ S} = 0,1 \text{ S} + 0,05 \text{ S} + \frac{1}{R_3}$

e $0,25 \text{ S} = 0,15 \text{ S} + \frac{1}{R_3}$

com $\frac{1}{R_3} = 0,1 \text{ S}$

e $R_3 = \frac{1}{0,1 \text{ S}} = 10 \Omega$

b) A aplicação da lei de Ohm resulta em:

$$E = V_1 = I_1 R_1 = (4 \text{ A})(10 \Omega) = 40 \text{ V}$$

c) $I_S = \frac{E}{R_T} = \frac{40 \text{ V}}{4 \Omega} = 10 \text{ A}$

d) A aplicação da lei de Ohm resulta em:

$$I_2 = \frac{V_2}{R_2} = \frac{E}{R_2} = \frac{40 \text{ V}}{20 \Omega} = 2 \text{ A}$$

Instrumentação

Na Figura 6.25, voltmíetros foram conectados para que se verificasse que a tensão através de elementos em paralelo era a mesma. Observe que o fio positivo ou

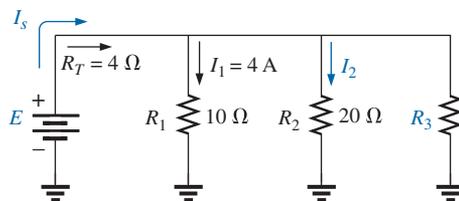


Figura 6.24 Circuito paralelo para o Exemplo 6.14.

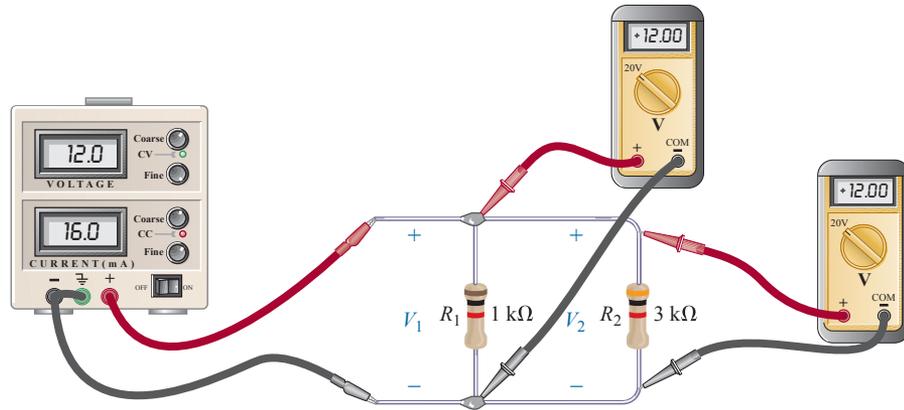


Figura 6.25 Medição das tensões de um circuito CC em paralelo.

vermelho de cada voltmetro está conectado ao lado alto (positivo) da tensão por meio de cada resistor para que se obtenha uma leitura positiva. A escala de 20 V foi usada porque a tensão aplicada excedeu a faixa da escala de 2 V.

Na Figura 6.26, um amperímetro foi conectado para medir a corrente fornecida pela fonte. Primeiro, a conexão para o suprimento tinha de ser interrompida no terminal positivo, e o medidor inserido como mostrado. Não se esqueça de usar terminais de amperímetro em seu medidor para esse tipo de medida. O fio vermelho ou positivo do medidor é conectado de maneira que a corrente fornecida pela fonte entre através desse fio e saia pelo fio negativo ou preto para assegurar uma leitura positiva. A escala de 200 mA foi usada porque a corrente fornecida pela fonte excedeu o valor máximo da escala de 2 mA. Por ora, presumimos que a resistência interna do medidor pode ser ignorada. Tendo em vista que a resistência interna de um amperímetro na escala de 200 mA é tipicamente de apenas alguns ohms, comparado aos resistores em paralelo na faixa do kilohm, trata-se de uma suposição excelente.

Uma medição mais difícil é a da corrente através do resistor R_1 . Ela, com frequência, causa problemas na

sessão de laboratório. Primeiro, como mostra a Figura 6.27(a), o resistor R_1 tem de estar desconectado do ponto de conexão de cima para estabelecer um circuito aberto. O amperímetro é, então, inserido entre os terminais resultantes, de maneira que a corrente entre no terminal positivo ou vermelho, como mostra a Figura 6.27(b). Mas nunca se esqueça do seguinte: ao usar um amperímetro, primeiro estabeleça um circuito aberto no ramo no qual a corrente deve ser medida e, então, insira o medidor.

A medida mais fácil é a da corrente através do resistor R_2 . Rompa a conexão para R_2 acima ou abaixo do resistor, e insira o amperímetro com a corrente entrando pelo fio positivo ou vermelho para obter uma leitura positiva.

6.4 DISTRIBUIÇÃO DE POTÊNCIA EM UM CIRCUITO EM PARALELO

Lembre-se do que aprendemos ao discutir os circuitos em série, que a potência aplicada a um circuito resistivo em série é igual à potência dissipada pelos elementos resistivos. O mesmo é verdade para circuitos resistivos em paralelo. Na realidade,

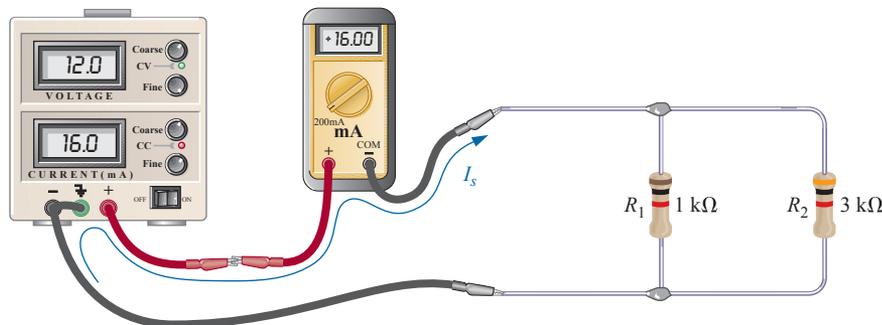


Figura 6.26 Medição da corrente fornecida pela fonte de um circuito em paralelo.

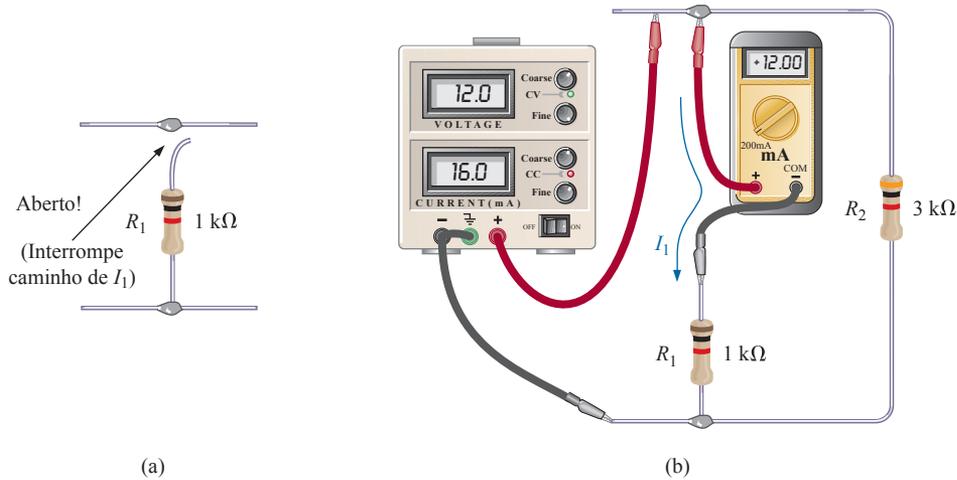


Figura 6.27 Medição da corrente através do resistor R_1 .

para qualquer circuito composto de elementos resistivos, a potência aplicada pela bateria será igual àquela dissipada pelos elementos resistivos.

Para o circuito em paralelo na Figura 6.28:

$$P_E = P_{R_1} + P_{R_2} + P_{R_3} \quad (6.10)$$

que é exatamente a mesma obtida para a combinação em série.

A potência fornecida pela fonte é:

$$P_E = EI_s \quad (\text{watts, W}) \quad (6.11)$$

como na equação para a potência de cada resistor (mostrado para R_1 , somente):

$$P_1 = V_1 I_1 = I_1^2 R_1 = \frac{V_1^2}{R_1} \quad (\text{watts, W}) \quad (6.12)$$

Na equação $P = V^2/R$, a tensão através de cada resistor em um circuito em paralelo será a mesma. O único fator que muda é a resistência no denominador da equação. O resultado é que

em um circuito resistivo em paralelo, quanto maior o resistor, menor a potência absorvida.

EXEMPLO 6.15

Para o circuito em paralelo na Figura 6.29 (valores-padrão):

- a) determine a resistência total, R_T ;
- b) descubra a corrente fornecida pela fonte e a corrente através de cada resistor;

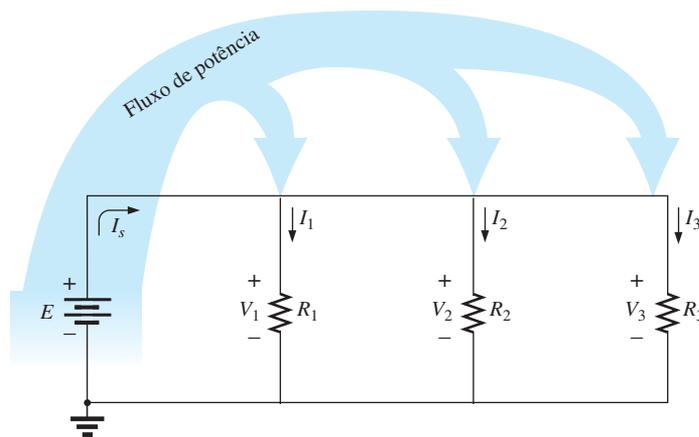


Figura 6.28 Fluxo de potência em um circuito em paralelo CC.

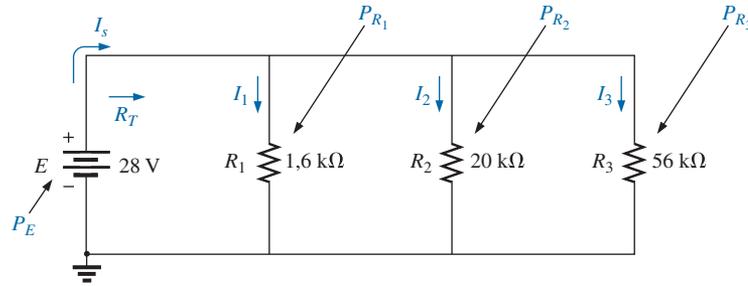


Figura 6.29 Circuito paralelo para o Exemplo 6.15.

- c) calcule a potência fornecida pela fonte;
- d) determine a potência absorvida por cada resistor em paralelo;
- e) verifique a Equação 6.10.

Soluções:

- a) Sem fazer um único cálculo, deve ficar claro a partir dos exemplos anteriores que a resistência total é menor que 1,6 kΩ e muito próxima desse valor devido ao valor absoluto dos outros níveis de resistência:

$$R_T = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} = \frac{1}{\frac{1}{1,6\text{k}\Omega} + \frac{1}{20\text{k}\Omega} + \frac{1}{56\text{k}\Omega}}$$

$$= \frac{1}{625 \times 10^{-6} + 50 \times 10^{-6} + 17,867 \times 10^{-6}}$$

$$= \frac{1}{692,867 \times 10^{-6}}$$

e $R_T = 1,44 \text{ k}\Omega$

- b) A aplicação da lei de Ohm resulta em:

$$I_s = \frac{E}{R_T} = \frac{28\text{V}}{1,44\text{k}\Omega} = 19,44 \text{ mA}$$

O fato de a corrente sempre buscar o caminho da menor resistência imediatamente nos diz que a corrente pelo resistor de 1,6 kΩ será a maior, e que a corrente pelo resistor de 56 kΩ será a menor.

A aplicação da lei de Ohm resulta em:

$$I_1 = \frac{V_1}{R_1} = \frac{E}{R_1} = \frac{28\text{V}}{1,6\text{k}\Omega} = 17,5 \text{ mA}$$

$$I_2 = \frac{V_2}{R_2} = \frac{E}{R_2} = \frac{28\text{V}}{20\text{k}\Omega} = 1,4 \text{ mA}$$

$$I_3 = \frac{V_3}{R_3} = \frac{E}{R_3} = \frac{28\text{V}}{56\text{k}\Omega} = 0,5 \text{ mA}$$

- c) A aplicação da Equação 6.11 resulta em:

$$P_E = EI_s = (28\text{V})(19,4\text{ mA}) = 543,2 \text{ mW}$$

- d) A aplicação de cada forma da equação apropriada resulta em:

$$P_1 = V_1 I_1 = EI_1 = (28\text{V})(17,5\text{ mA}) = 490 \text{ mW}$$

$$P_2 = I_2^2 R_2 = (1,4\text{ mA})^2 (20\text{ k}\Omega) = 39,2 \text{ mW}$$

$$P_3 = \frac{V_3^2}{R_3} = \frac{E^2}{R_3} = \frac{(28\text{V})^2}{56\text{ k}\Omega} = 14 \text{ mW}$$

Uma análise dos resultados substantia claramente o fato de que quanto maior o resistor, menor a potência absorvida.

- e) $P_E = P_{R_1} + P_{R_2} + P_{R_3}$
 $543,2 \text{ mW} = 490 \text{ mW} + 39,2 \text{ mW} + 14 \text{ mW}$
 $= 543,2 \text{ mW}$ (confere)

6.5 LEI DE KIRCHHOFF PARA CORRENTE

No capítulo anterior, a lei de Kirchhoff para tensões foi introduzida, fornecendo uma relação muito importante entre as tensões de uma malha fechada. Kirchhoff também tem o crédito de ter desenvolvido a equação a seguir igualmente importante para a relação entre as correntes de um circuito, chamada de **lei de Kirchhoff para corrente (LKC)**:

A soma algébrica das correntes que entram e saem de uma região, sistema ou nó é igual a zero.

A lei pode ser declarada também da seguinte forma:

A soma das correntes que entram em uma região, sistema ou nó tem de ser igual à soma das correntes que deixam essa mesma região, sistema ou nó.

Em forma de equação, a afirmação anterior pode ser escrita da seguinte forma:

$$\sum I_i = \sum I_o \tag{6.13}$$

com I_i representando a corrente que entra, ou *in*, e I_o representando a corrente que sai, ou *out*.

Na Figura 6.30, por exemplo, a área sombreada pode representar um sistema completo ou um circuito complicado, ou simplesmente um ponto de conexão (junção) para as correntes exibidas. Em todos os casos, a soma das correntes que entram tem de ser igual à soma das correntes que saem, conforme exige a Equação 6.13:

$$\begin{aligned} \Sigma I_i &= \Sigma I_o \\ I_1 + I_4 &= I_2 + I_3 \\ 4 \text{ A} + 8 \text{ A} &= 2 \text{ A} + 10 \text{ A} \\ 12 \text{ A} &= 12 \text{ A} \text{ (confere)} \end{aligned}$$

O uso mais comum dessa lei será feito em junções de dois ou mais caminhos (ramos) para a corrente, conforme mostra a Figura 6.31(a). Alguns estudantes inicialmente têm dificuldade em determinar se uma corrente está entrando ou saindo de uma junção. Um artifício que pode ser útil é a analogia da água na Figura 6.31(b), na qual a junção na Figura 6.31(a) é a pequena ponte sobre o regato. Simplesmente relacione a corrente de I_1 ao fluxo fluído de Q_1 , a corrente do ramo menor I_2 ao fluxo de água Q_2 , e a corrente de ramo maior I_3 ao fluxo Q_3 . A água que chega à ponte tem de ser igual à quantidade de água que sai da ponte, de maneira que $Q_1 = Q_2 + Q_3$. Tendo em vista que a corrente I_1 está apontando para a junção e o fluxo fluído

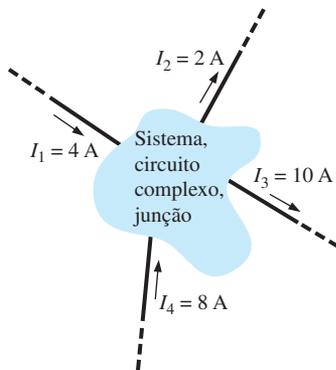


Figura 6.30 Ilustração da lei de Kirchhoff para corrente.

Q_1 , na direção da pessoa na ponte, ambas as quantidades são vistas como se estivessem entrando na junção. As correntes I_2 e I_3 estão ambas deixando a junção, da mesma maneira que Q_2 e Q_3 estão deixando a bifurcação do rio. As quantidades I_2 , I_3 , Q_2 e Q_3 estão, portanto, deixando a junção.

Nos próximos exemplos, os valores desconhecidos das correntes podem ser determinados aplicando-se a lei de Kirchhoff para corrente. Lembre-se de colocar a soma de todas as correntes que entram em uma junção à esquerda do sinal de igualdade e a soma de todas as correntes que saem da mesma junção à direita do mesmo sinal.

Na área eletroeletrônica o termo **nó** é normalmente usado para se referir a uma junção de dois ou mais ramos. Portanto, esse termo será usado frequentemente nas análises que se seguem.

EXEMPLO 6.16

Determine as correntes I_3 e I_4 na Figura 6.32 usando a lei de Kirchhoff para corrente.

Solução:

Há duas junções ou nós na Figura 6.32. O nó a tem apenas uma incógnita, enquanto o nó b tem duas incógnitas. Tendo em vista que uma única equação pode ser usada para solucionar apenas uma incógnita, temos que, em primeiro lugar, aplicar a lei de Kirchhoff para corrente ao nó a .

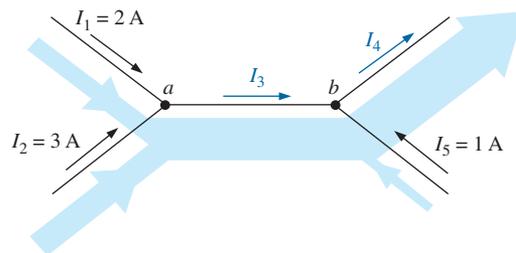
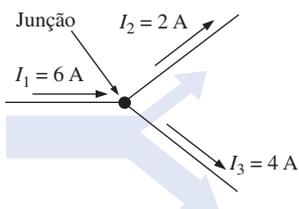


Figura 6.32 Configuração de dois nós para o Exemplo 6.16.



(a)



(b)

Figura 6.31 (a) Demonstração da lei de Kirchhoff para corrente; (b) analogia da água para a junção em (a).

No nó a ,

$$\begin{aligned}\Sigma I_i &= \Sigma I_o \\ I_1 + I_2 &= I_3 \\ 2 \text{ A} + 3 \text{ A} &= I_3 = \mathbf{5 \text{ A}}\end{aligned}$$

No nó b , usando o resultado recém-obtido,

$$\begin{aligned}\Sigma I_i &= \Sigma I_o \\ I_3 + I_5 &= I_4 \\ 5 \text{ A} + 1 \text{ A} &= I_4 = \mathbf{6 \text{ A}}\end{aligned}$$

Observe que na Figura 6.32, a largura das regiões sombreadas equivale ao valor absoluto da corrente naquela região.

EXEMPLO 6.17

Determine as correntes I_1 , I_3 , I_4 e I_5 para o circuito na Figura 6.33.

Solução:

Nessa configuração, quatro nós são definidos. Os nós a e c têm apenas uma corrente incógnita na junção, de maneira que a lei de Kirchhoff para corrente pode ser aplicada a qualquer junção.

No nó a ,

$$\begin{aligned}\Sigma I_i &= \Sigma I_o \\ I &= I_1 + I_2 \\ 5 \text{ A} &= I_1 + 4 \text{ A} \\ e \quad I_1 &= 5 \text{ A} - 4 \text{ A} = \mathbf{1 \text{ A}}\end{aligned}$$

No nó c ,

$$\begin{aligned}\Sigma I_i &= \Sigma I_o \\ I_2 &= I_4 \\ e \quad I_4 &= I_2 = \mathbf{4 \text{ A}}\end{aligned}$$

O uso dos resultados anteriores nas outras junções resulta na equação a seguir.

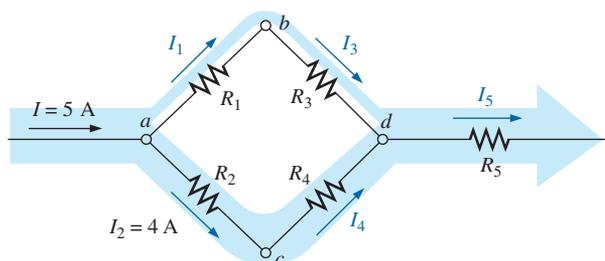


Figura 6.33 Configuração de quatro nós para o Exemplo 6.17.

No nó b ,

$$\begin{aligned}\Sigma I_i &= \Sigma I_o \\ I_1 &= I_3 \\ e \quad I_3 &= I_1 = \mathbf{1 \text{ A}}\end{aligned}$$

No nó d ,

$$\begin{aligned}\Sigma I_i &= \Sigma I_o \\ I_3 + I_4 &= I_5 \\ e \quad 1 \text{ A} + 4 \text{ A} &= I_5 = \mathbf{5 \text{ A}}\end{aligned}$$

Se considerarmos o circuito como um todo, veremos que a corrente que entra nele à esquerda é $I = 5 \text{ A}$, enquanto a corrente que deixa o circuito, à direita, é $I_5 = 5 \text{ A}$. Os dois valores têm de ser iguais, já que a corrente que entra em qualquer sistema tem de ser igual à corrente que sai do sistema.

EXEMPLO 6.18

Determine as correntes I_3 e I_5 na Figura 6.34 através de aplicações da lei de Kirchhoff para corrente.

Solução:

Observe primeiro que, tendo em vista que o nó b tem duas incógnitas (I_3 e I_5), e o nó a apenas uma, a lei de Kirchhoff para corrente tem de ser aplicada primeiro ao nó a . O resultado é, então, aplicado ao nó b .

No nó a ,

$$\begin{aligned}\Sigma I_i &= \Sigma I_o \\ I_1 + I_2 &= I_3 \\ 4 \text{ A} + 3 \text{ A} &= I_3 = \mathbf{7 \text{ A}}\end{aligned}$$

No nó b ,

$$\begin{aligned}\Sigma I_i &= \Sigma I_o \\ I_3 &= I_4 + I_5 \\ 7 \text{ A} &= 1 \text{ A} + I_5 \\ e \quad I_5 &= 7 \text{ A} - 1 \text{ A} = \mathbf{6 \text{ A}}\end{aligned}$$

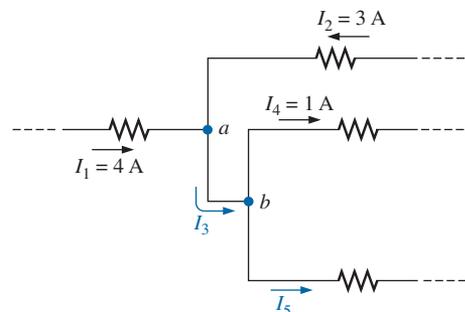


Figura 6.34 Circuito para o Exemplo 6.18.

EXEMPLO 6.19

Para o circuito CC em paralelo na Figura 6.35:

- a) determine a corrente fornecida pela fonte I_s ;
- b) descubra a tensão fornecida pela fonte E ;
- c) determine R_3 ;
- d) calcule R_T .

Soluções:

- a) Primeiro aplique a Equação 6.13 ao nó a . Apesar de o nó a , na Figura 6.35, parecer inicialmente uma única junção, ele pode ser redesenhado como mostra a Figura 6.36, sendo claramente um ponto em comum em todos os ramos.

O resultado é:

$$\begin{aligned} \sum I_i &= \sum I_o \\ I_s &= I_1 + I_2 + I_3 \end{aligned}$$

Substituição de valores: $I_s = 8 \text{ mA} + 10 \text{ mA} + 2 \text{ mA} = \mathbf{20 \text{ mA}}$

Observe nessa solução que você não precisa conhecer os valores do resistor ou a tensão aplicada. A solução é determinada somente pelos níveis de corrente.

- b) A aplicação da lei de Ohm resulta em:

$$E = V_1 = I_1 R_1 = (8 \text{ mA})(2 \text{ k}\Omega) = \mathbf{16 \text{ V}}$$

- c) A aplicação da lei de Ohm de uma maneira diferente resulta em:

$$R_3 = \frac{V_3}{I_3} = \frac{E}{I_3} = \frac{16 \text{ V}}{2 \text{ mA}} = \mathbf{8 \text{ k}\Omega}$$

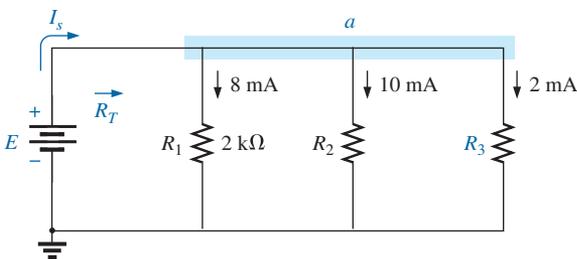


Figura 6.35 Circuito em paralelo para o Exemplo 6.19.

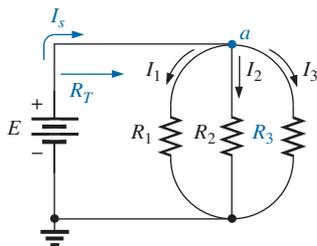


Figura 6.36 Circuito redesenhado na Figura 6.35.

- d) A aplicação da lei de Ohm, novamente, resulta em:

$$R_T = \frac{E}{I_s} = \frac{16 \text{ V}}{20 \text{ mA}} = \mathbf{0,8 \text{ k}\Omega}$$

A aplicação da lei de Kirchhoff para corrente não é limitada a circuitos em que todas as conexões internas são conhecidas ou visíveis. Por exemplo, todas as correntes do circuito integrado na Figura 6.37 são conhecidas, exceto I_1 . Ao tratar o sistema inteiro (que poderia conter mais de um milhão de elementos) como um único nó, podemos aplicar a lei de Kirchhoff para corrente, como mostra o Exemplo 6.20.

Antes de analisar o Exemplo 6.20 em detalhes, observe que o sentido da corrente incógnita I_1 não é fornecido na Figura 6.37. Em muitas ocasiões, isso será verdade. Com tantas correntes entrando e saindo do sistema, é difícil saber por meio de uma simples inspeção qual sentido deve ser designado para I_1 . *Nesses casos, simplesmente suponha o sentido e então confira o resultado. Se o resultado for negativo, o sentido errado foi presumido. Se o resultado for positivo, o sentido correto foi presumido. De qualquer maneira, o valor absoluto da corrente estará correto.*

EXEMPLO 6.20

Determine I_1 para o circuito integrado na Figura 6.37.

Solução:

Presumindo que a corrente I_1 , ao entrar no chip, resulta nas equações a seguir quando a lei de Kirchhoff é aplicada, descobrimos que:

$$\begin{aligned} \sum I_i &= \sum I_o \\ I_1 + 10 \text{ mA} + 4 \text{ mA} + 8 \text{ mA} &= 5 \text{ mA} + 4 \text{ mA} + 2 \text{ mA} + 6 \text{ mA} \\ I_1 + 22 \text{ mA} &= 17 \text{ mA} \\ I_1 &= 17 \text{ mA} - 22 \text{ mA} = \mathbf{-5 \text{ mA}} \end{aligned}$$

Descobrimos que o sentido para I_1 está *deixando* CI, apesar de a magnitude de 5 mA ser correta.

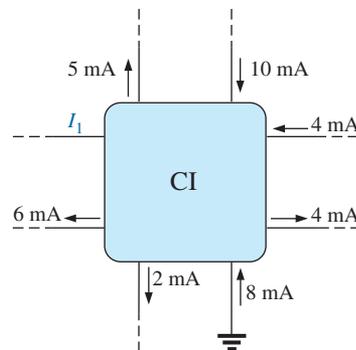


Figura 6.37 Circuito integrado para o Exemplo 6.20.

Na medida em que finalizamos essa importante seção, não se esqueça de que a lei de Kirchhoff para corrente será aplicada de uma forma ou de outra em todo o texto. *As leis de Kirchhoff são inquestionavelmente duas das mais importantes nesse campo, pois elas são aplicáveis às configurações mais complexas que existem hoje.* Elas não serão substituídas por uma lei mais importante, nem serão abandonadas em favor de uma abordagem mais sofisticada.

6.6 REGRA DO DIVISOR DE CORRENTE

Para os circuitos em série, temos a poderosa regra do divisor de tensão para descobrir a tensão através de um resistor em um circuito em série. Introduzimos agora a igualmente poderosa **regra do divisor de corrente**, usada para descobrir a corrente através de um resistor em um circuito em paralelo.

Na Seção 6.4, destacou-se que a corrente sempre buscará o caminho da menor resistência. Na Figura 6.38, por exemplo, a corrente de 9 A está diante de sua divisão entre os três resistores em paralelo. Com base nas seções anteriores, deve ficar claro, sem que um único cálculo tenha de ser realizado, que a maior quantidade de corrente passará pelo menor resistor de 10 Ω, e a menor quantidade de corrente passará pelo resistor de 1 kΩ. Na realidade, a corrente que passa no resistor de 100 Ω também excederá aquela que passa no resistor de 1 kΩ. Podemos dar um passo adiante e reconhecer que a resistência do resistor de 100 Ω é 10 vezes aquela do resistor de 10 Ω. De maneira similar, a corrente que passa através do resistor de 100 Ω é 10 vezes aquela que passa através do resistor de 1 kΩ.

Em geral,

no caso de dois elementos em paralelo com resistências iguais, a corrente se dividirá igualmente.

Se os elementos em paralelo tiverem resistências diferentes, o elemento de menor resistência será percorrido pela maior fração da corrente.

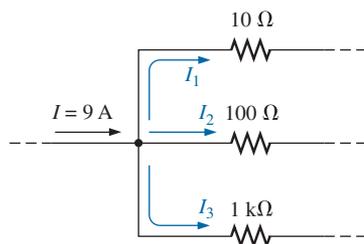


Figura 6.38 Discussão sobre como a corrente se dividirá entre três ramos paralelos de valores resistivos diferentes.

A razão entre os valores das correntes nos dois ramos será inversamente proporcional à razão entre suas resistências.

EXEMPLO 6.21

a) Determine as correntes I_1 e I_3 para o circuito na Figura 6.39.

b) Descubra a corrente fornecida pela fonte I_s .

Soluções:

a) Tendo em vista que R_1 é duas vezes R_2 , a corrente I_1 deve ser metade de I_2 , e:

$$I_1 = \frac{I_2}{2} = \frac{2 \text{ mA}}{2} = \mathbf{1 \text{ mA}}$$

Tendo em vista que R_2 é três vezes R_3 , a corrente I_3 deve ser três vezes I_2 , e:

$$I_3 = 3I_2 = 3(2 \text{ mA}) = \mathbf{6 \text{ mA}}$$

b) A aplicação da lei de Kirchhoff para corrente resulta em:

$$\begin{aligned} \Sigma I_i &= \Sigma I_o \\ I_s &= I_1 + I_2 + I_3 \\ I_s &= 1 \text{ mA} + 2 \text{ mA} + 6 \text{ mA} = \mathbf{9 \text{ mA}} \end{aligned}$$

Apesar de as discussões e os exemplos anteriores nos permitirem determinar a magnitude relativa de uma corrente com base em um nível conhecido, eles não fornecem o valor absoluto de uma corrente através de um ramo de um circuito em paralelo se apenas a corrente total é conhecida. O resultado é a necessidade da regra do divisor de corrente, que será derivada usando-se a configuração em paralelo na Figura 6.40(a). A corrente I_T (que usa o subscrito T para indicar a corrente total de entrada) se divide entre N resistores em paralelo e, então, reúne-se novamente na parte de baixo da configuração. Na Figura 6.40(b), a combinação em paralelo dos resistores foi substituída por um único resistor igual à resistência

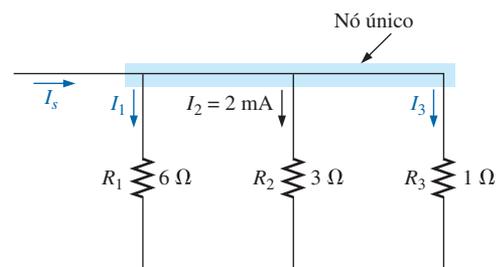


Figura 6.39 Circuito paralelo para o Exemplo 6.21.

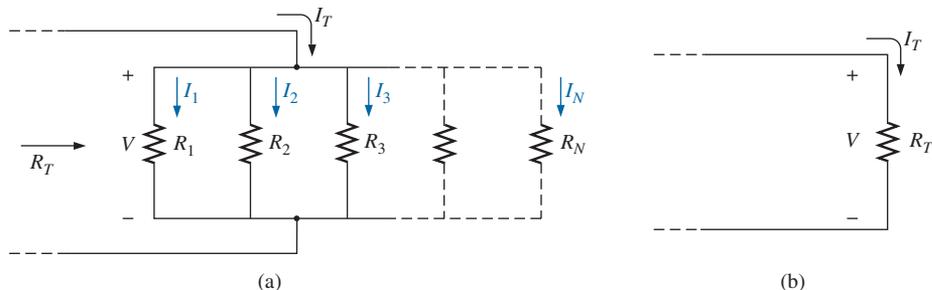


Figura 6.40 Derivação da regra do divisor de corrente: (a) circuito em paralelo de N resistores em paralelo; (b) equivalente reduzido da parte (a).

total da combinação em paralelo, como determinam as seções anteriores.

A corrente I_T pode então ser determinada usando-se a lei de Ohm:

$$I_T = \frac{V}{R_T}$$

Tendo em vista que a tensão V é a mesma através de elementos em paralelo, a equação a seguir é verdadeira:

$$V = I_1 R_1 = I_2 R_2 = I_3 R_3 = \dots = I_x R_x$$

onde o produto $I_x R_x$ se refere a qualquer combinação na série.

Substituindo V na equação anterior por $I_T R_T$, temos:

$$I_T = \frac{I_x R_x}{R_T}$$

Resolvendo I_x , o resultado final é a **regra do divisor de corrente**:

$$I_x = \frac{R_T}{R_x} I_T \tag{6.14}$$

que declara que

a corrente através de qualquer ramo de um circuito resistivo em paralelo é igual à resistência total do circuito em paralelo dividido pela resistência do resistor de interesse e multiplicada pela corrente total que entra na configuração em paralelo.

Tendo em vista que R_T e I_T são constantes, para uma configuração em particular, quanto maior o valor de R_x (no denominador), menor é o valor de I_x para aquele ramo, o que confirma o fato de que a corrente sempre busca o caminho de menor resistência.

EXEMPLO 6.22

Para o circuito em paralelo na Figura 6.41, determine a corrente I_1 usando a Equação 6.14.

Solução:

Equação 6.3:

$$\begin{aligned} R_T &= \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} \\ &= \frac{1}{\frac{1}{1\text{k}\Omega} + \frac{1}{10\text{k}\Omega} + \frac{1}{22\text{k}\Omega}} \\ &= \frac{1}{1 \times 10^{-3} + 100 \times 10^{-6} + 45,46 \times 10^{-6}} \\ &= \frac{1}{1,145 \times 10^{-3}} \\ &= \mathbf{873,01 \Omega} \end{aligned}$$

Equação 6.14:

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{R_T}{R_1} I_T \\ &= \frac{(873,01 \Omega)}{1\text{k}\Omega} (12\text{ mA}) = (0,873)(12\text{ mA}) = \mathbf{10,48\text{ mA}} \end{aligned}$$

e o menor resistor em paralelo recebe a maior porção da corrente.

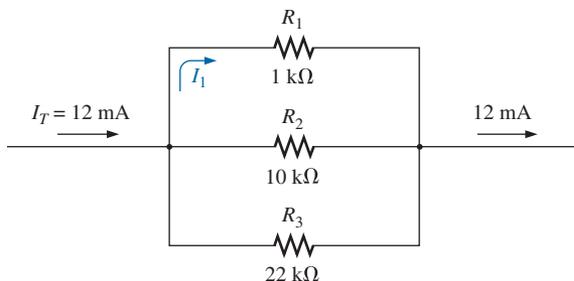


Figura 6.41 Uso da regra do divisor de corrente para calcular a corrente I_1 no Exemplo 6.22.

Observe também que

para um circuito em paralelo, a corrente através do menor resistor será muito próxima da corrente total de entrada se os outros elementos em paralelo da configuração forem muito maiores em valor absoluto.

No Exemplo 6.22, a corrente de R_1 é muito próxima da corrente total, pois R_1 é 10 vezes menor que a próxima resistência menor.

Caso especial: dois resistores em paralelo

Para o caso de dois resistores em paralelo como mostra a Figura 6.42, a resistência total é determinada por:

$$R_T = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

A substituição de R_T na Equação 6.14 para a corrente I_1 resulta em:

$$I_1 = \frac{R_T}{R_1} I_T = \left(\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right) \frac{I_T}{R_1}$$

e
$$I_1 = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) I_T$$
 (6.15a)

Similarmente, para I_2 :

$$I_2 = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) I_T$$
 (6.15b)

A Equação 6.15 declara que

para dois resistores em paralelo, a corrente através de um é igual à resistência do outro vezes a corrente total de entrada dividida pela soma dos dois resistores.

Tendo em vista que a combinação de dois resistores em paralelo é provavelmente a configuração em paralelo mais comum, a simplicidade do formato da Equação 6.15

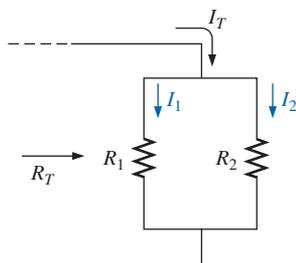


Figura 6.42 Derivação da regra do divisor de corrente para o caso especial de apenas dois resistores em paralelo.

sugere que vale a pena memorizá-la. Observe especialmente, entretanto, que o denominador da equação é simplesmente a soma, não a resistência total da combinação.

EXEMPLO 6.23

Determine a corrente I_2 para o circuito na Figura 6.43 usando a regra do divisor de corrente.

Solução:

O uso da Equação 6.15(b) resulta em:

$$I_2 = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) I_T = \left(\frac{4 \text{ k}\Omega}{4 \text{ k}\Omega + 8 \text{ k}\Omega} \right) 6 \text{ A} = (0,333)(6 \text{ A}) = 2 \text{ A}$$

O uso da Equação 6.14 resulta em:

$$I_2 = \frac{R_T}{R_2} I_T$$

com $R_T = 4 \text{ k}\Omega \parallel 8 \text{ k}\Omega = \frac{(4 \text{ k}\Omega)(8 \text{ k}\Omega)}{4 \text{ k}\Omega + 8 \text{ k}\Omega} = 2,667 \text{ k}\Omega$

e $I_2 = \left(\frac{2,667 \text{ k}\Omega}{8 \text{ k}\Omega} \right) 6 \text{ A} = (0,333)(6 \text{ A}) = 2 \text{ A}$

concordando com a solução anterior.

Talvez a solução que usa a Equação 6.15(b) pareça ser mais direta no Exemplo 6.23. Entretanto, tenha em mente que a Equação 6.14 é aplicável a qualquer configuração em particular, o que elimina a necessidade de ter que lembrar de duas equações.

Agora, apresentaremos um problema de design.

EXEMPLO 6.24

Determine o resistor R_1 na Figura 6.44 para implementar a divisão da corrente mostrada.

Solução:

Há essencialmente dois meios de abordar esse tipo de problema. Um envolve a substituição direta de valores conhecidos na equação da regra do divisor de corrente

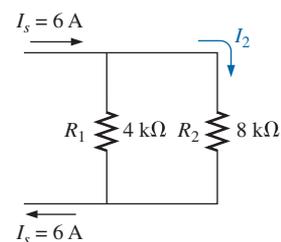


Figura 6.43 Uso da regra do divisor de corrente para determinar a corrente I_2 no Exemplo 6.23.

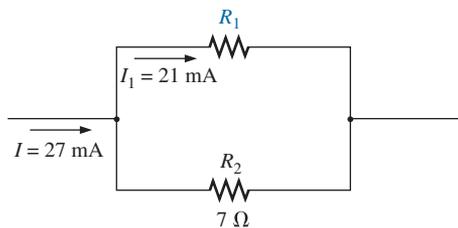


Figura 6.44 Problema de design para dois resistores em paralelo (Exemplo 6.24).

seguida por uma análise matemática. O outro é a aplicação sequencial das leis básicas de circuitos elétricos. Primeiro, usaremos a segunda abordagem. A aplicação da lei de Kirchhoff para corrente resulta em:

$$\begin{aligned} \Sigma I_i &= \Sigma I_o \\ I &= I_1 + I_2 \\ 27 \text{ mA} &= 21 \text{ mA} + I_2 \end{aligned}$$

e
A tensão V_2 :
de maneira que

$$\begin{aligned} I_2 &= 27 \text{ mA} - 21 \text{ mA} = 6 \text{ mA} \\ V_2 &= I_2 R_2 = (6 \text{ mA})(7 \Omega) = 42 \text{ mV} \\ V_1 &= V_2 = 42 \text{ mV} \end{aligned}$$

Por fim,

$$R_1 = \frac{V_1}{I_1} = \frac{42 \text{ mV}}{21 \text{ mA}} = 2 \Omega$$

Agora, a outra abordagem, usando a regra do divisor de corrente:

$$I_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I_T$$

$$21 \text{ mA} = \left(\frac{7 \Omega}{R_1 + 7 \Omega} \right) 27 \text{ mA}$$

$$\begin{aligned} (R_1 + 7 \Omega)(21 \text{ mA}) &= (7 \Omega)(27 \text{ mA}) \\ (21 \text{ mA})R_1 + 147 \text{ mV} &= 189 \text{ mV} \\ (21 \text{ mA})R_1 &= 189 \text{ mV} - 147 \text{ mV} = 42 \text{ mV} \end{aligned}$$

$$e \quad R_1 = \frac{42 \text{ mV}}{21 \text{ mA}} = 2 \Omega$$

Resumindo, portanto, lembre-se de que a corrente sempre busca o caminho de menor resistência, e a razão dos valores da resistência é o inverso dos níveis de corrente resultantes, como mostra a Figura 6.45. A espessura das faixas na Figura 6.45 reflete a magnitude relativa da corrente em cada ramo.

6.7 FONTES DE TENSÃO EM PARALELO

Devido ao fato de a tensão ser a mesma através de elementos em paralelo,

fontes de tensão podem ser colocadas em paralelo somente se elas tiverem a mesma tensão.

A razão fundamental para se colocar duas ou mais baterias ou fontes em paralelo é aumentar a especificação de corrente acima daquela de uma única fonte. Por exemplo, na Figura 6.46, duas baterias ideais de 12 V foram colocadas em paralelo. A corrente total fornecida pela fonte que usa a lei de Kirchhoff para corrente é agora a soma das correntes nominais de cada fonte. A potência resultante disponível será duas vezes aquela de uma única

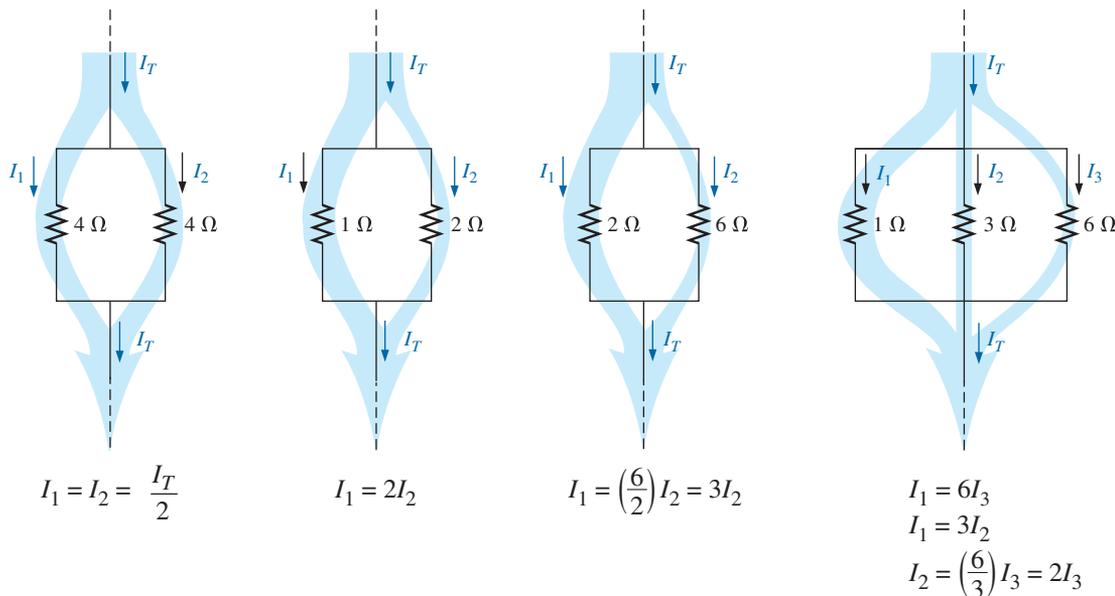


Figura 6.45 Demonstração de como a corrente se divide através de resistores em paralelo iguais e desiguais.

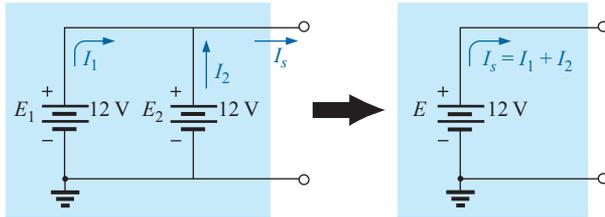


Figura 6.46 Demonstração do efeito de colocar duas fontes ideais da mesma tensão em paralelo.

fonte se a corrente nominal da fonte de cada uma for a mesma. Isto é,

$$\begin{aligned} \text{com} \quad & I_1 = I_2 = I \\ \text{então} \quad & P_T = E(I_1 + I_2) = E(I + I) = E(2I) = 2(EI) \\ & = 2P_{\text{(uma fonte)}} \end{aligned}$$

Se por alguma razão duas baterias de diferentes tensões forem colocadas em paralelo, ambas se tornarão ineficientes ou serão danificadas, pois a bateria com a tensão mais elevada vai ser descarregada rapidamente pela bateria com a tensão terminal mais baixa. Por exemplo, considere duas baterias de chumbo-ácido de diferentes tensões terminais colocadas em paralelo, como mostra a Figura 6.47. Não faz sentido colocar uma bateria de 12 V ideal em paralelo com uma bateria de 6 V, porque a lei de Kirchhoff para tensões seria violada. Entretanto, podemos examinar os efeitos disso se incluirmos os níveis de resistência interna, como mostra a Figura 6.47.

Os únicos resistores limitadores de corrente no circuito são as resistências internas, o que resulta em uma corrente de descarga muito alta para a bateria com a tensão de suprimento maior. A corrente resultante para o caso da Figura 6.47 seria:

$$I = \frac{E_1 - E_2}{R_{\text{int}_1} + R_{\text{int}_2}} = \frac{12\text{ V} - 6\text{ V}}{0,03\ \Omega + 0,02\ \Omega} = \frac{6\text{ V}}{0,05\ \Omega} = 120\text{ A}$$

Esse valor excede em muito a corrente de saída nominal da bateria de 12 V, resultando em uma rápida descarga de E_1 e um impacto destrutivo sobre a fonte menor devido às correntes excessivas. Esse tipo de situação ocorria eventualmente quando alguns carros ainda usavam baterias de 6 V. Algumas pessoas pensavam: ‘Se eu tenho uma bateria de 6 V, uma bateria de 12 V vai funcionar duas vezes melhor’; e isso não é verdade!

Em geral,

é sempre recomendável que, ao substituir baterias em série ou em paralelo, substitua-se todas as baterias.

Uma bateria nova colocada em paralelo com uma bateria mais velha provavelmente terá uma tensão terminal

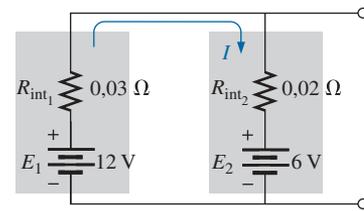


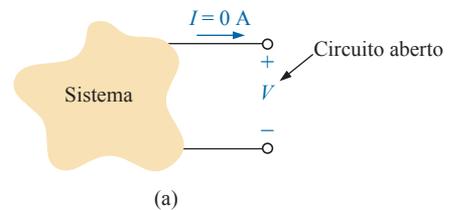
Figura 6.47 Exame do impacto de colocar duas baterias de chumbo-ácido de diferentes tensões terminais em paralelo.

mais alta e imediatamente começará a descarregar através da bateria mais velha. Além disso, a corrente disponível é menor para a bateria mais velha, o que resulta em uma saída de corrente mais alta do que a nominal da bateria mais nova quando uma carga for aplicada.

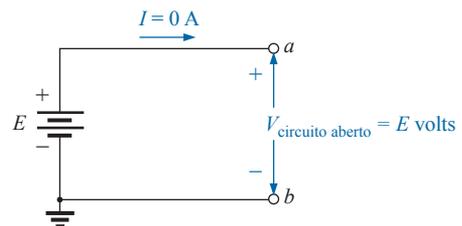
6.8 CIRCUITOS ABERTOS E CURTOS-CIRCUITOS

Os circuitos abertos e os curtos-circuitos podem, com frequência, causar mais confusão e dificuldades na análise de um sistema do que as configurações em série e em paralelo. Isso ficará mais claro nos próximos capítulos, quando aplicarmos certos métodos e teoremas.

Um **circuito aberto** consiste simplesmente em dois terminais isolados sem qualquer conexão entre si, como vemos na Figura 6.48(a). Como não existe um caminho fechado para a condução, a corrente associada a um circuito aberto é sempre nula. Entretanto, a diferença de potencial entre os terminais de um circuito aberto pode ter qualquer valor, dependendo do sistema a que os terminais estão conectados. Assim, em resumo,



(a)



(b)

Figura 6.48 Definição de um circuito aberto.

em um circuito aberto podemos ter uma diferença de potencial (tensão) qualquer entre seus terminais, mas o valor da corrente será sempre zero.

Na Figura 6.48(b), existe um circuito aberto entre os terminais *a* e *b*. A tensão nos terminais do circuito aberto é igual à tensão da fonte, mas a corrente é zero devido ao circuito estar incompleto.

Alguns exemplos práticos de circuitos abertos e seu impacto são fornecidos na Figura 6.49. Na Figura 6.49(a), a corrente excessiva demandada pelo circuito fez com que um dos fusíveis falhasse, criando um circuito aberto que reduziu a corrente a zero ampère. Entretanto, é importante observar que a *tensão aplicada plena passa agora através do circuito aberto*, de maneira que você tem de ter cuidado ao trocar o fusível. Se há um interruptor principal à frente do fusível, acione-o primeiro para eliminar a possibilidade de levar um choque. A situação claramente revela os benefícios de disjuntores: você pode reconfigurar o disjuntor sem ter de chegar perto dos fios energizados.

Na Figura 6.49(b), a placa de pressão da cavidade da lâmpada de uma lanterna foi dobrada quando a lanterna sofreu uma queda. Um circuito aberto existe agora entre o ponto de contato da lâmpada e a placa conectada às baterias. A corrente caiu para zero ampère, mas os 3 V fornecidos pelas baterias em série aparecem através do circuito aberto. A situação pode ser corrigida colocando-se uma chave de fenda sob a placa e empurrando-a na direção da lâmpada.

Finalmente, na Figura 6.49(c), o filamento de uma lâmpada em uma conexão em série se rompe devido à corrente excessiva ou ao tempo de uso, criando um circuito

aberto que derruba todas as lâmpadas na configuração em série. Novamente, a corrente caiu para zero ampère, mas os 120 V inteiros aparecerão através dos pontos de contato da lâmpada ruim. Em situações como essa, *você deve remover a tomada da parede antes de trocar a lâmpada.*

Um **curto-circuito** é uma conexão direta de resistência muito baixa entre dois terminais de um circuito, como mostra a Figura 6.50. A corrente através do curto-circuito pode ser de qualquer valor, como determinar o sistema ao qual ela está conectada, mas a tensão através do curto-circuito é sempre zero volt, porque considera-se que a resistência do curto-circuito é essencialmente zero ohm e $V = IR = I(0 \Omega) = 0 \text{ V}$.

Resumindo, portanto,

um curto-circuito pode carregar uma corrente de um nível determinado pelo circuito externo, mas a diferença de potencial (tensão) através de seus terminais é sempre zero volts.

Na Figura 6.51(a), a corrente através do resistor de 2Ω é 5 A. Se um curto-circuito ocorresse no resistor de 2Ω , a resistência total da combinação em paralelo do resistor de 2Ω e o curto (de essencialmente zero ohm) seria:

$$2 \Omega \parallel 0 \Omega = \frac{(2 \Omega)(0 \Omega)}{2 \Omega + 0 \Omega} = 0 \Omega$$

como indica a Figura 6.51(b), e a corrente vai subir a níveis muito altos, como determina a lei de Ohm:

$$I = \frac{E}{R} = \frac{10 \text{ V}}{0 \Omega} \rightarrow \infty \text{ A}$$

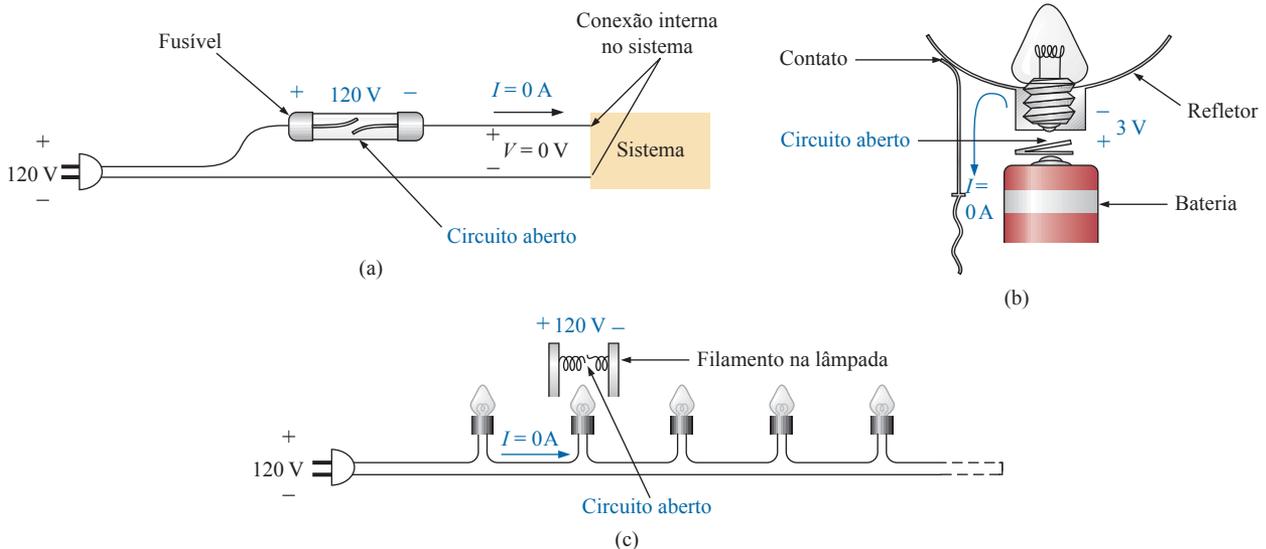


Figura 6.49 Exemplos de circuitos abertos.

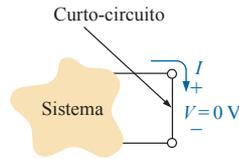


Figura 6.50 Definição de um curto-circuito.

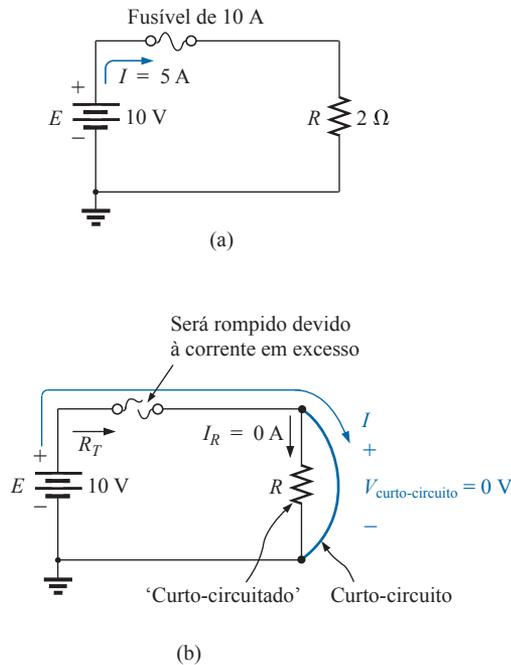


Figura 6.51 Demonstração do efeito de um curto-circuito sobre os níveis de corrente.

O efeito do resistor de 2Ω foi efetivamente ‘curto-circuitado’ pela conexão de baixa resistência. A corrente máxima é agora limitada somente pelo disjuntor do circuito ou pelo fusível em série com a fonte.

Alguns exemplos práticos de curtos-circuitos e seus impactos são fornecidos na Figura 6.52. Na Figura 6.52(a), um fio com corrente (a alimentação) enrolado em torno de um parafuso se soltou e está tocando a conexão de retorno. Uma conexão de curto-circuito entre os dois terminais foi estabelecida, o que pode resultar em uma corrente muito pesada e um possível perigo de incêndio. A esperança é que o disjuntor entre ‘em ação’ e o circuito seja desativado. Problemas como esse estão entre as razões que determinam que fios de alumínio (mais baratos e mais leves do que o cobre) não são permitidos em instalações elétricas residenciais ou industriais. O alumínio é mais sensível à temperatura do que o cobre, e vai se expandir e se contrair devido ao calor desenvolvido pela corrente que passa pelo cabo. Eventualmente, a expansão e a contração podem afrouxar o parafuso, e um fio sob algum estresse torsional da instalação pode se mover e fazer contato com outro condutor, como mostra a Figura 6.52(a). O alumínio ainda é usado em grandes painéis como uma conexão de barra coletora, mas ele é aparafusado.

Na Figura 6.52(b), os fios de um ferro começaram a se enrolar e a rachar devido a correntes excessivas ou a seu tempo de uso. Assim que o isolamento se rompe, esse enrolamento pode fazer com que dois fios se toquem e estabeleçam um curto-circuito. A esperança é que um disjuntor ou um fusível desconecte o circuito rapidamente. Frequentemente, não é o fio do ferro que causa o problema, mas uma extensão barata com o diâmetro de fio errado. Perceba que você não pode perceber a capacidade de uma extensão por sua capa exterior. Ela pode ter uma cobertura laranja grossa, mas ter um fio muito fino dentro. Confira o diâmetro do fio da próxima vez que você comprar uma extensão, e certifique-se de que ela tenha um diâmetro de pelo menos #14, sendo #12 a melhor escolha para aparelhos de alta corrente.

Finalmente, a Figura 6.52(c) ilustra os enrolamentos em um transformador ou em um motor para uso residen-

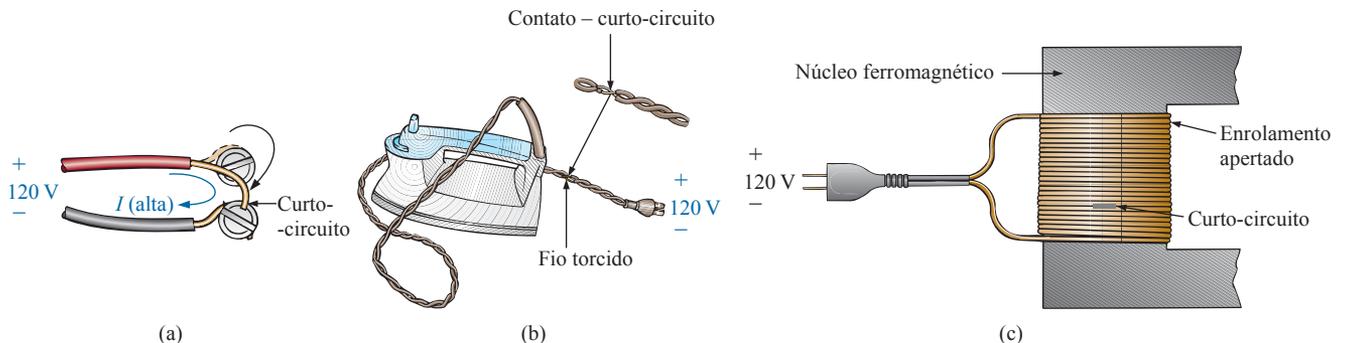


Figura 6.52 Exemplos de curtos-circuitos.

cial ou industrial. Os fios estão enrolados de maneira tão apertada e com uma camada de isolamento tão fina que é possível que, com o passar do tempo e com o uso, esse isolamento se rompa e provoque um curto-circuito. Em muitos casos, curtos-circuitos podem ocorrer, reduzindo o número de enrolamentos efetivos na unidade. É possível que a ferramenta ou o aparelho ainda funcione, mas com menos força ou com uma velocidade rotacional menor. Se você observar uma mudança dessa natureza na resposta, deverá conferir os enrolamentos, porque um curto-circuito pode levar a uma situação perigosa. Em muitos casos, o estado dos enrolamentos pode ser conferido com uma simples leitura de ohmímetro. Se um curto ocorreu, o comprimento de fio utilizável foi reduzido, e a resistência caiu. Se você sabe qual é a resistência normal, pode fazer uma comparação e chegar a uma conclusão.

Para um leigo, a terminologia *curto-circuito* ou *circuito aberto* é normalmente associada a situações difíceis como queda de energia, fumaça e fogo. Entretanto, na análise de circuitos, ambos podem ter um papel importante na determinação de parâmetros específicos de um sistema. Entretanto, mais frequentemente, se uma condição de curto-circuito deve ser estabelecida, ela pode ser obtida usando-se uma *ponte* — um fio de resistência desprezível a ser conectado entre os pontos de interesse. Estabelecer um circuito aberto exige apenas a certificação de que os terminais de interesse estejam isolados um do outro.

EXEMPLO 6.25

Determine a tensão V_{ab} para o circuito na Figura 6.53.

Solução:

O circuito aberto exige que I seja zero ampère. A queda de tensão através de ambos os resistores é, portanto, de zero volt, tendo em vista que $V = IR = (0)R = 0 \text{ V}$. A aplicação da lei de Kirchhoff para tensões em torno da malha fechada resulta em:

$$V_{ab} = E = 20 \text{ V}$$

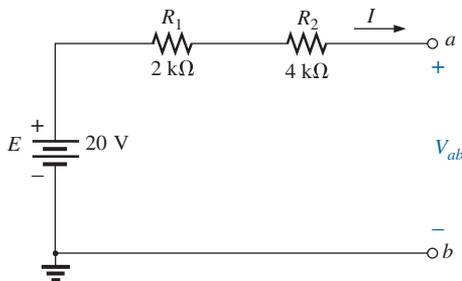


Figura 6.53 Circuito para o Exemplo 6.25.

EXEMPLO 6.26

Determine as tensões V_{ab} e V_{cd} para o circuito na Figura 6.54.

Solução:

A corrente através do sistema é zero ampère devido ao circuito aberto, o que resulta em uma queda de 0 V em cada resistor. Ambos os resistores podem então ser substituídos por curtos-circuitos, como mostra a Figura 6.55. A tensão V_{ab} passa então diretamente através da bateria de 10 V, e:

$$V_{ab} = E_1 = 10 \text{ V}$$

A tensão V_{cd} exige uma aplicação da lei de Kirchhoff para tensões:

$$+E_1 - E_2 - V_{cd} = 0$$

ou

$$V_{cd} = E_1 - E_2 = 10 \text{ V} - 30 \text{ V} = -20 \text{ V}$$

O sinal negativo na solução indica que a tensão real V_{cd} tem a polaridade oposta daquela mostrada na Figura 6.54.

EXEMPLO 6.27

Determine a tensão e a corrente desconhecidas em cada circuito da Figura 6.56.

Solução:

Para o circuito na Figura 6.56(a), a corrente I_T tomará o caminho da menor resistência, e tendo em vista que a condição de curto-circuito na extremidade do circuito é o caminho de menor resistência, toda a corrente

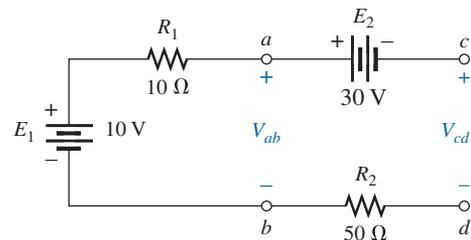


Figura 6.54 Circuito para o Exemplo 6.26.

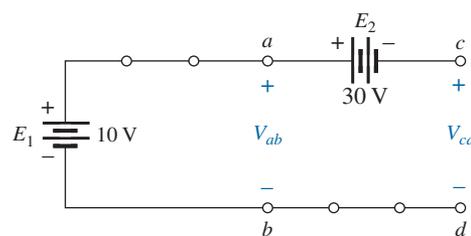


Figura 6.55 Circuito da Figura 6.54 redesenhado.

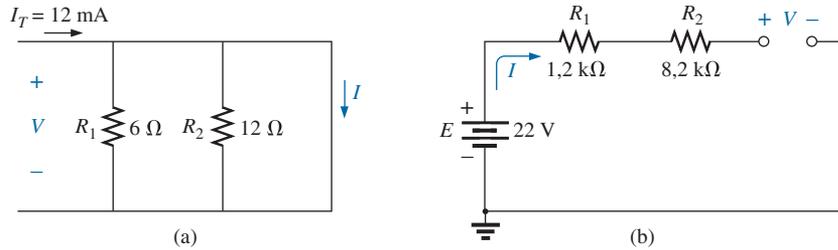


Figura 6.56 Circuitos para o Exemplo 6.27.

passará pelo curto-circuito. Essa conclusão pode ser verificada usando-se a regra do divisor de corrente. A tensão através do circuito é a mesma que atravessa o curto-circuito, zero volt, como mostra a Figura 6.57(a). Para o circuito na Figura 6.56(b), a condição de circuito aberto exige que a corrente seja de zero ampère. Portanto, as quedas de tensão dos resistores têm de ser de zero volt, como determina a lei de Ohm [$V_R = IR = (0)R = 0 \text{ V}$], com os resistores atuando como uma conexão da fonte para o circuito aberto. O resultado é que a tensão do circuito aberto é $E = 22 \text{ V}$, como mostra a Figura 6.57(b).

EXEMPLO 6.28

Determine V e I para o circuito na Figura 6.58 para o caso de o resistor R_2 ser curto-circuitado.

Solução:

O circuito redesenhado aparece na Figura 6.59. A corrente através do resistor de 3Ω é zero devido ao circuito

aberto, fazendo com que toda a corrente I passe pela ponte. Tendo em vista que $V_{3\Omega} = IR = (0)R = 0 \text{ V}$, a tensão V passa diretamente pelo curto, e:

$$V = 0 \text{ V}$$

com

$$I = \frac{E}{R_1} = \frac{6 \text{ V}}{2 \Omega} = 3 \text{ A}$$

6.9 EFEITOS DE CARGA DO VOLTÍMETRO

Nos capítulos anteriores, aprendemos que amperímetros não são instrumentos ideais. Quando você insere um amperímetro, na realidade, está introduzindo uma resistência adicional em série com o ramo no qual está medindo a corrente. Geralmente, isso não é um problema sério, mas ele pode ter um efeito perturbador em suas leituras, de maneira que é bom ter consciência dessa questão.

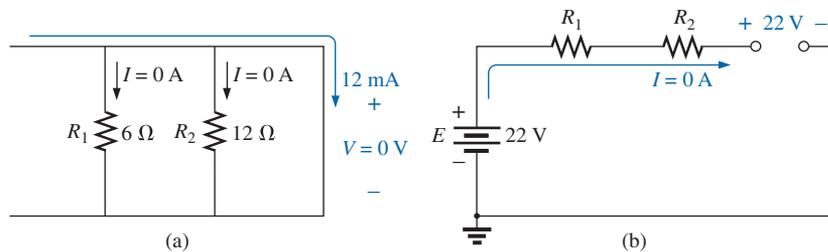


Figura 6.57 Soluções para o Exemplo 6.27.

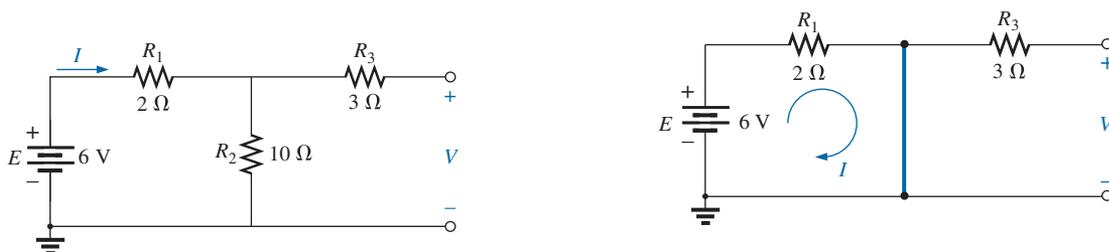


Figura 6.58 Circuito para o Exemplo 6.28.

Figura 6.59 Circuito na Figura 6.58 com R_2 substituído por uma ponte.

Voltímetros também têm uma resistência interna que aparece entre os dois terminais de interesse quando uma medição está sendo feita. Enquanto o amperímetro coloca uma resistência adicional em série com o ramo de interesse, o voltímetro coloca uma resistência adicional *através* do elemento, como mostra a Figura 6.60. Tendo em vista que ele aparece em paralelo com o elemento de interesse, o nível ideal para a resistência interna de um voltímetro seria infinitos ohms, da mesma maneira que zero ohm seria o ideal para um amperímetro. Infelizmente, a resistência de qualquer voltímetro não é infinita, e muda de um tipo de medidor para o outro.

A maioria dos medidores digitais tem um nível de resistência interna fixo na faixa do megohm que permanece o mesmo *para todas suas escalas*. Por exemplo, o medidor na Figura 6.60 tem o nível típico de 11 MΩ para sua resistência interna, não importando qual escala de tensão seja usada. Quando o medidor é colocado através do resistor de 10 kΩ, a resistência da combinação é:

$$R_T = 10\text{ k}\Omega \parallel 11\text{ M}\Omega = \frac{(10^4\ \Omega)(11 \times 10^6\ \Omega)}{10^4\ \Omega + (11 \times 10^6\ \Omega)} = 9,99\text{ k}\Omega$$

e o comportamento do circuito não é seriamente afetado. O resultado, portanto, é que

a maioria dos voltímetros digitais pode ser usada em circuitos com resistências que chegam à alta faixa de kilohms sem que haja preocupação com o efeito da resistência interna sobre a leitura.

Entretanto, se as resistências estão na faixa dos megohms, você deve investigar o efeito da resistência interna.

Mas um VOM analógico é uma questão diferente, pois os níveis de resistência interna são muito mais baixos e são uma função da escala usada. Se um VOM na escala de 2,5 V fosse colocado através do resistor de 10 kΩ na Figura 6.60, a resistência interna poderia ser 50 kΩ, o que resultaria em uma resistência combinada de:

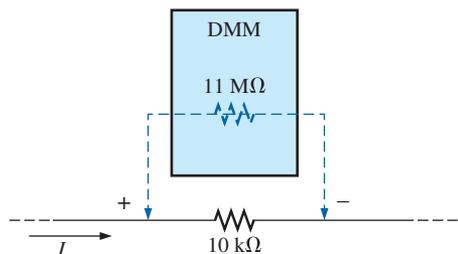


Figura 6.60 Carga de voltímetro.

$$R_T = 10\text{ k}\Omega \parallel 50\text{ k}\Omega = \frac{(10^4\ \Omega)(50 \times 10^3\ \Omega)}{10^4\ \Omega + (50 \times 10^3\ \Omega)} = 8,33\text{ k}\Omega$$

e o comportamento do circuito seria afetado porque o resistor de 10 kΩ apareceria com um resistor de 8,33 kΩ.

Para determinar a resistência R_m de qualquer escala de um VOM, simplesmente multiplique a **tensão máxima** da escala escolhida pela **especificação ohm/volt (Ω/V)**, que normalmente aparece na parte de baixo da face do medidor. Isto é,

$$R_m = (\text{VOM}) = (\text{escala})(\text{especificação } \Omega/\text{V})$$

Para uma especificação Ω/V típica de 20.000, a escala de 2,5 V teria uma resistência interna de:

$$(2,5\text{ V})(20.000\ \Omega/\text{V}) = \mathbf{50\text{ k}\Omega}$$

enquanto para a escala de 100 V, a resistência interna do VOM seria de:

$$(100\text{ V})(20.000\ \Omega/\text{V}) = \mathbf{2\text{ M}\Omega}$$

e para a escala de 250 V,

$$(250\text{ V})(20.000\ \Omega/\text{V}) = \mathbf{5\text{ M}\Omega}$$

EXEMPLO 6.29

Para o circuito relativamente simples na Figura 6.61(a):

- qual é a tensão de circuito aberto V_{ab} ?
- o que um DMM indicará caso ele tenha uma resistência interna de 11 MΩ? Compare sua resposta com aquela da parte (a);
- repita a parte (b) para um VOM com uma especificação Ω/V de 20.000 na escala de 100 V.

Soluções:

- Devido ao circuito aberto, a corrente é zero, e a queda de tensão através do resistor de 1 MΩ é zero volt. O resultado é que toda a tensão fornecida pela fonte aparece entre os pontos *a* e *b*, e:

$$V_{ab} = \mathbf{20\text{ V}}$$

- Quando o medidor é conectado, como mostra a Figura 6.61(b), um circuito completo foi estabelecido, e a corrente pode passar pelo circuito. A leitura do voltímetro pode ser determinada usando-se a regra do divisor de tensão, como a seguir:

$$V_{ab} = \frac{(11\text{ M}\Omega)(20\text{ V})}{(11\text{ M}\Omega + 1\text{ M}\Omega)} = \mathbf{18,33\text{ V}}$$

e a leitura é afetada de certa maneira.

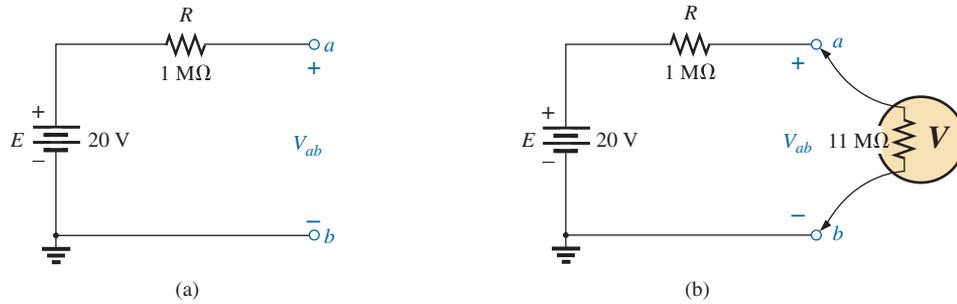


Figura 6.61 (a) Medição de uma tensão de circuito aberto com um voltímetro; (b) determinação do efeito do uso de um voltímetro digital com uma resistência interna de 11 MΩ na medida de uma tensão de circuito aberto (Exemplo 6.29).

c) Para o VOM, a resistência interna do medidor é:

$$R_m = (100 \text{ V}) (20.000 \text{ } \Omega/\text{V}) = 2 \text{ M}\Omega$$

$$e \quad V_{ab} = \frac{(2 \text{ M}\Omega)(20 \text{ V})}{(2 \text{ M}\Omega + 1 \text{ M}\Omega)} = 13,33 \text{ V}$$

que é consideravelmente abaixo do nível desejado de 20 V.

duas situações diferentes ao se mudar a variável de interesse. Por exemplo, a equação para a resistência total de um circuito em série é a soma das resistências. Ao mudar os parâmetros de resistência para parâmetros de condutância, você poderá obter a equação para a condutância total de um circuito em paralelo — uma maneira fácil de lembrar das duas equações. Similarmente, começando com a equação da condutância total, você poderá escrever facilmente a equação de resistência total para circuitos em série substituindo os parâmetros de condutância por parâmetros de resistência. Circuitos em série e em paralelo compartilham de duas importantes relações duais: (1) entre a resistência de circuitos em série e a condutância de circuitos em paralelo e (2) entre a tensão ou corrente de um circuito em série e a corrente ou tensão, respectivamente, de um circuito em paralelo. A Tabela 6.1 resume essa dualidade.

O formato da resistência total para um circuito em série tem o mesmo formato que a condutância total de

6.10 TABELA DE RESUMO

Agora que as configurações em série e em paralelo foram abordadas em detalhes, revisaremos as equações de maior destaque, assim como suas características. As equações para as duas configurações têm uma série de similaridades. Na realidade, as equações para uma podem ser obtidas diretamente da outra ao se aplicar, simplesmente, o princípio da **dualidade**. A dualidade entre equações significa que o formato para uma equação pode ser aplicado a

Tabela 6.1 Tabela de resumo.

Circuitos em série e em paralelo		
Série	Dualidade	Paralelo
$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_N$	$R \rightleftharpoons G$	$G_T = G_1 + G_2 + G_3 + \dots + G_N$
R_T aumenta (G_T diminui) se resistores adicionais são acrescentados em série	$R \rightleftharpoons G$	G_T aumenta (R_T diminui) se resistores adicionais são adicionados em paralelo
Caso especial: dois elementos $R_T = R_1 + R_2$	$R \rightleftharpoons G$	$G_T = G_1 + G_2$
I é o mesmo através dos elementos em série	$I \rightleftharpoons V$	V é o mesmo através de elementos em paralelo
$E = V_1 + V_2 + V_3$	$E, V \rightleftharpoons I$	$I_T = I_1 + I_2 + I_3$
Maior V através do maior R	$V \rightleftharpoons I$ e $R \rightleftharpoons G$	Maior I através do maior G (menor R)
$V_x = \frac{R_x E}{R_T}$	$E, V \rightleftharpoons I$ e $R \rightleftharpoons G$	$I_x = \frac{G_x I_T}{G_T}$
$P = EI_T$	$E \rightleftharpoons I$ e $I \rightleftharpoons E$	$P = I_T E$
$P = I^2 R$	$I \rightleftharpoons V$ e $R \rightleftharpoons G$	$P = V^2 G$
$P = V^2/R$	$V \rightleftharpoons I$ e $R \rightleftharpoons G$	$P = I^2/G$

um circuito em paralelo, como mostra a Tabela 6.1. Para ir de um a outro é necessário apenas intercambiar as letras R e G . Para o caso especial de dois elementos, as equações têm o mesmo formato, mas a equação aplicada para a resistência total da configuração paralela mudou. Na configuração em série, a resistência total aumenta a cada resistor adicionado. Para circuitos em paralelo, a condutância total aumenta a cada condutância adicional. O resultado é que a condutância total de um circuito em série cai com elementos resistivos adicionados, enquanto a resistência total de circuitos em paralelo diminui com elementos adicionados.

Em um circuito em série, a corrente é a mesma em qualquer lugar. Em um circuito em paralelo, a tensão é a mesma através de cada elemento. O resultado é uma dualidade entre a tensão e a corrente para as duas configurações. O que é verdade para uma em uma configuração é verdade para a outra em outra. Em um circuito em série, a tensão aplicada divide-se entre os elementos em série. Em um circuito em paralelo, a corrente divide-se entre elementos em paralelo. Para circuitos em série, o maior resistor captura a maior porção da tensão aplicada. Para circuitos em paralelo, o ramo com a maior condutância captura a maior porção da corrente de entrada. Além disso, para circuitos em série, a tensão aplicada é igual à soma das quedas de tensão através dos elementos em série do circuito, enquanto a corrente fornecida pela fonte para ramos em paralelo é igual à soma das correntes através de todos os ramos em paralelo.

A potência total fornecida a um circuito em série ou em paralelo é determinada pelo produto da tensão aplicada e pela corrente que a fonte resultante fornece. A potência fornecida a cada elemento também é a mesma para cada configuração. A dualidade pode ser aplicada novamente, mas a equação $P = EI$ gera o mesmo resultado que $P = IE$. Também, $P = I^2R$ pode ser substituído por $P = V^2G$ para elementos em paralelo, mas essencialmente todos podem ser usados em todas as configurações. O princípio da dualidade pode ser muito útil no processo de aprendizagem. Lembre-se disso na medida em que você avançar nos próximos capítulos. Você descobrirá, em capítulos posteriores, que essa dualidade também pode ser aplicada entre dois importantes elementos: indutores e capacitadores.

6.11 TÉCNICAS DE ANÁLISE DE DEFEITOS

A arte da *análise de defeitos* (identificação e correção) não está limitada somente a sistemas elétricos ou eletrônicos. Em um sentido mais amplo,

análise de defeitos é um processo no qual utilizamos conhecimentos e experiência para localizar um problema e sugerir ou implementar uma solução.

Mesmo o mais simples dos circuitos pode não operar corretamente por muitas razões. Pode haver uma conexão aberta; os instrumentos de medida podem precisar de calibração; a fonte de alimentação pode estar desligada ou ter sido ligada ao circuito de modo incorreto; um elemento pode não estar funcionando corretamente por causa de um dano anterior ou por ser de má qualidade; um fusível pode ter queimado, e assim por diante. Infelizmente, não existe uma sequência definida de passos que nos permita identificar a enorme variedade de problemas que podem aparecer em um sistema elétrico. Somente a experiência, aliada ao sólido conhecimento das leis básicas, pode ajudar uma pessoa a encontrar rapidamente a causa de um comportamento inadequado do sistema.

Entretanto, parece bastante óbvio que o primeiro passo para verificar o circuito ou identificar um problema é ter uma ideia das ordens de grandeza das tensões e das correntes que devem existir em todas as partes do circuito. Por exemplo, no circuito visto na Figura 6.62, a corrente deve ser da ordem de uns poucos miliampères, com a maior parte da tensão da bateria entre os terminais do resistor de $8\text{ k}\Omega$. No entanto, na mesma figura, vemos que $V_{R_1} = V_{R_2} = 0\text{ V}$ e que $V_a = 20\text{ V}$. Como $V = IR$, deduzimos imediatamente que $I = 0\text{ A}$ e que existe uma ruptura em alguma parte do circuito. O fato de $V_a = 20\text{ V}$ assegura que as ligações que vão de GND até a , passando pela fonte, estão em perfeito estado. Portanto, o circuito aberto tem de estar entre R_1 e R_2 , ou então na conexão em R_2 com GND. Um circuito aberto em um dos dois pontos resultaria em $I = 0\text{ A}$, e nas leituras registradas na figura. Tenha em mente que, embora tenhamos $I = 0\text{ A}$, R_1 constitui uma conexão entre a bateria e o ponto a . Ou seja, se $I = 0\text{ A}$, $V_{R_1} = IR_1 = (0)R_1 = 0\text{ V}$, que é o resultado obtido no caso de um curto-circuito.

Na Figura 6.62, se $V_{R_1} \cong 20\text{ V}$ e V_{R_2} for muito pequena ($\cong 0,08\text{ V}$, por exemplo), isso sugere que o circuito está

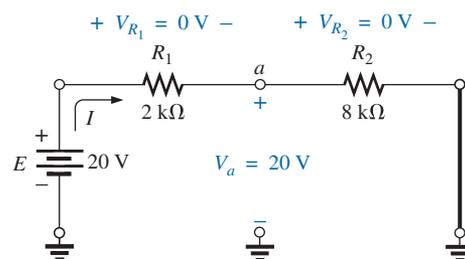


Figura 6.62 Circuito defeituoso.

completo, que é percorrido por uma corrente e existe algum problema relacionado ao resistor R_2 , que não está em curto-circuito, pois essa condição resultaria em $V_{R_2} = 0$ V. Uma verificação cuidadosa de R_2 pode nos mostrar, por exemplo, que um resistor de 8Ω foi usado na montagem, em vez do resistor especificado de $8 \text{ k}\Omega$; houve uma leitura incorreta do código de cores. Para evitar isto, um ohmímetro deve ser usado para confirmar a leitura do código de cores ou para garantir que o valor da resistência ainda esteja dentro da faixa determinada pelo código de cores.

Ocasionalmente, o problema poderá ser difícil de diagnosticar. Todos os componentes foram checados e todas as ligações parecem estar firmes. A fonte está ligada e ajustada no valor adequado; os medidores parecem estar funcionando corretamente. Nessas ocasiões, a experiência é fundamental. Talvez você se lembre, por exemplo, de que uma análise da ligação interna (que não é visível) de um resistor revelou anteriormente que essa ligação era do tipo fusível, ou ainda que esse mesmo resistor foi sujeito a uma sobrecarga de corrente em uma ocasião anterior, o que pode tê-lo danificado de modo que sua resistência real seja muito inferior àquela informada pelo código de cores. Verifique a fonte novamente! Embora a tensão de saída possa ter sido selecionada de modo correto, o botão de controle da corrente pode ter sido deixado na posição de corrente zero ou mínima. A ligação em GND é estável? A lista de dúvidas parece não ter fim. Entretanto, lembre-se do fato de que a experiência faz com que a identificação de problemas seja mais rápida. É claro que quanto mais complicado o sistema, maior a lista de possibilidades; mas, frequentemente, é possível identificar uma região do sistema na qual o comportamento indesejado ocorre antes de se efetuar o teste dos componentes individuais.

6.12 MONTAGENS EXPERIMENTAIS (PROTOBOARDS/BREADBOARDS)

Na Seção 5.12, a montagem experimental foi introduzida juntamente com as conexões para um circuito em série simples. Para continuar a montagem, o circuito na Figura 6.17 foi configurado na placa da Figura 6.63(a) usando-se duas técnicas diferentes. As possibilidades são infinitas, mas essas duas soluções usam uma abordagem relativamente direta.

Primeiro, observe que as linhas de suprimento e terra estão estabelecidas ao longo do comprimento da placa usando as zonas de condução horizontais na parte de cima e de baixo da placa através das conexões aos terminais. O circuito à esquerda na placa foi usado para configurar o circuito de maneira bastante parecida, aparecendo de maneira esquemática na Figura 6.63(b). Essa abordagem exigiu que os resistores fossem conectados entre duas faixas condutivas verticais. Se tivessem sido colocados de maneira perfeitamente vertical em uma única faixa condutiva, os resistores teriam entrado em curto-circuito. Frequentemente, configurar o circuito de maneira que ele copie da melhor forma possível o original pode tornar mais fácil sua checagem e medição. O circuito à direita na parte (a) usou as faixas condutivas verticais para conectar os resistores em cada extremidade. Tendo em vista que não havia espaço suficiente para os três, uma conexão teve de ser adicionada entre o conjunto vertical de cima e o conjunto de baixo. Os resistores estão em ordem, R_1 , R_2 e R_3 de cima para baixo. Para ambas as configurações, o ohmímetro pode ser conectado ao fio positivo do terminal fonte e do terminal terra ou negativo.

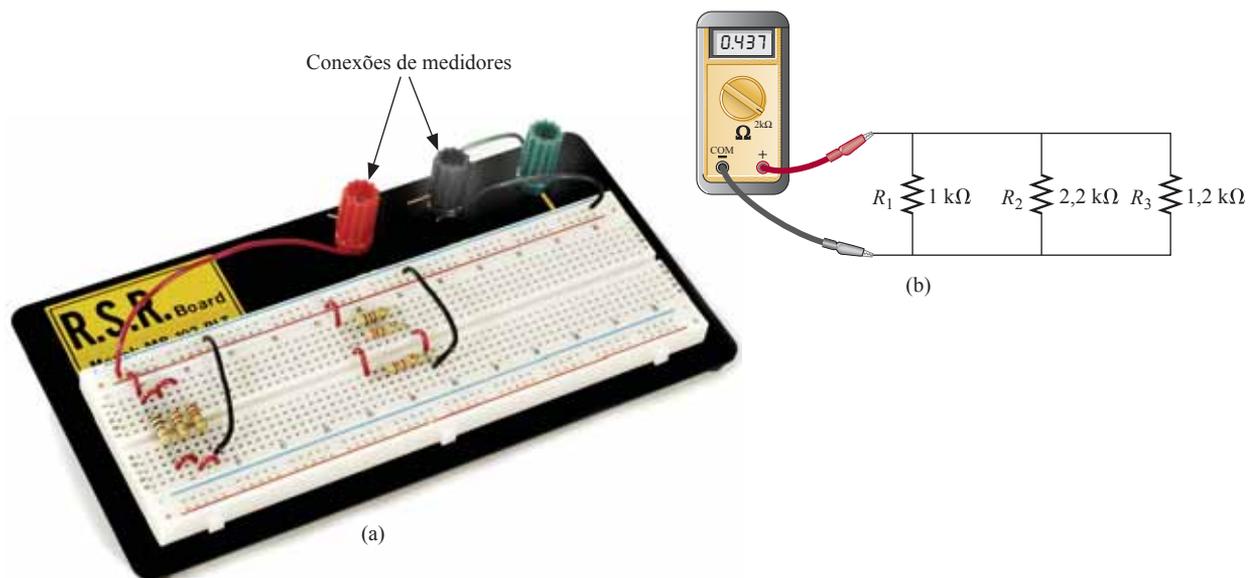


Figura 6.63 Uso de montagem experimental para configurar o circuito na Figura 6.17.

Faça uma pausa para analisar as conexões e pensar em outras possibilidades. Melhorias podem ser feitas com frequência, e pode ser gratificante descobrir a configuração mais eficiente com o menor número possível de fios de conexão.

6.13 APLICAÇÕES

Uma das vantagens mais importantes da configuração em paralelo é que:

se um ramo da configuração deixar de funcionar (circuito aberto), os ramos restantes ainda operarão plenamente.

Em uma casa, a conexão em paralelo é usada para assegurar que se um circuito tiver um problema e acionar seu disjuntor, os circuitos restantes ainda terão os 120 V inteiros. O mesmo vale para automóveis, sistemas de computador, plantas industriais e onde quer que seja desastroso ter um único circuito controlando a distribuição total de energia.

Outra vantagem importante é que

ramos podem ser adicionados a qualquer momento sem que isso afete o comportamento daqueles que já estão instalados.

Em outras palavras, diferentemente da conexão em série, em que um componente adicional reduz o nível de corrente e talvez afete a resposta de alguns dos componentes existentes, um ramo em paralelo adicional não

afetará o nível de corrente nos outros ramos. É claro que a demanda de corrente da fonte aumenta, como determina a lei de Kirchhoff para corrente, de maneira que você tem de estar ciente das limitações da fonte.

A seguir, algumas das aplicações mais comuns da configuração em paralelo.

Sistema automotivo

Na medida em que você começa a examinar o sistema elétrico de um automóvel, a questão mais importante a ser compreendida é que todo o sistema elétrico de um automóvel funciona como um *sistema CC*. Embora o gerador produza um sinal CA variante no tempo, um processo de retificação o converte em um sinal que tem um nível médio CC usado para carregar a bateria. Em particular, observe que o capacitor de filtro no ramo do alternador, que pode ser visto na Figura 6.64, amortecce a forma de onda CA de saída do retificador para produzir uma fonte de alimentação com uma característica CC melhorada. Portanto, a bateria com carga tem de fornecer a corrente contínua necessária para todo o sistema elétrico do automóvel. Assim, a potência demandada da bateria em qualquer instante corresponde ao produto da tensão nos terminais da bateria pela corrente drenada pela carga total representada por todos os sistemas em operação no automóvel. Isso certamente atribui à bateria uma enorme responsabilidade, e justifica todos os cuidados que devemos ter com ela.

Visto que o sistema elétrico de um automóvel é essencialmente um sistema em paralelo, a corrente total drenada da bateria é a soma das correntes de todos os ra-

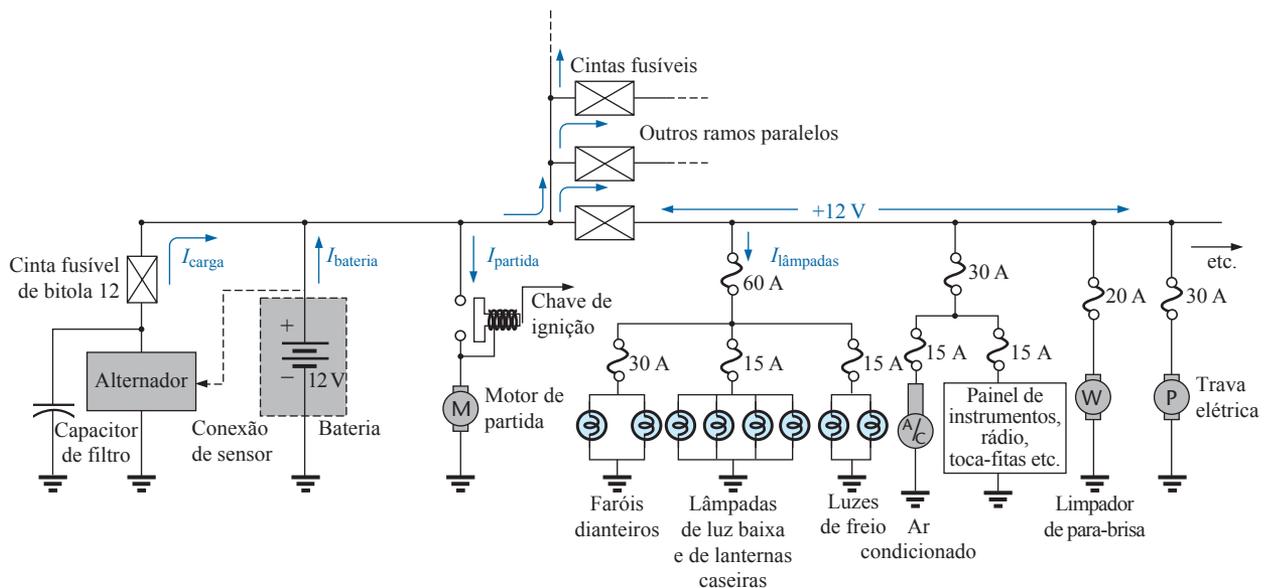


Figura 6.64 Vista expandida do sistema elétrico de um automóvel.

mos em paralelo conectados diretamente à bateria do automóvel. Na Figura 6.64, alguns ramos do diagrama elétrico de um carro foram esboçados para fornecer alguma informação sobre a instalação elétrica, os valores de correntes e a configuração dos fusíveis. Todos os automóveis têm fusíveis, e alguns também têm disjuntores para proteger os diversos componentes e para evitar riscos de incêndio. Exceto por alguns ramos, que podem ter elementos em série, a tensão de operação para a maioria dos componentes de um automóvel é a própria tensão da bateria, à qual atribuímos o valor de 12 V, ainda que, tipicamente, esse valor varie entre 12 e 14,6 V na operação de carregamento. Em outras palavras, todos os componentes têm um terminal conectado à bateria e o outro ao terra ou ao chassi.

Observando a Figura 6.64, vemos que o alternador, ou o ramo de carga do sistema, está conectado diretamente nos terminais da bateria para fornecer a corrente de carga, conforme indicado no diagrama. Uma vez que a partida no automóvel é dada, o rotor do alternador entrará em rotação, gerando uma tensão CA variante no tempo, a qual, por sua vez, passa por um circuito que contém um retificador e um filtro para fornecer uma tensão CC que carregue a bateria. Essa operação de carga acontece apenas quando o sensor, conectado diretamente à bateria, sinaliza que a tensão nos terminais da bateria está relativamente baixa. Situado à direita da bateria no diagrama, o ramo do motor de partida foi incluído para mostrar que não há fusível entre o motor de partida e a bateria quando a chave de ignição é ativada. A ausência de fusível nessa malha é devida às enormes correntes de partida (centenas de ampères) que fluem para dar partida em um automóvel que pode estar parado há dias e/ou pode estar em um ambiente de clima frio — e uma fricção mais intensa ocorre entre as partes móveis até que o óleo comece a circular. Os níveis de corrente de partida podem variar muito, de maneira que seria difícil especificar um fusível, sendo que correntes altas repetitivas poderiam danificar a cinta fusível, o que provocaria uma falha quando a corrente estivesse dentro do nível esperado. Quando a chave de ignição é ativada, o relé de partida completa o circuito entre a bateria e o motor de partida, e isso fará, espera-se, com que o automóvel seja ligado. Se a partida falhar, a primeira atitude deverá ser verificar as conexões da bateria, do relé de partida e do motor de partida para garantir que não surjam interrupções inesperadas nessas conexões devido a vibrações, corrosão ou umidade.

Uma vez que a partida do automóvel tenha ocorrido, o relé de partida abrirá e a bateria estará exclusivamente alimentando os componentes do automóvel. Embora o diagrama visto na Figura 6.64 não mostre o mecanismo de comutação, todo o circuito elétrico do automóvel, exceto nos casos de algumas lâmpadas externas importantes, é

geralmente desligado, de modo que a bateria possa se dedicar ao processo de partida. As lâmpadas foram incluídas nos casos em que um desligamento, ainda que seja por um intervalo de tempo curto, poderia gerar uma situação de perigo. Se o automóvel estiver em um ambiente seguro, é melhor deixar as lâmpadas apagadas no momento da partida para economizar a bateria, que teria uma corrente de 30 A a menos sendo drenada. Se as lâmpadas estiverem ligadas no momento da partida, pode-se esperar uma diminuição na intensidade luminosa devido à alta corrente drenada pelo motor de partida, que pode exceder a 500 A. Atualmente, as baterias são especificadas em corrente de arranque (partida) em vez de em ampères-horas. Baterias com especificações de corrente de 700 e 1.000 A para arranque a frio são comuns hoje em dia.

Os fusíveis, como o que é mostrado na Figura 6.65, separam o alternador da bateria e esta dos diversos circuitos do automóvel. Atualmente, eles são feitos com fios de bitola específica projetados para se abrirem de maneira correta com níveis de correntes de 100 A ou mais. Eles são incluídos para proteger o sistema naquelas situações em que uma corrente inesperada é drenada por diversos circuitos aos quais ele está conectado. Essa alta corrente drenada pode, é claro, ser proveniente de um curto-circuito em um dos ramos, mas nesses casos o fusível daquele ramo provavelmente resolveria o problema. O fusível é uma proteção adicional para a linha, caso a corrente total drenada pelos ramos conectados em paralelo exceda os níveis seguros. Os fusíveis têm a aparência mostrada na Figura 6.65(b), na qual o espaço entre os terminais do fusível indica um fusível queimado. Conforme mostra a Figura 6.64, o fusível de 60 A (frequentemente denominado *fusível de distribuição de potência*) para as lâmpadas é um fusível de segunda ordem para a corrente total drenada pelos circuitos das lâmpadas. Finalmente, o fusível de terceira ordem serve para as unidades individuais do automóvel como lâmpadas, ar condicionado e trava elétrica. Em cada caso, a especificação do fusível excede a carga

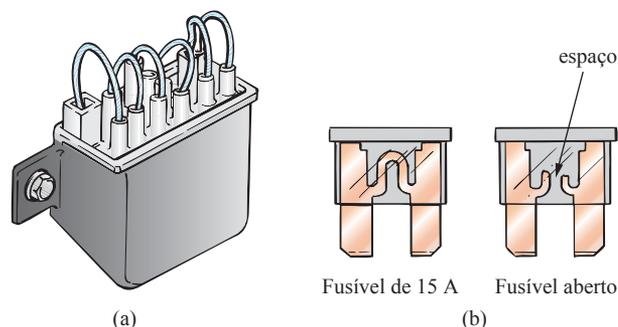


Figura 6.65 Fusíveis para automóveis: (a) cinta fusível; (b) fusível de encaixe.

normal (valor de corrente) de operação do componente, mas o valor de cada fusível nos dá alguma indicação da demanda esperada em condições normais de operação. Por exemplo, os faróis dianteiros drenam tipicamente mais de 10 A, as lanternas traseiras drenam mais de 5 A, o ar condicionado drena cerca de 10 A (quando o engate estiver acionado) e os acionadores elétricos dos vidros drenam de 10 a 20 A, dependendo de quantos dispositivos acionadores são operados de uma só vez.

A Figura 6.64 fornece alguns detalhes apenas para uma parte do circuito total de um automóvel. Na mesma figura, ramos paralelos adicionais, com seus respectivos fusíveis, foram indicados para que posteriormente sejam apresentadas as configurações em paralelo de todos os circuitos.

Na maioria dos veículos, o caminho de retorno para a bateria através da conexão de terra é, na realidade, através do chassi do carro. Ou seja, existe apenas um fio para cada carga elétrica, sendo a outra extremidade simplesmente aterrada no chassi. O retorno para a bateria (conexão do chassi com o terminal negativo) é, portanto, um fio de grande bitola igual ao que é conectado ao terminal positivo. Em alguns carros construídos com uma mistura de materiais como metal, plástico e borracha, o caminho de retorno através do chassi metálico passa a ser inadequado, sendo que dois fios têm de ser conectados em cada carga elétrica do veículo.

Instalação elétrica residencial

No Capítulo 4, os valores básicos de potência relevantes foram discutidos para diversos valores de demanda de uma residência. Agora, estamos prontos para dar o próximo passo e analisar as conexões reais dos elementos em uma residência.

Primeiro, é importante saber que, exceto em algumas circunstâncias muito especiais, a instalação elétrica básica é feita em uma configuração em paralelo. Entretanto, cada ramo em paralelo pode ter uma combinação de elementos em paralelo e em série. Cada ramo completo do circuito recebe 120 ou 208 V, sendo a corrente determinada pela carga. A Figura 6.66(a) fornece os detalhes da instalação elétrica de um circuito simples contendo uma lâmpada incandescente e duas tomadas. A Figura 6.66(b) mostra a representação esquemática. Primeiramente, observe que, embora cada carga esteja em paralelo com a rede elétrica, as chaves são sempre conectadas em série com a carga. A potência é transmitida à lâmpada apenas quando a chave estiver fechada e os 120 V aparecem nos terminais do bulbo. O ponto de conexão para as duas tomadas passa pela caixa situada no teto, que sustenta a lâmpada. Como não existe uma chave para as tomadas, elas estão sempre ‘quentes’ (energizadas), a menos que o disjuntor do cir-

cuito no painel principal esteja desligado. É importante entender isso porque você pode se sentir tentado a trocar a luminária simplesmente desligando o interruptor na parede. É verdade que, se você for muito cuidadoso, pode trabalhar com uma fase de cada vez (tendo a certeza de que não a encostará em outra fase em nenhum momento), mas o procedimento padrão é desligar o disjuntor no painel sempre que for trabalhar no circuito. Observe na Figura 6.66(a) que o fio de *alimentação* (preto) na instalação, no painel, está conectado a um dos lados da chave e das duas tomadas. Esse fio não está conectado diretamente na luminária, pois isso a manteria ligada todo o tempo. A energização da lâmpada é feita por meio do interruptor. A conexão direta, do painel até as tomadas, garante que elas estejam sempre energizadas, caso o disjuntor no painel esteja ligado. Observe também como o fio de *retorno* (branco) está conectado diretamente ao interruptor da lâmpada e às tomadas para proporcionar um retorno para cada componente. Não há necessidade de o fio branco passar pela chave, já que uma tensão aplicada é uma conexão de dois pontos e o fio preto é controlado por uma chave.

O aterramento adequado do sistema como um todo e das cargas individuais é um dos mais importantes aspectos na instalação de qualquer sistema. Às vezes, há uma tendência a estarmos mais satisfeitos com o funcionamento do sistema e dedicarmos atenção menor às técnicas adequadas de aterramento. Tenha sempre em mente que um sistema de aterramento adequado tem um caminho direto para a terra (solo), caso uma situação indesejada ocorra. A ausência de uma conexão direta para a terra faz com que o sistema determine seu próprio caminho para a terra, e você pode ser esse caminho, caso encoste em algo energizado como um fio, uma caixa metálica, um cano metálico, entre outros. Na Figura 6.66(a), as conexões para os fios terra foram incluídas. Em vez de um fio com cobertura plástica, usado na Figura 6.66(a), o fio terra é fornecido como um fio de cobre desencapado. Observe que ele está conectado ao painel, que por sua vez está conectado diretamente a uma haste de cobre de aproximadamente 2,44 m enterrada no solo. Além disso, observe que a conexão de terra é distribuída por todo o circuito, incluindo o interruptor, a luminária da lâmpada e as tomadas. Essa é uma conexão contínua. Se a caixa da tomada, a caixa do interruptor e a luminária forem feitas de materiais como metal, o fio terra tem de ser conectado em cada um. Caso sejam de material plástico, não há a necessidade de conexão ao terra. Entretanto, o interruptor, as duas tomadas e a luminária possuem conexões próprias para terra. No caso do interruptor e das tomadas, existe um parafuso verde do fio terra que é conectado em toda a armação do interruptor e das tomadas, conforme mostra a Figura 6.67, que apresenta a conexão de terra de uma tomada. Para ambos, interruptor e tomada,

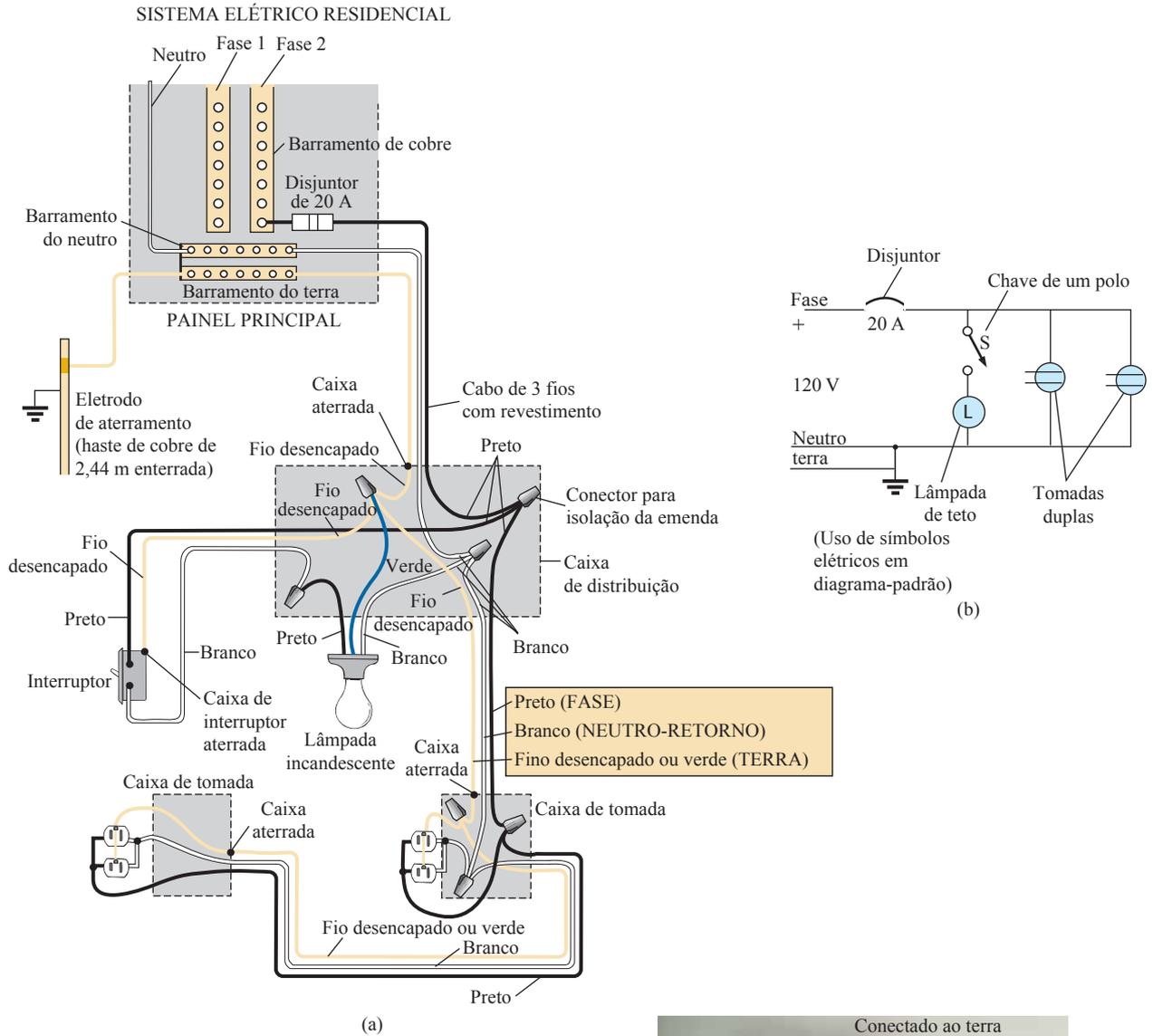


Figura 6.66 Instalação elétrica residencial que usa uma única fase: (a) detalhes físicos; (b) representação esquemática.

mesmo o parafuso no corpo metálico ou os parafusos usados para fixar a placa exterior no local estarão aterrados, já que eles são aparafusados na caixa de metal do interruptor e da tomada. Quando a conexão de terra é aparafusada na caixa de metal, é possível realizá-la usando-se os parafusos de fixação do interruptor ou da tomada na caixa, conforme mostra a Figura 6.67. *Em todo caso, preste atenção especial no processo de aterramento sempre que for instalar qualquer equipamento elétrico.*

Do ponto de vista prático, sempre que fixar um fio em um terminal do tipo parafuso, envolva o fio no sentido horário em torno do parafuso, de modo que, quando apertar o parafuso, ele agarre o fio em torno dele no mesmo

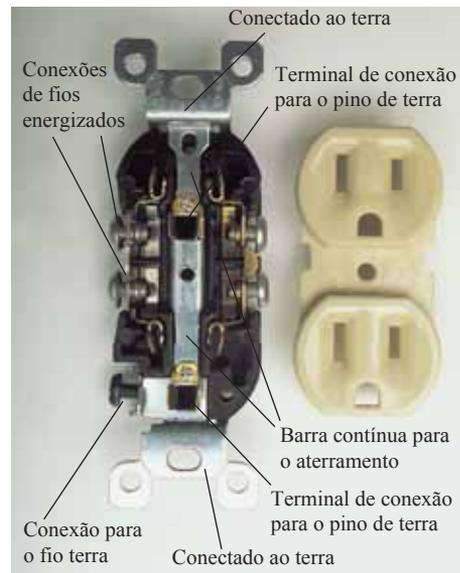


Figura 6.67 Conexões contínuas de terra em uma tomada dupla.

sentido. Uma análise mais detalhada de uma instalação elétrica residencial típica aparece no Capítulo 15.

Conexões em paralelo de barramentos de computadores

A construção interna (hardware) de grandes computadores mainframe e modelos de computador pessoais se baseiam na possibilidade da inclusão de placas de interface em slots como os que são mostrados na Figura 6.68(a). A placa principal (geralmente, a maior das placas), normalmente chamada de *placa-mãe*, contém a maioria das funções necessárias para a operação de um computador completo. As placas de interface são habitualmente acrescentadas com a finalidade de expandir a capacidade de memória, possibilitar a conexão de rede, acrescentar equipamentos periféricos, entre outras. Por exemplo, caso

se decida incluir um modem no computador, pode-se simplesmente inserir a placa de modem no conector adequado visto na Figura 6.68(a). Os conectores de barramento são conectados em paralelo tendo conexões comuns com a fonte de alimentação, com os barramentos de dados e endereço, com os sinais de controle, com o GND, entre outros. Por exemplo, se a conexão inferior de cada conector de barramento for uma conexão GND, essa conexão será distribuída através de cada conector de barramento e imediatamente conectada em toda placa de interface instalada. Cada placa de interface tem um conector que se ajusta diretamente ao conector do barramento sem que haja a necessidade de qualquer soldagem ou montagem. Os pinos da placa de interface são projetados para fornecer um caminho entre a placa-mãe e seus componentes para desempenhar a função desejada. Observe na Figura

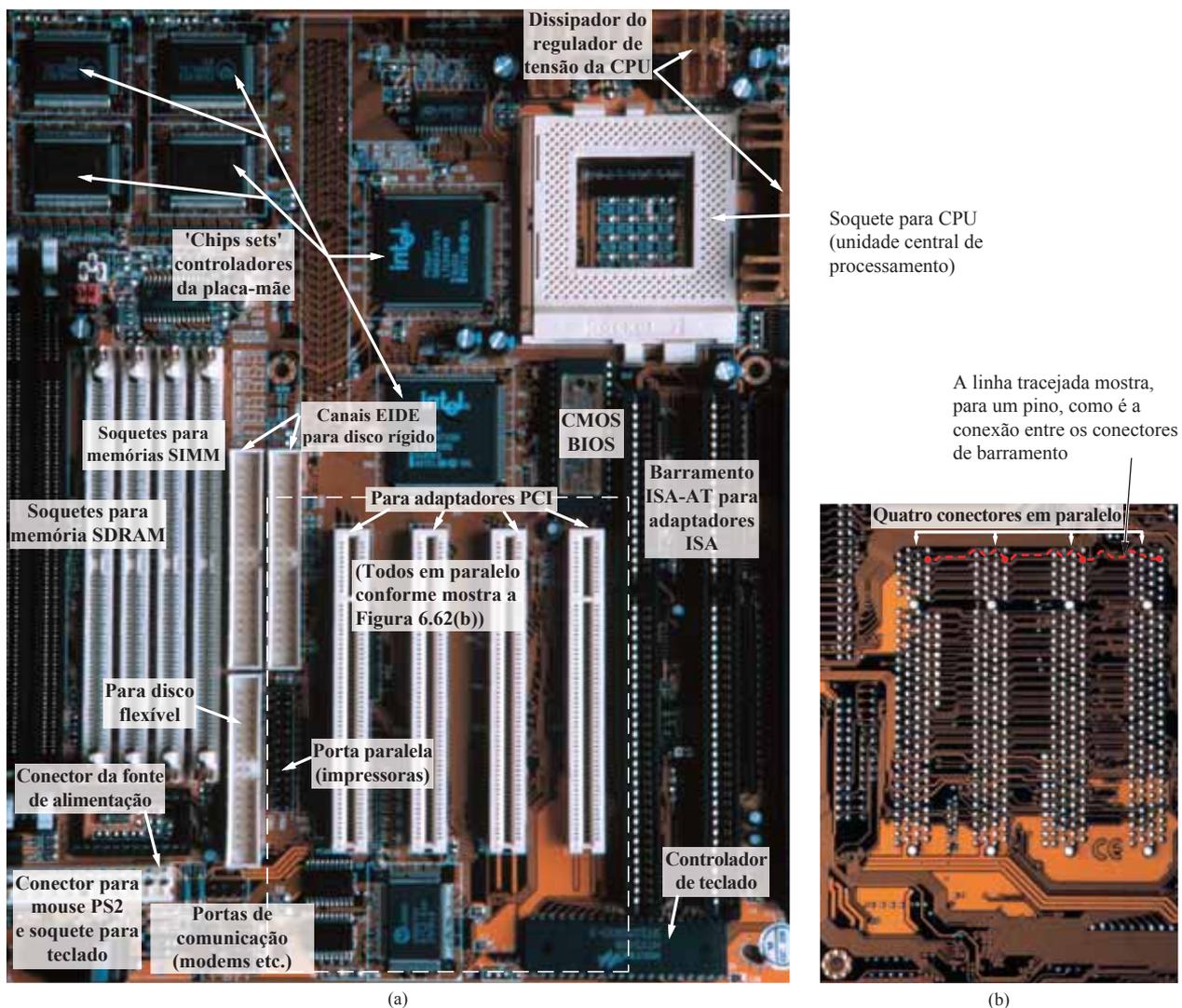


Figura 6.68 (a) Placa-mãe de um computador de mesa; (b) conexões da placa de circuito impresso para a região indicada no item (a).

6.68(b), que é uma vista posterior da região indicada na Figura 6.68(a), que se for seguida a trilha do segundo pino de cima para baixo na extrema esquerda, será possível ver que ele está conectado ao mesmo pino nos outros três conectores.

Atualmente, a maioria dos computadores laptop pequenos vem com todas as opções já instaladas, evitando assim a necessidade de conectores de barramento. Memórias extras e outras atualizações de hardware são inseridas diretamente na placa-mãe.

6.14 ANÁLISE COMPUTACIONAL

PSpice

Circuitos CC em paralelo. A análise computacional dedicada aos circuitos CC em paralelo é muito similar à análise CC dos circuitos em série. Entretanto, nesse caso, a tensão é a mesma sobre todos os elementos em paralelo, e o valor da corrente através de cada ramo depende do valor da resistência. O circuito em paralelo a ser analisado tem valores de resistores em uma ampla faixa para demonstrar os efeitos nos valores resultantes de corrente. A seguir, é mostrada uma lista de abreviações para qualquer parâmetro de um circuito quando se usa o PSpice:

- f** = 10^{-15}
- p** = 10^{-12}
- n** = 10^{-9}
- u** = 10^{-6}
- m** = 10^{-3}
- k** = 10^{+3}
- MEG** = 10^{+6}
- G** = 10^{+9}
- T** = 10^{+12}

Em particular, observe que **m** (ou **M**) é usado para mili, e **MEG** para megohms. Observe também que o PSpice não faz distinção entre unidades maiúsculas e minúsculas, porém determinados parâmetros usam normalmente abreviações das duas maneiras, conforme mencionado antes.

Como os detalhes da implementação de um circuito e de seu processo de simulação foram abordados com profundidade nas seções 4.9 e 5.14 para circuitos CC, a abordagem feita agora está limitada somente aos diversos passos necessários. Esses passos devem se tornar óbvios após alguma experiência, chegando ao ponto em que o ‘desenho’ do circuito e sua simulação sejam realizados de forma rápida e direta.

Após selecionar o botão **Create document** (na parte superior da tela), a seguinte sequência abre a janela **Schematic: PSpice 6-1-OK-Create a blank Project-OK-PAGE1** (caso necessário).

A fonte de tensão e os resistores são introduzidos conforme descrito em detalhes nas seções mencionadas anteriormente, porém, agora é preciso girar os resistores 90°. Pode-se realizar isso clicando com o botão direito do mouse antes de fixar o resistor no local desejado. A longa lista de opções resultantes inclui **Rotate** que, ao ser selecionado, faz com que o resistor gire 90° no sentido anti-horário. Ele também pode ser girado ao se acionar simultaneamente as teclas **Ctrl-R**. O resistor pode, então, ser colocado na posição através de um clique com o botão esquerdo do mouse. Um benefício adicional dessa tática é que os resistores restantes a serem colocados já estarão na posição vertical. Os valores atribuídos à fonte de tensão e aos resistores aparecem na Figura 6.69.

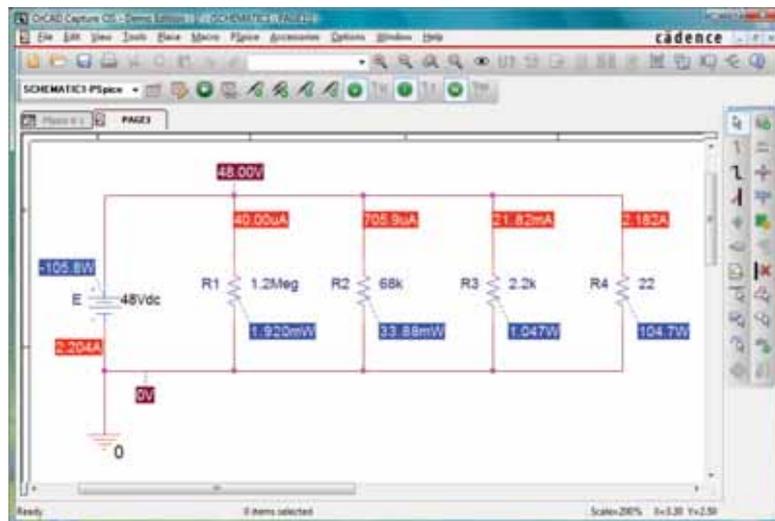


Figura 6.69 Uso do PSpice na simulação de um circuito em paralelo.

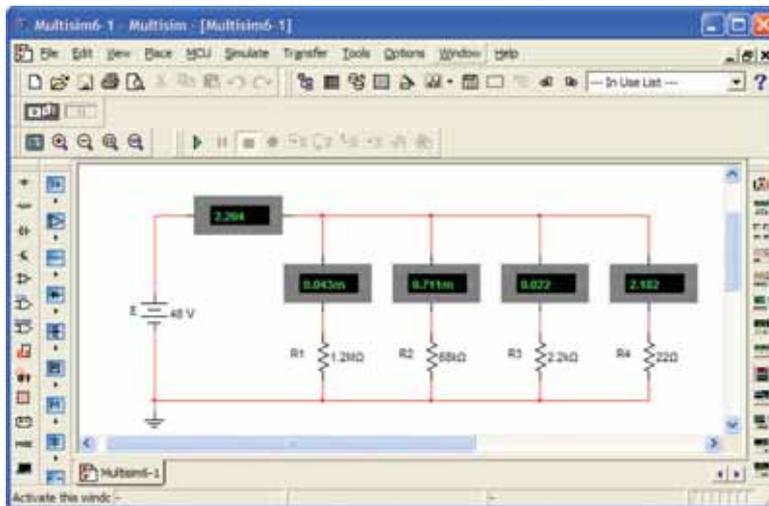


Figura 6.70 Uso dos indicadores do Multisim para mostrar as correntes em um circuito paralelo.

Uma vez que o circuito esteja completo, a simulação e os resultados vistos na Figura 6.69 podem ser obtidos por meio da seguinte seqüência: **Select New Simulation Profile** botão-**Bias Point>Create-Analysis-Bias Point-OK-Run PSpice key-Exit(X)**.

Os resultados mostrados na Figura 6.69 revelam claramente que as tensões sobre todos os elementos em paralelo são iguais, e que os valores de corrente aumentam significativamente com a diminuição nos valores das resistências. A faixa de valores dos resistores sugere, por inspeção, que a resistência total é menor que a menor das resistências, cujo valor é 22Ω . Usando-se a lei de Ohm e a corrente de $2,204 \text{ A}$ fornecida pela fonte obtemos a resistência total $R_T = E/I_s = 48 \text{ V}/2,204 \text{ A} = 21,78 \Omega$, conforme a conclusão anteriormente citada.

Multisim

Circuitos CC paralelos. Para fins de comparação, o circuito em paralelo, mostrado na Figura 6.69, será analisado agora usando-se o Multisim. A fonte de alimentação e o GND são selecionados e colocados conforme mostra a Figura 6.70, usando-se os procedimentos utilizados em capítulos anteriores. No caso dos resistores, foi escolhido o símbolo de resistor na lista **BASIC toolbar**, no entanto, eles devem ser girados 90° para ficarem iguais à configuração vista na Figura 6.69. Pode-se fazer isso clicando primeiro no símbolo do resistor para colocá-lo no estado ativo. (Certifique-se de que os pequenos quadrados pretos apareçam em torno do símbolo, rótulo e valor; caso contrário, pode-se ter ativado apenas o rótulo ou o valor.) Em seguida, clique com o botão direito do mouse. A opção **90° Clockwise** pode então ser selecionada, fazendo com que o resistor gire automaticamente. Infelizmente, não há uma

continuidade no comando, de modo que o próximo resistor terá de ser girado usando-se o mesmo procedimento. Os valores de cada resistor são estabelecidos por meio de um duplo clique no símbolo do resistor, obtendo-se a caixa de diálogo. Lembre-se de que a unidade de medida é controlada pelos botões de rolagem à direita dela. No caso do Multisim, diferentemente do PSpice, a letra maiúscula **M** é usada para megohm e a letra minúscula **m** é usada para miliohm.

Agora, em vez de usar o medidor completo empregado nas medidas anteriores, usaremos as opções de medida disponíveis na **Virtual toolbar** (também chamada de **BASIC toolbar**). Se ela não estiver prontamente disponível, a barra de ferramentas pode ser obtida através da seqüência **View-Toolbars-Virtual**. Se a tecla na barra de ferramentas que parece com um pequeno medidor (**Show Measurement Family**) for escolhida, ela vai apresentar quatro opções para o uso de um amperímetro, quatro para um voltímetro e cinco sondas. As quatro escolhas para um amperímetro simplesmente estabelecem a posição e localização dos conectores positivos e negativos. A opção **Place Ammeter (Horizontal)** estabelece o amperímetro na posição horizontal, como mostra a Figura 6.70, no topo à esquerda do diagrama com o sinal de mais à esquerda e o sinal de menos à direita — a mesma polaridade que seria obtida, caso a corrente através de um resistor na mesma posição fosse da esquerda para a direita. A escolha de **Place Ammeter (Vertical)** resultará nos amperímetros nas seções verticais do circuito com a conexão positiva no topo e a conexão negativa na parte de baixo, como mostra a Figura 6.70 para os quatro ramos. Se você escolher **Place Ammeter (Horizontally related)** para a corrente fornecida pela fonte, isso simplesmente reverterá as posições

dos sinais positivos e negativos e fornecerá uma resposta negativa para a leitura. Se **Place Ammeter (Vertically rotated)** fosse escolhido para os ramos verticais, as leituras seriam corretas, mas teriam os sinais negativos. Uma vez que todos os elementos estejam no lugar e seus valores tenham sido estabelecidos, inicie a simulação com a sequência **Simulate-Run**. Serão obtidos os resultados mostrados na Figura 6.70.

Observe que todos os resultados aparecem dentro das caixas dos indicadores. Os resultados são todos positivos porque os amperímetros foram posicionados em uma configuração em que a corrente, no sentido convencional, entra no lado positivo. Observe também que, assim como fizemos com os amperímetros, os indicadores foram colocados em série com o ramo no qual a corrente deveria ser medida.

PROBLEMAS

Seção 6.2 Resistores em paralelo

1. Para cada configuração na Figura 6.71, descubra as fontes de tensão e/ou elementos resistores (elementos individuais, não combinações de elementos) que estão em paralelo. Lembre-se de que os elementos em paralelo têm a mesma tensão.
2. Para o circuito na Figura 6.72:
 - a) descubra os elementos (fontes de tensão e/ou resistores) que estão em paralelo;
 - b) descubra os elementos (fontes de tensão e/ou resistores) que estão em série.
3. Descubra a resistência total para cada configuração na Figura 6.73. Observe que apenas resistores de valor-padrão foram usados.
4. Para cada placa de circuito na Figura 6.74, descubra a resistência total entre as projeções 1 e 2.
5. A resistência total de cada uma das configurações na Figura 6.75 foi especificada. Descubra a resistência desconhecida.

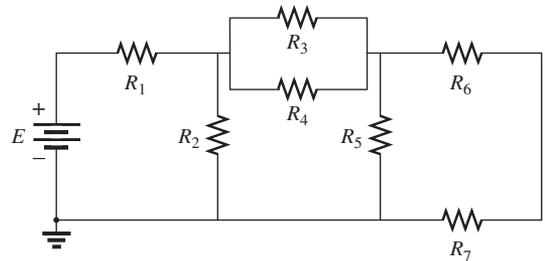


Figura 6.72 Problema 2.

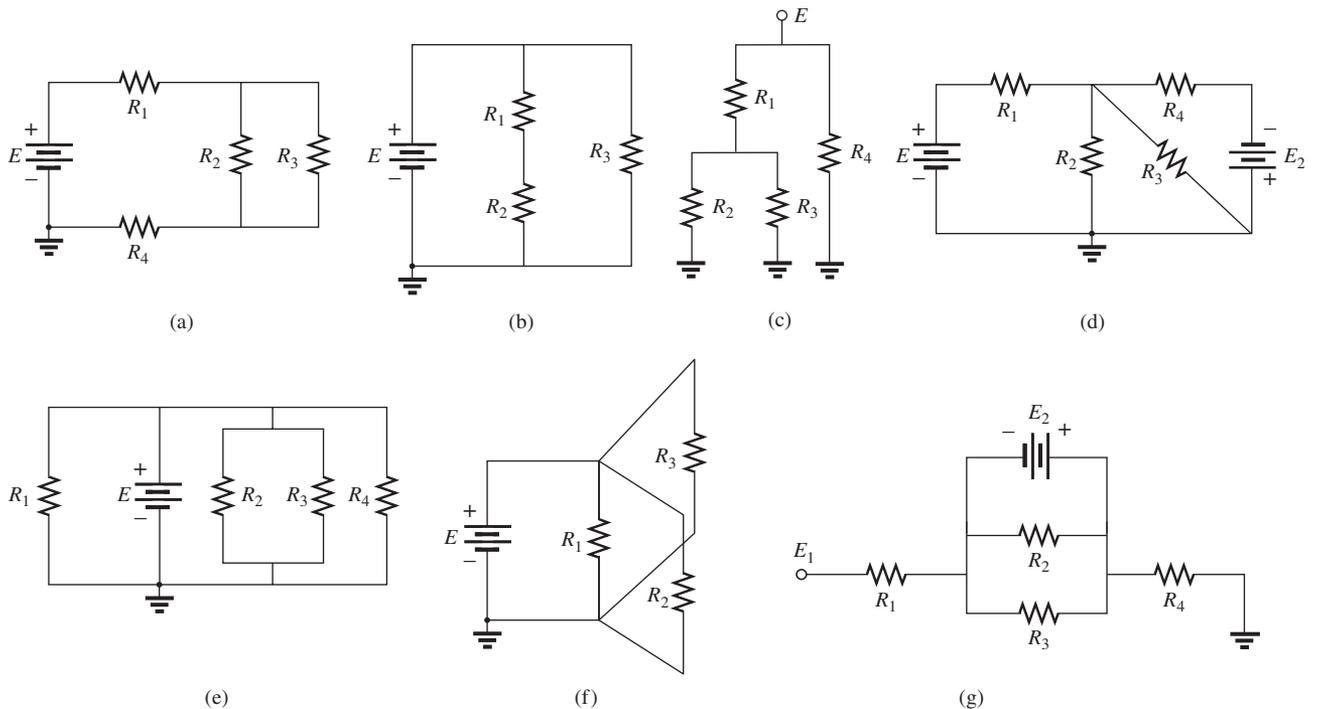


Figura 6.71 Problema 1.

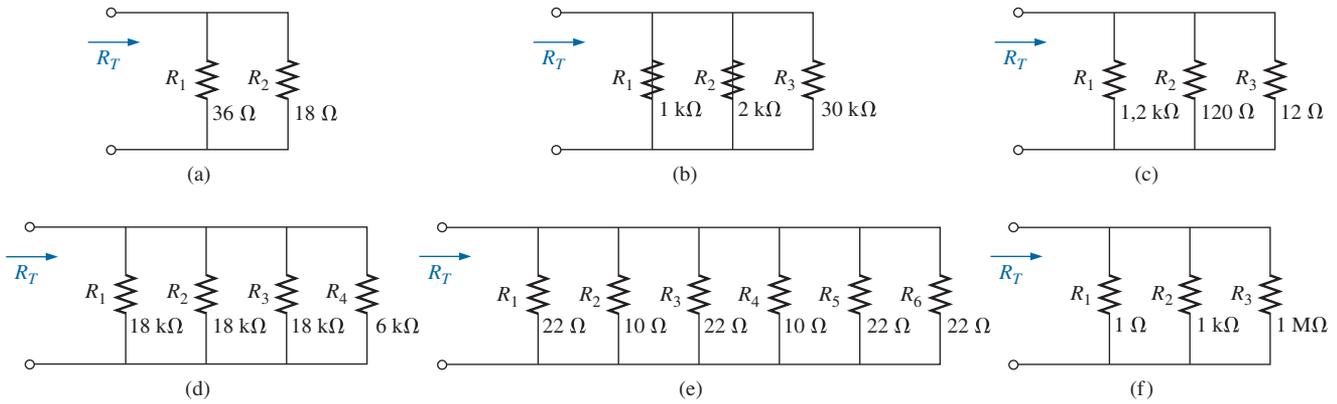


Figura 6.73 Problema 3.

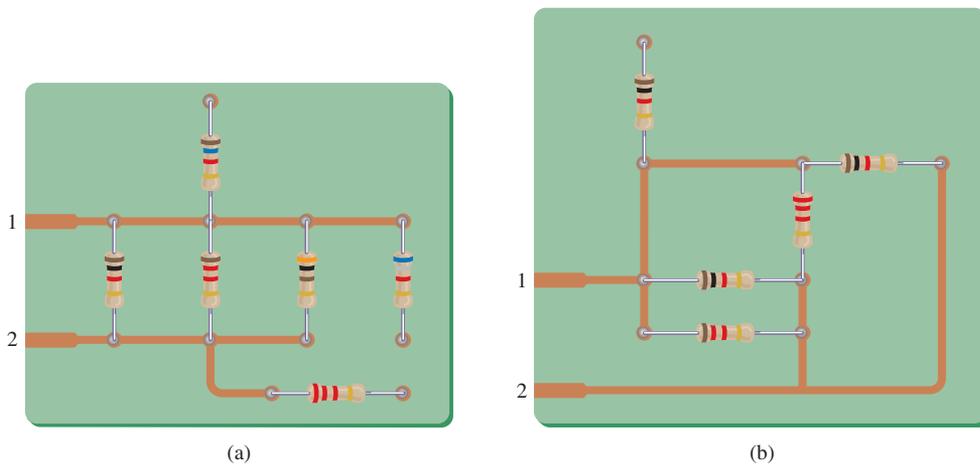


Figura 6.74 Problema 4.

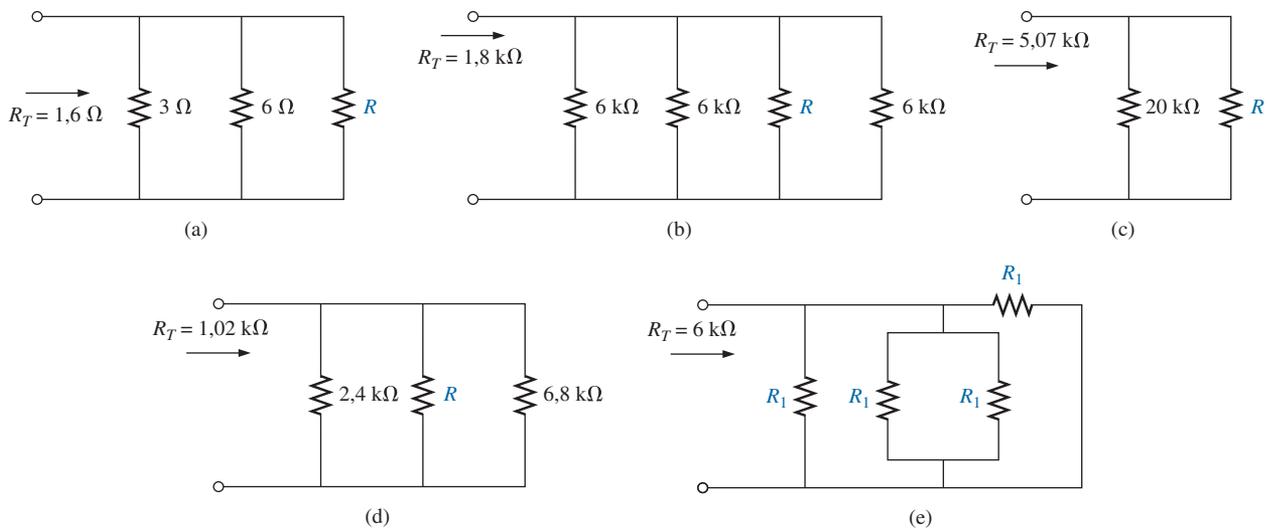


Figura 6.75 Problema 5.

6. Para o circuito em paralelo na Figura 6.76, composto de valores-padrão, responda:
- Qual resistor tem o maior impacto sobre a resistência total?
 - Sem que nenhum cálculo seja feito, qual é o valor aproximado para a resistência total?
 - Calcule a resistência total e comente sua resposta para a parte (b).
 - Em uma base aproximada, quais resistores podem ser ignorados ao se determinar a resistência total?
 - Se adicionarmos outro resistor em paralelo de qualquer valor ao circuito, qual será o impacto sobre a resistência total?
7. Qual é a leitura do ohmímetro para cada configuração na Figura 6.77?
- *8. Determine R_1 para o circuito na Figura 6.78.

Seção 6.3 Circuitos em paralelo

9. Para o circuito em paralelo na Figura 6.79, responda:
- Descubra a resistência total.
 - Qual é a tensão através de cada ramo?
 - Determine a corrente fornecida pela fonte e a corrente através de cada ramo.
 - Certifique-se de que a corrente fornecida pela fonte seja igual à soma das correntes dos ramos.
10. Para o circuito da Figura 6.80, faça o que se pede:
- Descubra a corrente através de cada ramo.
 - Descubra a resistência total.
 - Calcule I_s usando o resultado da parte (b).
 - Descubra a corrente fornecida pela fonte usando o resultado da parte (a).
 - Compare os resultados das partes (c) e (d).
11. Repita a análise do Problema 10 para o circuito na Figura 6.81, construído a partir de valores padronizados de resistores.

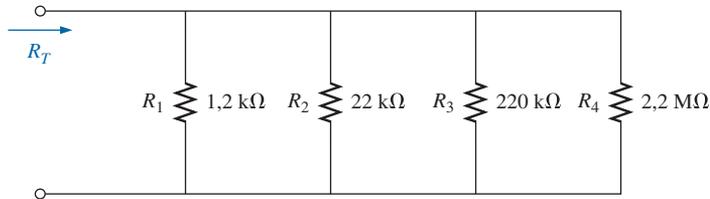


Figura 6.76 Problema 6.

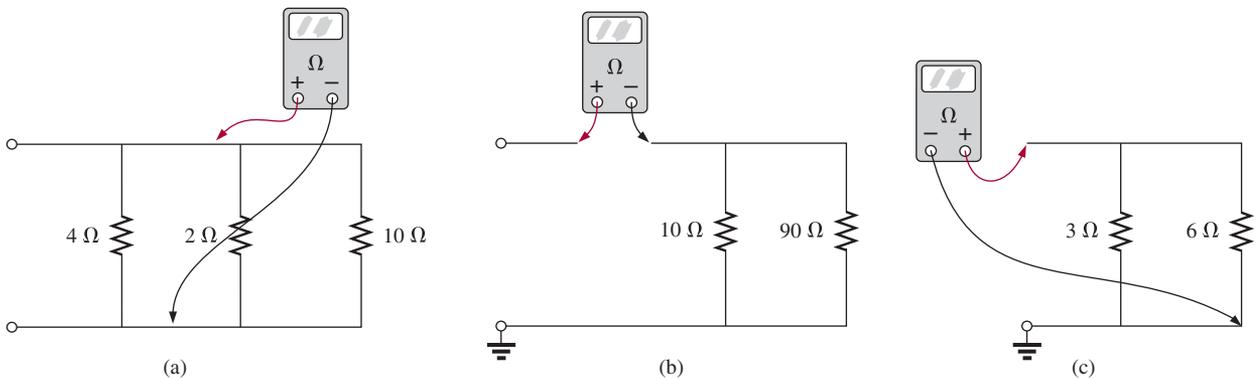


Figura 6.77 Problema 7.

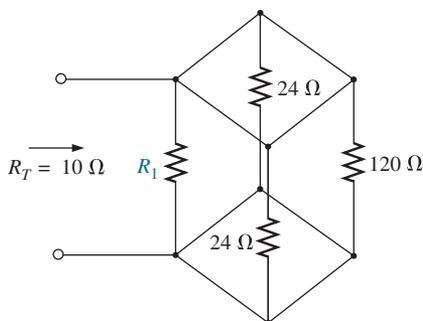


Figura 6.78 Problema 8.

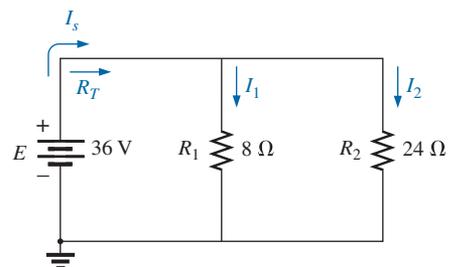


Figura 6.79 Problema 9.

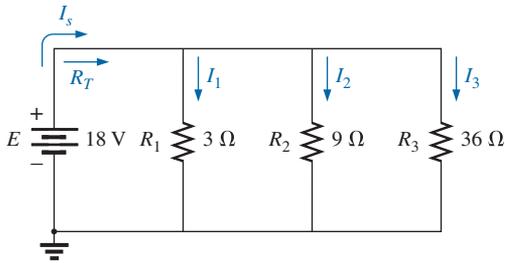


Figura 6.80 Problema 10.

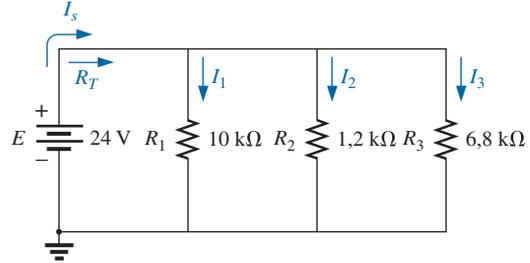


Figura 6.81 Problema 11.

12. Para o circuito em paralelo na Figura 6.82, faça o que se pede:
- Sem que um único cálculo seja feito, adivinhe a resistência total.
 - Calcule a resistência total e a compare com seu palpite na parte (a).
 - Sem que um único cálculo seja feito, qual ramo terá mais corrente? Qual terá a menor?
 - Calcule a corrente através de cada ramo, e compare seus resultados com os pressupostos da parte (c).
 - Descubra a corrente fornecida pela fonte e teste se ela se iguala à soma das correntes dos ramos.
 - Como o valor absoluto da corrente fornecida pela fonte se compara àquele das correntes dos ramos?
13. Dadas as informações fornecidas pela Figura 6.83, descubra:
- a resistência R_2 ;
 - a tensão de alimentação E .
14. Use a informação dada pela Figura 6.84 para calcular:
- a tensão de alimentação E ;
 - a resistência R_2 ;
 - a corrente I_1 ;
 - a corrente fornecida pela fonte;
 - a potência fornecida pela fonte;
 - a potência fornecida aos resistores R_1 e R_2 ;
 - compare a potência calculada na parte (e) à soma da potência fornecida a todos os resistores.
15. Dadas as informações fornecidas pela Figura 6.85, descubra os valores desconhecidos: E , R_1 e I_3 .
16. Para o circuito da Figura 6.86, descubra:
- a tensão V ;
 - a corrente I_2 ;
 - a corrente I_3 ;
 - a potência para o resistor de 12 kΩ.
17. Usando as informações fornecidas pela Figura 6.87, descubra:
- a resistência R_2 ;
 - a resistência R_3 ;
 - a corrente I_3 .
18. Para o circuito na Figura 6.81:
- redesene o circuito e insira amperímetros para medir a fonte da corrente e a corrente através de cada ramo;
 - conecte um voltímetro para medir a fonte de tensão e a tensão através do resistor R_3 . Há alguma diferença nas conexões? Por quê?

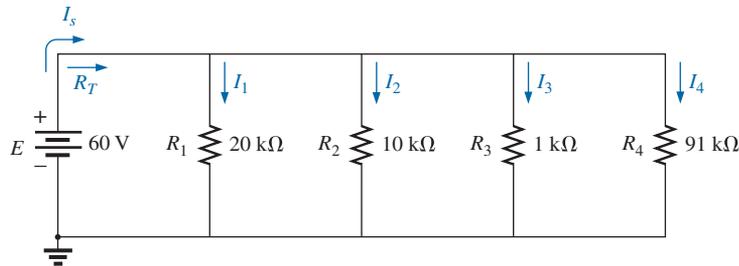


Figura 6.82 Problema 12.

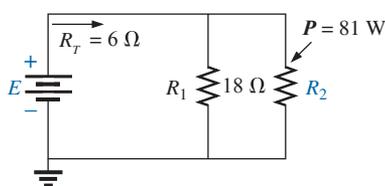


Figura 6.83 Problema 13.

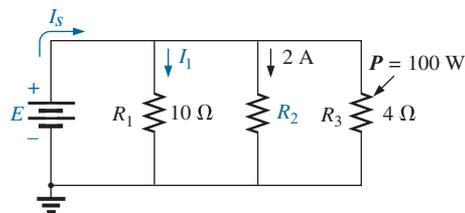


Figura 6.84 Problema 14.

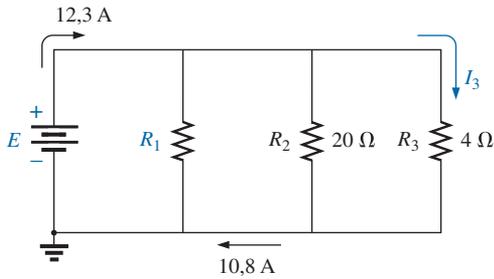


Figura 6.85 Problema 15.

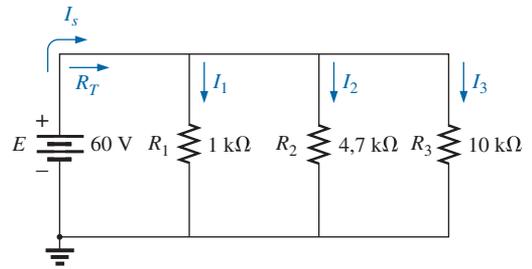


Figura 6.88 Problema 19.

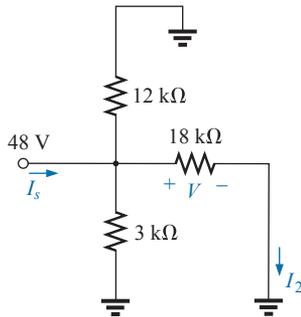


Figura 6.86 Problema 16.

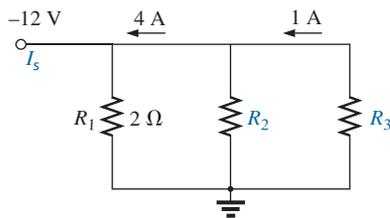


Figura 6.87 Problema 17.

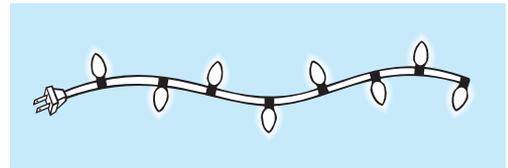


Figura 6.89 Problema 20.

Seção 6.4 Distribuição de potência em um circuito em paralelo

19. Para a configuração na Figura 6.88:
 - a) descubra a resistência total e a corrente através de cada ramo;
 - b) descubra a resistência fornecida a cada resistor;
 - c) calcule a potência fornecida pela fonte;
 - d) compare a potência fornecida pela fonte à soma das potências fornecidas aos resistores;
 - e) qual resistor recebeu mais potência? Por quê?
20. Oito lâmpadas para árvore de Natal estão conectadas em paralelo, conforme mostra a Figura 6.89.
 - a) Se o conjunto for conectado a uma fonte de 120 V, qual será a corrente através de cada lâmpada se cada uma tiver uma resistência interna de 1,8 kΩ?
 - b) Determine a resistência total do circuito.
 - c) Descubra a corrente drenada da fonte.
 - d) Determine a potência consumida por cada lâmpada.
 - e) Usando os resultados da parte (d), descubra a potência fornecida pela fonte.

- f) Se uma das lâmpadas queimar (ou seja, se o filamento se romper), que efeito isso terá sobre as lâmpadas restantes? Qual é o efeito sobre a corrente fornecida pela fonte? Por quê?
21. Determine a potência fornecida pela bateria CC na Figura 6.90.
 22. Uma parte do sistema elétrico de uma residência está desenhada na Figura 6.91.
 - a) Determine a corrente através de cada ramo em paralelo do circuito.
 - b) Calcule a corrente drenada da fonte de 120 V. O disjuntor de 20 A será acionado?
 - c) Qual a resistência total do circuito?
 - d) Determine a potência fornecida pela fonte. Como ela se compara à soma das especificações de potência que aparecem na Figura 6.91?
 - *23. Para o circuito na Figura 6.92:
 - a) descubra a corrente I_1 ;
 - b) calcule a potência dissipada pelo resistor de 4 Ω;
 - c) descubra a corrente I_2 .

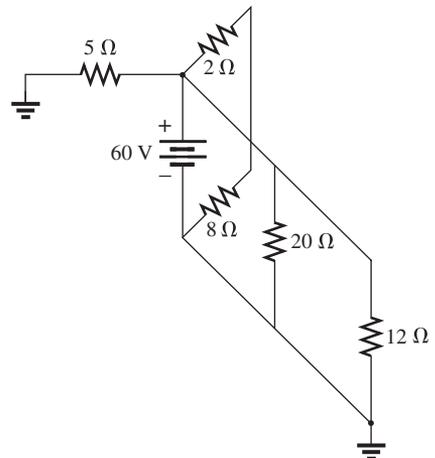


Figura 6.90 Problema 21.

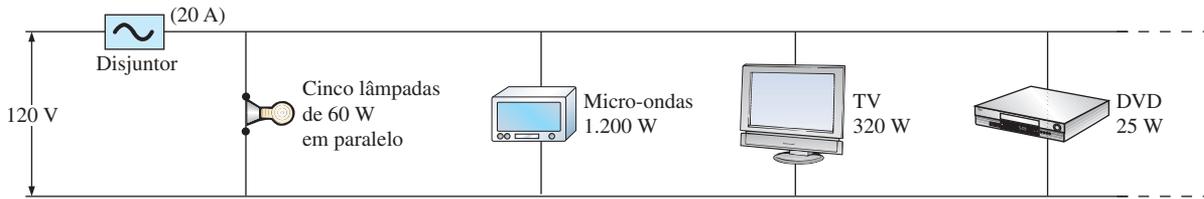


Figura 6.91 Problema 22.

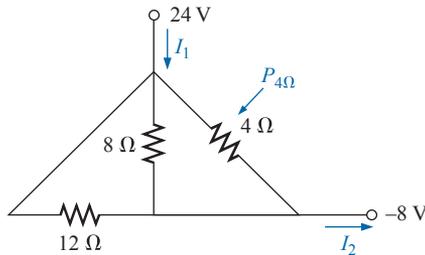


Figura 6.92 Problema 23.

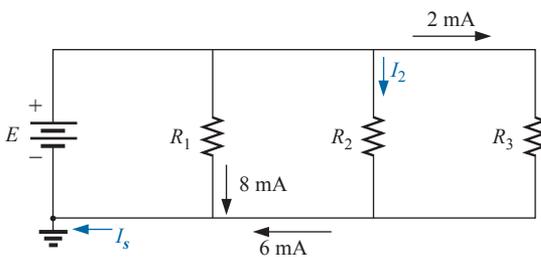


Figura 6.93 Problema 24.

Seção 6.5 Lei de Kirchhoff para corrente

24. Usando a lei de Kirchhoff para corrente, determine as correntes desconhecidas para o circuito em paralelo na Figura 6.93.
25. Usando a lei de Kirchhoff para corrente, descubra as correntes desconhecidas para as configurações complexas na Figura 6.94.
26. Usando a lei de Kirchhoff para corrente, determine as correntes desconhecidas para os circuitos na Figura 6.95.
27. Usando as informações fornecidas na Figura 6.96, descubra as resistências de ramos R_1 e R_3 , a resistência total R_T e a fonte de tensão E .
28. Descubra os valores desconhecidos para os circuitos na Figura 6.97 usando as informações fornecidas.
29. Descubra os valores desconhecidos para os circuitos da Figura 6.98 usando as informações fornecidas.

Seção 6.6 Regra do divisor de corrente

30. Com base somente nos valores dos resistores, determine todas as correntes para a configuração na Figura 6.99. Não use a lei de Ohm.
31. a) Determine uma das correntes desconhecidas da Figura 6.100 usando a regra do divisor de corrente.
b) Determine a outra corrente usando a lei de Kirchhoff para corrente.

32. Para cada circuito da Figura 6.101, determine as correntes desconhecidas.
33. Os itens (a) até (e) desse problema devem ser efetuados por inspeção — ou seja, mentalmente. O objetivo é obter uma solução sem uma prolongada sequência de cálculos. Para o circuito mostrado na Figura 6.102:
 - a) Qual o valor aproximado de I_1 , considerando os valores dos elementos em paralelo?
 - b) Qual é a razão I_1/I_2 ? Com base no resultado da parte (a), qual é o valor aproximado de I_2 ?
 - c) Qual é a razão I_1/I_3 ? Com base no resultado, qual é o valor aproximado de I_3 ?
 - d) Qual é a razão I_1/I_4 ? Com base no resultado, qual é o valor aproximado de I_4 ?
 - e) Qual é o efeito do resistor de $100\text{ k}\Omega$ em paralelo sobre os cálculos anteriores? Quão menor a corrente I_4 será de I_1 ?
 - f) Calcule a corrente através do resistor de $1\ \Omega$ usando a regra do divisor de corrente. Como o resultado se compara ao da parte (a)?

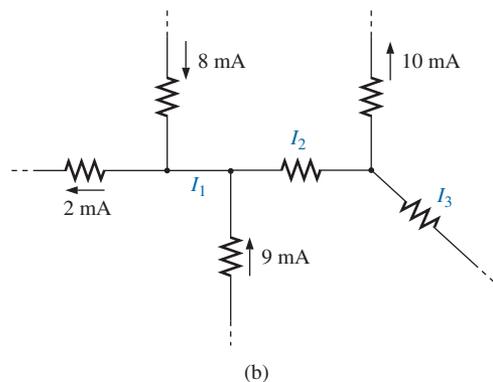
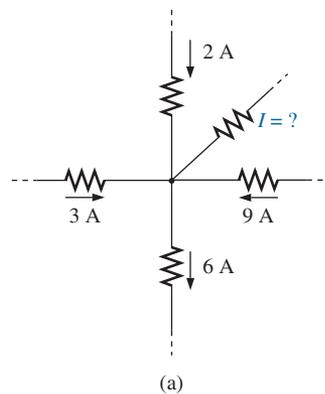


Figura 6.94 Problema 25.

- g) Calcule a corrente através do resistor de $10\ \Omega$. Como o resultado se compara ao da parte (b)?
- h) Calcule a corrente através do resistor de $1\ \text{k}\Omega$. Como o resultado se compara ao da parte (c)?
- i) Calcule a corrente através do resistor de $100\ \text{k}\Omega$. Como o resultado se compara às soluções para a parte (e)?

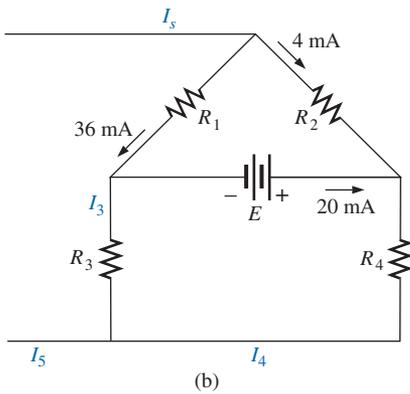
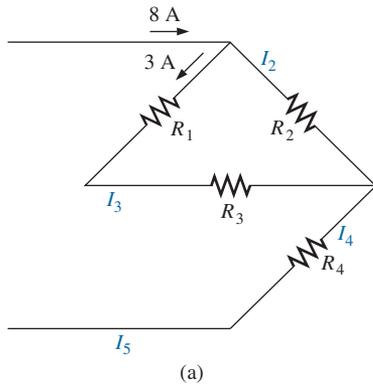


Figura 6.95 Problema 26.

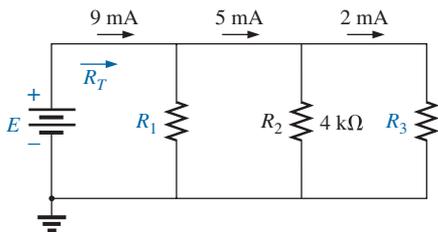


Figura 6.96 Problema 27.

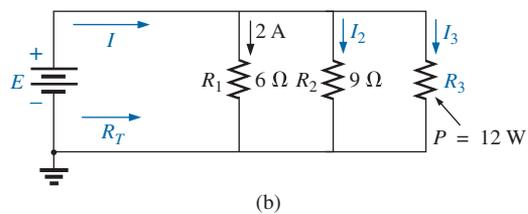
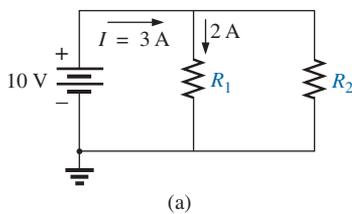


Figura 6.97 Problema 28.

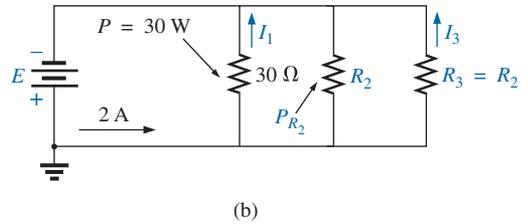
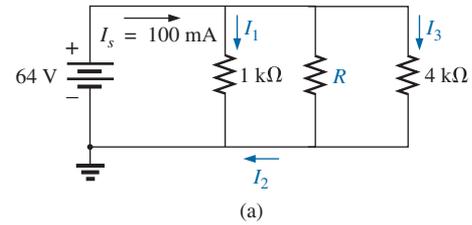


Figura 6.98 Problema 29.

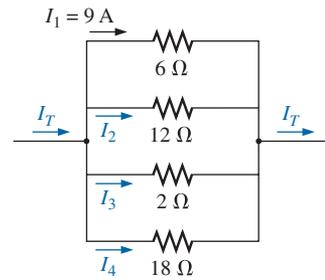


Figura 6.99 Problema 30.

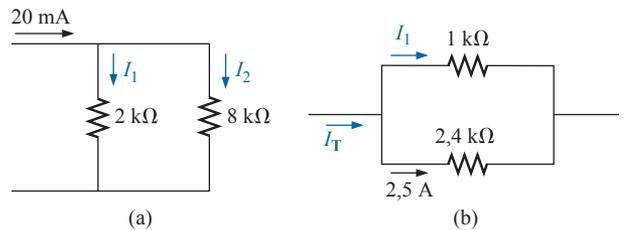


Figura 6.100 Problema 31.

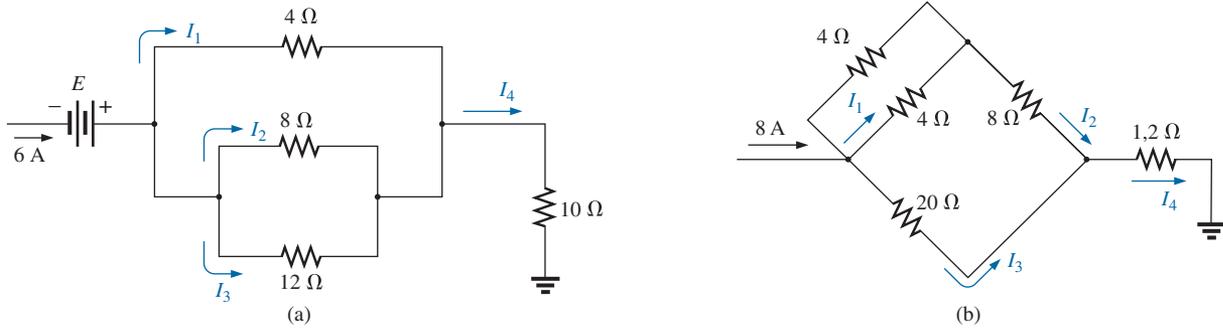


Figura 6.101 Problema 32.

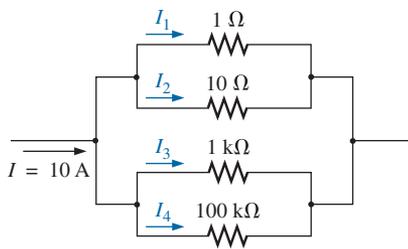


Figura 6.102 Problema 33.

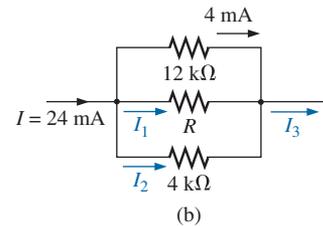
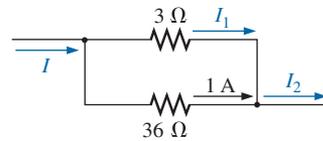


Figura 6.103 Problema 34.

34. Descubra os valores desconhecidos para os circuitos na Figura 6.103 usando as informações fornecidas.
35. a) Descubra a resistência R para o circuito na Figura 6.104 que assegurará que $I_1 = 3I_2$.
 b) Descubra I_1 e I_2 .
36. Projete o circuito na Figura 6.105 de maneira que $I_2 = 2I_1$ e $I_3 = 2I_2$.

Seção 6.7 Fontes de tensão em paralelo

37. Presumindo fontes idênticas na Figura 6.106:
 a) descubra as correntes indicadas;
 b) descubra a potência fornecida por cada fonte;
 c) descubra a potência total fornecida por ambas as fontes e compare-a com a potência fornecida para a carga R_L ;
 d) se apenas uma corrente fornecida pela fonte estivesse disponível, qual seria a corrente drenada para fornecer a mesma potência para a carga? Como o nível de corrente se compara ao nível calculado na parte (a)?
38. Presumindo fontes idênticas, determine as correntes I_1 , I_2 e I_3 para a configuração na Figura 6.107.
39. Presumindo fontes idênticas, determine a corrente I e a resistência R para o circuito em paralelo na Figura 6.108.

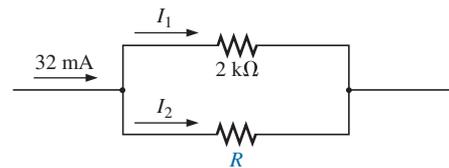


Figura 6.104 Problema 35.

Seção 6.8 Circuitos abertos e curtos-circuitos

40. Para o circuito na Figura 6.109:
 a) determine I_s e V_L ;
 b) determine I_s se R_L está em curto-circuito;
 c) determine V_L se R_L for substituído por um circuito aberto.
41. Para o circuito na Figura 6.110:
 a) determine a tensão do circuito aberto V_L ;
 b) se o resistor de $2,2 \text{ k}\Omega$ está em curto-circuito, qual é o novo valor de V_L ?
 c) determine V_L se o resistor $4,7 \text{ k}\Omega$ for substituído por um circuito aberto.

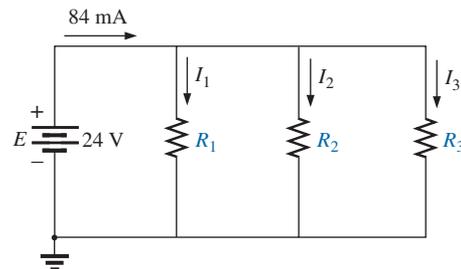


Figura 6.105 Problema 36.

- *42. Para o circuito na Figura 6.111:
 a) determine as correntes I_1 e I_2 do curto-circuito.
 b) determine as tensões V_1 e V_2 .
 c) determine a corrente I_s que atravessa a fonte.

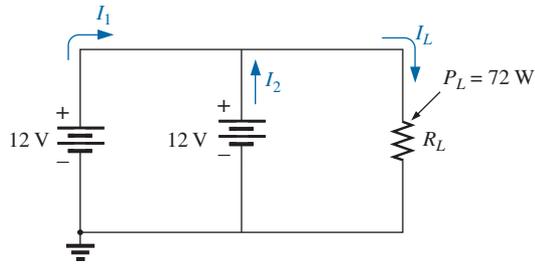


Figura 6.106 Problema 37.

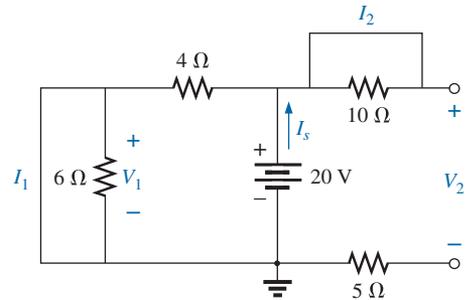


Figura 6.111 Problema 42.

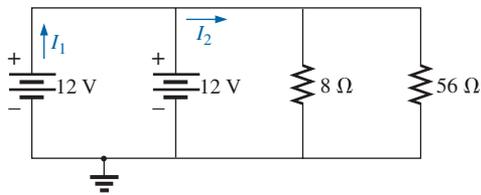


Figura 6.107 Problema 38.

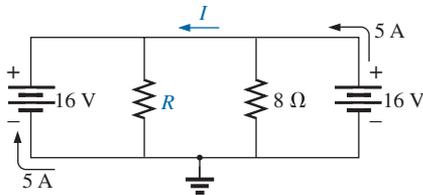


Figura 6.108 Problema 39.

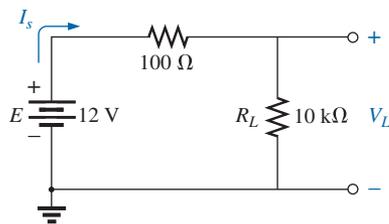


Figura 6.109 Problema 40.

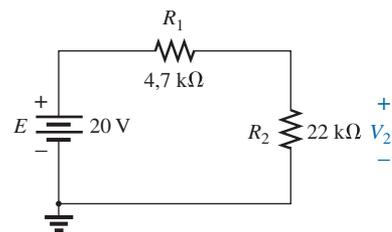


Figura 6.112 Problema 43.

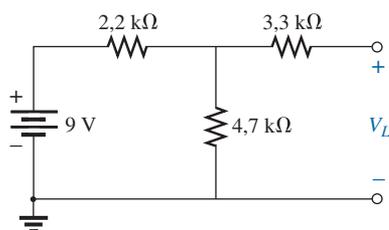


Figura 6.110 Problema 41.

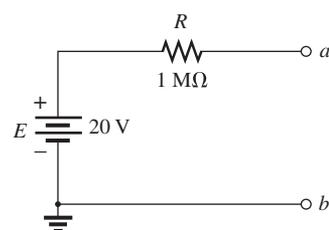


Figura 6.113 Problema 44.

Seção 6.9 Efeitos de carga do voltímetro

43. Para as configurações de séries simples na Figura 6.112:
- Determine a tensão de V_2 .
 - Determine a leitura de um DMM com uma resistência interna de 11 MΩ quando usado para medir V_2 .
 - Repita a parte (b) com um VOM que tenha uma especificação Ω/V de 20.000 usando a escala de 20 V. Compare os resultados das partes (b) e (c). Explique quaisquer diferenças.
 - Repita as partes (a) até (c) com $R_1 = 100 \text{ k}\Omega$ e $R_2 = 200 \text{ k}\Omega$.
 - Baseado nos resultados anteriores, a quais conclusões gerais você pode chegar a respeito do uso de um DMM ou de um VOM no modo voltímetro?
44. Dada a configuração na Figura 6.113, responda:
- Qual é a tensão entre os pontos a e b ?
 - Qual será a leitura de um DMM colocado entre os terminais a e b se a resistência interna do medidor for 11 MΩ?
 - Repita a parte (b) se um VOM com uma especificação de Ω/V de 20.000 usando a escala de 200 V. Qual será a leitura caso se use a escala de 20 V? Há uma diferença? Por quê?

Seção 6.11 Técnicas de análise de defeitos

45. Baseado nas medidas da Figura 6.114, determine se o circuito está operando corretamente. Se não estiver, determine por que isso ocorre.
46. Considerando a Figura 6.115, descubra a tensão V_{ab} sem fazer uso do medidor. Quando o medidor for aplicado ao circuito ativo, ele lerá 8,8 V. Se o valor medido não for igual ao valor teórico, quais elementos podem ter sido conectados incorretamente?
47. a) A tensão V_a para o circuito na Figura 6.116 é -1 V. Se ela subitamente der um salto para 20 V, o que pode acontecer com a estrutura do circuito? Identifique a área problemática.

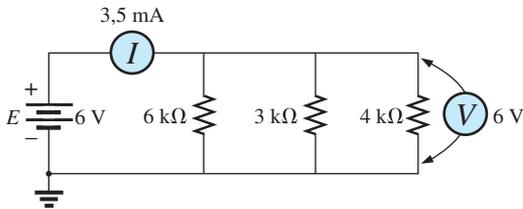


Figura 6.114 Problema 45.

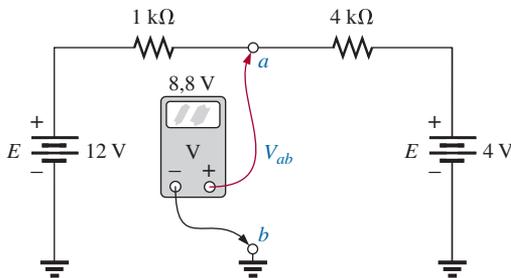


Figura 6.115 Problema 46.

- b) Se a tensão V_a fosse 6 V em vez de -1 V, explique o que estaria errado com a construção do circuito.

Seção 6.14 Análise computacional

48. Usando o PSpice ou o Multisim, verifique os resultados do Exemplo 6.13.
49. Usando o PSpice ou o Multisim, encontre a solução para o Problema 9 e compare sua resposta com a solução escrita à mão.
50. Usando o PSpice ou o Multisim, encontre a solução para o Problema 11 e compare sua resposta com a solução escrita à mão.

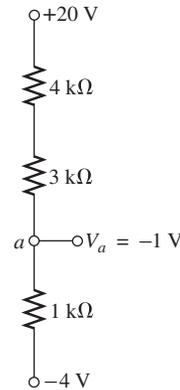


Figura 6.116 Problema 47.

GLOSSÁRIO

- Circuito aberto:** Ausência de uma conexão direta entre dois pontos em um circuito.
- Circuito em paralelo:** Configuração de circuito na qual os elementos têm dois pontos em comum.
- Curto-circuito:** Conexão direta de um valor baixo de resistência que pode modificar significativamente o comportamento de um elemento ou sistema.
- Lei de Kirchhoff para corrente:** Soma algébrica das correntes que entram e saem de um nó é zero.

- Nó:** Junção de dois ou mais ramos.
- Razão ohms/volt (Ω/V):** Especificação usada para determinar a sensibilidade à corrente e a resistência interna de um medidor.
- Regra do divisor de corrente:** Método pelo qual a corrente através de elementos em paralelo pode ser determinada sem que seja necessário calcular primeiro a tensão entre os terminais dos elementos em paralelo.