

Circuitos em série

5

Objetivos

- Familiarizar-se com as características de um circuito em série e encontrar soluções para a tensão, a corrente e a potência de cada um dos elementos.
- Desenvolver uma clara compreensão da lei de Kirchhoff para tensões e entender como ela é importante na análise de circuitos elétricos.
- Tomar conhecimento de como uma tensão aplicada se dividirá entre componentes em série e aplicar de maneira apropriada a regra do divisor de tensão.
- Compreender o uso das notações de índice inferior único e de índice inferior duplo para definir os níveis de tensão de um circuito.
- Aprender como usar um voltímetro, um amperímetro e um ohmímetro para medir as quantidades importantes de um circuito.

5.1 INTRODUÇÃO

Atualmente, dois tipos de corrente elétrica estão disponíveis para os consumidores. Um deles é a *corrente contínua* (CC), cujo fluxo de cargas (corrente) não varia nem em intensidade, nem em direção com o passar do tempo. O outro é a *corrente alternada senoidal* (CA), cujo fluxo de cargas varia continuamente em intensidade e sentido com o tempo. Os próximos capítulos trazem uma introdução à análise de circuitos na qual abordaremos somente circuitos de corrente contínua. Os métodos e conceitos serão discutidos em detalhes para esse tipo de corrente; quando for conveniente, um breve comentário será suficiente para explicar quaisquer diferenças que possamos encontrar ao considerar a corrente alternada nos capítulos posteriores.

Uma bateria, como a ilustrada na Figura 5.1, tem, em função da diferença de potencial entre seus terminais, a capacidade de promover (‘pressionar’) um fluxo de cargas através de um simples circuito. O terminal positivo atrai os elétrons do fio com a mesma rapidez com que eles são fornecidos pelo terminal negativo. Enquanto a bateria estiver ligada ao circuito e mantiver suas características elétricas, a corrente (CC), através do circuito, não sofrerá variações nem de intensidade, nem de sentido.

Se considerarmos o fio como um condutor ideal (isto é, que não se opõe ao fluxo de elétrons), a diferença de potencial V entre os terminais do resistor será igual à tensão aplicada pela bateria: V (volts) = E (volts).

A corrente é limitada somente pelo resistor R . Quanto maior a resistência, menor a corrente, e vice-versa, como determina a lei de Ohm.

Por convenção (conforme discutido no Capítulo 2), o sentido do **fluxo convencional da corrente** ($I_{\text{convencional}}$), como indica a Figura 5.1, é oposto ao do **fluxo de elétrons** ($I_{\text{elétrons}}$). Além disso, o fluxo uniforme de cargas nos leva a

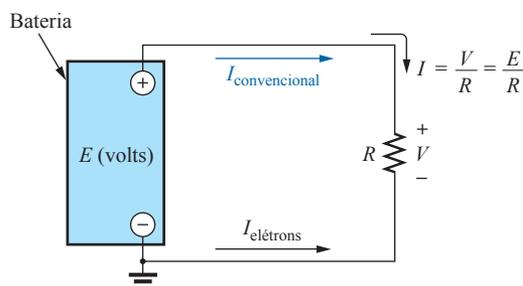


Figura 5.1 Introdução aos componentes básicos de um circuito elétrico.

concluir que a corrente contínua I é a mesma em qualquer ponto do circuito. Segundo o sentido de fluxo convencional, observamos que há um aumento de potencial ao atravessar a bateria (de $-$ para $+$) e uma queda de potencial ao atravessar o resistor (de $+$ para $-$). Em circuitos de corrente contínua com apenas uma fonte de tensão, a corrente convencional sempre passa de um potencial mais baixo para um potencial mais alto ao atravessar uma fonte de tensão, conforme ilustra a Figura 5.2. Entretanto, o fluxo convencional sempre passa de um potencial mais alto para um potencial mais baixo ao atravessar um resistor, qualquer que seja o número de fontes de tensão no mesmo circuito, como mostra a Figura 5.3.

O circuito mostrado na Figura 5.1 possui a configuração mais simples possível. Este capítulo e os seguintes acrescentarão elementos ao sistema de maneira bastante específica, para introduzir uma gama de conceitos que constituirão a maior parte da base necessária para analisar sistemas mais complexos. Saiba que as leis, regras e conceitos apresentados e discutidos nos capítulos 5 e 6 serão usados nos estudos de sistemas elétricos, eletrônicos e computacionais. Eles não serão substituídos por regras, leis e conceitos mais avançados à medida que progredirmos nos estudos. Portanto, é de vital importância que os conceitos sejam claramente compreendidos e que regras e leis sejam aplicadas com segurança.

5.2 RESISTORES EM SÉRIE

Antes que uma conexão em série seja descrita, primeiro perceba que todo resistor fixo tem apenas dois terminais a serem conectados em uma configuração; portanto, ele é chamado de **dispositivo de dois terminais**. Na Figura 5.4, um terminal de resistor R_2 é conectado ao resistor R_1

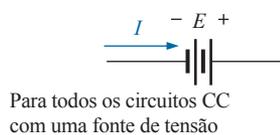


Figura 5.2 Definição do sentido convencional da corrente para circuitos CC com uma fonte de tensão.

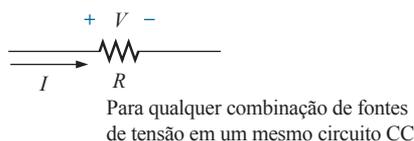


Figura 5.3 Definição da polaridade resultante da passagem de uma corrente I , no sentido convencional, através de um elemento resistivo.

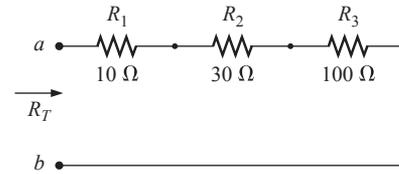


Figura 5.4 Conexão em série de resistores.

em um lado, e o outro terminal é conectado ao resistor R_3 do outro lado, resultando em uma, e apenas uma, conexão entre resistores adjacentes. Quando conectados dessa maneira, os resistores estabelecem uma conexão em série. Se três elementos fossem conectados ao mesmo ponto, como mostra a Figura 5.5, não haveria uma conexão em série entre os resistores R_1 e R_2 .

Para os resistores em série,

a resistência total de uma configuração em série é a soma de níveis de resistência.

Na forma de equação para qualquer número (N) de resistores,

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + \dots + R_N \quad (5.1)$$

Um dos resultados da Equação 5.1 é que

quanto mais resistores em série acrescentarmos, maior será a resistência, não importando seu valor.

Além disso,

o maior resistor em uma combinação em série terá o maior impacto sobre a resistência total.

Para a configuração na Figura 5.4, a resistência total é

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 = 10 \Omega + 30 \Omega + 100 \Omega$$

e $R_T = 140 \Omega$

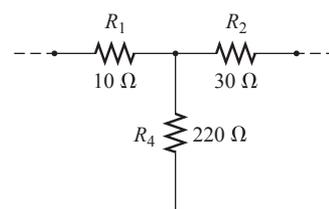


Figura 5.5 Configuração na qual nenhum dos resistores está em série.

EXEMPLO 5.1

Determine a resistência total da conexão em série na Figura 5.6. Observe que todos os resistores que aparecem nesse circuito são valores-padrão.

Solução:

Observe na Figura 5.6 que, apesar de o resistor R_3 estar na vertical e o resistor R_4 na parte de baixo retornar ao terminal b , todos os resistores estão em série, já que há apenas dois fios de resistores em cada ponto de conexão.

Aplicando a Equação 5.1, chegamos a

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + R_4$$

$$R_T = 20 \Omega + 220 \Omega + 1,2 \Omega + 5,6 \text{ k}\Omega$$

e

$$R_T = 7.040 \Omega = \mathbf{7,04 \text{ k}\Omega}$$

Para o caso especial em que os resistores possuem o mesmo valor, a Equação 5.1 pode ser modificada como mostrado a seguir:

$$R_T = NR \tag{5.2}$$

onde N é o número de resistores em série de valor R .

EXEMPLO 5.2

Descubra a resistência total dos resistores em série na Figura 5.7. Novamente, reconheça $3,3 \text{ k}\Omega$ como um valor-padrão.

Solução:

Agora, desconsidere a mudança na configuração. Resistores vizinhos estão conectados em apenas um ponto, satisfazendo a definição de elementos em série.

Equação 5.2: $R_T = NR$
 $= (4) (3,3 \text{ k}\Omega) = \mathbf{13,2 \text{ k}\Omega}$

É importante perceber que, tendo em vista que os parâmetros da Equação 5.1 podem ser colocados em qualquer ordem,

a resistência total dos resistores em série não é afetada pela ordem na qual eles estão conectados.

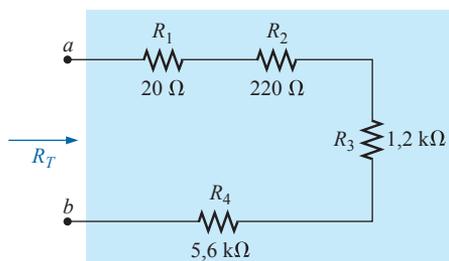


Figura 5.6 Conexão em série de resistores para o Exemplo 5.1.

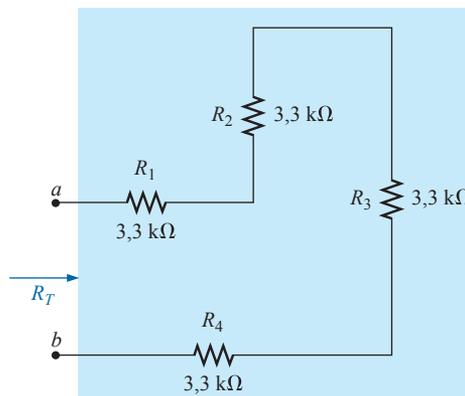


Figura 5.7 Conexão em série de quatro resistores de mesmo valor (Exemplo 5.2).

O resultado é que a resistência total na Figura 5.8(a) é a mesma que na Figura 5.8(b). Novamente, observe que todos os resistores são valores-padrão.

EXEMPLO 5.3

Determine a resistência total dos resistores em série (valores-padrão) na Figura 5.9.

Solução:

Primeiro, a ordem dos resistores é modificada, como mostra a Figura 5.10, para permitir o uso da Equação 5.2. A resistência total é, então,

$$R_T = R_1 + R_3 + NR_2$$

$$= 4,7 \text{ k}\Omega + 2,2 \text{ k}\Omega + (3) (1 \text{ k}\Omega) = \mathbf{9,9 \text{ k}\Omega}$$

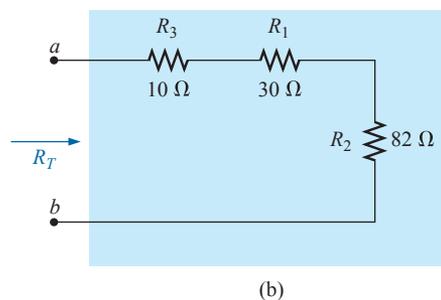
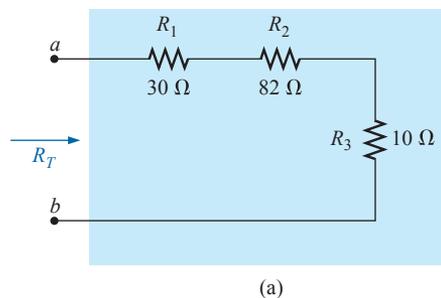


Figura 5.8 Duas combinações em série dos mesmos elementos com a mesma resistência total.

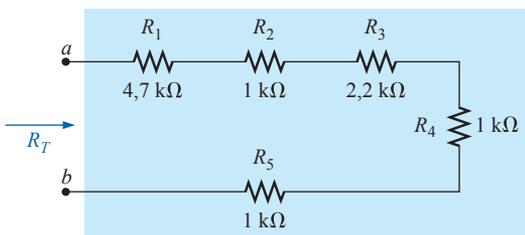


Figura 5.9 Combinação em série de resistores para o Exemplo 5.3.

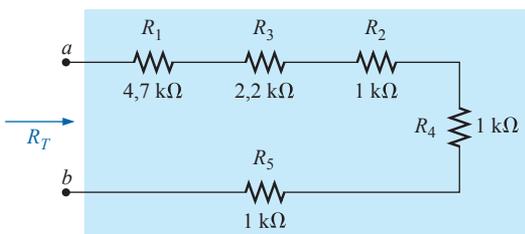


Figura 5.10 Circuito em série da Figura 5.9 redesenhado para permitir o uso da Equação 5.2: $R_T = NR$.

Analogias

Ao longo deste livro, analogias serão usadas para explicar algumas das relações fundamentais importantes em circuitos elétricos. Uma analogia é simplesmente uma combinação de elementos de um tipo diferente que é importante para ajudar a explicar um conceito, uma relação ou uma equação em particular.

Uma analogia que funciona bem na combinação em série de elementos é a conexão de diferentes comprimentos de corda para tornar a corda mais longa. Pedacos adjacentes de corda são conectados em um ponto somente, satisfazendo a definição de elementos em série. Conectar uma terceira corda ao ponto em comum significaria que as seções da corda não estariam mais em série.

Outra analogia é a conexão de mangueiras para formar uma mangueira mais longa. Novamente, ainda há

apenas um ponto de conexão entre as seções adjacentes, resultando em uma conexão em série.

Instrumentação

A resistência total de qualquer configuração pode ser medida simplesmente conectando um ohmímetro aos terminais de acesso como mostra a Figura 5.11 para o circuito na Figura 5.4. *Tendo em vista que não há polaridade associada à resistência*, qualquer um dos fios pode ser conectado ao ponto *a*, com o outro fio conectado ao ponto *b*. Escolha uma escala que excederá a resistência total do circuito, e lembre-se de que ao ler a resposta no medidor, se uma escala de kilohm for selecionada, o resultado será em kilohms. Para a Figura 5.11, a escala de 200 Ω do nosso multímetro escolhido foi usada porque a resistência total é 140 Ω. Se a escala de 2 kΩ do nosso medidor tivesse sido escolhida, a leitura digital exibiria 0,140, e você teria de reconhecer o resultado em kilohms.

Na próxima seção, introduziremos outro método para determinar a resistência total de um circuito usando a lei de Ohm.

5.3 CIRCUITOS EM SÉRIE

Se tomarmos agora uma fonte CC de 8,4 V e a conectarmos em série com os resistores em série da Figura 5.4, teremos o **circuito em série** da Figura 5.12.

Um circuito é uma combinação de elementos que resultarão em um fluxo de cargas contínuo, ou corrente, por meio da configuração.

Primeiro, reconheça que a *fonte CC também é um dispositivo de dois terminais* com dois pontos a serem conectados. Se assegurarmos simplesmente que há apenas uma conexão feita em cada extremidade da fonte para a combinação em série de resistores, poderemos ter certeza de que estabelecemos um circuito em série.

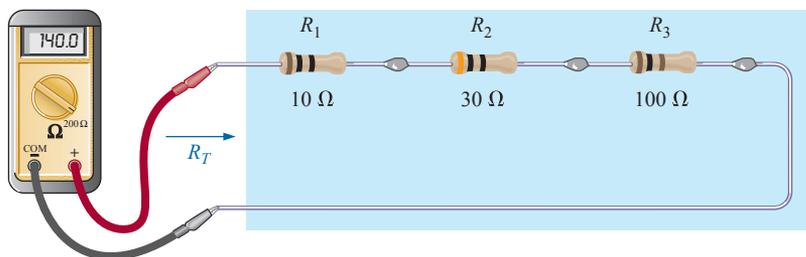


Figura 5.11 Usando um ohmímetro para medir a resistência total de um circuito em série.

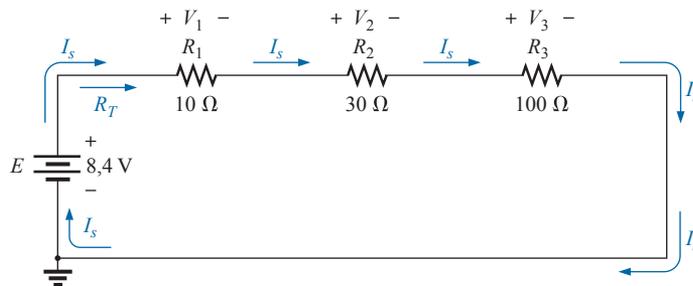


Figura 5.12 Representação esquemática de um circuito em série CC.

A maneira pela qual a fonte é conectada determina a direção da corrente convencional resultante. Para circuitos CC em série:

a direção da corrente convencional em um circuito CC em série é tal que ela deixa o terminal positivo da fonte e retorna para o terminal negativo, como mostra a Figura 5.12.

Um dos conceitos mais importantes a serem lembrados ao analisar circuitos em série e ao definir elementos que estão em série é:

A corrente é a mesma em todos os pontos de um circuito em série.

Para o circuito na Figura 5.12, a declaração acima determina que a corrente é a mesma através dos três resistores e da fonte de tensão. Além disso, se você já se perguntou se dois elementos estão em série ou não, simplesmente confira se a corrente é a mesma através de cada elemento.

Em qualquer configuração, se dois elementos estão em série, a corrente tem de ser a mesma. Entretanto, se a corrente é a mesma para dois elementos adjacentes, os elementos podem ou não estar em série.

A necessidade para essa restrição na última frase será demonstrada nos capítulos a seguir.

Agora que temos um circuito completo e a corrente foi estabelecida, o nível da corrente e a tensão através de cada resistor devem ser determinados. Para fazer isso, retorne à lei de Ohm e substitua a resistência na equação pela resistência total do circuito. Isto é,

$$I_s = \frac{E}{R_T} \tag{5.3}$$

com o subscrito *s* usado para indicar a corrente da fonte.

É importante perceber que quando uma fonte CC é conectada, ela não ‘vê’ a conexão individual de elementos, mas simplesmente a resistência total ‘vista’ nos terminais de conexão, como mostra a Figura 5.13(a). Em outras palavras, ela reduz a configuração inteira para uma como a da Figura 5.13(b), na qual a lei de Ohm pode ser facilmente aplicada.

Para a configuração na Figura 5.12, com a resistência total calculada na última seção, a corrente resultante é

$$I_s = \frac{E}{R_T} = \frac{8,4 \text{ V}}{140 \Omega} = 0,06 \text{ A} = \mathbf{60 \text{ mA}}$$

Observe que a corrente I_s em cada ponto ou canto do circuito é a mesma. Além disso, observe que a corrente também é indicada na exibição de corrente da fonte de potência.

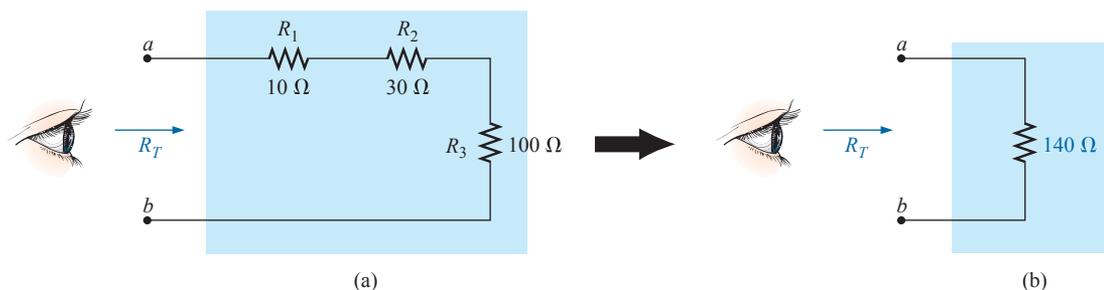


Figura 5.13 Resistência ‘vista’ nos terminais de um circuito em série.

Agora que temos o nível de corrente, podemos calcular a tensão através de cada resistor. Primeiro reconheça que

a polaridade da tensão através de um resistor é determinada pela direção da corrente.

Quando a corrente entra em um resistor ela cria uma queda na tensão com a polaridade indicada na Figura 5.14(a). Inverta a direção da corrente e a polaridade será invertida como mostra a Figura 5.14(b). Mude a orientação do resistor e as mesmas regras se aplicarão, como mostra a Figura 5.14(c). A utilização desse mesmo processo no circuito da Figura 5.12 resultará nas polaridades que aparecem nessa figura.

O valor absoluto da queda de tensão através de cada resistor pode então ser encontrado aplicando a lei de Ohm, usando apenas a resistência de cada resistor. Isto é,

$$\begin{aligned} V_1 &= I_1 R_1 \\ V_2 &= I_2 R_2 \\ V_3 &= I_3 R_3 \end{aligned} \quad (5.4)$$

o que na Figura 5.12 resulta em

$$\begin{aligned} V_1 &= I_1 R_1 = I_s R_1 = (60 \text{ mA})(10 \Omega) = \mathbf{0,6 \text{ V}} \\ V_2 &= I_2 R_2 = I_s R_2 = (60 \text{ mA})(30 \Omega) = \mathbf{1,8 \text{ V}} \\ V_3 &= I_3 R_3 = I_s R_3 = (60 \text{ mA})(100 \Omega) = \mathbf{6,0 \text{ V}} \end{aligned}$$

Observe que em todos os cálculos numéricos que aparecem no texto até o momento, uma unidade de medida foi aplicada em cada quantidade calculada. Jamais se esqueça de que uma quantidade sem uma unidade de medida muitas vezes fica desprovida de sentido.

EXEMPLO 5.4

Para o circuito em série na Figura 5.15:

- descubra a resistência total R_T ;
- calcule a corrente da fonte resultante I_s ;
- determine a tensão através de cada resistor.

Soluções:

$$\begin{aligned} \text{a) } R_T &= R_1 + R_2 + R_3 \\ &= 2 \Omega + 1 \Omega + 5 \Omega \\ R_T &= \mathbf{8 \Omega} \end{aligned}$$

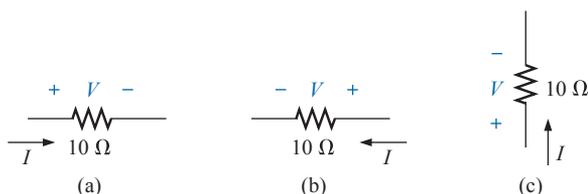


Figura 5.14 Inserção das polaridades através de um resistor como determina a direção da corrente.

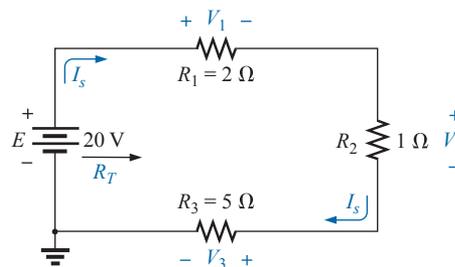


Figura 5.15 Circuito em série a ser investigado no Exemplo 5.4.

$$\begin{aligned} \text{b) } I_s &= \frac{E}{R_T} = \frac{20 \text{ V}}{8 \Omega} = \mathbf{2,5 \text{ A}} \\ \text{c) } V_1 &= I_1 R_1 = I_s R_1 = (2,5 \text{ A})(2 \Omega) = \mathbf{5 \text{ V}} \\ V_2 &= I_2 R_2 = I_s R_2 = (2,5 \text{ A})(1 \Omega) = \mathbf{2,5 \text{ V}} \\ V_3 &= I_3 R_3 = I_s R_3 = (2,5 \text{ A})(5 \Omega) = \mathbf{12,5 \text{ V}} \end{aligned}$$

EXEMPLO 5.5

Para o circuito em série na Figura 5.16:

- descubra a resistência total R_T ;
- determine a corrente da fonte I_s e indique sua direção no circuito;
- descubra a tensão através do resistor R_2 e indique sua polaridade no circuito.

Soluções:

- Os elementos do circuito são rearranjados como mostra a Figura 5.17.

$$\begin{aligned} R_T &= R_2 + NR \\ &= 4 \Omega + (3)(7 \Omega) \\ &= 4 \Omega + 21 \Omega \\ R_T &= \mathbf{25 \Omega} \end{aligned}$$

- Observe que devido à maneira com que a fonte CC foi conectada, a corrente agora tem uma direção anti-horária, como mostra a Figura 5.17:

$$I_s = \frac{E}{R_T} = \frac{50 \text{ V}}{25 \Omega} = \mathbf{2 \text{ A}}$$

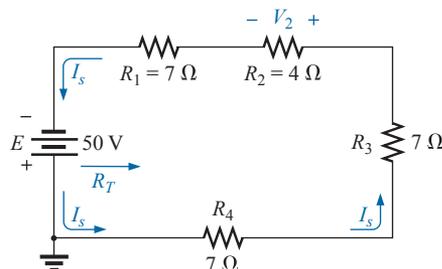


Figura 5.16 Circuito em série a ser analisado no Exemplo 5.5.

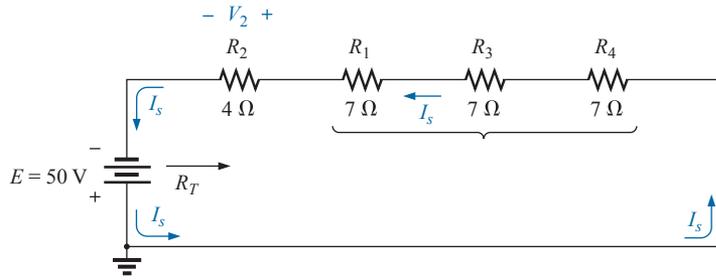


Figura 5.17 Circuito da Figura 5.16 redesenhado para permitir o uso da Equação 5.2.

c) A direção da corrente definirá a polaridade para V_2 , que aparece na Figura 5.17:

$$V_2 = I_2 R_2 = I_s R_2 = (2 \text{ A})(4 \Omega) = 8 \text{ V}$$

Os exemplos 5.4 e 5.5 são diretos, são problemas que fazem uso de substituições e relativamente fáceis de solucionar com alguma prática. O Exemplo 5.6, entretanto, é outro tipo de problema, e exige tanto um conhecimento firme de leis e equações fundamentais quanto uma capacidade de identificar qual quantidade deve ser determinada primeiro. A melhor preparação para exercícios como esse é resolver o maior número possível de problemas desse tipo.

EXEMPLO 5.6

Dados R_T e I_3 , calcule R_1 e E para o circuito mostrado na Figura 5.18.

Solução:

Tendo em vista que é fornecida a resistência total, parece natural escrever primeiro a equação para a resistência total e, então, inserir o que sabemos:

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3$$

Descobrimos que há apenas uma incógnita, e ela pode ser determinada a partir de algumas manipulações matemáticas simples. Isto é,

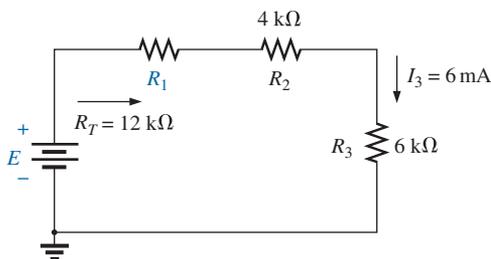


Figura 5.18 Circuito em série a ser analisado no Exemplo 5.6.

$$12 \text{ k}\Omega = R_1 + 4 \text{ k}\Omega + 6 \text{ k}\Omega = R_1 + 10 \text{ k}\Omega$$

e

$$12 \text{ k}\Omega - 10 \text{ k}\Omega = R_1$$

de maneira que $R_1 = 2 \text{ k}\Omega$

A tensão CC pode ser determinada diretamente da lei de Ohm.

$$E = I_s R_T = I_3 R_T = (6 \text{ mA})(12 \text{ k}\Omega) = 72 \text{ V}$$

Analogias

As analogias usadas anteriormente para definir a conexão em série são também excelentes para definir a corrente de um circuito em série. Por exemplo, para as cordas conectadas em série, o estresse sobre cada corda é **o mesmo** enquanto elas tentam suportar certo peso. Para a analogia da água, o fluxo da água é **o mesmo** através de cada seção da mangueira na medida em que a água é levada para seu destino.

Instrumentação

Outro conceito importante a ser lembrado é:

A inserção de qualquer medidor em um circuito afetará o circuito.

Você deve usar medidores que minimizem o impacto sobre a resposta do circuito. Os efeitos de carga dos medidores são discutidos em detalhe em uma seção posterior deste capítulo. Por ora, presumiremos que os medidores são ideais e não afetam os circuitos em que são aplicados, de maneira que podemos nos concentrar em seu uso apropriado.

Além disso, no laboratório, é particularmente útil se dar conta de que

as tensões de um circuito podem ser medidas sem que haja interrupções (rompimento das conexões) do circuito.

Na Figura 5.19, todas as tensões do circuito na Figura 5.12 estão sendo medidas por voltímetros que estão

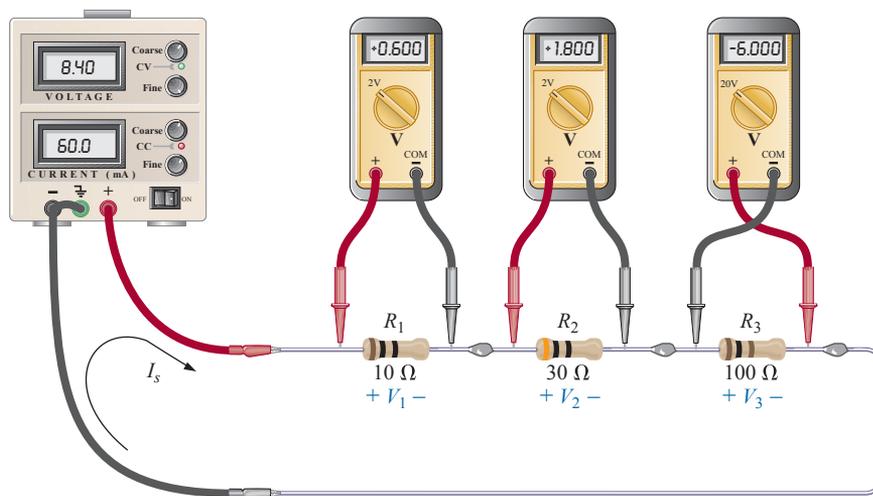


Figura 5.19 Utilização de voltmímetros para medir as tensões através dos resistores na Figura 5.12.

conectados sem perturbar a configuração original. Observe que todos os voltmímetros estão colocados **entre** os elementos resistivos. Além disso, observe que o fio positivo (normalmente vermelho) do voltmímetro está conectado ao ponto de potencial mais alto (sinal positivo), com o fio negativo (normalmente preto) do voltmímetro conectado ao ponto de potencial mais baixo (sinal negativo) para V_1 e V_2 . O resultado é a exibição de uma leitura positiva. Se os fios fossem invertidos, o valor absoluto permaneceria o mesmo, mas o sinal apareceria como mostrado em V_3 .

Observe com atenção que a escala de 20 V de nosso medidor foi usada para medir o nível de -6 V, enquanto a escala de 2 V de nosso medidor foi usada para medir os níveis de 0,6 e 1,8 V. O valor máximo da escala escolhida sempre tem de exceder o valor máximo a ser medido. Em geral,

ao usar um voltmímetro, comece com uma escala que vá assegurar que a leitura seja menor que o valor máximo da escala. Então, vá trabalhando as escalas até que a leitura com o nível mais alto de precisão seja obtido.

Voltando nossa atenção para a corrente do circuito, descobrimos que

utilizar um amperímetro para medir a corrente de um circuito exige que o circuito seja aberto em algum ponto e o medidor inserido em série com o ramo no qual a corrente deve ser determinada.

Por exemplo, para medir a corrente que deixa o terminal positivo da fonte, a conexão para o terminal positivo tem de ser removida para criar um circuito aberto entre a fonte e o resistor R_1 . O amperímetro é então inserido entre

esses dois pontos para formar uma ponte entre a fonte e o primeiro resistor, como mostra a Figura 5.20. Agora, o amperímetro está em série com a fonte e os outros elementos do circuito. Se cada medidor deve fornecer uma leitura positiva, a conexão deve ser feita de tal forma que a corrente convencional entre no terminal positivo do medidor e deixe o terminal negativo. Isso foi feito para três dos amperímetros, com o amperímetro à direita de R_3 conectado de maneira inversa. O resultado é um sinal negativo para a corrente. Entretanto, observe também que a corrente tem o valor absoluto correto. Tendo em vista que a corrente é de 60 mA, a escala de 200 mA de nosso medidor foi usada para cada medidor.

Como esperado, a corrente em cada ponto do circuito em série é a mesma usada em nossos amperímetros ideais.

5.4 DISTRIBUIÇÃO DE POTÊNCIA EM UM CIRCUITO EM SÉRIE

Em qualquer sistema elétrico, a potência aplicada será igual à potência dissipada ou absorvida. Para qualquer circuito em série, como aquele mostrado na Figura 5.21,

a potência aplicada pela fonte CC deve ser igual àquela dissipada pelos elementos resistivos.

Na forma de equação,

$$P_E = P_{R_1} + P_{R_2} + P_{R_3} \quad (5.5)$$

A potência fornecida pela fonte pode ser determinada usando

$$P_E = EI_s \quad (\text{watts, W}) \quad (5.6)$$

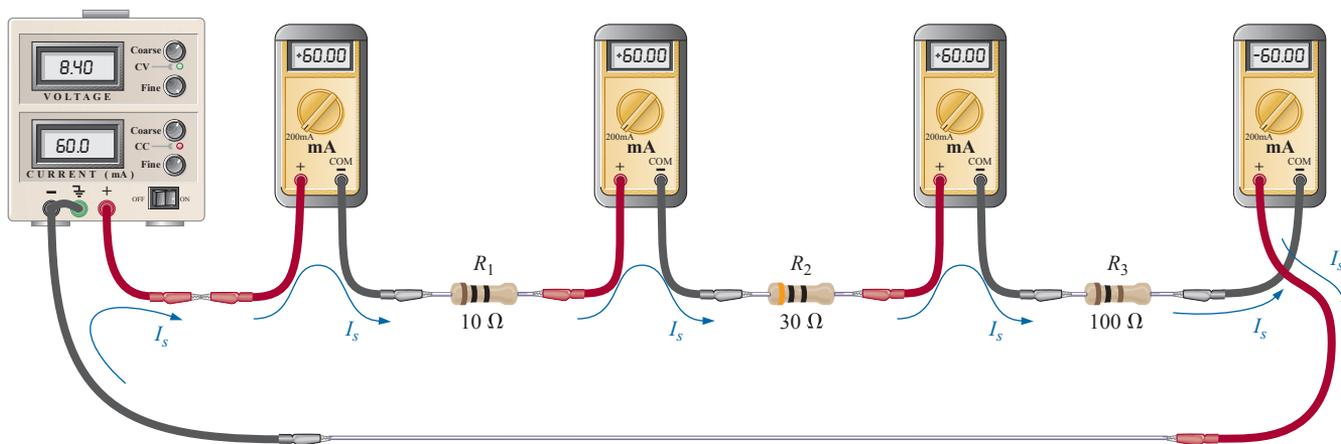


Figura 5.20 Medição da corrente através do circuito em série na Figura 5.12.

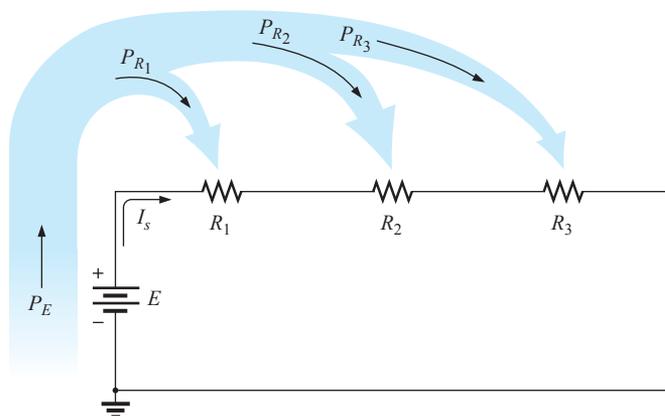


Figura 5.21 Distribuição de potência em um circuito em série.

A potência dissipada pelos elementos resistivos pode ser determinada por qualquer uma das formas a seguir (mostradas para o resistor R_1 , somente):

$$P_1 = V_1 I_1 = I_1^2 R_1 = \frac{V_1^2}{R_1} \quad (\text{watts, W}) \quad (5.7)$$

Tendo em vista que a corrente é a mesma através de elementos em série, você verá nos exemplos a seguir que

em uma configuração em série, a potência máxima é fornecida ao resistor maior.

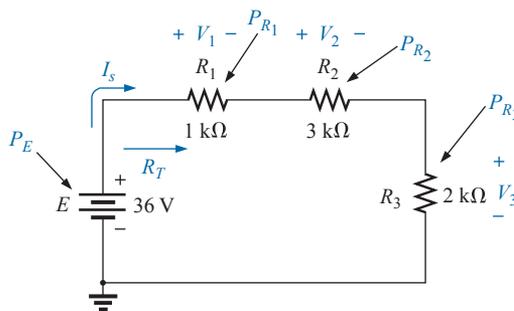


Figura 5.22 Circuito em série a ser investigado no Exemplo 5.7.

EXEMPLO 5.7

Para o circuito em série na Figura 5.22 (sendo todos valores-padrão):

- a) determine a resistência total R_T ;
- b) calcule a corrente I_s ;
- c) determine a tensão através de cada resistor;
- d) descubra a potência fornecida pela bateria;

- e) determine a potência dissipada por cada resistor;
- f) comente se a potência total fornecida se iguala à potência total dissipada.

Soluções:

a) $R_T = R_1 + R_2 + R_3$
 $= 1 \text{ k}\Omega + 3 \text{ k}\Omega + 2 \text{ k}\Omega$

$$R_T = 6 \text{ k}\Omega$$

b) $I_s = \frac{E}{R_T} = \frac{36 \text{ V}}{6 \text{ k}\Omega} = 6 \text{ mA}$

c) $V_1 = I_s R_1 = I_s R_1 = (6 \text{ mA})(1 \text{ k}\Omega) = 6 \text{ V}$
 $V_2 = I_s R_2 = I_s R_2 = (6 \text{ mA})(3 \text{ k}\Omega) = 18 \text{ V}$
 $V_3 = I_s R_3 = I_s R_3 = (6 \text{ mA})(2 \text{ k}\Omega) = 12 \text{ V}$

d) $P_E = EI_s = (36 \text{ V})(6 \text{ mA}) = 216 \text{ mW}$

e) $P_1 = V_1 I_1 = (6 \text{ V})(6 \text{ mA}) = 36 \text{ mW}$
 $P_2 = I_s^2 R_2 = (6 \text{ mA})^2 (3 \text{ k}\Omega) = 108 \text{ mW}$
 $P_3 = \frac{V_3^2}{R_3} = \frac{(12 \text{ V})^2}{2 \text{ k}\Omega} = 72 \text{ mW}$

f) $P_E = P_{R_1} + P_{R_2} + P_{R_3}$
 $216 \text{ mW} = 36 \text{ mW} + 108 \text{ mW} + 72 \text{ mW} = 216 \text{ mW}$
 (confere)

5.5 FONTES DE TENSÃO EM SÉRIE

As fontes de tensão podem ser conectadas em série, como mostra a Figura 5.23, para aumentar ou diminuir a tensão total aplicada a um sistema. A tensão líquida é determinada somando as fontes com a mesma polaridade e subtraindo o total das fontes com a polaridade oposta. A polaridade líquida é a polaridade da soma maior.

Na Figura 5.23(a), por exemplo, as fontes estão todas ‘pressionando’ a corrente para que ela siga um curso no sentido horário, de maneira que a tensão líquida é

$$E_T = E_1 + E_2 + E_3 = 10 \text{ V} + 6 \text{ V} + 2 \text{ V} = 18 \text{ V}$$

como mostra a figura. Na Figura 5.23(b), entretanto, a fonte de 4 V está ‘pressionando’ a corrente no sentido horário, enquanto as outras duas estão tentando estabelecer uma corrente no sentido anti-horário. Nesse caso, a tensão aplicada em um sentido anti-horário é maior do que aquela em sentido horário. O resultado é o sentido anti-horário para a corrente, como mostra a Figura 5.23(b). O efeito líquido pode ser determinado descobrindo a diferença de tensão

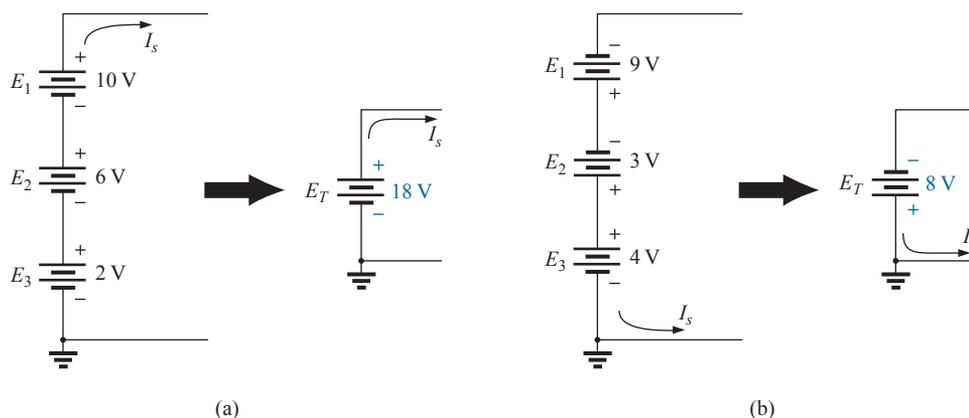


Figura 5.23 Redução das fontes de tensão CC em série a uma única fonte.

aplicada entre aquelas fontes que ‘pressionam’ a corrente em uma direção e o total em outra direção. Nesse caso,

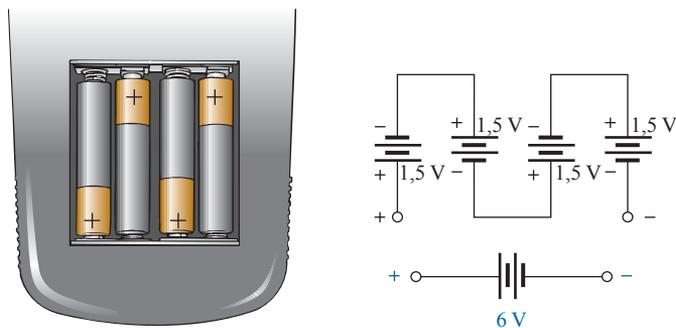
$$E_T = E_1 + E_2 + E_3 = 9 \text{ V} + 3 \text{ V} - 4 \text{ V} = 8 \text{ V}$$

com a polaridade mostrada na figura.

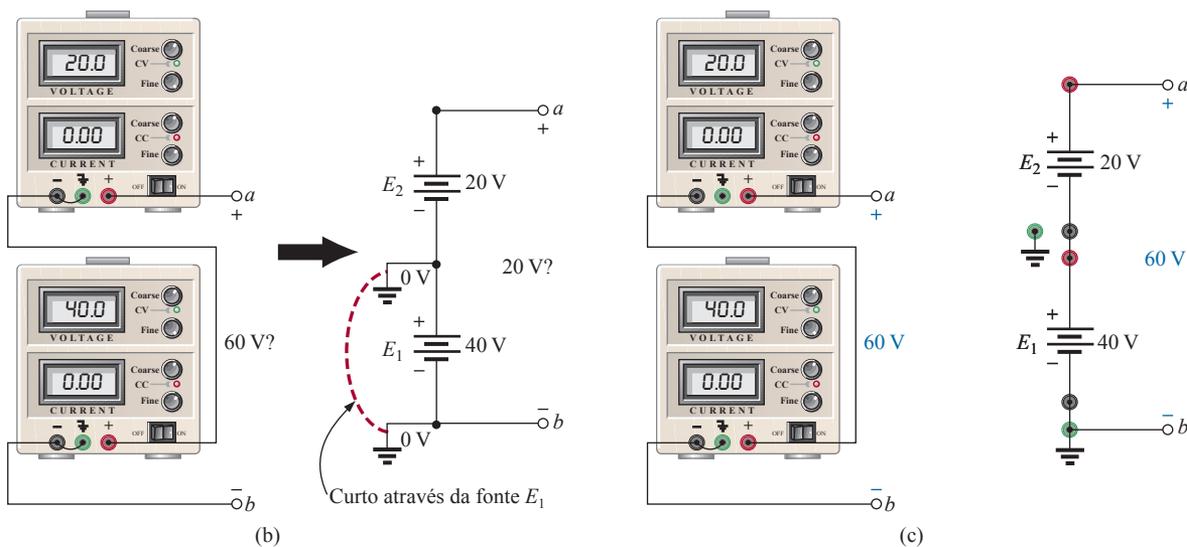
Instrumentação

A conexão de baterias em série para se obter uma tensão mais alta é comum em grande parte dos equipamentos eletrônicos portáteis atuais. Por exemplo, na Figura 5.24(a), quatro baterias AAA 1,5 V foram conectadas em série para se obter uma tensão de fonte de 6 V. Apesar de a tensão ter aumentado, é importante ter em mente que a corrente máxima para cada bateria AAA e para a fonte de 6 V ainda é a mesma. Entretanto, a potência disponível aumentou a um fator de 4 devido ao aumento na tensão terminal. Observe também, como mencionado no Capítulo 2, que a extremidade negativa de cada bateria está conectada à mola, e a extremidade positiva, ao contato sólido. Além disso, observe que a conexão entre as baterias é feita pelas linguetas de conexão horizontais.

Em geral, fontes com apenas dois terminais (+ e –) podem ser conectadas como no caso das baterias. Um problema surge, entretanto, se a fonte tem uma conexão de terra interna fixa ou opcional. Na Figura 5.24(b), duas fontes de laboratório foram conectadas em série com ambos os aterramentos conectados. Isso resulta no curto-circuito da fonte mais baixa E_1 (o que pode causar dano à fonte, se o fusível protetor não for ativado com a rapidez necessária), pois ambos os aterramentos estão com um potencial zero. Nesses casos, a fonte E_2 deve ser deixada sem terra algum (flutuando), como mostra a Figura 5.24(c), para fornecer a tensão terminal de 60 V. Se as fontes de laboratório têm uma conexão interna do terminal negativo para o terra como um recurso de proteção para os usuários, uma conexão em série das fontes não pode ser feita. Não se



(a)



(b)

(c)

Figura 5.24 Conexão em série de fontes CC: (a) quatro baterias 1,5 V em série para estabelecer uma tensão terminal de 6 V; (b) conexões incorretas para duas fontes CC em série; (c) conexão correta de duas fontes em série para estabelecer 60 V nos terminais de saída.

esqueça desse fato, pois algumas instituições educacionais acrescentam um terra interno às fontes como um recurso de proteção, apesar de o painel ainda exibir a conexão de terra como um recurso opcional.

5.6 LEI DE KIRCHHOFF PARA TENSÕES

A lei a ser descrita nesta seção é uma das mais importantes nesse campo. Ela se aplica não apenas a circuitos CC, mas também a qualquer tipo de sinal — seja ele CA, digital, entre outros. Essa lei é amplamente aplicável, e pode ser muito útil na busca de soluções de circuitos que às vezes nos deixam perdidos sem saber que direção tomar em uma investigação.

A lei, chamada **lei de Kirchhoff para tensões (LKT)**, foi desenvolvida por Gustav Kirchhoff (Figura 5.25) em meados do século XIX. Ela é uma pedra fundamental de todo o campo e, na realidade, nunca será ultrapassada ou substituída.

A aplicação da lei exige que definamos um caminho fechado de investigação, permitindo que comecemos em um ponto no circuito, nos desloquemos através dele e encontremos nosso caminho de volta até o ponto de partida original. O caminho não precisa ser circular, quadrado ou ter qualquer outra forma definida; ele tem de simplesmente fornecer uma maneira de deixar um ponto e voltar a ele sem deixar o circuito. Na Figura 5.26, se deixarmos o ponto *a* e seguirmos a corrente, terminaremos no ponto *b*. Partindo desse ponto, podemos passar pelos pontos *c* e *d*, e eventualmente retornar pela fonte de tensão ao ponto *a*, nosso ponto de partida. O caminho *abcda* é, portanto, um caminho fechado, ou uma **malha fechada**. A lei especifica que

a soma algébrica das elevações e quedas de potencial em torno de um caminho fechado (ou malha fechada) é zero.



Figura 5.25 Gustav Robert Kirchhoff.
Cortesia da Biblioteca do Congresso, Washington, EUA.

Alemão (Königsberg, Berlim)
(1824-1887)
Físico, professor de Física na Universidade de Heidelberg.

Embora tenha contribuído em diversas áreas no campo da Física, é mais conhecido por seu trabalho no campo da eletricidade com suas definições que relacionavam as correntes e as tensões de um circuito, publicado em 1847. Realizou pesquisas com o químico alemão Robert Bunsen (inventor do *bico de Bunsen*) que resultaram na descoberta dos elementos químicos *césio* e *rubídio*.

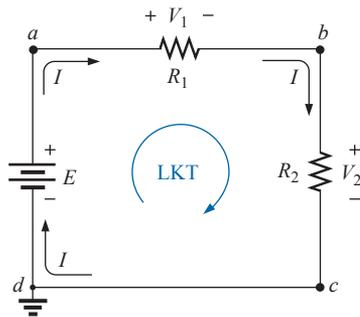


Figura 5.26 Aplicação da lei de Kirchhoff para tensões em um circuito CC em série.

Em uma forma simbólica, ela pode ser escrita como

$$\sum_{\odot} V = 0 \quad \text{(Lei de Kirchhoff para tensões na forma simbólica)} \quad (5.8)$$

onde Σ representa a soma, \odot a malha fechada e V as elevações e quedas de potencial. O termo *algébrico* significa simplesmente que devemos prestar atenção aos sinais que resultam nas equações à medida que adicionamos e subtraímos termos.

A primeira questão que surge com frequência é: qual sentido devo seguir na malha fechada? Devo sempre seguir o sentido da corrente? Para simplificar a questão, esse texto sempre tentará se deslocar em um sentido horário. Ao escolher um sentido, você elimina a necessidade de

pensar a respeito de qual caminho seria o mais apropriado. Qualquer sentido funcionará desde que você volte para o ponto de partida.

Outra questão é: como devo aplicar um sinal às várias tensões na medida em que avanço em um sentido horário? Para uma tensão em particular, designaremos um sinal positivo ao proceder do potencial negativo para o positivo — uma experiência positiva como ir de um saldo bancário negativo para um positivo. A mudança oposta em nível de potencial resulta em um sinal negativo. Na Figura 5.26, na medida em que prosseguimos do ponto d para o ponto a através da fonte de tensão, nós nos deslocamos de um potencial negativo (o sinal negativo) para um potencial positivo (o sinal positivo), de maneira que um sinal positivo é dado à fonte de tensão E . Conforme prosseguimos do ponto a para o ponto b , encontramos um sinal positivo seguido por um sinal negativo, de modo que uma queda em potencial ocorreu, e um sinal negativo é aplicado. Seguindo de b para c , encontramos outra queda em potencial, de maneira que outro sinal negativo é aplicado. Então, chegamos de volta ao ponto de partida d , e a soma resultante é estabelecida como igual a zero, como define a Equação 5.8.

Escrever a sequência usando as tensões e os sinais resulta no seguinte:

$$+E - V_1 - V_2 = 0$$

podendo ser reescrita como $E = V_1 + V_2$

O resultado é particularmente interessante, pois ele nos diz que

a tensão aplicada em um circuito CC em série será igual à soma das quedas de tensão do circuito.

A lei de Kirchhoff também pode ser escrita da seguinte forma:

$$\sum_{\odot} V_{\text{elevações}} = \sum_{\odot} V_{\text{quedas}} \quad (5.9)$$

revelando que

a soma das elevações de tensão em torno de uma malha fechada será sempre igual à soma das quedas de tensão.

Para demonstrar que a direção seguida em torno da malha não tem efeito sobre os resultados, tomaremos o sentido anti-horário e compararemos os resultados. A sequência resultante aparece como

$$-E + V_2 + V_1 = 0$$

produzindo o mesmo resultado de $E = V_2 + V_1$

EXEMPLO 5.8

Use a lei de Kirchhoff para determinar a tensão desconhecida para o circuito na Figura 5.27.

Solução:

Quando se aplica a lei de Kirchhoff para tensões, é importante concentrar-se nas polaridades das elevações e quedas de tensão, não no tipo de elemento. Em outras palavras, não trate uma queda de tensão em um elemento resistivo de modo diferente de uma elevação de tensão (ou queda) em uma fonte. Se a polaridade ditar que uma queda ocorreu, é isso o que importa, e não se ela é um elemento resistivo ou uma fonte.

A aplicação da lei de Kirchhoff para tensões no circuito da Figura 5.27, no sentido horário, resultará em:

$$+E_1 - V_1 - V_2 - E_2 = 0$$

e
$$V_1 = E_1 - V_2 - E_2 = 16 \text{ V} - 4,2 \text{ V} - 9 \text{ V}$$

de maneira que $V_1 = 2,8 \text{ V}$

O resultado mostra claramente que não é necessário conhecer os valores dos resistores ou da corrente para determinar a tensão desconhecida. Os valores das outras tensões são suficientes.

EXEMPLO 5.9

Determine a tensão desconhecida do circuito na Figura 5.28.

Solução:

Nesse caso, a tensão desconhecida não está em um único elemento resistivo, mas entre dois pontos arbitrários no circuito. Simplesmente aplique a lei de Kirchhoff para tensões em torno de um caminho, incluindo a fonte ou o resistor R_3 . Para o sentido horário, incluindo a fonte, a equação resultante é a seguinte:

$$+E - V_1 - V_x = 0$$

e
$$V_x = E - V_1 = 32 \text{ V} - 12 \text{ V} = 20 \text{ V}$$

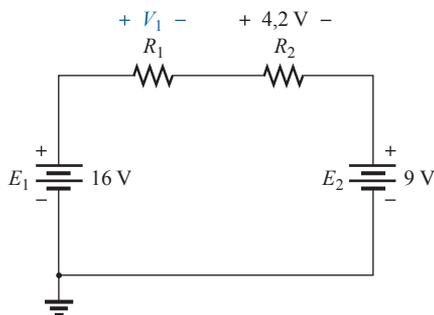


Figura 5.27 Circuito em série a ser examinado no Exemplo 5.8.

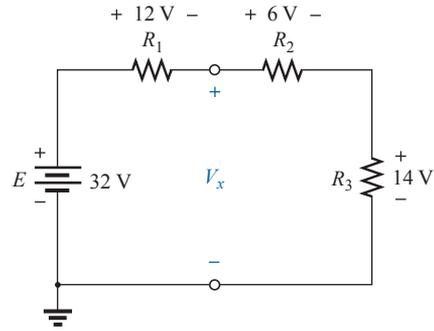


Figura 5.28 Circuito CC em série a ser analisado no Exemplo 5.9.

Para o sentido horário, incluindo o resistor R_3 , a equação é a seguinte:

$$+V_x - V_2 - V_3 = 0$$

e
$$V_x = V_2 + V_3 = 6 \text{ V} + 14 \text{ V}$$

com
$$V_x = 20 \text{ V}$$

fornecendo exatamente a mesma solução.

Não há uma exigência de que o caminho a ser seguido deva ter um fluxo de carga ou de corrente. No Exemplo 5.10, a corrente é zero em todo lugar, mas a lei de Kirchhoff para tensões ainda pode ser aplicada para determinar a tensão entre os pontos de interesse. Também ocorrerão situações em que a polaridade real não será fornecida. Em tais casos, simplesmente presuma uma polaridade. Se a resposta for negativa, o valor absoluto do resultado está correto, mas a polaridade deverá ser invertida.

EXEMPLO 5.10

Usando a lei de Kirchhoff para tensões, determine as tensões V_1 e V_2 para o circuito na Figura 5.29.

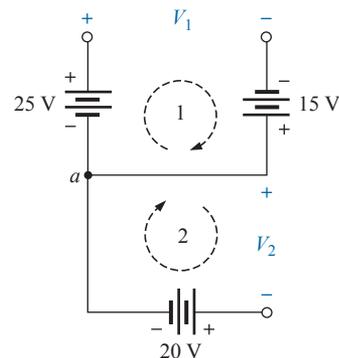


Figura 5.29 Combinação de fontes de tensão a serem examinadas no Exemplo 5.10.

Solução:

Para a malha 1, começando no ponto a em um sentido horário,

$$+25 \text{ V} - V_1 + 15 \text{ V} = 0$$

e $V_1 = \mathbf{40 \text{ V}}$

Para a malha 2, começando no ponto a em um sentido horário,

$$-V_2 - 20 \text{ V} = 0$$

e $V_2 = \mathbf{-20 \text{ V}}$

O sinal de menos na solução indica apenas que as polaridades reais são opostas àquelas escolhidas inicialmente.

O próximo exemplo demonstra que você não precisa saber quais elementos estão dentro de um recipiente ao aplicar a lei de Kirchhoff para tensões. Eles poderiam ser fontes de tensão ou uma combinação de fontes e resistores. Isso não importa; simplesmente, preste bastante atenção às polaridades encontradas.

Tente descobrir as quantidades desconhecidas nos exemplos a seguir sem olhar as respostas. Isso ajudará a definir onde você pode estar tendo problemas.

O Exemplo 5.11 enfatiza o fato de que, quando aplicamos a lei de Kirchhoff para tensões, as polaridades das quedas ou das elevações são os parâmetros que importam, não os tipos de elementos envolvidos.

EXEMPLO 5.11

Usando a lei de Kirchhoff para tensões, determine a tensão desconhecida para o circuito na Figura 5.30.

Solução:

Observe que, nesse circuito, há várias polaridades entre os elementos desconhecidos, tendo em vista que eles podem conter qualquer combinação de componentes. Aplicar a lei de Kirchhoff para tensões no sentido horário resulta em:

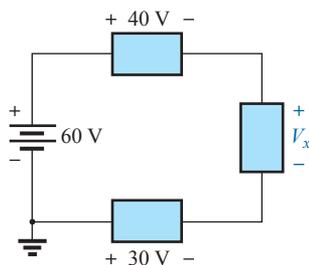


Figura 5.30 Configuração em série a ser examinada no Exemplo 5.11.

$$+60 \text{ V} - 40 \text{ V} - V_x + 30 \text{ V} = 0$$

e $V_x = 60 \text{ V} + 30 \text{ V} - 40 \text{ V} = 90 \text{ V} - 40 \text{ V}$

com $V_x = \mathbf{50 \text{ V}}$

EXEMPLO 5.12

Determine a tensão V_x para o circuito na Figura 5.31. Observe que a polaridade de V_x não foi fornecida.

Solução:

Para casos em que a polaridade não está incluída, simplesmente suponha uma polaridade e aplique a lei de Kirchhoff para tensões. Se os resultados têm um sinal positivo, a polaridade escolhida estava correta. Se o resultado tem um sinal de menos, o **valor absoluto está correto**, mas a polaridade suposta tem de ser invertida. Nesse caso, se supusermos que a é o terminal positivo e b , o negativo, e aplicarmos a lei de Kirchhoff para tensões no sentido horário, teremos:

$$-6 \text{ V} - 14 \text{ V} - V_x + 2 \text{ V} = 0$$

e $V_x = -20 \text{ V} + 2 \text{ V}$

de maneira que $V_x = \mathbf{-18 \text{ V}}$

Como o resultado foi negativo, sabemos que a deve ser negativo e b positivo, mas que o valor absoluto de 18 V está correto.

EXEMPLO 5.13

Para o circuito em série na Figura 5.32:

- determine V_2 usando a lei de Kirchhoff para tensões;
- determine a corrente I_2 ;
- descubra R_1 e R_3 .

Soluções:

- Aplicar a lei de Kirchhoff para tensões no sentido horário partindo do terminal negativo da fonte resulta em

$$-E + V_3 + V_2 + V_1 = 0$$

e $E = V_1 + V_2 + V_3$ (como esperado)

de maneira que

$$V_2 = E - V_1 - V_3 = 54 \text{ V} - 18 \text{ V} - 15 \text{ V}$$

e $V_2 = \mathbf{21 \text{ V}}$

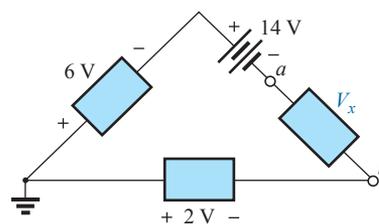


Figura 5.31 Aplicação da lei de Kirchhoff para tensões em um circuito no qual as polaridades não foram fornecidas para uma das tensões (Exemplo 5.12).

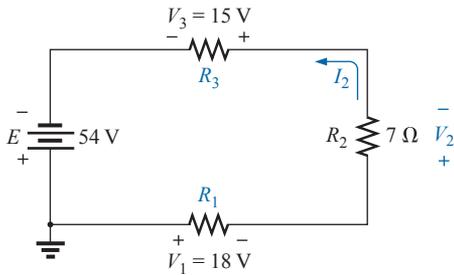


Figura 5.32 Configuração em série a ser examinada no Exemplo 5.13.

$$\begin{aligned} \text{b) } I_2 &= \frac{V_2}{R_2} = \frac{21\text{ V}}{7\ \Omega} \\ I_2 &= 3\text{ A} \\ \text{c) } R_1 &= \frac{V_1}{I_1} = \frac{18\text{ V}}{3\text{ A}} = 6\ \Omega \\ \text{com } R_3 &= \frac{V_3}{I_3} = \frac{15\text{ V}}{3\text{ A}} = 5\ \Omega \end{aligned}$$

EXEMPLO 5.14

Usando a lei de Kirchhoff para tensões e a Figura 5.12, verifique a Equação 5.1.

Solução:

Aplicando a lei de Kirchhoff para tensões em torno da malha fechada:

$$E = V_1 + V_2 + V_3$$

Substituindo a lei de Ohm:

$$I_s R_T = I_1 R_1 + I_2 R_2 + I_3 R_3$$

mas

$$I_s = I_1 = I_2 = I_3$$

de maneira que $I_s R_T = I_s (R_1 + R_2 + R_3)$

e

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3$$

que é a Equação 5.1.

5.7 DIVISÃO DE TENSÃO EM UM CIRCUITO EM SÉRIE

A seção anterior demonstrou que a soma das tensões através dos resistores de um circuito em série será sempre igual à tensão aplicada. Ela não pode ser maior ou menor que esse valor. A questão seguinte é: como o valor de um resistor afetará a tensão através do resistor? Na verdade,

a tensão através de elementos resistivos em série vai se dividir proporcionalmente ao valor de cada resistência em relação ao valor total da série.

Em outras palavras,

em um circuito resistivo em série, quanto maior a resistência, maior será a tensão capturada.

Além disso,

a razão das tensões através de resistores em série será a mesma que a razão de seus níveis de resistência.

Todas as definições anteriores podem ser descritas de uma maneira mais eficiente usando alguns poucos exemplos. Na Figura 5.33, todas as tensões através de elementos resistivos são fornecidas. O maior resistor de $6\ \Omega$ captura a maior parcela da tensão aplicada, enquanto o resistor menor, R_3 , captura a menor parte. Além disso, observe que, tendo em vista que o nível de resistência de R_1 é seis vezes aquele de R_3 , a tensão através de R_1 é seis vezes aquela de R_3 . O fato de o nível de resistência de R_2 ser três vezes aquele de R_1 resulta em três vezes a tensão em R_2 . Em geral, portanto, a tensão através de resistores em série terá a mesma razão que seus níveis de resistência.

Observe que se níveis de resistência de todos os resistores na Figura 5.33 forem aumentados pelo mesmo montante, como mostra a Figura 5.34, todos os níveis de

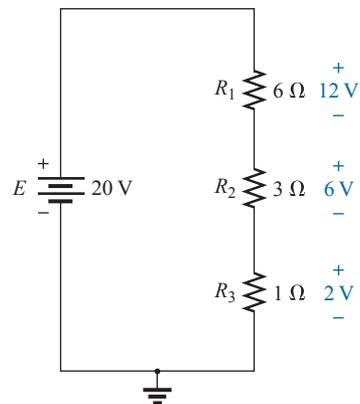


Figura 5.33 Exibição de como a tensão se divide através de elementos resistivos em série.

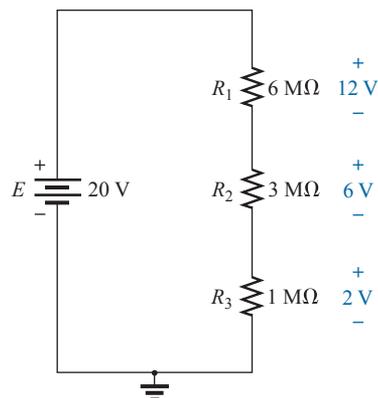


Figura 5.34 A razão de valores resistivos determina a divisão de tensão de um circuito CC em série.

tensão permanecerão os mesmos. Em outras palavras, apesar de os níveis de resistência terem sido aumentados em um fator de 1 milhão, as razões de tensão permaneceram as mesmas. Claramente, portanto, é a razão dos valores de resistores que conta quando falamos em divisão de tensão, não o valor absoluto dos resistores. O nível de corrente do circuito será severamente afetado por essa mudança no nível de resistência, mas os níveis de tensão permanecerão inalterados.

Com base no que foi dito, deve estar claro a essa altura que ao encontrar pela primeira vez um circuito como o da Figura 5.35, você deverá esperar que a tensão através do resistor de 1 MΩ seja muito maior do que aquela através do resistor de 1 kΩ ou de 100 Ω. Além disso, com base na declaração anterior, a tensão através do resistor de 1 kΩ será 10 vezes maior do que aquela através do resistor de 100 Ω, já que o nível de resistência é 10 vezes maior. Certamente, seria de se esperar que muito pouca tensão sobrasse para o resistor de 100 Ω. Observe que a corrente nunca foi mencionada na análise anterior. A distribuição da tensão aplicada é determinada somente pela razão de níveis de resistência. É claro que o valor absoluto dos resistores determinará o nível de corrente resultante.

Prosseguindo, tendo em vista que 1 MΩ é 1.000 vezes maior do que 1 kΩ, a tensão V_1 será 1.000 vezes maior do que V_2 . Além disso, a tensão V_2 será 10 vezes maior do que V_3 . Finalmente, a tensão através do resistor maior de 1 MΩ será $(10)(1.000) = 10.000$ vezes maior do que V_3 .

Agora, vamos aos detalhes. A resistência total é:

$$\begin{aligned} R_T &= R_1 + R_2 + R_3 \\ &= 1 \text{ M}\Omega + 1 \text{ k}\Omega + 100 \text{ }\Omega \\ R_T &= \mathbf{1.001.100 \text{ }\Omega} \end{aligned}$$

A corrente é:

$$I_s = \frac{E}{R_T} = \frac{100 \text{ V}}{1.001.100 \text{ }\Omega} \cong 99,89 \text{ }\mu\text{A} \text{ (em torno de } 100 \text{ }\mu\text{A)}$$

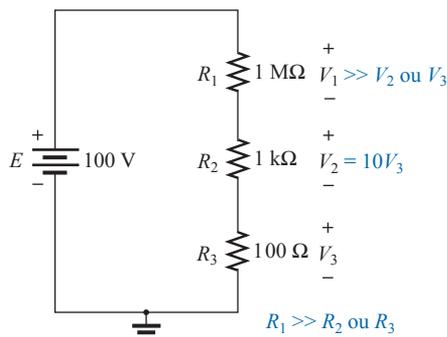


Figura 5.35 O maior dos elementos resistivos em série vai capturar a porção maior da tensão aplicada.

com

$$V_1 = I_1 R_1 = I_s R_1 = (99,89 \text{ }\mu\text{A})(1 \text{ M}\Omega) = \mathbf{99,89 \text{ V}}$$

(quase 100 V)

$$V_2 = I_2 R_2 = I_s R_2 = (99,89 \text{ }\mu\text{A})(1 \text{ k}\Omega) = \mathbf{99,89 \text{ mV}}$$

(em torno de 100 mV)

$$V_3 = I_3 R_3 = I_s R_3 = (99,89 \text{ }\mu\text{A})(100 \text{ }\Omega) = \mathbf{9,989 \text{ mV}}$$

(em torno de 10 mV)

Como ilustrado, a parte principal da tensão aplicada ocorre através do resistor de 1 MΩ. A corrente está no âmbito do microampère devido, fundamentalmente, ao resistor grande de 1 MΩ. A tensão V_2 gira em torno de 0,1 V, comparada com quase 100 V para V_1 . A tensão através de R_3 é de apenas aproximadamente 10 mV, ou 0,010 V.

Antes de fazer quaisquer cálculos detalhados e extensos, você deve primeiro examinar os níveis de resistência dos resistores em série para desenvolver alguma ideia de como a tensão aplicada será dividida através do circuito. Isso vai revelar, com um mínimo de esforço, o que você deveria esperar ao realizar os cálculos (um mecanismo de checagem). Isso também permite que você se manifeste de maneira inteligente a respeito da resposta do circuito sem ter de recorrer a nenhum cálculo.

Regra do divisor de tensão (VDR)

A **regra do divisor de tensão** permite a determinação da tensão através de um resistor em série sem que se tenha de determinar primeiro a corrente do circuito. A regra em si pode ser deduzida ao se analisar o circuito em série simples na Figura 5.36.

Primeiro, determine a resistência total como a seguir:

$$R_T = R_1 + R_2$$

Então
$$I_s = I_1 = I_2 = \frac{E}{R_T}$$

Aplique a lei de Ohm para cada resistor:

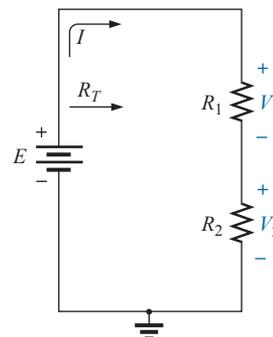


Figura 5.36 Desenvolvimento da regra do divisor de tensão.

$$V_1 = I_1 R_1 = \left(\frac{E}{R_T} \right) R_1 = R_1 \frac{E}{R_T}$$

$$V_2 = I_2 R_2 = \left(\frac{E}{R_T} \right) R_2 = R_2 \frac{E}{R_T}$$

O formato resultante para V_1 e V_2 é

$$V_x = R_x \frac{E}{R_T} \quad (\text{regra do divisor de tensão}) \quad (5.10)$$

onde V_x é a tensão através do resistor R_x , E é a tensão aplicada através dos elementos em série, e R_T é a resistência total do circuito em série.

A regra do divisor de tensão declara que

a tensão através de um resistor em um circuito em série é igual ao valor daquele resistor vezes a tensão aplicada total dividida pela resistência total da configuração em série.

Apesar de a Equação 5.10 ter sido derivada usando-se um circuito em série de apenas dois elementos, ela pode ser usada em circuitos em série que tenham um número qualquer de resistores em série.

EXEMPLO 5.15

Para o circuito em série na Figura 5.37:

- sem realizar nenhum cálculo, quão maior você esperaria que a tensão através de R_2 fosse comparada com aquela através de R_1 ?
- descubra qual é a tensão V_1 usando apenas a regra do divisor de tensão;
- usando a conclusão da parte (a), determine a tensão através de R_2 ;
- use a regra do divisor de tensão para determinar a tensão através de R_2 e compare sua resposta com sua conclusão na parte (c);
- como a soma de V_1 e V_2 se compara com a tensão aplicada?

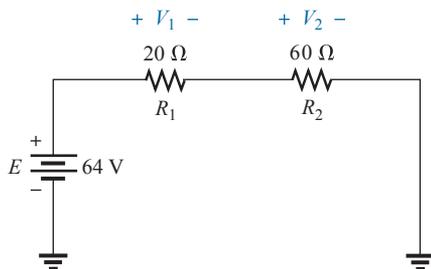


Figura 5.37 Circuito em série a ser examinado usando-se a regra do divisor de tensão no Exemplo 5.15.

Soluções:

a) Tendo em vista que o resistor R_2 é três vezes R_1 , espera-se que $V_2 = 3V_1$.

$$b) V_1 = R_1 \frac{E}{R_T} = 20 \Omega \left(\frac{64 \text{ V}}{20 \Omega + 60 \Omega} \right) = 20 \Omega \left(\frac{64 \text{ V}}{80 \Omega} \right) = 16 \text{ V}$$

$$c) V_2 = 3V_1 = 3(16 \text{ V}) = 48 \text{ V}$$

$$d) V_2 = R_2 \frac{E}{R_T} = (60 \Omega) \left(\frac{64 \text{ V}}{80 \Omega} \right) = 48 \text{ V}$$

Os resultados são exatamente os mesmos.

$$e) E = V_1 + V_2$$

$$64 \text{ V} = 16 \text{ V} + 48 \text{ V} = 64 \text{ V} \quad (\text{confere})$$

EXEMPLO 5.16

Usando a regra do divisor de tensão, determine as tensões V_1 e V_3 para o circuito em série na Figura 5.38.

Solução:

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3$$

$$= 2 \text{ k}\Omega + 5 \text{ k}\Omega + 8 \text{ k}\Omega$$

$$R_T = 15 \text{ k}\Omega$$

$$V_1 = R_1 \frac{E}{R_T} = 2 \text{ k}\Omega \left(\frac{45 \text{ V}}{15 \text{ k}\Omega} \right) = 6 \text{ V}$$

$$e) V_3 = R_3 \frac{E}{R_T} = 8 \text{ k}\Omega \left(\frac{45 \text{ V}}{15 \text{ k}\Omega} \right) = 24 \text{ V}$$

A regra do divisor de tensão pode ser estendida à tensão por meio de dois ou mais elementos em série, se a resistência no numerador da Equação 5.10 for expandida para incluir a resistência total dos resistores em série, através dos quais a tensão será encontrada (R'). Isto é,

$$V' = R' \frac{E}{R_T} \quad (5.11)$$

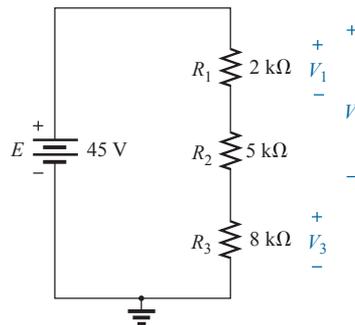


Figura 5.38 Circuito em série a ser investigado nos exemplos 5.16 e 5.17.

EXEMPLO 5.17

Determine a tensão (denotada V') através da combinação em série dos resistores R_1 e R_2 na Figura 5.38.

Solução:

Tendo em vista que a tensão desejada está tanto em R_1 quanto em R_2 , a soma de R_1 e R_2 será substituída como R' na Equação 5.11. O resultado é:

$$R' = R_1 + R_2 = 2 \text{ k}\Omega + 5 \text{ k}\Omega = 7 \text{ k}\Omega$$

e

$$V' = R' \frac{E}{R_T} = 7 \text{ k}\Omega \left(\frac{45 \text{ V}}{15 \text{ k}\Omega} \right) = 21 \text{ V}$$

No exemplo a seguir, você é apresentado a um problema de outro tipo: dada a divisão de tensão, você tem de determinar os valores de resistor exigidos. Na maioria dos casos, problemas desse tipo simplesmente exigem que você seja capaz de usar as equações básicas introduzidas até o momento.

EXEMPLO 5.18

Dada a leitura do voltímetro na Figura 5.39, descubra a tensão V_3 .

Solução:

Apesar de o resto do circuito não ser mostrado e o nível de corrente não ter sido determinado, a regra do divisor de tensão pode ser aplicada usando-se a leitura do voltímetro como a tensão total através da combinação em série de resistores. Isto é,

$$V_3 = R_3 \frac{(V_{\text{medidor}})}{R_3 + R_2} = \frac{3 \text{ k}\Omega(5,6 \text{ V})}{3 \text{ k}\Omega + 1,2 \text{ k}\Omega}$$

$$V_3 = 4 \text{ V}$$

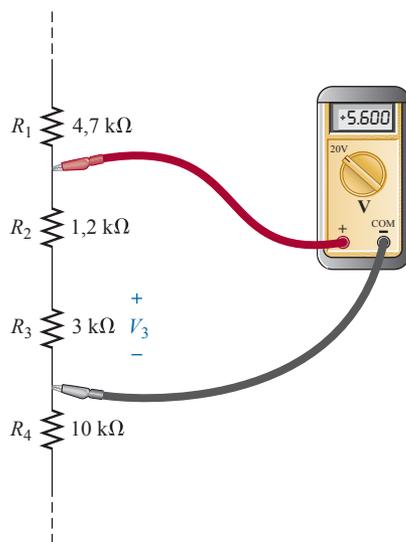


Figura 5.39 Ação do divisor de tensão do Exemplo 5.18.

EXEMPLO 5.19

Projete o circuito divisor de tensão da Figura 5.40 de tal maneira que a tensão através de R_1 seja quatro vezes a tensão através de R_2 ; isto é, $V_{R_1} = 4 V_{R_2}$.

Solução:

A resistência total é definida por:

$$R_T = R_1 + R_2$$

entretanto, se $V_{R_1} = 4V_{R_2}$

então $R_1 = 4R_2$

de maneira que $R_T = R_1 + R_2 = 4R_2 + R_2 = 5R_2$

Ao aplicar a lei de Ohm, podemos determinar a resistência total do circuito:

$$R_T = \frac{E}{I_S} = \frac{20 \text{ V}}{4 \text{ mA}} = 5 \text{ k}\Omega$$

de maneira que $R_T = 5R_2 = 5 \text{ k}\Omega$

e $R_2 = \frac{5 \text{ k}\Omega}{5} = 1 \text{ k}\Omega$

então $R_1 = 4R_2 = 4(1 \text{ k}\Omega) = 4 \text{ k}\Omega$

5.8 INTERCÂMBIO DE ELEMENTOS EM SÉRIE

Os elementos de circuitos em série podem ser intercambiados sem que a resistência total, a corrente que atravessa o circuito e a potência consumida pelos diferentes elementos sejam afetadas. Por exemplo, o circuito visto na Figura 5.41 pode ser redesenhado conforme ilustra a Figura 5.42, sem que os valores de I e V_2 sejam afetados. A resistência total R_T é 35Ω nos dois casos, e $I = 70 \text{ V}/35 \Omega = 2 \text{ A}$. A tensão $V_2 = IR_2 = (2 \text{ A})(5 \Omega) = 10 \text{ V}$ nas duas configurações.

EXEMPLO 5.20

Determine I e a tensão entre os terminais do resistor de 7Ω no circuito da Figura 5.43.

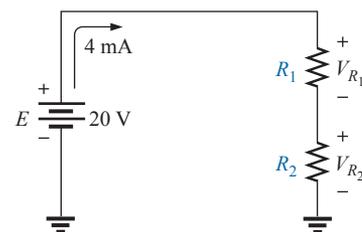


Figura 5.40 Projeto de um circuito divisor de tensão (Exemplo 5.19).

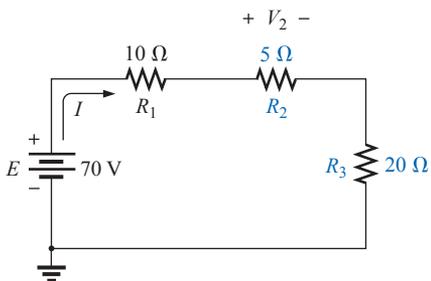


Figura 5.41 Circuitos CC em série com os elementos a serem intercambiados.

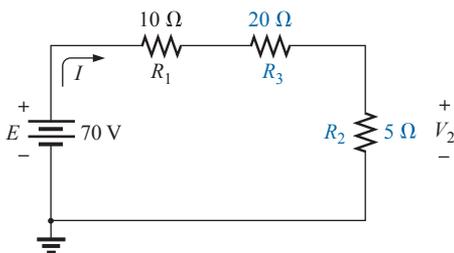


Figura 5.42 Circuito da Figura 5.41 com R_2 e R_3 intercambiados.

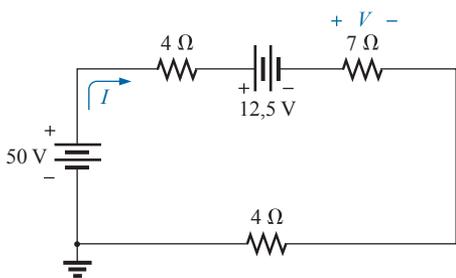


Figura 5.43 Exemplo 5.20.

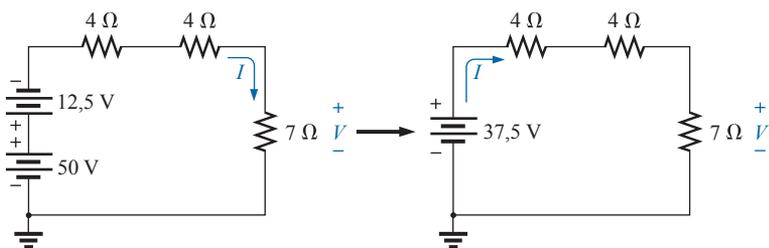


Figura 5.44 Redesenho do circuito da Figura 5.43.

Solução:

O circuito é redesenhado como mostra a Figura 5.44.

$$R_T = (2)(4\ \Omega) + 7\ \Omega = 15\ \Omega$$

$$I = \frac{E}{R_T} = \frac{37,5\text{ V}}{15\ \Omega} = 2,5\text{ A}$$

$$V_{7\Omega} = IR = (2,5\text{ A})(7\ \Omega) = 17,5\text{ V}$$

5.9 NOTAÇÃO

A notação possui uma importante função nas análises que seguem. Portanto, é importante que comecemos a analisar a notação usada pela indústria.

Fontes de tensão e terra

Exceto em uns poucos casos especiais, os sistemas elétricos e eletrônicos são aterrados por razões de segurança e para fins de referência. O símbolo que indica a conexão terra aparece na Figura 5.45 com seu valor de potencial definido — zero volts. Um circuito aterrado pode se parecer ao que mostra a Figura 5.46(a), (b) ou (c). Em qualquer um dos casos, entende-se que o terminal negativo da bateria e o terminal inferior do resistor R_2 estão conectados ao potencial do ponto de terra. Embora a Figura 5.46(c) não mostre nenhuma conexão entre os dois terras, supõe-se que tal ligação exista para garantir o fluxo contínuo da carga. Se $E = 12\text{ V}$, então o ponto a está a um potencial positivo de 12 V em relação ao potencial do ponto de terra, e existem 12 V entre os terminais da combinação em série dos resistores R_1 e R_2 . Se um voltímetro conectado entre o ponto b e o terra lê 4 V, então a tensão entre os terminais de R_2 é 4 V, estando o potencial maior em b .

Em diagramas esquemáticos maiores, nos quais o espaço precisa ser aproveitado ao máximo e a clareza de informações é muito importante, as fontes de tensão podem ser indicadas como nas figuras 5.47(a) e 5.48(a), não como nas figuras 5.47(b) e 5.48(b). Além disso, os valores de potencial podem ser indicados na Figura 5.49



Figura 5.45 Potencial do ponto de terra.

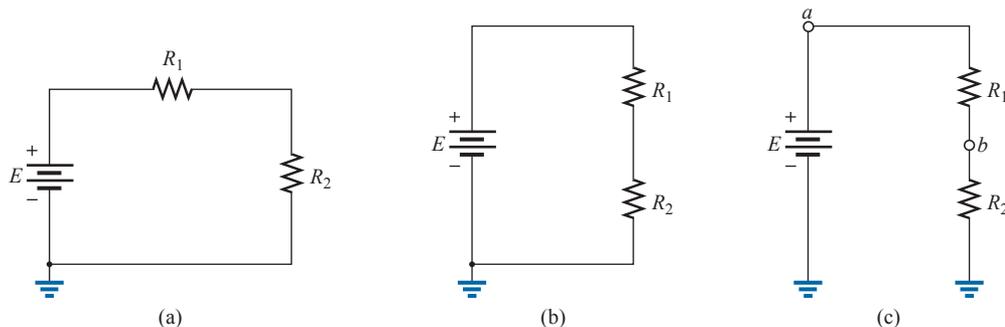


Figura 5.46 Três formas de mostrar o mesmo circuito CC em série.

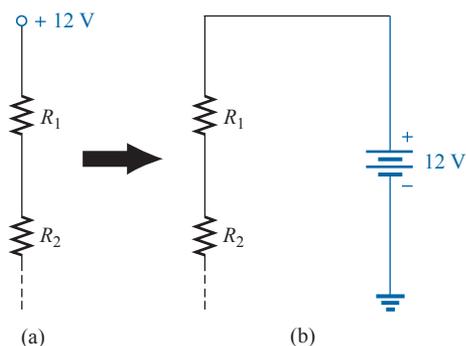


Figura 5.47 Substituição da notação especial em uma fonte de tensão CC pelo símbolo-padrão.

para permitir uma verificação rápida dos valores dos potenciais, relativos ao ponto de terra, em vários pontos de um circuito para assegurar que o sistema está operando adequadamente.

Notação de duplo índice inferior

O fato de a tensão ser uma grandeza estabelecida entre dois pontos resultou em uma notação de duplo índice inferior que define o primeiro índice inferior como correspondente ao ponto de maior potencial. Na Figura 5.50(a), os dois pontos que definem a tensão entre os terminais do resistor R são representados por a e b . Como a é o primeiro índice em V_{ab} , o ponto a deve estar a um potencial maior que o ponto b para que V_{ab} tenha um valor positivo. Se, na verdade, o ponto b estiver a um potencial maior do que

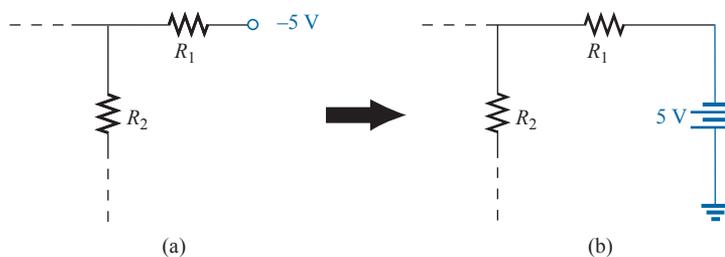


Figura 5.48 Substituição da notação em uma fonte de tensão CC negativa pela notação-padrão.

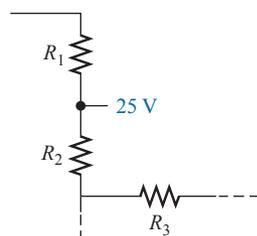


Figura 5.49 A presença do valor esperado da tensão em um ponto específico de um circuito mostra que ele está funcionando corretamente.

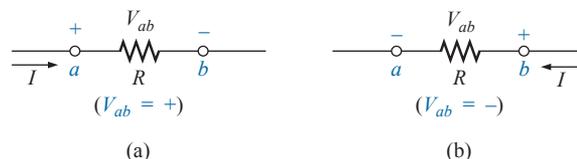


Figura 5.50 Definição do sinal para a notação de duplo índice inferior.

o ponto a , V_{ab} terá um valor negativo, conforme indica a Figura 5.50(b).

Em resumo:

a notação de duplo índice inferior V_{ab} especifica o ponto a como o de maior potencial. Se esse não for o caso, um sinal negativo deve ser associado ao valor de V_{ab} .

Em outras palavras:

a tensão V_{ab} é a tensão no ponto a em relação ao ponto b .

Notação de índice inferior único

Se o ponto b da notação V_{ab} for especificado como o potencial de terra (zero volt), então uma notação de subscripto inferior único poderá ser usada para informar a tensão em um ponto em relação ao ponto de terra.

Na Figura 5.51, V_a é a tensão entre o ponto a e o ponto de terra. Nesse caso, ela é obviamente 10 V, pois é medida diretamente entre os terminais da fonte de tensão E . A tensão V_b é a tensão entre o ponto b e o ponto de terra. Como é uma tensão obtida diretamente sobre o resistor de 4Ω , $V_b = 4 \text{ V}$.

Em resumo:

a notação de índice inferior único V_a especifica a tensão no ponto a em relação ao ponto de terra (zero volt). Se a tensão é menor que zero, um sinal negativo deve ser associado ao valor de V_a .

Comentários gerais

Uma relação particularmente útil pode ser estabelecida agora, e ela terá aplicação extensiva na análise de circuitos eletrônicos. Em função dos padrões de notação citados anteriormente, temos a seguinte relação:

$$V_{ab} = V_a - V_b \quad (5.12)$$

Em outras palavras, se as tensões nos pontos a e b em relação ao ponto de terra forem conhecidas, a tensão

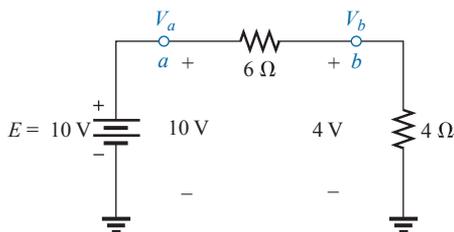


Figura 5.51 Definição do uso da notação de índice único para valores de tensão.

V_{ab} poderá ser determinada usando-se a Equação 5.12. A partir da Figura 5.51, por exemplo:

$$V_{ab} = V_a - V_b = 10 \text{ V} - 4 \text{ V} = 6 \text{ V}$$

EXEMPLO 5.21

Determine a tensão V_{ab} para as condições mostradas na Figura 5.52.

Solução:

Aplicando a Equação 5.12:

$$V_{ab} = V_a - V_b = 16 \text{ V} - 20 \text{ V} = -4 \text{ V}$$

Observe que o sinal negativo indica o fato de que o ponto b está a um potencial mais elevado do que o ponto a .

EXEMPLO 5.22

Determine a tensão V_a para a configuração ilustrada na Figura 5.53.

Solução:

Aplicando a Equação 5.12:

$$e \quad \begin{aligned} V_{ab} &= V_a - V_b \\ V_a &= V_{ab} + V_b = 5 \text{ V} + 4 \text{ V} \\ &= 9 \text{ V} \end{aligned}$$

EXEMPLO 5.23

Determine a tensão V_{ab} para a configuração mostrada na Figura 5.54.

Solução:

Aplicando a Equação 5.12:

$$V_{ab} = V_a - V_b = 20 \text{ V} - (-15 \text{ V}) = 20 \text{ V} + 15 \text{ V} = 35 \text{ V}$$

Note no Exemplo 5.23 que é preciso ter cuidado com os sinais ao usar a equação. A tensão cai de um valor

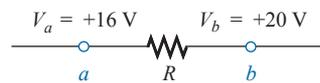


Figura 5.52 Exemplo 5.21.

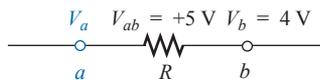


Figura 5.53 Exemplo 5.22.

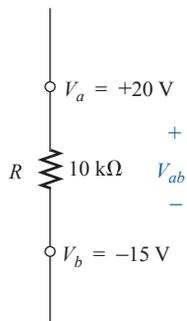


Figura 5.54 Exemplo 5.23.

positivo de +20 V para um valor negativo de -15 V. Conforme mostra a Figura 5.55, isso representa uma queda de tensão de 35 V. De certa forma, é como passar de um saldo bancário positivo de R\$ 20,00 para um saldo negativo de R\$ 15,00; o total das despesas corresponde a R\$ 35,00.

EXEMPLO 5.24

Determine as tensões V_b , V_c e V_{ac} no circuito visto na Figura 5.56.

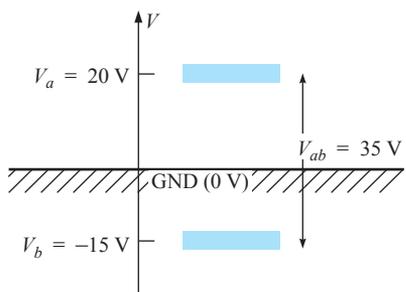


Figura 5.55 Influência de tensões positivas e negativas sobre a queda de tensão total.

Solução:

Começando no potencial de terra (zero volt), subimos 10 V para chegar ao ponto a e, em seguida, passamos por uma queda de potencial de 4 V para chegar ao ponto b. O resultado é que o medidor lerá:

$$V_b = +10 \text{ V} - 4 \text{ V} = 6 \text{ V}$$

como demonstra claramente a Figura 5.57.

Se continuarmos até o ponto c, haverá uma queda adicional de 20 V, o que nos dará

$$V_c = V_b - 20 \text{ V} = 6 \text{ V} - 20 \text{ V} = -14 \text{ V}$$

como ilustra a Figura 5.58.

A tensão V_{ac} pode ser obtida usando-se a Equação 5.12 ou simplesmente observando a Figura 5.58.

$$V_{ac} = V_a - V_c = 10 \text{ V} - (-14 \text{ V}) = 24 \text{ V}$$

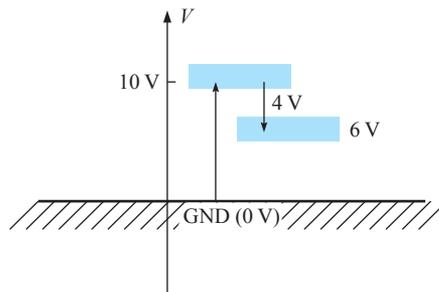


Figura 5.57 Determinação de V_b a partir dos valores definidos de tensão.

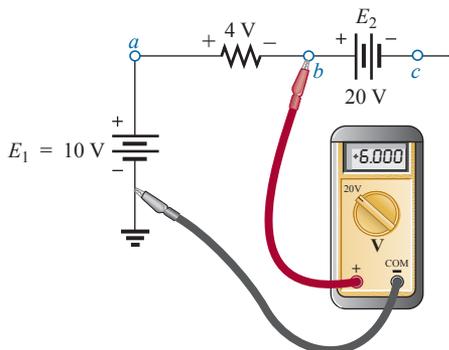


Figura 5.56 Exemplo 5.24.

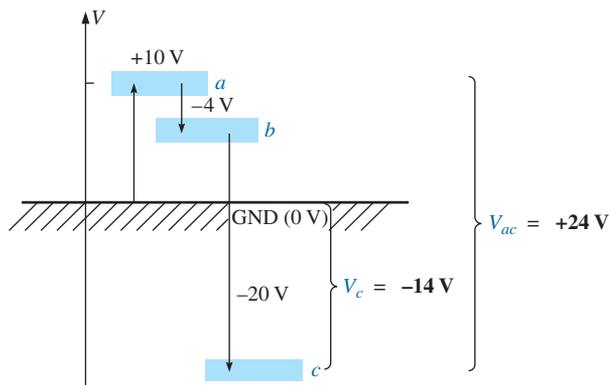


Figura 5.58 Revisão dos valores de potencial para o circuito da Figura 5.56.

EXEMPLO 5.25

Determine V_{ab} , V_{cb} e V_c para o circuito mostrado na Figura 5.59.

Solução:

Há dois modos de resolver esse problema. O primeiro é fazer um esboço como o da Figura 5.60 e notar que existe uma queda de 54 V entre os terminais dos resistores em série R_1 e R_2 . A corrente pode então ser determinada usando a lei de Ohm e os valores das tensões, como segue:

$$I = \frac{54 \text{ V}}{45 \Omega} = 1,2 \text{ A}$$

$$V_{ab} = IR_2 = (1,2 \text{ A})(25 \Omega) = 30 \text{ V}$$

$$V_{cb} = -IR_1 = -(1,2 \text{ A})(20 \Omega) = -24 \text{ V}$$

$$V_c = E_1 = -19 \text{ V}$$

O outro modo é redesenhar o circuito, como mostra a Figura 5.61, para estabelecer o efeito somatório de E_1 e E_2 para então resolver o circuito em série resultante:

$$I = \frac{E_1 + E_2}{R_T} = \frac{19 \text{ V} + 35 \text{ V}}{45 \Omega} = \frac{54 \text{ V}}{45 \Omega} = 1,2 \text{ A}$$

e $V_{ab} = 30 \text{ V}$ $V_{cb} = -24 \text{ V}$ $V_c = -19 \text{ V}$

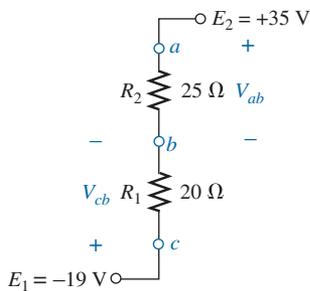


Figura 5.59 Exemplo 5.25.

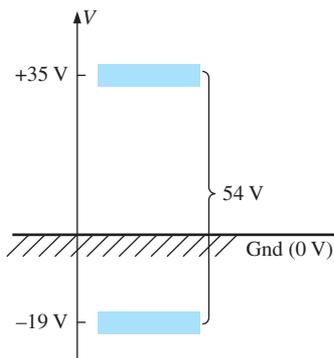


Figura 5.60 Determinação da queda de tensão total nos elementos resistivos da Figura 5.59.

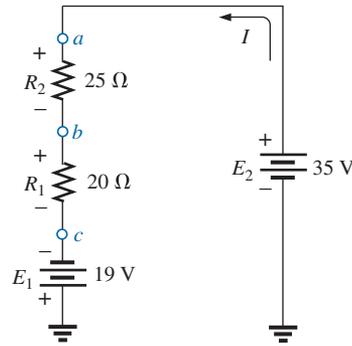


Figura 5.61 Redesenho do circuito da Figura 5.59 usando os símbolos-padrão da fonte de tensão CC.

EXEMPLO 5.26

Usando a regra dos divisores de tensão, determine as tensões V_1 e V_2 da Figura 5.62.

Solução:

Redesenhando o circuito utilizando o símbolo de bateria, obtemos o circuito da Figura 5.63. Ao aplicar a regra dos divisores de tensão,

$$V_1 = \frac{R_1 E}{R_1 + R_2} = \frac{(4 \Omega)(24 \text{ V})}{4 \Omega + 2 \Omega} = 16 \text{ V}$$

$$V_2 = \frac{R_2 E}{R_1 + R_2} = \frac{(2 \Omega)(24 \text{ V})}{4 \Omega + 2 \Omega} = 8 \text{ V}$$

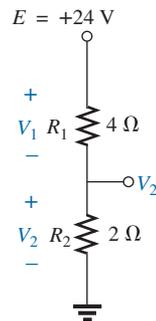


Figura 5.62 Exemplo 5.26.

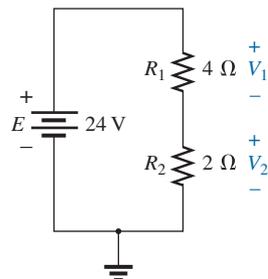


Figura 5.63 Circuito da Figura 5.62 redesenhado.

EXEMPLO 5.27

Para o circuito visto na Figura 5.64:

- a) calcule V_{ab} ;
- b) calcule V_b ;
- c) calcule V_c .

Soluções:

- a) Regra dos divisores de tensão:

$$V_{ab} = \frac{R_1 E}{R_T} = \frac{(2 \Omega)(10 \text{ V})}{2 \Omega + 3 \Omega + 5 \Omega} = +2 \text{ V}$$

- b) Regra dos divisores de tensão:

$$V_b = V_{R_2} + V_{R_3} = \frac{(R_2 + R_3) E}{R_T} = \frac{(3 \Omega + 5 \Omega)(10 \text{ V})}{10 \Omega} = 8 \text{ V}$$

ou $V_b = V_a - V_{ab} = E - V_{ab} = 10 \text{ V} - 2 \text{ V} = 8 \text{ V}$

- c) $V_c =$ potencial do ponto de terra = 0 V

5.10 REGULAÇÃO DE TENSÃO E RESISTÊNCIA INTERNA DAS FONTES DE TENSÃO

Quando você usa uma fonte CC como o gerador, a bateria ou a fonte da Figura 5.65, você presume inicialmente que ela fornecerá a tensão desejada para qualquer carga resistiva que possa conectar à fonte. Em outras palavras, se a bateria é rotulada 1,5 V ou a fonte é estabelecida a 20 V, você presume que elas fornecerão essa tensão, não importando a carga aplicada. Infelizmente, nem sempre é o caso. Por exemplo, se aplicamos um resistor de 1 kΩ

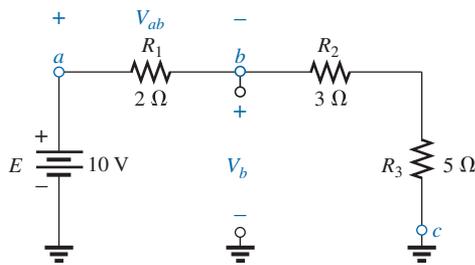


Figura 5.64 Exemplo 5.27.

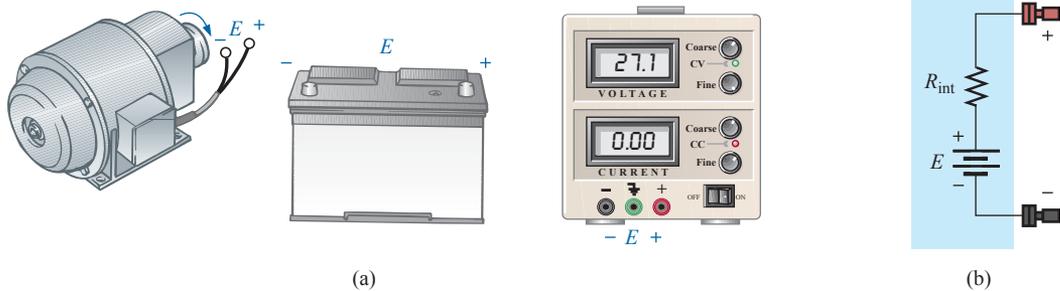


Figura 5.65 (a) Fontes de tensão CC; (b) circuito equivalente.

a uma fonte de laboratório CC, é relativamente fácil estabelecer a tensão de 20 V através do resistor. Entretanto, se removemos o resistor de 1 kΩ e o substituímos por um resistor de 100 Ω, sem mexer nos controles da fonte, podemos descobrir que a tensão caiu para 19,14 V. Mude a carga para um resistor de 68 Ω, e a tensão terminal cai para 18,72 V. Descobrimos que a carga aplicada afeta a tensão terminal da fonte. Na realidade, esse exemplo destaca que

um circuito deve estar sempre conectado a uma fonte antes de o nível da tensão da fonte ser selecionado.

O motivo pelo qual a tensão terminal cai por causa das mudanças na carga (demanda de corrente) é que

toda fonte prática (mundo real) tem uma resistência interna em série com a fonte de tensão idealizada.

como mostra a Figura 5.65(b). O nível de resistência depende do tipo de fonte, mas ele está sempre presente. Todo ano são lançadas novas fontes que são menos sensíveis à carga aplicada, mas, mesmo assim, alguma sensibilidade ainda permanece.

A fonte na Figura 5.66 ajuda a explicar a ação que ocorreu antes quando mudamos o resistor de carga. Devido à **resistência interna** da fonte, a fonte interna ideal deve ser estabelecida em 20,1 V, como indica a Figura 5.66(a), se 20 V tiver de aparecer através do resistor de 1 kΩ. A resistência interna vai capturar 0,1 V da tensão aplicada. A corrente no circuito é determinada simplesmente olhando para a carga e usando a lei de Ohm; isto é, $I_L = V_L/R_L = 20 \text{ V}/1 \text{ k}\Omega = 20 \text{ mA}$, que é uma corrente relativamente baixa.

Na Figura 5.66(b), todas as configurações da fonte são deixadas intocadas, mas a carga de 1 kΩ é substituída por um resistor de 100 Ω. A corrente resultante é agora $I_L = E/R_T = 20,1 \text{ V}/105 \Omega = 191,43 \text{ mA}$, e a tensão de saída é $V_L = I_L R = (191,43 \text{ mA})(100 \Omega) = 19,14 \text{ V}$, uma queda de 0,86 V. Na Figura 5.66(c), uma carga de 68 Ω é aplicada, e a corrente aumenta substancialmente para 275,34 mA com uma tensão terminal de apenas 18,72 V. Essa é uma

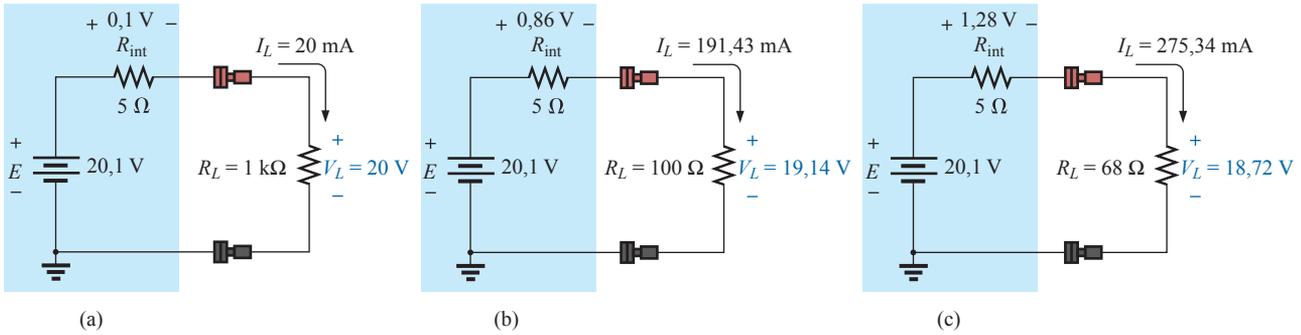


Figura 5.66 Demonstração do efeito de mudança de uma carga na tensão terminal de uma fonte.

queda de 1,28 V do nível esperado. De maneira bastante óbvia, entretanto, na medida em que a corrente drenada da fonte aumenta, a tensão terminal continua a cair.

Se colocarmos em um gráfico a tensão terminal em relação à demanda de corrente de 0 A para 275,34 mA, obteremos o gráfico da Figura 5.67. É interessante a formação de uma linha reta que continua a cair com o aumento na demanda de corrente. Observe, em particular, que a curva começa a um nível de corrente de 0 A.

Quando não há carga, e os terminais de saída da fonte não estão conectados a qualquer carga, a corrente será de 0 A devido à ausência de um circuito completo. A tensão de saída será o nível de fonte ideal interna de 20,1 V.

A inclinação da linha é definida pela resistência interna da fonte. Isto é,

$$R_{\text{int}} = \frac{\Delta V_L}{\Delta I_L} \quad (\text{ohms}, \Omega) \quad (5.13)$$

o que para o gráfico na Figura 5.67 resulta em

$$R_{\text{int}} = \frac{\Delta V_L}{\Delta I_L} = \frac{20,1\text{V} - 18,72\text{V}}{275,34\text{mA} - 0\text{mA}} = \frac{1,38\text{V}}{275,34\text{mA}} = 5\ \Omega$$

Para fontes de qualquer tipo, o gráfico especificamente importante é o da tensão de saída em relação à corrente drenada da fonte, como mostra a Figura 5.68(a). Observe que o valor máximo é conseguido sob condições sem carga como define a Figura 5.68(b) e a descrição anterior. Condições de plena carga são definidas pela corrente máxima que a fonte pode fornecer de maneira contínua, como mostra a Figura 5.68(c).

Como base para comparação, uma fonte de tensão ideal e sua curva de resposta são fornecidas na Figura 5.69. Observe a ausência da resistência interna e o fato de que é uma linha horizontal (não há variação alguma com a demanda de carga) — uma curva de resposta impossível. Quando comparamos a curva na Figura 5.69 com aquela na Figura 5.68(a), entretanto, percebemos que *quanto mais intensa a inclinação*, mais sensível é a fonte à mudança de carga e, portanto, ela é *menos desejável* para muitos dos procedimentos de laboratório. Na realidade,

quanto maior for a resistência interna, mais intensa é a queda na tensão com um aumento na demanda de curva (corrente).

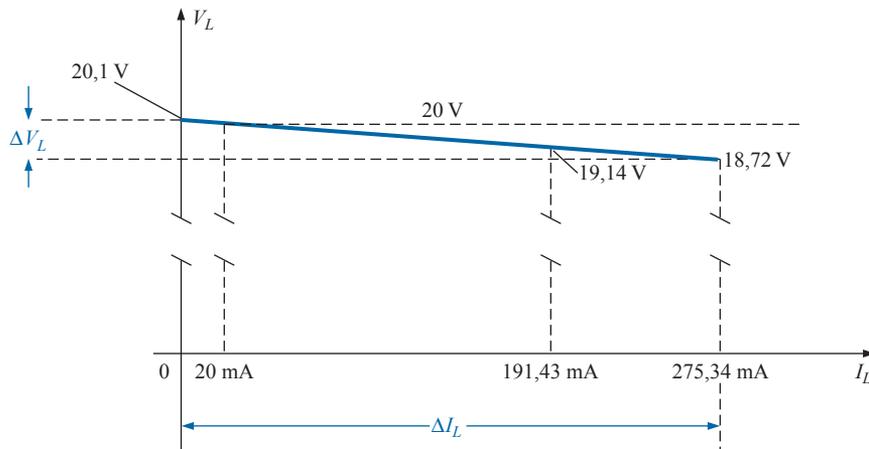


Figura 5.67 Gráfico de V_L em relação a I_L para a fonte na Figura 5.66.

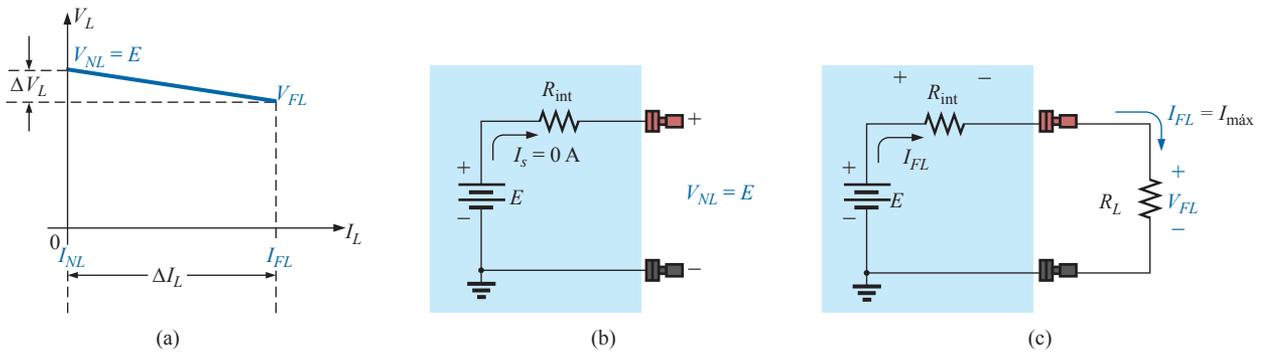


Figura 5.68 Definição das propriedades de importância para uma fonte de potência.

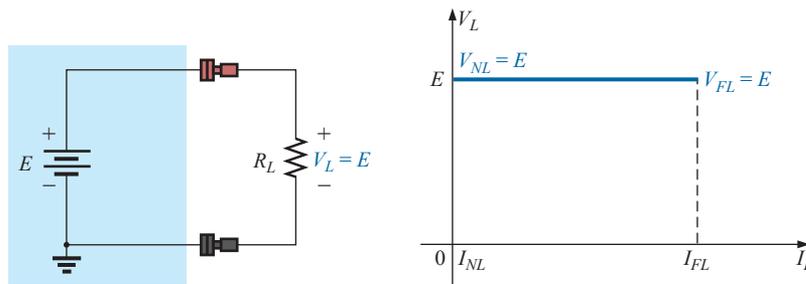


Figura 5.69 Fonte ideal e suas características terminais.

Para nos ajudar a antecipar a resposta esperada de uma fonte, uma especificação chamada **regulação de tensão** (abreviada *VR*, do inglês Voltage Regulation; frequentemente chamada de *regulação de carga* em planilhas de especificação) foi estabelecida. A equação básica em termos das quantidades na Figura 5.68(a) é a seguinte:

$$VR = \frac{V_{NL} - V_{FL}}{V_{FL}} \times 100\% \quad (5.14)$$

Os exemplos a seguir demonstram que

quanto menor a regulação de tensão ou a carga de uma fonte, menor será a variação da tensão terminal com níveis crescentes de demanda de corrente.

Para a fonte anterior com uma tensão sem carga de 20,1 V e uma tensão com plena carga de 18,72 V, a 275,34 mA, a regulação de tensão é

$$VR = \frac{V_{NL} - V_{FL}}{V_{FL}} \times 100\% = \frac{20,1\text{ V} - 18,72\text{ V}}{18,72\text{ V}} \times 100\% \cong 7,37\%$$

o que é bastante alto, revelando que temos uma fonte muito sensível. A maioria das fontes comerciais modernas tem

fatores de regulação menores que 1 por cento, com 0,01 por cento sendo bastante comum.

EXEMPLO 5.28

- a) Dadas as características na Figura 5.70, determine a regulação de tensão da fonte.
- b) Determine a resistência interna da fonte.
- c) Desenhe o circuito equivalente para a fonte.

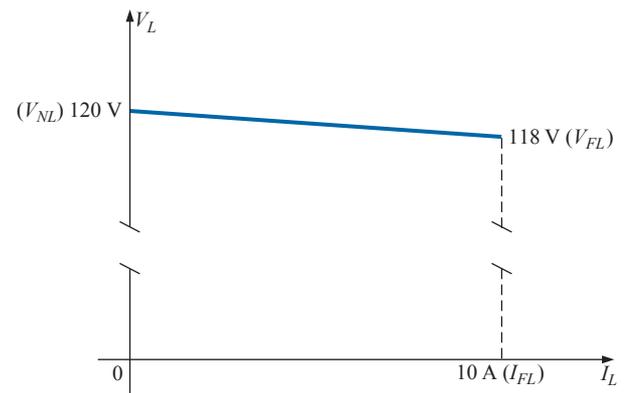


Figura 5.70 Características terminais para a fonte do Exemplo 5.28.

Soluções:

- a) $VR = \frac{V_{NL} - V_{FL}}{V_{FL}} \times 100\%$
 $= \frac{120\text{ V} - 118\text{ V}}{118\text{ V}} \times 100\% = \frac{2}{118} \times 100\%$
 $VR \cong 1,7\%$
- b) $R_{int} = \frac{\Delta V_L}{\Delta I_L} = \frac{120\text{ V} - 118\text{ V}}{10\text{ A} - 0\text{ A}} = \frac{2\text{ V}}{10\text{ A}} = 0,2\ \Omega$
- c) Ver Figura 5.71.

EXEMPLO 5.29

Dada uma fonte de 60 V com uma regulação de tensão de 2 por cento:

- a) determine a tensão terminal da fonte sob condições de plena carga;
- b) se a corrente de meia-carga é 5 A, determine a resistência interna da fonte;
- c) esboce a curva da tensão terminal *versus* demanda de carga e o circuito equivalente para o abastecimento.

Soluções:

- a) $VR = \frac{V_{NL} - V_{FL}}{V_{FL}} \times 100\%$
 $2\% = \frac{60\text{ V} - V_{FL}}{V_{FL}} \times 100\%$
 $\frac{2\%}{100\%} = \frac{60\text{ V} - V_{FL}}{V_{FL}}$

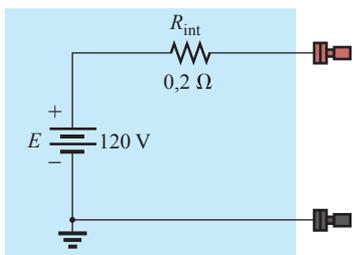
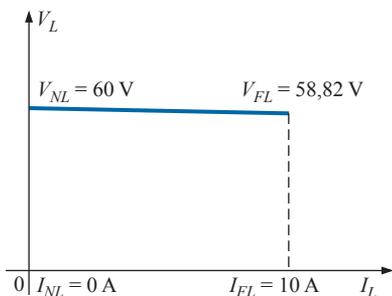


Figura 5.71 Fonte CC com as características terminais da Figura 5.70.



- $0,02V_{FL} = 60\text{ V} - V_{FL}$
 $1,02V_{FL} = 60\text{ V}$
 $V_{FL} = \frac{60\text{ V}}{1,02} = 58,82\text{ V}$
- b) $I_{FL} = 10\text{ A}$
 $R_{int} = \frac{\Delta V_L}{\Delta I_L} = \frac{60\text{ V} - 58,82\text{ V}}{10\text{ A} - 0\text{ A}} = \frac{1,18\text{ V}}{10\text{ A}} \cong 0,12\ \Omega$
- c) Ver Figura 5.72.

5.11 EFEITOS DE CARGA DOS INSTRUMENTOS

Na seção anterior, aprendemos que as fontes de potência não são os instrumentos ideais que pensávamos que fossem. A carga aplicada pode ter um efeito sobre a tensão terminal. Felizmente, tendo em vista que as fontes de hoje em dia têm fatores de regulação de carga tão pequenos, a mudança na tensão terminal com a carga normalmente pode ser ignorada na maioria das aplicações. Se agora voltarmos nossa atenção para os vários medidores que usamos em laboratório, novamente descobriremos que eles não são totalmente ideais:

Sempre que se aplica um medidor a um circuito, você muda o circuito e a resposta do sistema. Felizmente, entretanto, para a maioria das aplicações, considerando-se os medidores como ideais, é uma aproximação válida desde que determinados fatores sejam considerados.

Por exemplo,

qualquer amperímetro conectado em um circuito em série introduzirá uma resistência à combinação em série que afetará a corrente e as tensões da configuração.

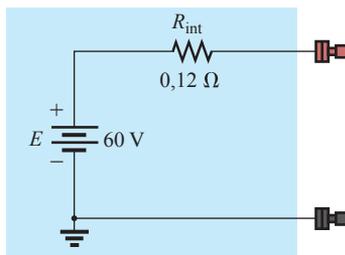


Figura 5.72 Características e circuito equivalente para a fonte do Exemplo 5.29.

A resistência entre os terminais de um amperímetro é determinada pela escala escolhida do amperímetro. Em geral,

para amperímetros, quanto mais alto o valor máximo da corrente para uma escala em particular, menor será a resistência interna.

Por exemplo, não é incomum a resistência entre os terminais de um amperímetro ser de $250\ \Omega$ para uma escala de $2\ \text{mA}$, mas apenas $1,5\ \Omega$ para a escala de $2\ \text{A}$, como mostra a Figura 5.73(a) e (b). Se você estiver analisando um circuito em detalhes, poderá incluir a resistência interna como mostra a Figura 5.73 como um resistor entre os dois terminais do medidor.

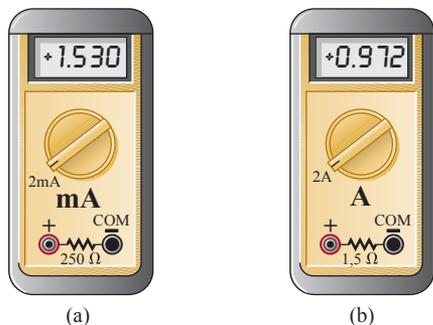


Figura 5.73 Introdução dos efeitos da resistência interna de um amperímetro: (a) escala de $2\ \text{mA}$; (b) escala de $2\ \text{A}$.

Em uma primeira leitura, tais níveis de resistência em correntes baixas passam a impressão de que amperímetros estão longe de ser ideais, e que eles deveriam ser usados somente para se obter uma ideia geral da corrente, e que não deveríamos esperar deles uma leitura verdadeira. Felizmente, entretanto, quando você lê correntes abaixo da faixa de $2\ \text{mA}$, os resistores em série com o amperímetro estão tipicamente na faixa do kilohm. Por exemplo, na Figura 5.74(a), para um amperímetro ideal, a corrente exibida é $0,6\ \text{mA}$, como determinado a partir de $I_s = E/R_T = 12\ \text{V}/20\ \text{k}\Omega = 0,6\ \text{mA}$. Se agora inserimos um medidor com uma resistência interna de $250\ \Omega$, como mostra a Figura 5.74(b), a resistência adicional no circuito vai fazer com que a corrente caia para $0,593\ \text{mA}$ como determinado por $I_s = E/R_T = 12\ \text{V}/20,25\ \text{k}\Omega = 0,593\ \text{mA}$. Agora, certamente a corrente caiu do nível ideal, mas a diferença nos resultados é de apenas aproximadamente 1 por cento — nada extraordinário, e a medida pode ser usada para a maioria das finalidades. Se os resistores em série estivessem na mesma faixa que os resistores de $250\ \Omega$, teríamos um problema diferente, e precisaríamos realizar a leitura dos resultados com muito cuidado.

Vamos voltar para a Figura 5.20 e determinar a corrente real se cada medidor na escala de $2\ \text{A}$ tem uma resistência interna de $1,5\ \Omega$. O fato de que há quatro medidores resultará em uma resistência adicional de $(4)(1,5\ \Omega) = 6\ \Omega$ no circuito, e a corrente será de $I_s = E/R_T = 8,4\ \text{V}/146\ \Omega \cong 58\ \text{mA}$, em vez dos $60\ \text{mA}$ sob condições

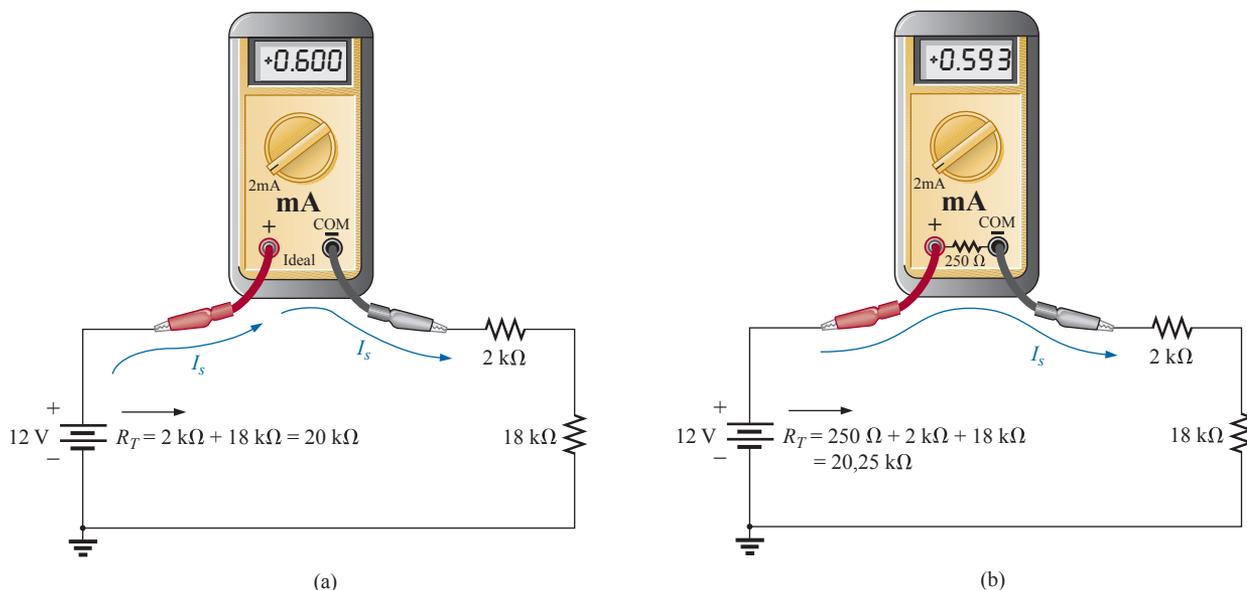


Figura 5.74 Aplicação de um amperímetro na escala $2\ \text{mA}$ a um circuito com resistores na faixa de kilohms: (a) ideal; (b) real.

ideais. Esse valor ainda é próximo o suficiente para ser considerado uma leitura útil. Entretanto, não esqueça que se estivéssemos medindo a corrente no circuito, usaríamos somente um amperímetro, e a corrente seria $I_s = E/R_T = 8,4 \text{ V}/141,5 \Omega \cong 59 \text{ mA}$, o que certamente pode ser 60 mA.

Em geral, portanto, perceba que essa resistência interna tem de ser levada em consideração, mas pelas razões descritas, a maioria das leituras pode ser usada como uma excelente primeira aproximação para a corrente real.

Deveria ser acrescentado que devido a esse *problema de inserção* com os amperímetros, e devido ao importante fato de o *circuito ter de ser perturbado* para medir uma corrente, amperímetros não são tão usados como inicialmente se esperaria. Em vez de interromper um circuito para inserir um medidor, a tensão através de um resistor é frequentemente medida e a corrente, então, é calculada usando-se a lei de Ohm. Isso elimina a necessidade de se preocupar a respeito do nível da resistência do medidor e ter de perturbar o circuito. Outra opção é usar os amperímetros do tipo alicate, introduzidos no Capítulo 2, removendo as questões relativas a perdas de inserção e perturbação do circuito. É claro que, para muitas aplicações práticas (como fontes de alimentação), é conveniente ter um amperímetro permanentemente instalado, de maneira que a corrente possa ser rapidamente lida do painel. Em tais casos, entretanto, o design é feito de maneira a compensar a perda de inserção.

Resumindo, portanto, não se esqueça de que a inserção de um amperímetro adicionará resistência ao ramo e afetará os níveis de corrente e tensão. No entanto, na maioria dos casos o efeito é mínimo, e a leitura fornecerá uma boa primeira aproximação para o nível real.

O efeito de carga dos voltímetros é discutido em detalhes no próximo capítulo, visto que não é um efeito em série. Em geral, entretanto, os resultados serão bastante similares aos daqueles do amperímetro, mas a principal diferença é a de que o circuito não tem de ser perturbado para que se aplique o medidor.

5.12 MONTAGENS EXPERIMENTAIS (PROTOBOARDS/BREADBOARDS)

A uma certa altura do projeto de qualquer sistema eletroeletrônico, uma montagem experimental terá de ser construída e testada. Uma das maneiras mais eficientes de construir um modelo de testes é usar a **montagem experimental** (*protoboard*, no passado mais comumente chamado de *breadboard*), mostrada na Figura 5.75. Ela permite uma conexão direta da fonte de alimentação e proporciona um método convencional para conter e conectar os componentes. Não há muito a aprender a respeito de montagens experimentais, mas é importante destacar algumas de suas características, incluindo a maneira com que os elementos são tipicamente conectados.

O terminal vermelho V_a é conectado diretamente ao terminal positivo da fonte de tensão CC, com o fio preto V_b conectado ao terminal negativo e o terminal verde sendo usado para a conexão terra. Sob o modelo de buracos, há faixas de cobre horizontais contínuas sob as linhas de cima e de baixo, como mostram as faixas de cobre na Figura 5.75. Na região do centro, as faixas condutivas são verticais, mas não passam do entalhe profundo correndo ao longo do comprimento horizontal da placa. E isso é tudo, apesar de ser preciso alguma prática para fazer um uso mais efetivo dos padrões condutivos.

Como exemplos, o circuito na Figura 5.12 está conectado à montagem experimental (veja foto na Figura 5.76) usando *duas abordagens diferentes*. Após a fonte de alimentação CC ter sido conectada, um fio é trazido do terminal positivo vermelho para a fita condutiva de cima marcada '+'. Não se esqueça de que agora a faixa inteira está conectada ao terminal positivo da fonte. O terminal negativo é conectado à faixa de baixo marcada com um sinal de menos (-), de maneira que 8,4 V pode ser lido em qualquer ponto entre a faixa positiva de cima e a faixa negativa de baixo. Uma conexão terra ao terminal negativo da bateria foi feita no local dos três terminais. Para

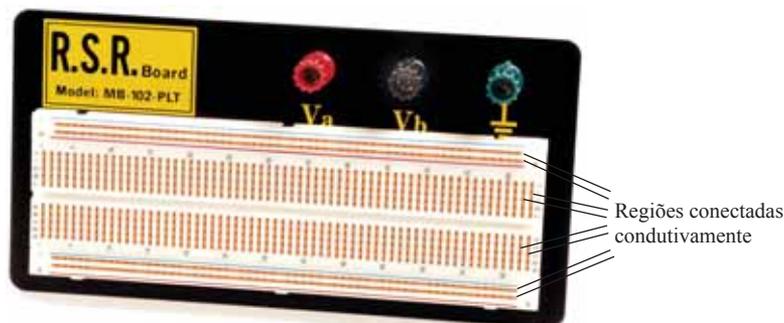


Figura 5.75 Montagem experimental (*protoboard*) com áreas de condutividade usando-se duas abordagens diferentes.

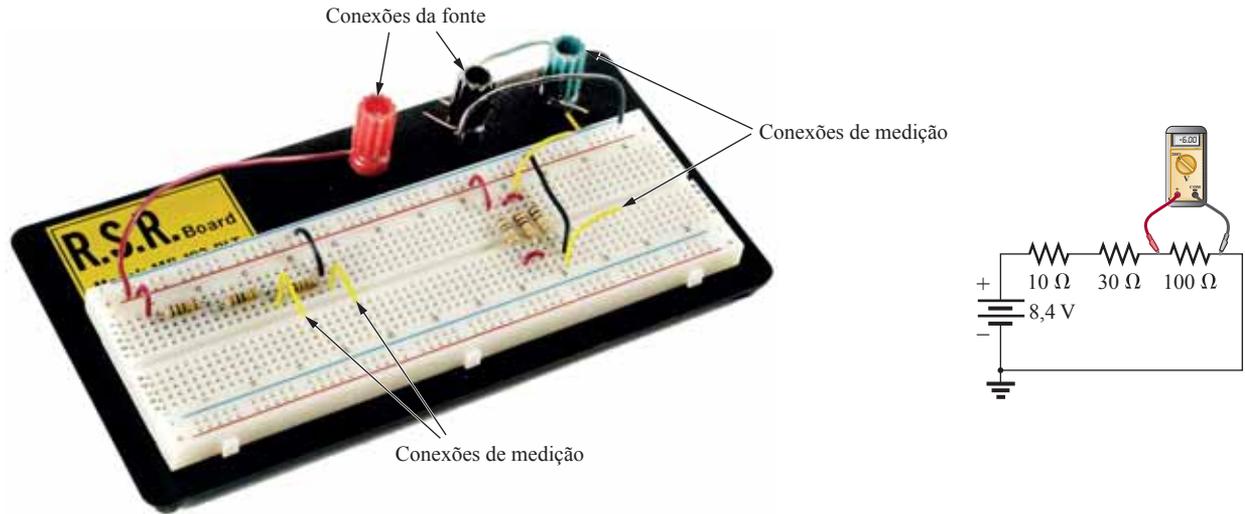


Figura 5.76 Duas configurações para o circuito na Figura 5.12 em uma montagem experimental com fios amarelos adicionados a cada configuração para medir a tensão V_3 usando um voltímetro.

a conveniência do usuário, são disponibilizados kits nos quais o comprimento dos cabos tem um código de cores. De outra maneira, uma bobina com fio de diâmetro 24 é cortada na medida certa e as extremidades são desencapadas. Em geral, sinte-se à vontade para usar o comprimento extra — nem tudo precisa estar nos ângulos certos. Para a maioria das montagens experimentais, resistores de 1/4 a 1 W vão ser inseridos sem problemas na placa. Para ficar mais claro, resistores de 1/2 W são usados na Figura 5.76. A tensão através de qualquer componente pode ser facilmente lida inserindo fios adicionais como mostra a figura (os cabos amarelos) e anexando o medidor. Para qualquer circuito, os componentes podem ser conectados de várias formas. Observe na configuração à direita que o interruptor horizontal pelo centro da placa foi usado para isolar os dois terminais de cada resistor. Mesmo que não existam padrões estabelecidos, é importante que o arranjo seja *facilmente compreendido* por outra pessoa.

Configurações adicionais, usando montagens experimentais, são apresentadas nos capítulos seguintes, de maneira que você possa se acostumar com o modo com que elas são usadas mais efetivamente. Você provavelmente verá montagens experimentais com bastante frequência em suas sessões de laboratório ou em um ambiente industrial.

5.13 APLICAÇÕES

Antes de olhar algumas aplicações, precisamos considerar algumas características gerais da configuração em série que você deve sempre manter em mente ao projetar um sistema. Primeiro, e provavelmente o mais importante, é que

se um elemento de uma combinação em série de elementos falhar, ele interromperá a resposta de todos os elementos em série. Se ocorrer um circuito aberto, a corrente será zero. Se resultar em um curto circuito, a tensão aumentará através dos outros elementos, e a corrente aumentará em valor absoluto.

Segundo, e uma questão que você não deve esquecer nunca, é que

para a mesma fonte de tensão, quanto mais elementos você colocar em série, menor será a corrente e menor será a tensão através de todos os elementos da combinação em série.

Por fim, e um resultado discutido em detalhes neste capítulo, é que

a corrente é a mesma para todos os elementos de uma combinação em série, mas a tensão através de cada elemento é uma função de sua resistência terminal.

Há outras características de importância que você vai aprender na medida em que investigar áreas possíveis de aplicação, mas as características citadas anteriormente são as mais importantes.

Controle em série

Um uso comum da configuração em série encontra-se na configuração de um sistema que assegure que tudo esteja no lugar antes que a potência plena seja aplicada. Na Figura 5.77, vários mecanismos de leitura podem ser

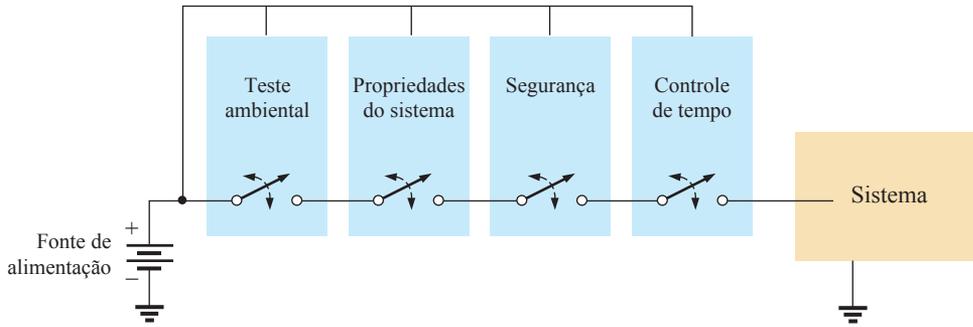


Figura 5.77 Controle em série sobre um sistema operacional.

ligados a chaves em série, evitando que a potência chegue à carga até que todas as chaves estejam fechadas ou em suas posições. Por exemplo, como mostra a Figura 5.77, um componente pode testar o ambiente para perigos como gases, altas temperaturas e assim por diante. O componente seguinte pode ser sensível às propriedades do sistema a ser energizado para que se tenha certeza de que todos os componentes estejam funcionando. A segurança é outro fator na sequência em série, e por fim um mecanismo de tempo pode estar presente para assegurar horas limitadas de operação ou restringir os períodos operacionais. A lista é infinita, mas o que é certo é que ‘todos os sistemas têm de permitir passagem’ antes que a potência alcance o sistema operacional.

Lâmpadas para árvore de Natal

Nos últimos anos, pequenas lâmpadas piscantes, usadas em árvores de Natal, conectadas a fios contendo de 50 a 100 lâmpadas dispostas em fila, tornaram-se muito populares (veja a Figura 5.78(a)). Embora as lâmpadas para a árvore de Natal possam ser conectadas em série ou em paralelo (a ser discutido no próximo capítulo), as pequenas lâmpadas piscantes desses conjuntos são

normalmente conectadas em série. É relativamente fácil comprovar se as lâmpadas estão assim conectadas. Se um fio entra em uma extremidade do soquete da lâmpada e sai na outra extremidade, então as lâmpadas estão em série. Se dois fios entram e saem do soquete, provavelmente as lâmpadas estão em paralelo. Normalmente, quando lâmpadas são conectadas em série, se uma queimar (o filamento partir e o circuito abrir), todas as lâmpadas se apagarão, já que o caminho para a passagem da corrente foi interrompido. Entretanto, as lâmpadas mostradas na Figura 5.78(a) foram especialmente projetadas, conforme mostra a Figura 5.78(b), para permitir que a corrente continue a circular nas outras lâmpadas quando o filamento se partir. Na base de cada lâmpada existe um elemento fusível envolto nas duas hastes que sustentam o filamento. Esse fusível é feito de um metal de pouca condução que aparece em contato com as duas hastes verticais, mas na realidade uma camada sobre as hastes ou sobre o fusível evita a condução elétrica entre as hastes sob condições normais de operação. Se o filamento de uma lâmpada se rompesse e criasse um circuito aberto entre as hastes, a corrente através das lâmpadas seria interrompida se não fosse o elemento fusível. No instante em que o filamento

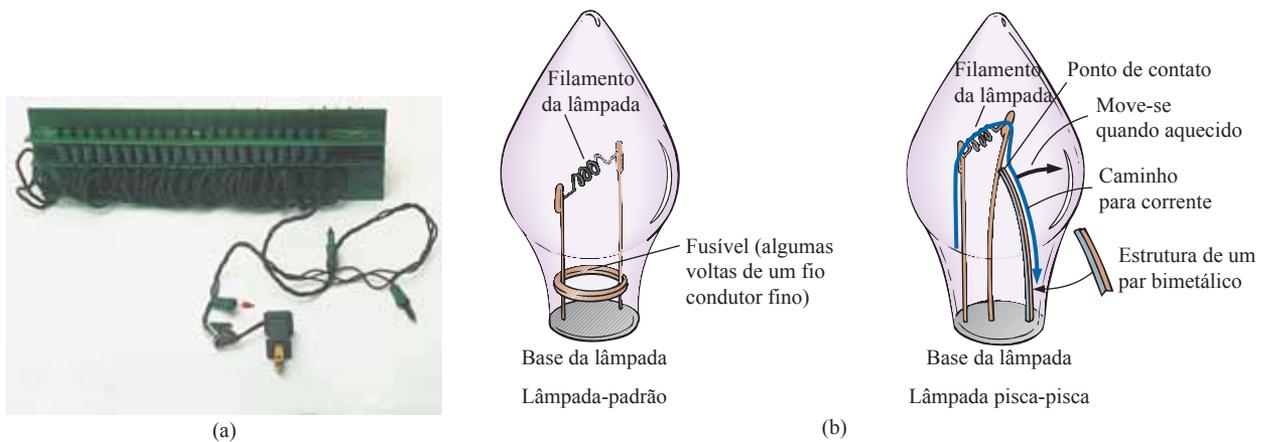


Figura 5.78 Lâmpadas para árvore de Natal: (a) conjunto com 50 unidades; (b) construção da lâmpada.

da lâmpada se abre, a corrente através do circuito passa a ser zero, e toda a tensão de 120 V da tomada aparece sobre a lâmpada queimada. Essa tensão alta entre as hastes de uma única lâmpada corresponde a uma diferença de potencial suficiente para estabelecer uma corrente através da cobertura isolante e conecta o elemento fusível com as duas hastes. O circuito é novamente fechado, fazendo com que todas as lâmpadas brilhem, exceto a que tem o elemento fusível ativado. Entretanto, tenha em mente que todas as vezes que uma lâmpada queimar, existirá uma tensão maior sobre as outras lâmpadas do circuito, fazendo com que elas brilhem mais intensamente. Eventualmente, se muitas lâmpadas queimarem, a tensão atingirá um valor no qual as outras lâmpadas se queimarão rapidamente em sequência. A conclusão é que uma lâmpada tem de ser substituída o quanto antes.

As lâmpadas mostradas na Figura 5.78(b) são especificadas para 2,5 V a 0,2 A, ou seja, 200 mA. Visto que existem 50 lâmpadas em série, a tensão total sobre as lâmpadas será de $50 \times 2,5 \text{ V}$, ou seja, 125 V, que está

de acordo com a tensão disponível em uma típica tomada elétrica residencial. Como as lâmpadas estão em série, a corrente através de cada lâmpada será de 200 mA. A especificação de potência de cada lâmpada é, portanto, $P = VI = (2,5 \text{ V})(0,2 \text{ A}) = 0,5 \text{ W}$ com uma potência total demandada de $50 \times 0,5 \text{ W} = 25 \text{ W}$.

Uma representação esquemática de um conjunto de lâmpadas visto na Figura 5.78(a) é mostrado na Figura 5.79(a). Observe que apenas uma lâmpada pisca-pisca é necessária. Como as lâmpadas estão em série, quando a lâmpada pisca-pisca interromper a corrente, ela desligará todas as outras. De acordo com o que é mostrado na Figura 5.78(b), a lâmpada pisca-pisca tem incorporada uma chave térmica constituída por um par bimetálico que abre o circuito quando aquecido pela corrente a uma determinada temperatura. Assim que essa chave térmica abre, o resfriamento é iniciado até que a chave seja novamente fechada, de maneira que a corrente volte a circular nas lâmpadas. Isso então provocará um novo aquecimento, uma nova abertura, e todo o processo se repetirá. O re-

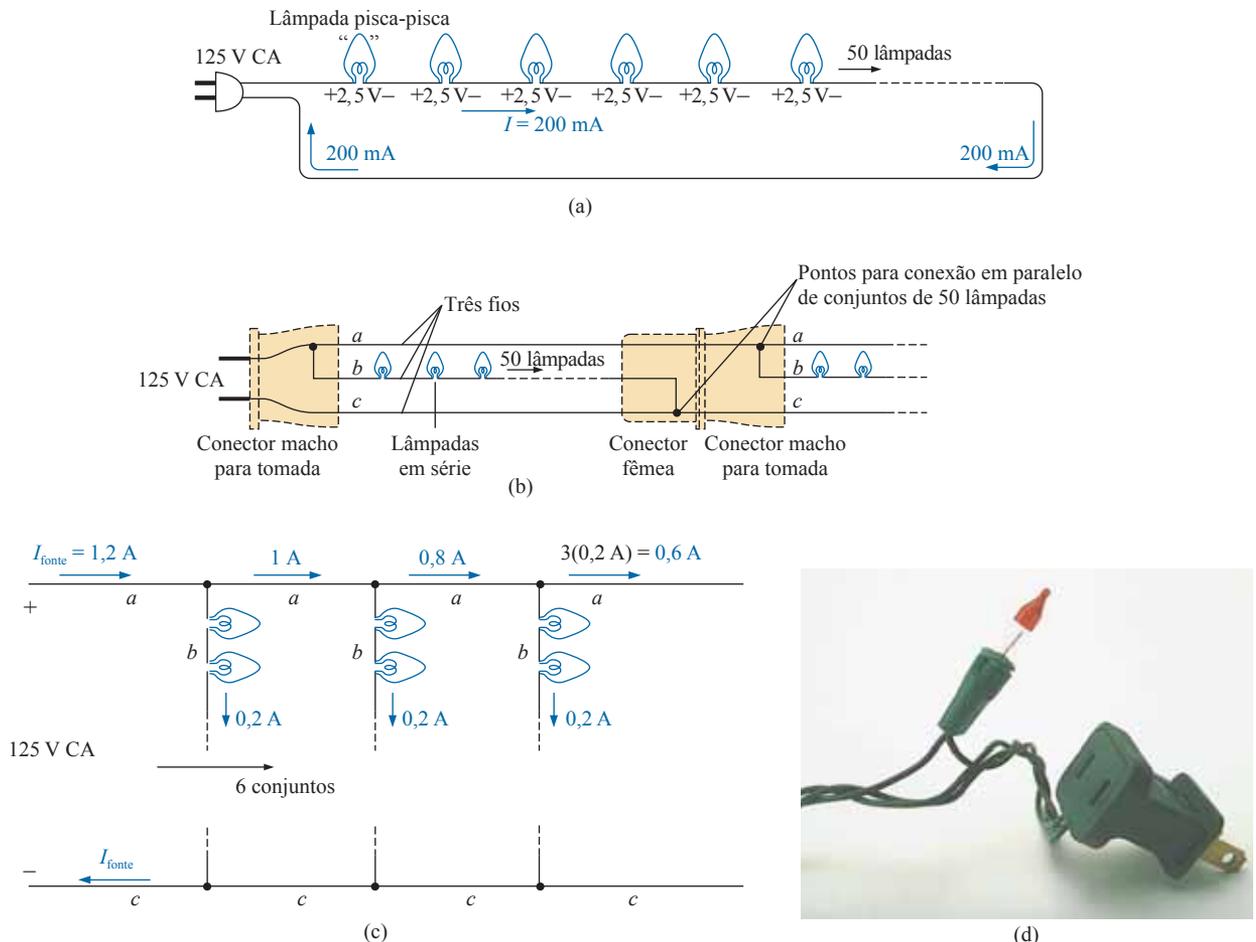


Figura 5.79 (a) Diagrama elétrico de um único conjunto de lâmpadas; (b) configuração especial na ligação dos fios; (c) diagrama esquemático redesenhado; (d) conector macho especial para tomada e uma lâmpada pisca-pisca.

sultado disso é que temos uma ação de liga e desliga que gera um pisca-pisca, ao qual já estamos familiarizados. Naturalmente, em climas mais frios (por exemplo, onde há neve), inicialmente será gasto um tempo maior para aquecer, de modo que a frequência do pisca-pisca será menor no início; mas no momento em que as lâmpadas se aquecerem, a frequência aumentará.

O fabricante especifica que não mais do que seis conjuntos devem ser conectados juntos. Então, a primeira pergunta que surge é: como os conjuntos podem ser conectados juntos, uma extremidade na outra, sem que se reduza a tensão em cada lâmpada, o que provocaria uma redução no brilho de todas as lâmpadas? Se a fiação for observada cuidadosamente, será possível ver como as lâmpadas são conectadas em série; existe um fio que passa por todas as lâmpadas, além de dois outros fios que passam de uma tomada para outra. Por que colocaram dois fios a mais se as lâmpadas estão conectadas em série? A resposta baseia-se no fato de que, quando todos os conjuntos estão conectados juntos, eles estão, na realidade, conectados em paralelo (a ser discutido no próximo capítulo). Essa configuração singular da fiação é mostrada na Figura 5.79(b) e redesenhada na Figura 5.79(c). Note que a linha superior é a linha ‘quente’ (energizada) para todos os conjuntos conectados, e a linha de baixo é o retorno, neutro ou GND para todos os conjuntos. Através do conector macho para tomada, mostrado na Figura 5.79(d), a fase e o retorno são conectados em cada conjunto de lâmpadas, sendo que as conexões com os pinos de metal do conector macho são feitas conforme mostra a Figura 5.79(b). Veremos no

próximo capítulo que a corrente drenada da tomada na parede por cargas em paralelo é a soma das correntes de cada ramo. O resultado, como mostra a Figura 5.79(c), é que a corrente drenada da fonte é $6 \times 200 \text{ mA} = 1,2 \text{ A}$, e a potência total dos seis conjuntos é o produto da tensão aplicada pela corrente fornecida pela fonte, ou seja, $(120 \text{ V})(1,2 \text{ A}) = 144 \text{ W}$, sendo $144 \text{ W}/6 = 24 \text{ W}$ por conjunto.

Forno de micro-ondas

Os circuitos com dispositivos em série podem ser muito úteis no projeto de segurança de equipamentos. Embora reconheçamos a utilidade do forno de micro-ondas, ele pode ser bastante perigoso se a porta não for fechada ou vedada adequadamente. Não é suficiente testar em apenas um ponto em torno da porta para verificar se ela está fechada, porque a porta pode estar encurvada ou torta em função do uso contínuo. Uma configuração segura, que é usada normalmente, é mostrada na Figura 5.80. Observe que as chaves magnéticas estão posicionadas em volta da porta, com o ímã na própria porta e a chave magnética da porta na estrutura principal. As chaves magnéticas são simplesmente chaves nas quais o ímã atrai uma barra condutora magnética entre dois contatos para fechar o circuito — algo sugerido pelo símbolo do dispositivo no diagrama do circuito mostrado na Figura 5.80. Visto que as chaves magnéticas estão todas em série, todas têm de ser fechadas para que o circuito seja fechado e a unidade de potência seja ligada. Se a porta estiver suficientemente fora do formato evitando que um único ímã não esteja próximo o suficiente para fechar o mecanismo da chave, o

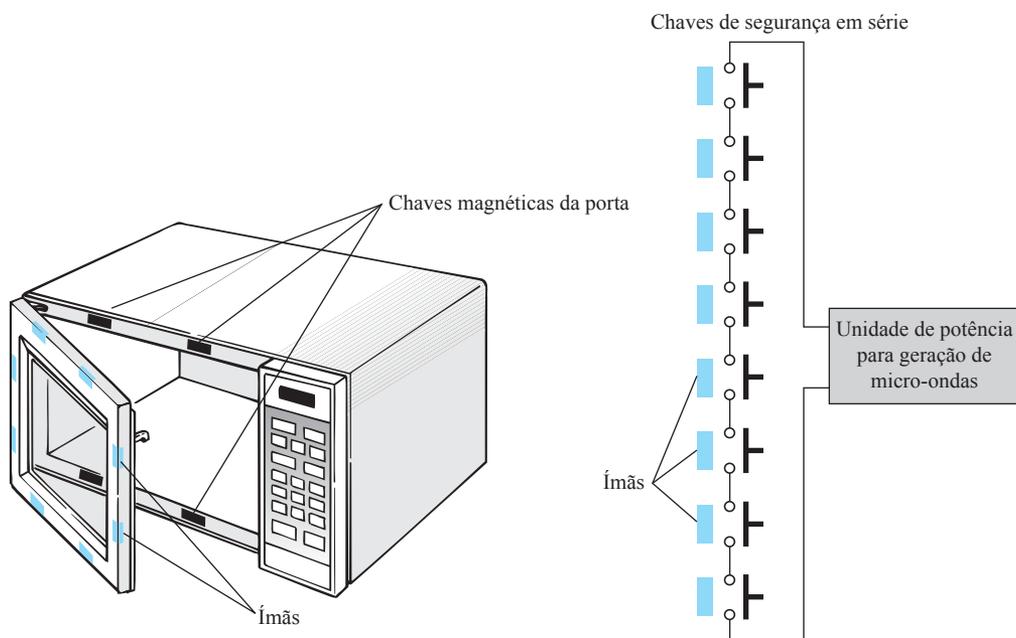


Figura 5.80 Chaves de segurança conectadas em série em um forno de micro-ondas.

circuito não será fechado, e a unidade de potência não será ligada. Dentro da unidade de controle da fonte de potência, os elementos em série fecharão um circuito que comanda a operação, ou a corrente será detectada e monitorada de modo a controlar a operação do sistema.

Circuito de alarme com elementos em série

O circuito mostrado na Figura 5.81 é um circuito de alarme simples. Observe que todos os elementos do projeto estão configurados em série. A fonte de alimentação é uma fonte contínua de 5 V que pode ser obtida por meio de um projeto similar ao mostrado na Figura 2.33, ou uma bateria CC, ou ainda uma combinação de uma fonte CA e uma fonte CC para garantir que a bateria sempre esteja com plena carga. Se todos os sensores estiverem fechados, circulará uma corrente de 5 mA, porque a resistência do relé é de cerca de 1 kΩ. Essa corrente energiza o relé mantendo o alarme no estado desativado. Entretanto, se algum dos sensores abrir, a corrente será interrompida, o relé desativará e o circuito do alarme será energizado. Usando fios relativamente curtos e alguns sensores, o sistema deve funcionar bem, já que as quedas de tensões serão muito pequenas. Mas, como os fios do alarme geralmente são finos, eles apresentarão um valor de resistência mensurável se os fios para os sensores forem muito longos, podendo ocorrer uma queda de tensão suficiente através da linha, reduzindo a tensão no relé a um valor com o qual o alarme não opere adequadamente. Desse modo, o comprimento do fio é um fator que tem de ser considerado se uma configuração em série for usada. Uma sensibilidade adequada ao comprimento da linha removeria qualquer preocupação em relação à operação do sistema. Um projeto aperfeiçoado é descrito no Capítulo 8.

5.14 ANÁLISE COMPUTACIONAL

PSpice

Na Seção 4.9, foi apresentado o procedimento básico para instalação da pasta PSpice e a execução de um pro-

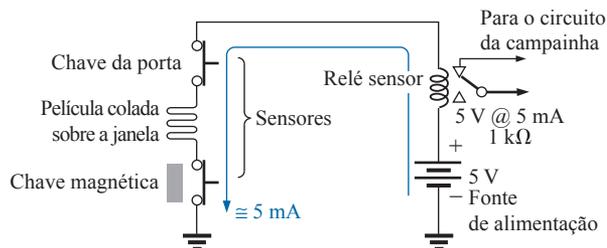


Figura 5.81 Circuito de um alarme com elementos em série.

grama. Em função dos detalhes mostrados naquela seção, seria bom revisá-la antes de prosseguir com esse exemplo. Isso porque esse exemplo é apenas o segundo em que usamos o PSpice, e alguns detalhes a serem apresentados não terão a mesma abordagem da Seção 4.9.

O circuito a ser analisado é mostrado na Figura 5.82. Você usará a PSpice criada na Seção 4.9. Um duplo clique no ícone **OrCAD 10.0 DEMO/CAPTURE CIS** fará aparecer a janela. Um novo projeto é então iniciado ativando-se, na parte superior esquerda da tela, o botão **Create document** (esse botão tem estampado o desenho de uma página com uma estrela no canto superior esquerdo). O resultado é o aparecimento da caixa de diálogo **New Project** na qual é inserido **PSpice 5-1** como nome (**Name**). A opção **Analog or Mixed A/D** já está selecionada, e **PSpice** aparece como **Location**. Clique em **OK** e a caixa de diálogo **Create PSpice Project** aparecerá. Selecione **Create a blank project**, clique em **OK** e a janela de trabalho aparecerá. Arrastando a borda esquerda da janela **SCHEMATIC1:PAGE1** para o lado direito, você visualizará ambas as telas. Clicando no sinal + na janela **Project Manager**, serão visualizados os subníveis até **PAGE1**. Se preferir alterar o nome **SCHEMATIC1**, selecione-o e clique com o botão direito do mouse. Uma lista aparecerá, e nela você verá uma opção denominada **Rename**; ao selecioná-la, aparecerá a caixa de diálogo **Rename Schematic**, insira **PSpice 5-1**. A Figura 5.83 mostra que o nome **SCHEMATIC1** foi mantido.

O próximo passo é importante. Se a barra de ferramentas na borda direita não estiver visível, dê um clique com o botão esquerdo em qualquer lugar da tela **SCHEMATIC1:PAGE1**. Para começar a construir o circuito, selecione o botão **Place part** para obter a caixa de diálogo **Place Part**. Observe que agora a biblioteca **SOURCE** aparece na lista **Library** (dos esforços do Capítulo 4). Selecione **SOURCE**, e uma lista de fontes aparecerá embaixo de **Part List**, sendo que **VDC** pode ser selecionada. Clique em **OK** e, movendo o cursor, coloque-a na área de trabalho com um clique apenas no botão esquerdo do mouse. Clique com o botão direito do

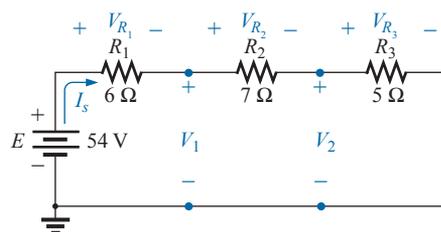


Figura 5.82 Diagrama de um circuito CC em série a ser analisado usando o PSpice.

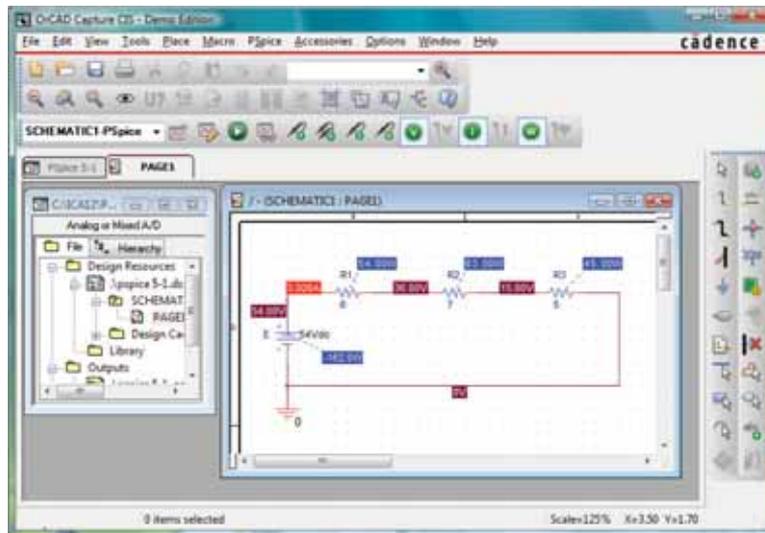


Figura 5.83 Uso do PSpice na análise de um circuito CC em série.

mouse e selecione **End Mode** para finalizar o processo, já que o circuito tem apenas uma fonte. Com mais um clique no botão esquerdo do mouse, a fonte será fixada no local. Agora, selecione novamente o botão **Place a part** seguido da biblioteca **ANALOG** para encontrar o resistor **R**. Uma vez selecionado o resistor e dado um clique em **OK**, o resistor aparecerá na tela junto ao cursor. Dessa vez, como é necessário colocar três resistores, não há necessidade de ativar **End Mode** entre a colocação de cada resistor na área de trabalho. Simplesmente clique uma vez em um local escolhido, clique uma segunda vez em outro local e, finalmente, uma terceira vez para colocar o terceiro resistor. Em seguida, clique com o botão direito do mouse para finalizar o processo com **End Mode**. Finalmente, tem de ser acrescentado ao circuito um **GND** selecionando o botão apropriado e ativando **0/SOURCE** na caixa de diálogo **Place Ground**. Clique em **OK** e coloque o GND conforme mostra a Figura 5.83.

Conecte os elementos usando o botão **Place a wire** para obter o sinal de uma cruz na tela. Comece pela extremidade superior da fonte de tensão clicando com o botão esquerdo do mouse e desenhe o fio clicando com o botão esquerdo em cada ponto em que for necessário um giro de 90° . Quando um fio estiver conectado de um elemento a outro, mova o cursor para a próxima conexão; não é necessário ativar **End Mode** entre as conexões. Agora os rótulos e valores têm de ser selecionados com um duplo clique em cada parâmetro para que se obtenha a caixa de diálogo **Display Properties**. Como ela aparece com a quantidade de interesse em um fundo azul, simplesmente digite o rótulo ou o valor, seguido de um clique em **OK**. O circuito agora está completo e pronto para ser analisado.

Antes da simulação, selecione **V**, **I** e **W** na barra de ferramentas na parte superior da janela para garantir que tensões, correntes e potências sejam mostradas na tela. Para realizar uma simulação, selecione o botão **New Simulation Profile** (que aparece como uma folha de dados, na segunda barra de ferramentas de cima para baixo, com uma estrela no canto superior esquerdo) para obter a caixa de diálogo **New Simulation**. Digite o nome **Bias Point** abaixo de **Name** para uma solução CC (dc) e acione o botão **Create**. Uma caixa de diálogo **Simulation Settings-Bias Point** aparecerá e **Analysis** estará selecionada, e **Bias Point** é encontrada sob o título de **Analysis type**. Clique em **OK** e, em seguida, selecione o botão **Run PSpice** (uma seta azul) para iniciar a simulação. Feche a janela resultante. A tela exibida (mostrada na Figura 5.83) indica que a corrente é de 3 A para o circuito, tendo 15 V através de R_3 e 36 V a partir de um ponto entre R_1 e R_2 em relação a GND. A tensão através de R_2 é $36\text{ V} - 15\text{ V} = 21\text{ V}$, e a tensão através de R_1 é $54\text{ V} - 36\text{ V} = 18\text{ V}$. A potência fornecida e dissipada por cada elemento também é mostrada.

Multisim

A construção do circuito na Figura 5.84 usando o Multisim é simplesmente uma extensão do procedimento delineado no Capítulo 4. Para cada elemento resistivo ou medidor, o processo é repetido. O rótulo para cada um aumenta em um na medida em que resistores ou medidores adicionais são acrescentados. Lembre-se de que discutimos no Capítulo 4 que era preciso acrescentar os medidores antes de se conectar os elementos porque os medidores precisam de espaço e têm de ser polarizados adequadamente. A corrente será determinada pelo amperí-

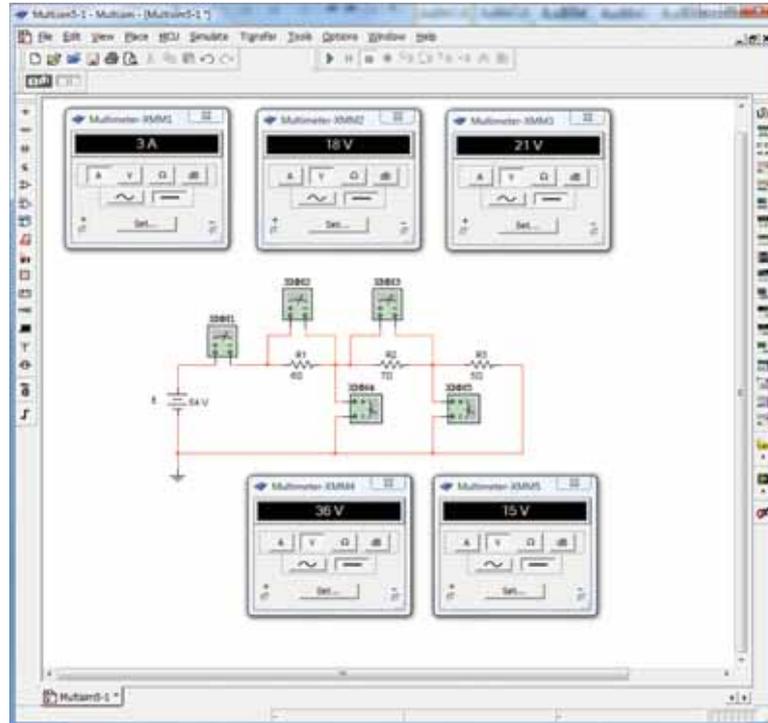


Figura 5.84 Uso do Multisim na análise de um circuito CC em série.

metro **XMM1**, e a tensão pelos medidores desde **XMM2** até **XMM5**. Como um item de particular importância, note que:

no Multisim, os medidores são conectados exatamente da mesma maneira em que são colocados em um circuito real no laboratório. Os amperímetros são conectados em série com o ramo no qual a corrente tem de ser medida, e os voltímetros são conectados entre os dois pontos de interesse (sobre os resistores). Além disso, para uma leitura positiva, os amperímetros são conectados de forma que a corrente, considerando-se o sentido convencional, entre pelo terminal positivo, e os voltímetros são conectados de modo que o ponto de maior potencial seja conectado ao terminal positivo.

Os ajustes do medidor são feitos a partir de um duplo clique no símbolo do medidor situado no diagrama. Conforme o caso, **V** ou **I** tem de ser escolhido, porém o botão com a linha horizontal, para a análise CC, é o mesmo para todos. Novamente, o botão **Set** pode ser selecionado para saber quais são os ajustes, porém os valores default de resistência de entrada do medidor serão adequados para todas as análises descritas neste livro. Posicione os medidores (multimeters) na tela de modo a visualizar, após a simulação, os valores de corrente e das diversas tensões.

Lembre-se do que foi estudado no Capítulo 4; os elementos podem ser movidos simplesmente ao se clicar em cada símbolo no esquema e arrastá-los para o local desejado. O mesmo pode ser dito em relação a rótulos e valores. Eles são alterados por meio de um duplo clique, no rótulo ou no valor, e da consequente inserção do novo dado. Ao clicar em **OK**, eles aparecerão alterados no esquema. Não é necessário selecionar um botão especial para conectar os elementos. Coloque o cursor no ponto inicial para obter um pequeno círculo sobre uma cruz. Clique nesse ponto e percorra o caminho desejado até o próximo ponto. Quando o cursor estiver nesse outro ponto, clique novamente e a linha aparecerá. Todas as linhas de conexão são feitas com ângulos de 90°. Entretanto, não é possível estabelecer um caminho em diagonal de um ponto a outro. Para remover qualquer elemento, rótulo ou linha, clique sobre o item desejado obtendo o estado ativo deste, representado por quatro pequenos quadrados, e acione a tecla **Delete** ou o botão com a tesoura situado na barra do menu superior.

Lembre-se de que vimos no Capítulo 4 que você pode iniciar a simulação através da sequência **Simulate-Run** selecionando a tecla verde **Run** ou passando a **Simulate Switch** para a posição **1**.

Observe a partir dos resultados que a soma das tensões medidas por **XMM2** e **XMM4** é igual à tensão aplicada. Todos os medidores são considerados ideais,

de maneira que não há queda de tensão através do amperímetro XMM1. Além disso, eles não afetam o valor da corrente medida por XMM1. Todos os voltímetros têm essencialmente uma resistência interna infinita, enquanto todos os amperímetros têm uma resistência interna zero.

É claro, medidores podem ser configurados para qualquer valor não ideal usando-se a opção **Set**. Observe também que a soma das tensões medidas por XMM3 e XMM5 é igual àquela medida por XMM4, como exige a lei de Kirchhoff para tensões.

PROBLEMAS

Seção 5.2 Resistores em série

- Para cada configuração na Figura 5.85, descubra os elementos (fontes de tensão e/ou resistores) individuais (não combinações de todos eles) que estão em série. Se necessário, use o fato de que os elementos em série têm a mesma corrente. Simplesmente liste aqueles que não satisfazem as condições para uma relação em série. Aprenderemos mais a respeito de outras combinações mais tarde.
- Descubra a resistência total R_T para cada configuração na Figura 5.86. Observe que apenas valores de resistores padrão foram usados.
- Para cada placa de circuito na Figura 5.87, descubra a resistência total entre as conexões 1 e 2.
- Para o circuito na Figura 5.88, composto de valores-padrão:
 - qual resistor terá o maior impacto sobre a resistência total?
 - em uma base aproximada, quais resistores podem ser ignorados ao se determinar a resistência total?
 - descubra a resistência total e comente seus resultados para as partes (a) e (b).
- Para cada configuração na Figura 5.89, determine a leitura do ohmímetro.

- Descubra a resistência R , dada a leitura do ohmímetro para cada configuração na Figura 5.90.
- Qual é a leitura do ohmímetro para cada configuração na Figura 5.91?

Seção 5.3 Circuitos em série

- Para a configuração em série na Figura 5.92, construída de valores-padrão:
 - descubra a resistência total;
 - calcule a corrente;
 - descubra a tensão através de cada elemento resistivo;
 - calcule a potência fornecida pela fonte;
 - descubra a potência fornecida para o resistor de 18Ω .
- Para a configuração em série na Figura 5.93, construída usando resistores de valor padrão:
 - sem fazer um único cálculo, qual elemento resistivo terá a maior tensão através dele? Qual terá a menor?
 - qual resistor terá maior impacto sobre a resistência total e sobre a corrente resultante? Descubra a resistência total e a corrente.
 - descubra a tensão através de cada elemento e reveja sua resposta para a parte (a).

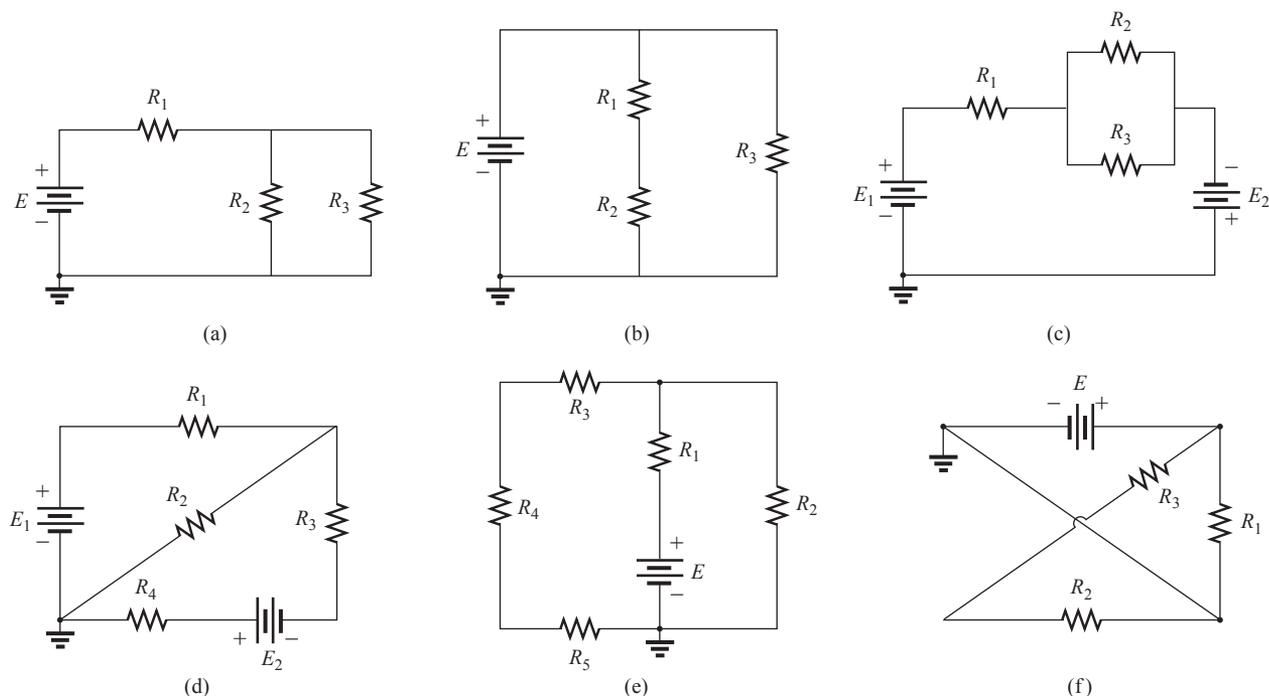


Figura 5.85 Problema 1.

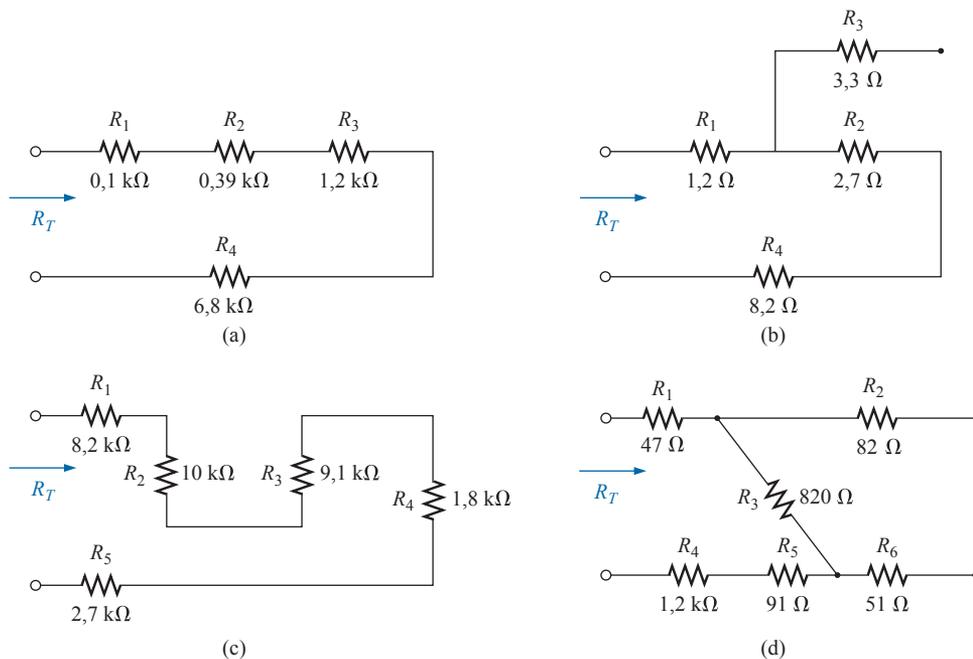


Figura 5.86 Problema 2.

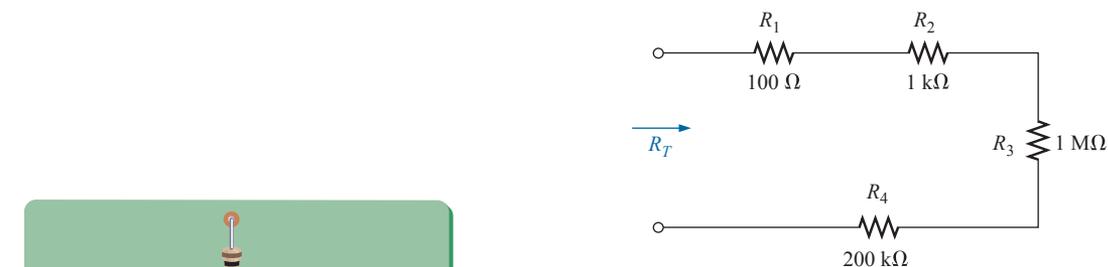
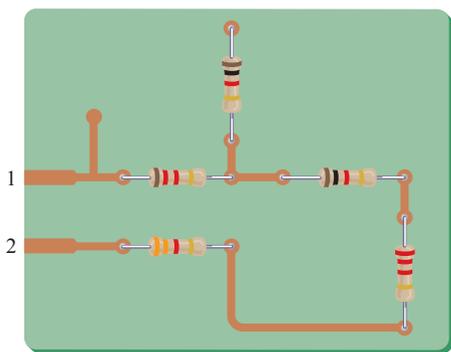
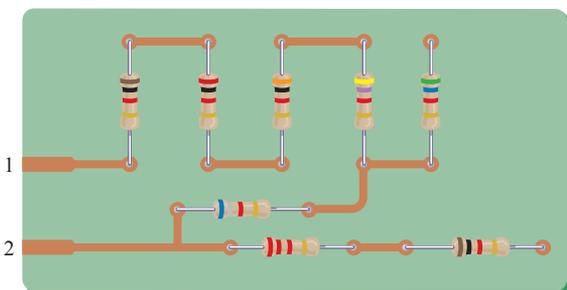


Figura 5.88 Problema 4.

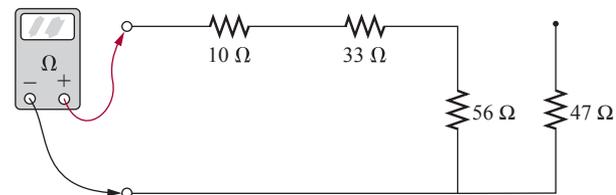


(a)

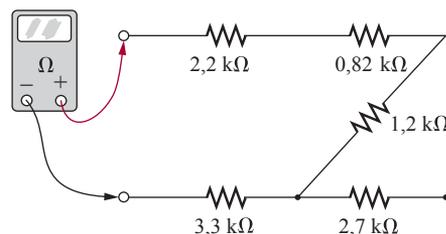


(b)

Figura 5.87 Problema 3.



(a)



(b)

Figura 5.89 Problema 5.

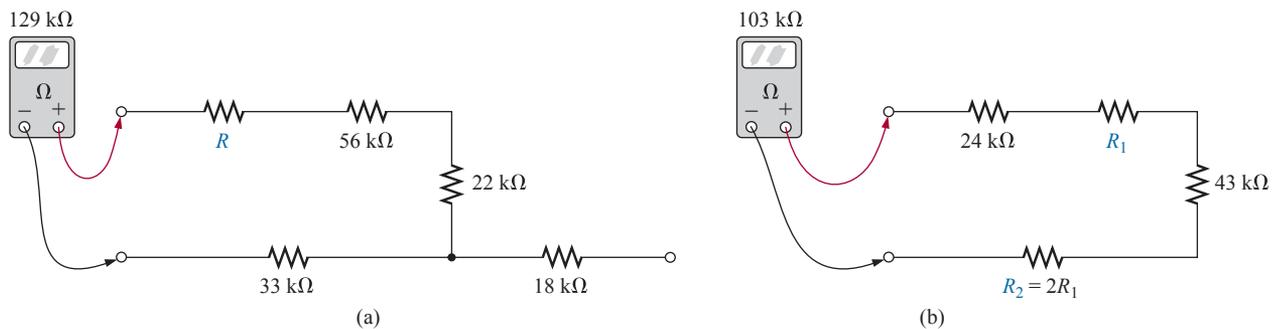


Figura 5.90 Problema 6.

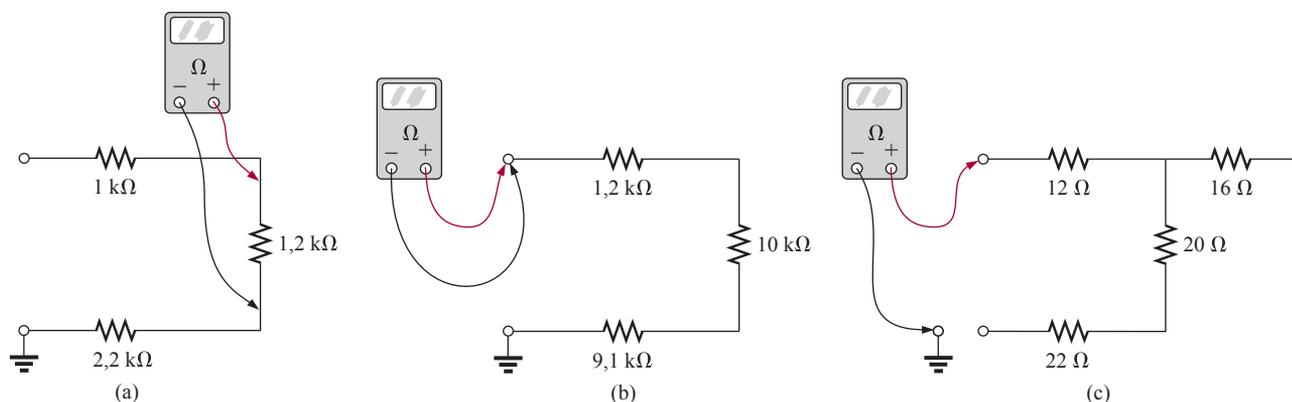


Figura 5.91 Problema 7.

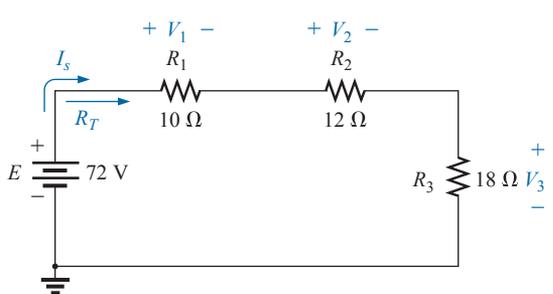


Figura 5.92 Problema 8.

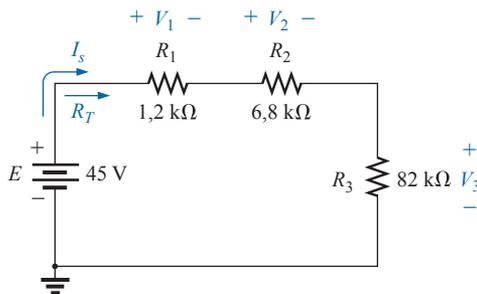


Figura 5.93 Problema 9.

10. Descubra a tensão necessária para desenvolver a corrente especificada em cada circuito da Figura 5.94.
11. Para cada circuito na Figura 5.95, construída de valores-padrão, determine:
 - a) a corrente I ;
 - b) a tensão da fonte E ;
 - c) a resistência desconhecida;
 - d) a tensão através de cada elemento.
12. Para cada configuração na Figura 5.96, quais são as leituras do amperímetro e do volímetro?

- Seção 5.4** Distribuição de potência em um circuito em série
13. Para o circuito na Figura 5.97, construído de resistores de valor-padrão:
 - a) descubra a resistência total, a corrente e a tensão através de cada um dos elementos;
 - b) descubra a potência fornecida para cada resistor;
 - c) calcule a potência total fornecida para todos os resistores;
 - d) descubra a potência fornecida pela fonte;
 - e) como a potência fornecida pela fonte se compara com aquela fornecida para todos os resistores?
 - f) qual resistor recebeu mais potência? Por quê?

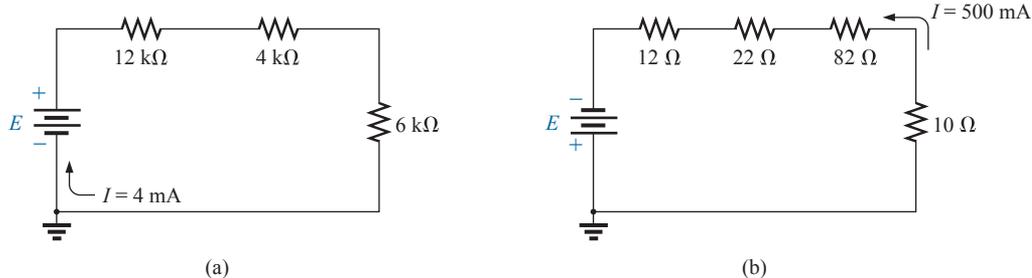


Figura 5.94 Problema 10.

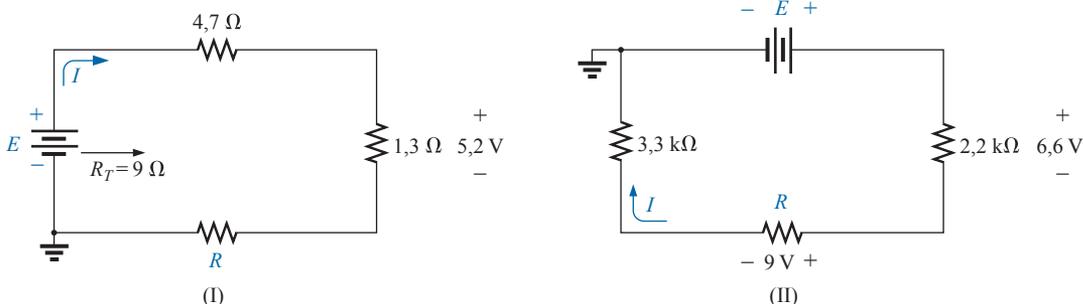


Figura 5.95 Problema 11.

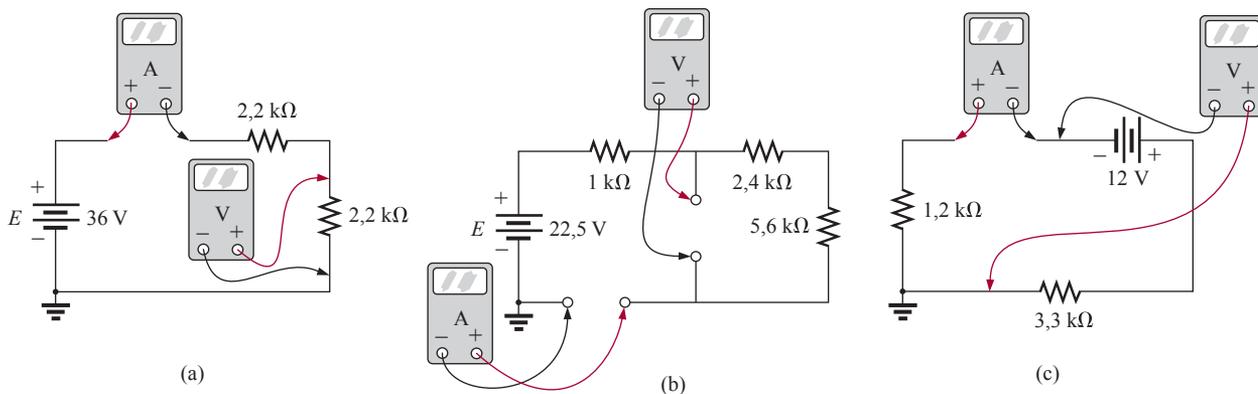


Figura 5.96 Problema 12.

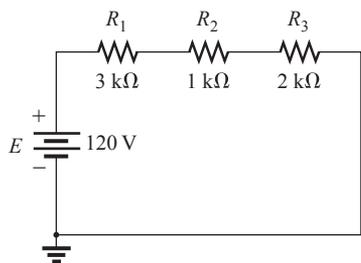


Figura 5.97 Problema 13.

- g) o que aconteceu com toda a potência fornecida aos resistores?
 - h) se os resistores estão disponíveis com especificações de potência de 1/2, 1, 2 e 5 W, qual especificação de potência mínima pode ser usada para cada resistor?
14. Descubra as quantidades desconhecidas para o circuito da Figura 5.98 usando a informação fornecida.
 15. Descubra as quantidades desconhecidas para o circuito da Figura 5.99 usando a informação fornecida.
 16. Oito luzes de Natal estão conectadas em série como mostra a Figura 5.100.

- a) Se o conjunto está conectado a uma fonte de 120 V, qual é a corrente através das lâmpadas se cada lâmpada tem uma resistência interna de $28\frac{1}{8} \Omega$?
- b) Determine a potência fornecida a cada lâmpada.
- c) Calcule a queda de tensão através de cada lâmpada.

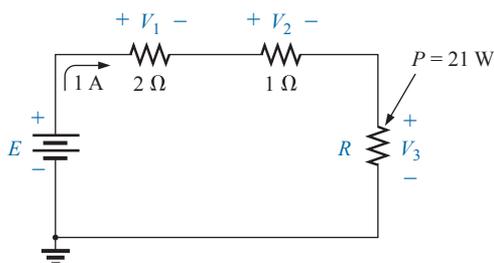


Figura 5.98 Problema 14.

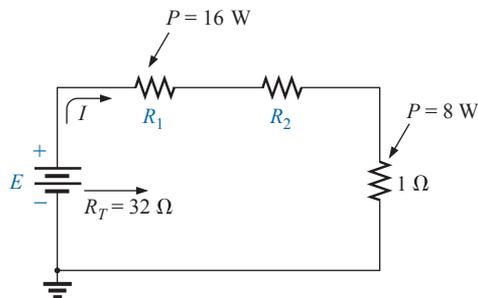


Figura 5.99 Problema 15.

- d) Se uma lâmpada queimar (isto é, se o filamento se abrir), qual será o efeito sobre as lâmpadas restantes? Por quê?

*17. Para as condições especificadas na Figura 5.101, determine a resistência desconhecida.

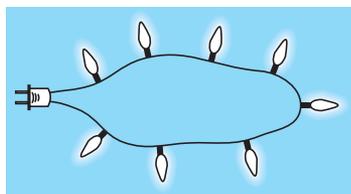


Figura 5.100 Problema 16.

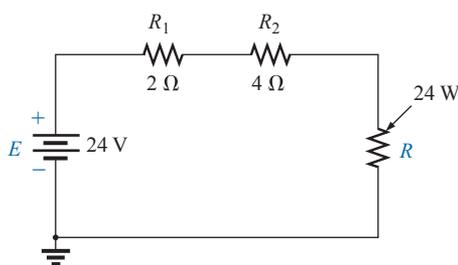


Figura 5.101 Problema 17.

Seção 5.5 Fontes de tensão em série

- 18. Combine as fontes de tensão em série na Figura 5.102 em uma única fonte de tensão entre os pontos a e b.
- 19. Determine a corrente I e seu sentido para cada circuito mostrado na Figura 5.103. Antes de calcular a corrente I, redesenhe cada circuito com uma única fonte de tensão.
- 20. Descubra a fonte de tensão desconhecida e o resistor para os circuitos na Figura 5.104. Primeiro, combine as fontes de tensão em série em uma única fonte. Indique a direção da corrente resultante.

Seção 5.6 Lei de Kirchhoff para tensões

- 21. Usando a lei de Kirchhoff para tensões, descubra as tensões desconhecidas para os circuitos na Figura 5.105.
- 22. a) Descubra a corrente I para o circuito da Figura 5.106. b) Descubra a tensão V_2 . c) Descubra a tensão V_1 usando a lei de Kirchhoff para tensões.
- 23. Usando a lei de Kirchhoff para tensões, determine as tensões desconhecidas para os circuitos em série na Figura 5.107.

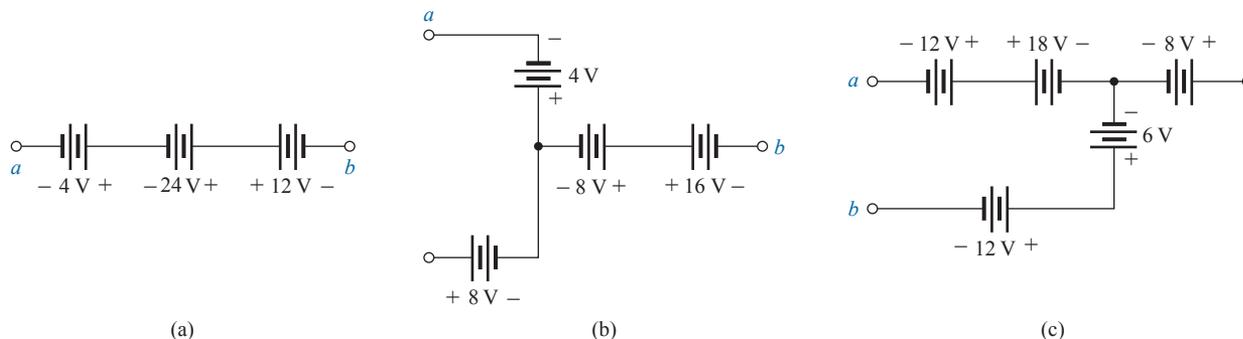


Figura 5.102 Problema 18.

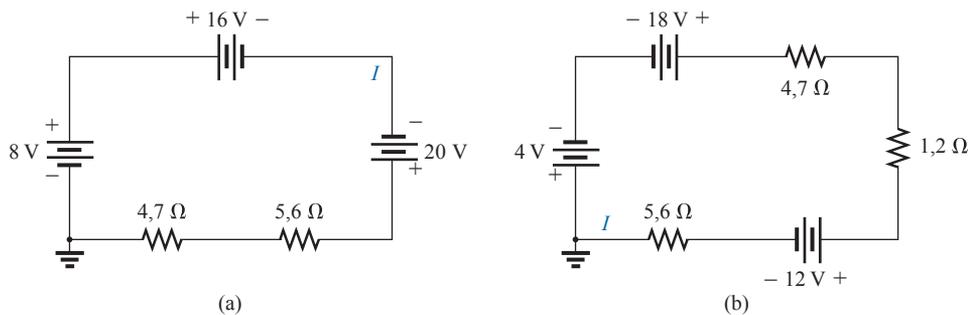


Figura 5.103 Problema 19.

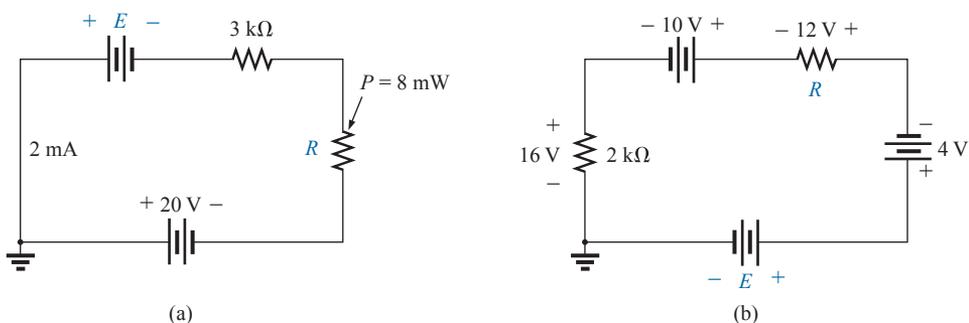


Figura 5.104 Problema 20.

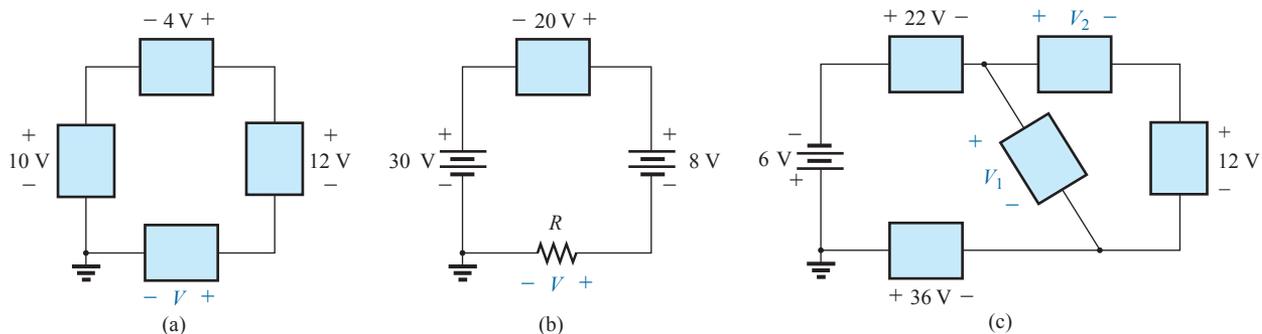


Figura 5.105 Problema 21.

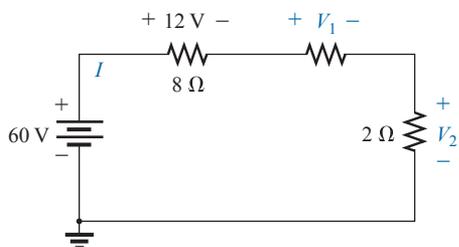


Figura 5.106 Problema 22.

24. Usando a lei de Kirchhoff para tensões, descubra as tensões desconhecidas para a configuração na Figura 5.108.

Seção 5.7 Divisão de tensão em um circuito em série

- 25. Determine os valores dos resistores desconhecidos na Figura 5.109 usando apenas os níveis de tensão fornecidos. Não calcule a corrente!
- 26. Para a configuração na Figura 5.110, com valores de resistor padrão responda:
 - a) por inspeção, qual resistor receberá a porção maior da tensão aplicada? Por quê?
 - b) quão maior será a tensão V_3 em comparação a V_2 e a V_1 ?
 - c) descubra a tensão através do maior resistor usando a regra dos divisores de tensão;
 - d) descubra a tensão através de uma combinação em série de resistores R_2 e R_3 .

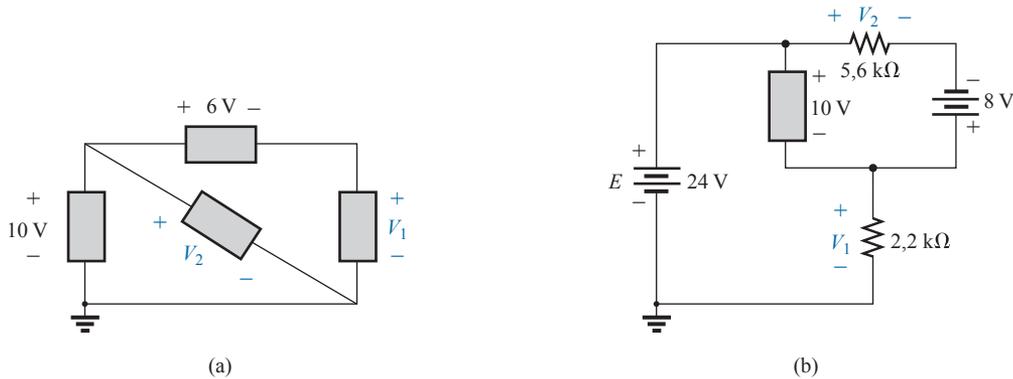


Figura 5.107 Problema 23.

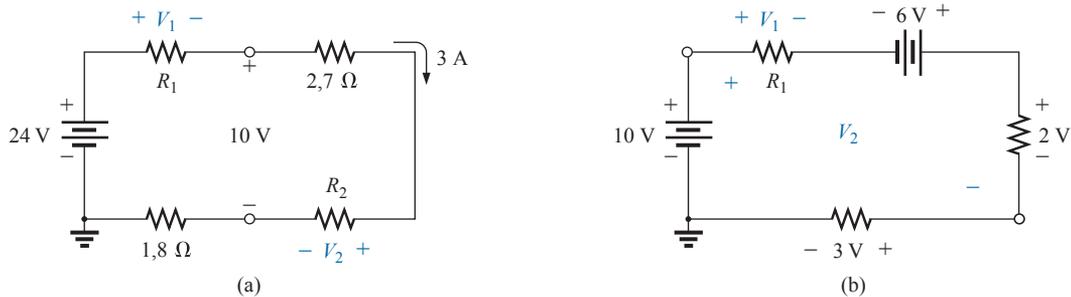


Figura 5.108 Problema 24.

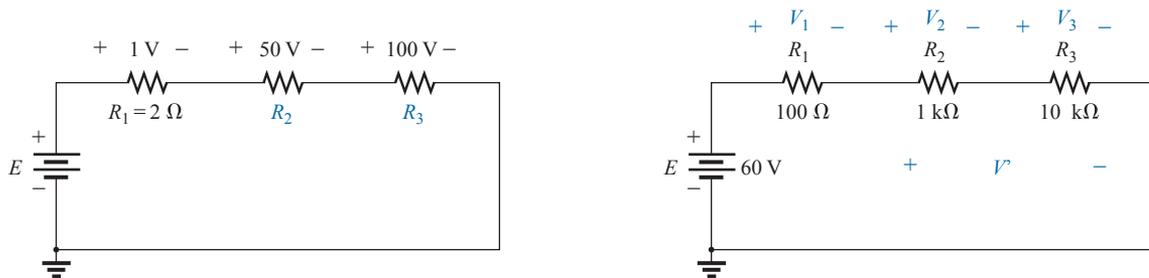


Figura 5.109 Problema 25.

Figura 5.110 Problema 26.

- 27. Usando a regra dos divisores de tensão, descubra as tensões indicadas na Figura 5.111.
- 28. Usando a regra dos divisores de tensão ou a lei de Kirchhoff para tensões, determine as tensões desconhecidas para as configurações na Figura 5.112. Não calcule a corrente!
- 29. Usando a informação fornecida, descubra as quantidades desconhecidas da Figura 5.113.
- *30. Usando a regra dos divisores de tensão, descubra a resistência desconhecida para a configuração na Figura 5.114.
- 31. a) Projete um circuito divisor de tensão que permitirá o uso de uma lâmpada de 8 V, 50 mA em um automóvel com um sistema elétrico de 12 V.

- b) Qual é a especificação de potência mínima do resistor escolhido se resistores de 1/4, 1/2 e 1 W estão disponíveis?
- *32. Projete o divisor de tensões na Figura 5.115 de tal maneira que $V_{R_1} = 1/5 V_{R_2}$. Isto é, calcule R_1 e R_2 .
- *33. Descubra a tensão através de cada resistor na Figura 5.116 se $R_1 = 2R_3$ e $R_2 = 7R_3$.
- *34. a) Projete o circuito na Figura 5.117 de tal maneira que $V_{R_2} = 3V_{R_1}$ e $V_{R_3} = 4V_{R_2}$.
 b) Se a corrente é reduzida a 10 μ A, quais são os novos valores de R_1 , R_2 e R_3 ? Como eles se comparam aos resultados da parte (a)?

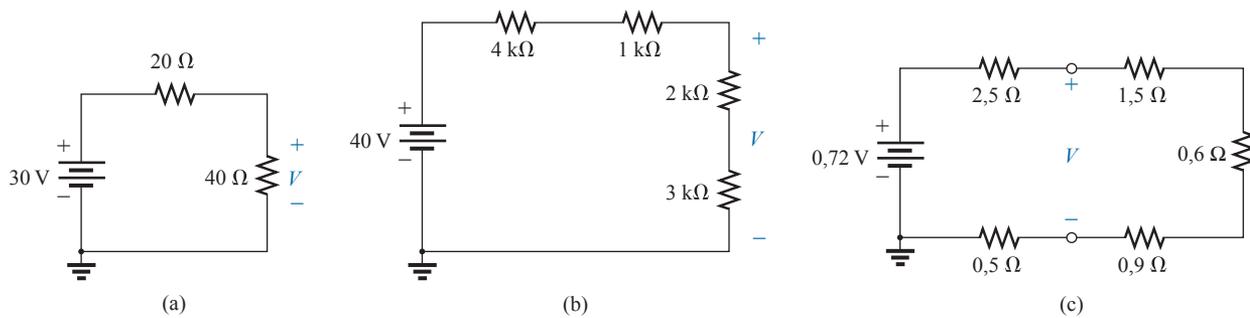


Figura 5.111 Problema 27.

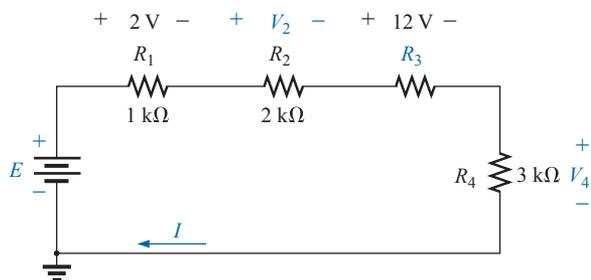
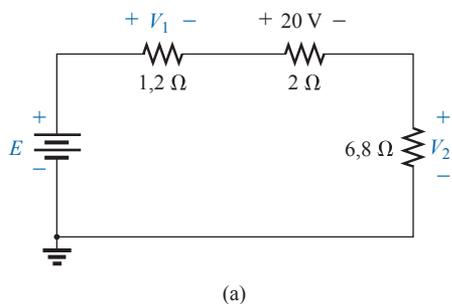


Figura 5.113 Problema 29.

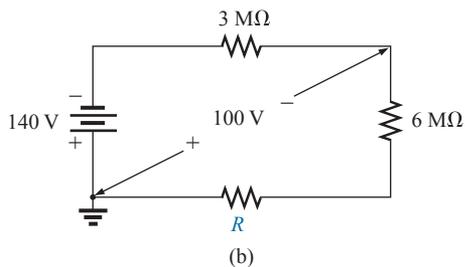
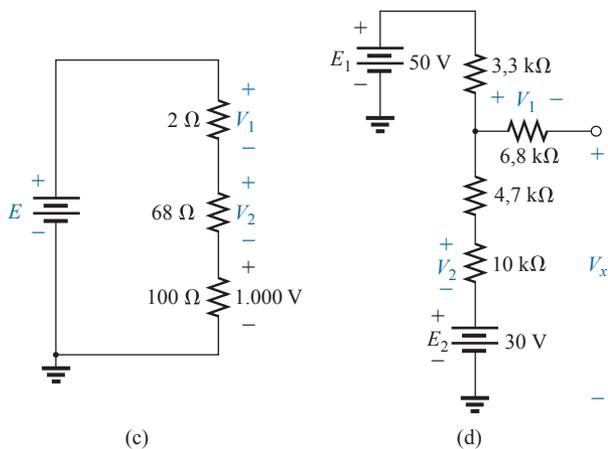
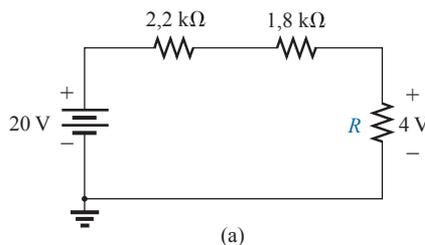
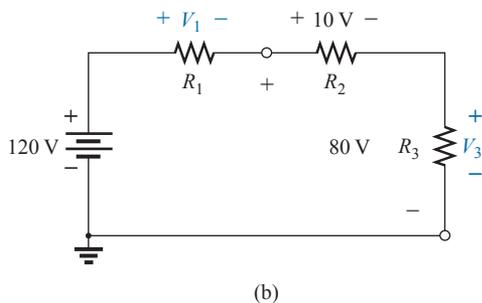


Figura 5.114 Problema 30.

Figura 5.112 Problema 28.

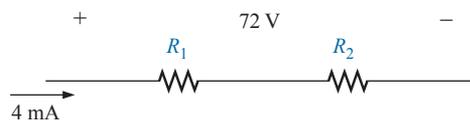


Figura 5.115 Problema 32.

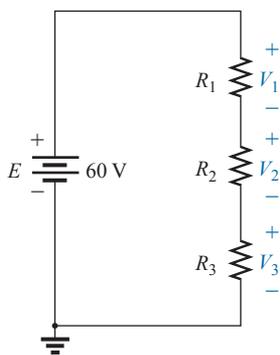


Figura 5.116 Problema 33.

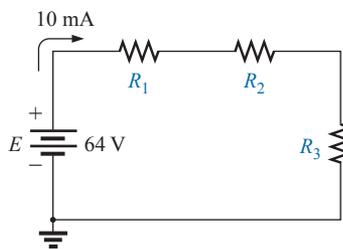


Figura 5.117 Problema 34.

SEÇÃO 5.9 Notação

- 35. Determine as tensões V_a , V_b e V_{ab} para os circuitos mostrados na Figura 5.118.
- 36. a) Determine a corrente I (com o sentido) e a tensão V (com a polaridade) para os circuitos mostrados na Figura 5.119.
- b) Descubra a tensão V_a .
- 37. Para o circuito mostrado na Figura 5.120, determine as tensões a seguir:
 - a) V_a, V_b, V_c, V_d, V_e
 - b) V_{ab}, V_{dc}, V_{cb}
 - c) V_{ac}, V_{db}
- *38. Dadas as informações que aparecem na Figura 5.121, descubra o nível de resistência para R_1 e R_3 .

- 39. Determine os valores de R_1, R_2, R_3 e R_4 para o divisor de tensões da Figura 5.122 se a corrente da fonte é 16 mA.
- 40. Para o circuito na Figura 5.123, determine as tensões a seguir:
 - a) V_a, V_b, V_c, V_d
 - b) V_{ab}, V_{cb}, V_{cd}
 - c) V_{ad}, V_{ca}
- *41. Para o circuito integrado na Figura 5.124, determine $V_0, V_4, V_7, V_{10}, V_{23}, V_{30}, V_{67}, V_{56}$ e I (valor absoluto e sentido).
- *42. Para o circuito integrado na Figura 5.125, determine $V_0, V_3, V_2, V_{23}, V_{12}$ e I_i .

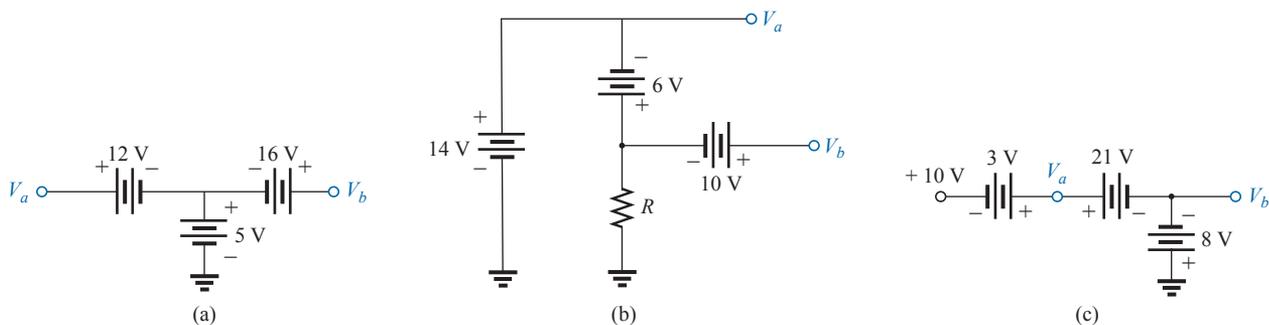


Figura 5.118 Problema 35.

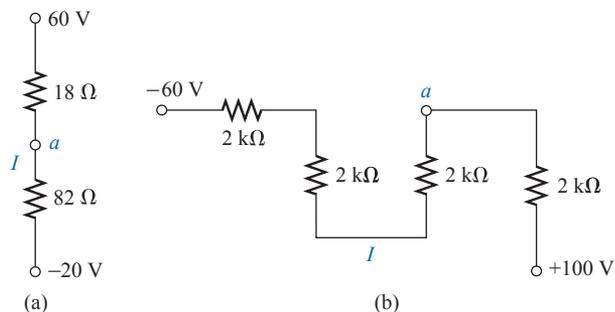


Figura 5.119 Problema 36.

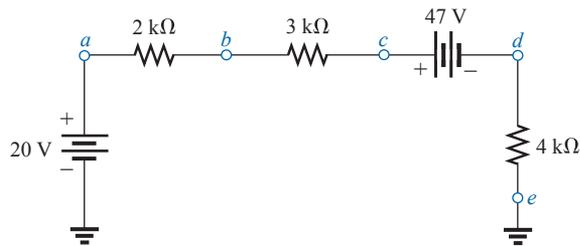


Figura 5.120 Problema 37.

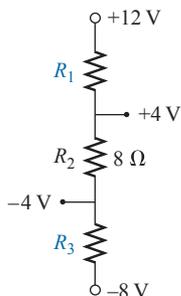


Figura 5.121 Problema 38.

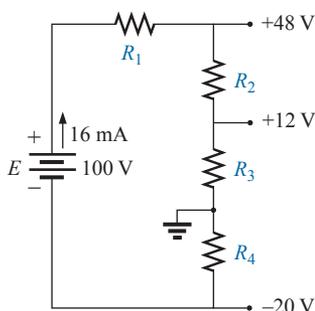


Figura 5.122 Problema 39.

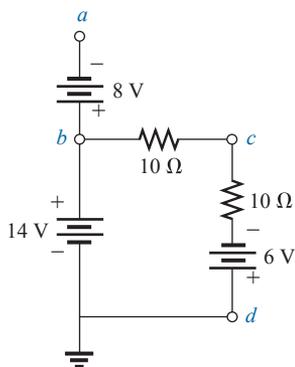


Figura 5.123 Problema 40.

Seção 5.10 Regulação de tensão e resistência interna das fontes de tensão

- 43. a) Descubra a resistência interna de uma bateria que tem uma saída sem carga de 60 V e que fornece uma corrente de plena carga de 2 A para uma carga de 28 Ω.
- b) Descubra a regulação de tensão da fonte.
- 44. a) Descubra a tensão para a carga (condições de plena carga) para a fonte na Figura 5.126.
- b) Descubra a regulação de tensão da fonte.
- c) Quanto de potência é fornecido pela fonte e perdido para a resistência interna sob condições de plena carga?

Seção 5.11 Efeitos de carga dos instrumentos

- 45. a) Determine a corrente através do circuito na Figura 5.127.

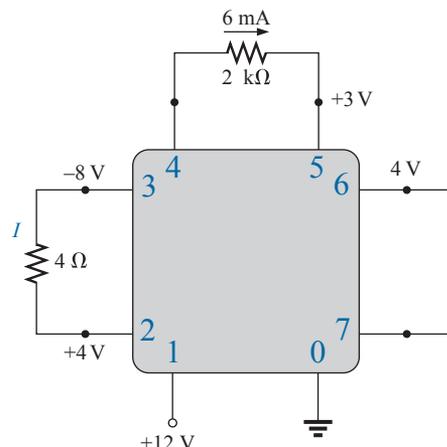


Figura 5.124 Problema 41.

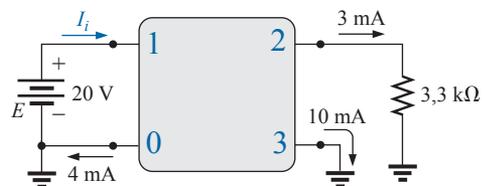


Figura 5.125 Problema 42.

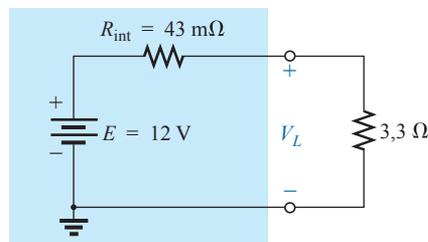


Figura 5.126 Problema 44.

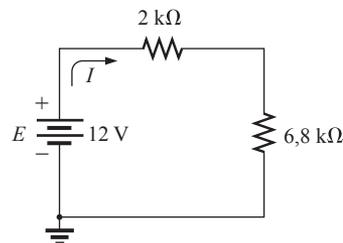


Figura 5.127 Problema 45.

- b) Se um amperímetro com uma resistência interna de 250 Ω é inserido no circuito na Figura 5.127, qual efeito ele terá sobre o nível de corrente?
- c) A diferença no nível de corrente é uma questão importante para a maioria das aplicações?

Seção 5.14 Análise computacional

46. Use o computador para verificar os resultados do Exemplo 5.4.

47. Use o computador para verificar os resultados do Exemplo 5.5.

48. Use o computador para verificar os resultados do Exemplo 5.15.

GLOSSÁRIO

Circuito: Combinação de certo número de elementos interligados que proporciona ao menos um caminho fechado pelo qual as cargas podem fluir.

Circuito em série: Configuração de circuito na qual os elementos têm apenas um ponto de conexão em comum, e na qual os terminais não estão ligados a um terceiro elemento pelo qual passa uma corrente.

Dispositivo de dois terminais: Qualquer elemento ou componente com dois terminais externos para conexão com uma configuração de circuito.

Lei de Kirchhoff para tensões (LKT): A soma algébrica das elevações e das quedas de tensão em uma malha (ou caminho) fechada é zero.

Malha fechada: Qualquer conexão contínua de ramos que permite seguir um caminho partindo de um ponto em um

sentido e retornando ao mesmo ponto no sentido oposto sem deixar o circuito.

Protoboard breadboard: Placa lisa com um conjunto-padrão de buracos conectados condutivamente projetada para aceitar cabos de diâmetro 24 e componentes com fios com aproximadamente o mesmo diâmetro.

Regra dos divisores de tensão: Método pelo qual uma tensão em um circuito em série pode ser determinada sem que seja necessário calcular a corrente no circuito.

Regulação de tensão: Valor percentual que fornece uma indicação das variações da tensão de saída de uma fonte causadas por variações na carga.

Resistência interna: Resistência inerente encontrada internamente em qualquer fonte de energia.