

# Circuitos em série-paralelo



## Objetivos

- Aprender a respeito das características singulares das configurações em série-paralelo e como solucionar problemas envolvendo tensão, corrente, ou potência de qualquer elemento individual ou de qualquer combinação de elementos.
- Familiarizar-se com a fonte com divisor de tensão e com as condições necessárias para usá-la efetivamente.
- Aprender a usar um potenciômetro para controlar a tensão através de uma dada carga.

## 7.1 INTRODUÇÃO

Os capítulos 5 e 6 foram dedicados aos fundamentos dos circuitos em série e em paralelo. De certa forma, esses capítulos podem ser os mais importantes do livro, pois estabelecem uma fundação para todo o material que vem posteriormente. As configurações de circuitos restantes não podem ser definidas por uma lista estrita de condições devido à variedade de configurações que existem. Em termos amplos, podemos olhar para as possibilidades restantes como se elas fossem em **série-paralelo** ou **complexas**.

*Uma configuração em série-paralelo é aquela que é formada por uma combinação de elementos em série-paralelo.*

*Uma configuração complexa é aquela em que nenhum dos elementos está em série ou em paralelo.*

Neste capítulo, usaremos a combinação em série-paralelo utilizando as leis básicas introduzidas para os circuitos em série-paralelo. Não há lei ou regra nova alguma a aprender; há, simplesmente, uma abordagem que permite a análise de tal estrutura. No próximo capítulo, consideraremos circuitos complexos usando métodos de análise que permitirão analisar qualquer tipo de circuito.

As possibilidades para configurações em série-paralelo são infinitas. Portanto, você precisa examinar cada circuito como se ele fosse uma entidade separada e definir a abordagem que fornece o melhor caminho para determinar as quantidades desconhecidas. Consequentemente, você encontrará similaridades entre as configurações que tornam mais fácil definir a melhor rota para uma solução, mas isso ocorre apenas com exposição, prática e paciência. A melhor preparação para a análise de circuitos em série-paralelo é uma firme compreensão dos conceitos introduzidos para circuitos em série e em paralelo. Todas as regras e leis a serem aplicadas neste capítulo já foram introduzidas nos dois capítulos anteriores.

## 7.2 CIRCUITOS EM SÉRIE-PARALELO

O circuito na Figura 7.1 é um circuito em série-paralelo. Em um primeiro momento, você tem de tomar muito cuidado para determinar quais elementos estão em série e quais estão em paralelo. Por exemplo, os resistores  $R_1$  e  $R_2$  *não* estão em série devido ao resistor  $R_3$  estar conectado ao ponto comum  $b$  entre  $R_1$  e  $R_2$ . Os resistores  $R_2$  e  $R_4$  *não* estão em paralelo porque eles não estão conectados em ambas as extremidades. Eles estão separados em uma extremidade pelo resistor  $R_3$ . A necessidade de ter certeza absoluta a respeito de suas definições dos últimos dois capítulos agora se torna óbvia. Na realidade, pode ser

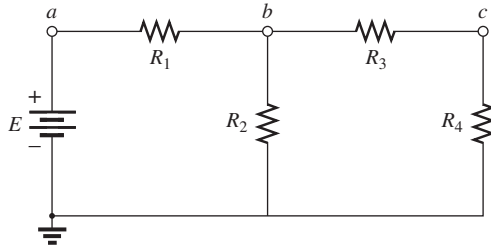


Figura 7.1 Circuito CC em série-paralelo.

uma boa ideia fazer referência a essas regras na medida em que fizemos progressos neste capítulo.

Se olharmos com bastante cuidado a Figura 7.1, veremos que os dois resistores  $R_3$  e  $R_4$  estão em série porque compartilham somente o ponto  $c$ , e nenhum outro elemento está conectado àquele ponto. Além disso, a fonte de tensão  $E$  e o resistor  $R_1$  estão em série porque compartilham o ponto  $a$ , e não há nenhum outro elemento conectado ao mesmo ponto. Em toda a configuração, não há dois elementos em paralelo.

Como podemos analisar esse tipo de configuração? A abordagem exige que primeiro identifiquemos os elementos que podem ser combinados. Tendo em vista que não há elementos em paralelo, temos que nos voltar para as possibilidades com os elementos em série. A fonte de tensão e o resistor em série não podem ser combinados porque são tipos diferentes de elementos. Entretanto, os resistores  $R_3$  e  $R_4$  podem ser combinados para formar um único resistor. A resistência total dos dois é sua soma, como definido pelos circuitos em série. A resistência resultante está então em paralelo com o resistor  $R_2$ , e eles podem ser combinados usando-se as leis para elementos em paralelo. O processo começou: estamos lentamente reduzindo o circuito a um apenas, que será representado por um único resistor igual à resistência total ‘vista’ pela fonte.

A corrente fornecida pela fonte pode agora ser determinada usando a lei de Ohm, e podemos trabalhar retrocedendo através do circuito para descobrir todas as outras correntes e tensões. A capacidade de definir o primeiro passo na análise pode ser difícil, às vezes. Entretanto, combinações podem ser feitas usando-se somente as regras para elementos em série ou em paralelo, de maneira que, naturalmente, o primeiro passo pode, simplesmente, definir quais elementos estão em série e quais estão em paralelo. Então, você tem de definir como descobrir coisas como a resistência total e a corrente fornecida pela fonte e proceder com a análise. Em geral, os passos a seguir proporcionam alguma orientação para a ampla variedade de combinações possíveis que você pode encontrar.

### Abordagem geral

1. Reserve algum tempo para estudar o problema ‘como um todo’, construindo mentalmente um resumo do procedimento que planeja usar. Isso pode resultar em economia de tempo e energia.
2. Em seguida, analise cada região do circuito separadamente antes de associá-las em combinações série-paralelo. Isso geralmente simplifica o circuito e possivelmente revela um método direto para a determinação dos valores de uma ou mais incógnitas. Esse procedimento também elimina muitos dos erros devido à falta de um método sistemático.
3. Redesenhe o circuito, quando possível, com os ramos simplificados, mantendo intactas as quantidades desconhecidas para manter o circuito em um modo mais fácil de ser entendido e proporcionar circuitos reduzidos para que, a partir da fonte, sejam determinadas as quantidades desconhecidas.
4. Quando obtiver uma solução, verifique se ela é razoável, considerando os valores associados à fonte de energia e aos elementos do circuito. Caso a solução não pareça razoável, resolva o circuito usando outro método ou recapitule todo o trabalho cuidadosamente.

## 7.3 MÉTODO DE REDUÇÃO E RETORNO

O circuito da Figura 7.1 é redesenhado, resultando na Figura 7.2(a). Para essa discussão, presumiremos que a tensão  $V_4$  é desejada. Como foi descrito na Seção 7.2, primeiro combine os resistores em série  $R_3$  e  $R_4$  para formar um resistor equivalente  $R'$ , como mostra a Figura 7.2(b). Os resistores  $R_2$  e  $R'$  estão em paralelo, e podem ser combinados para estabelecer um resistor equivalente  $R'_7$ , como mostra a Figura 7.2(c). Os resistores  $R_1$  e  $R'_7$  estão em série, e podem ser combinados para estabelecer a resistência total do circuito como mostra a Figura 7.2(d). Agora, a **fase de redução** da análise está completa. O circuito não pode ser colocado de uma forma mais simples.

Podemos proceder agora com a **fase de retorno**, através da qual realizamos nosso caminho de volta para a tensão desejada  $V_4$ . Devido à configuração de série resultante, a corrente fornecida pela fonte também é a corrente por  $R_1$  e  $R'_7$ . A tensão através de  $R'_7$  (e, portanto,  $R_2$ ) pode ser determinada usando-se a lei de Ohm como mostra a Figura 7.2(e). Por fim, a tensão desejada  $V_4$  pode

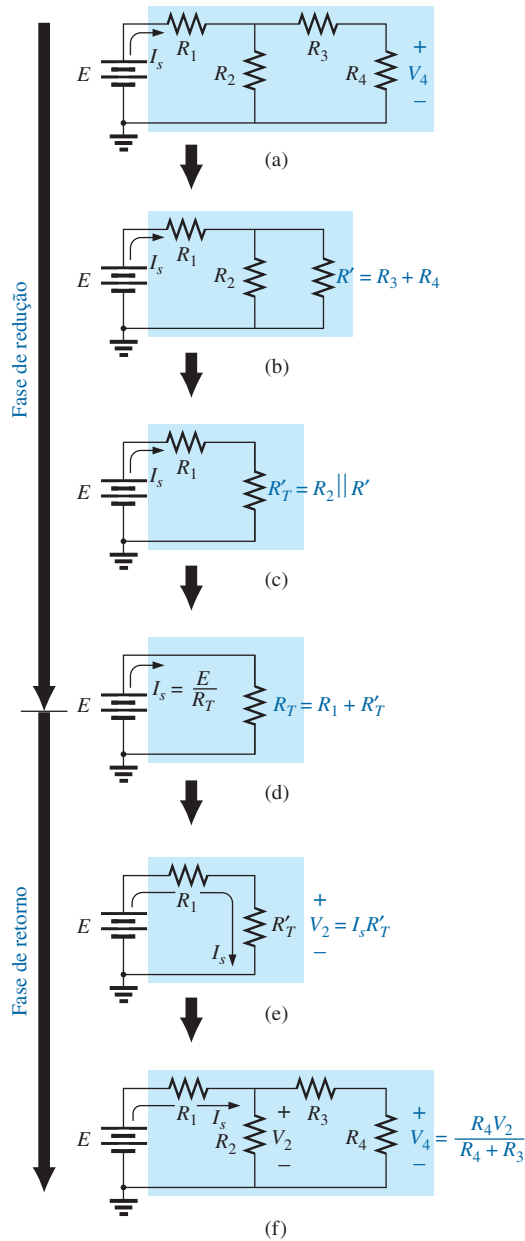


Figura 7.2 Introdução ao método de redução e retorno.

ser determinada por uma aplicação da regra do divisor de tensão como mostra a Figura 7.2(f).

O método da redução e retorno acaba de ser introduzido. Esse processo o capacita a reduzir o circuito a sua forma mais simples através da fonte e, então, determinar a corrente fornecida pela fonte. Na fase de retorno, você usa a corrente fornecida pela fonte resultante para trabalhar a incógnita desejada. Para a maioria dos circuitos em série-paralelo de fonte única, o método anterior proporciona uma opção viável para a solução. Em alguns casos, atalhos que poupam tempo e energia podem ser aplicados. Agora, veremos alguns exemplos.

**EXEMPLO 7.1**

Calcule a corrente \$I\_3\$ para o circuito em série-paralelo na Figura 7.3.

Solução:

Ao conferir os elementos em série e em paralelo, descobrimos que os resistores \$R\_2\$ e \$R\_3\$ estão em paralelo. Sua resistência total é:

$$R' = R_2 \parallel R_3 = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} = \frac{(12 \text{ k}\Omega)(6 \text{ k}\Omega)}{12 \text{ k}\Omega + 6 \text{ k}\Omega} = 4 \text{ k}\Omega$$

Ao substituir a combinação em paralelo por uma resistência equivalente única, temos a configuração da Figura 7.4. Os resistores \$R\_1\$ e \$R'\$ estão em série, resultando em uma resistência total de:

$$R_T = R_1 + R' = 2 \text{ k}\Omega + 4 \text{ k}\Omega = 6 \text{ k}\Omega$$

A corrente fornecida pela fonte é então determinada usando-se a lei de Ohm:

$$I_s = \frac{E}{R_T} = \frac{54 \text{ V}}{6 \text{ k}\Omega} = 9 \text{ mA}$$

Na Figura 7.4, tendo em vista que \$R\_1\$ e \$R'\$ estão em série, elas têm a mesma corrente \$I\_s\$. O resultado é:

$$I_1 = I_s = 9 \text{ mA}$$

Retornando à Figura 7.3, descobrimos que \$I\_1\$ é a corrente total que entra na combinação em paralelo de \$R\_2\$

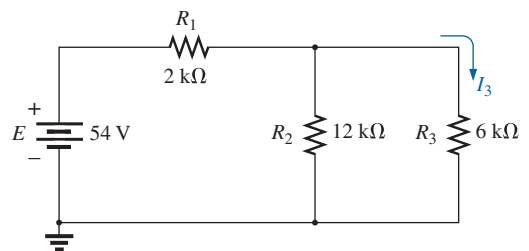


Figura 7.3 Circuito em série-paralelo para o Exemplo 7.1.

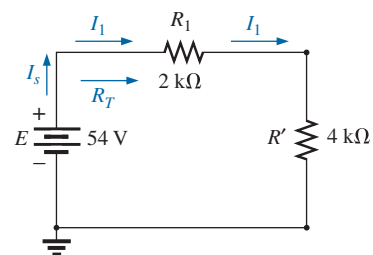


Figura 7.4 Substituição da resistência equivalente paralela para os resistores \$R\_2\$ e \$R\_3\$ na Figura 7.3.

e  $R_3$ . A aplicação da regra do divisor de corrente resulta na corrente desejada:

$$I_3 = \left( \frac{R_2}{R_2 + R_3} \right) I_1 = \left( \frac{12 \text{ k}\Omega}{12 \text{ k}\Omega + 6 \text{ k}\Omega} \right) 9 \text{ mA} = 6 \text{ mA}$$

Observe que, na solução para o Exemplo 7.1, todas as equações usadas foram introduzidas nos últimos dois capítulos; nada de novo foi introduzido, exceto como abordar o problema e usar a equação de maneira apropriada.

**EXEMPLO 7.2**

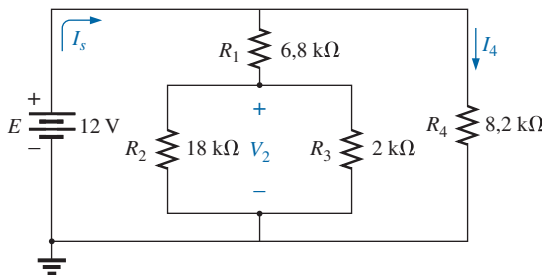
Considerando o circuito na Figura 7.5:

- a) determine as correntes  $I_4$  e  $I_s$  e a tensão  $V_2$ ;
- b) insira os medidores para medir a corrente  $I_4$  e a tensão  $V_2$ .

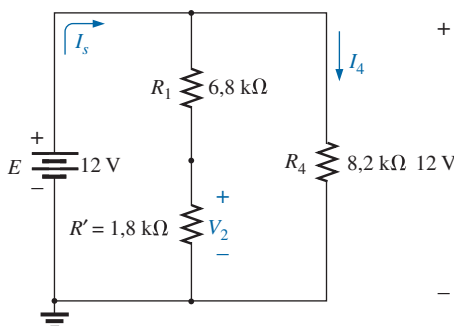
Soluções:

- a) Ao conferir o circuito, descobrimos que não há dois resistores em série, e que a única combinação em paralelo são os resistores  $R_2$  e  $R_3$ . Combinar os dois resistores em paralelo resulta em uma resistência total de:

$$R' = R_2 \parallel R_3 = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} = \frac{(18 \text{ k}\Omega)(2 \text{ k}\Omega)}{18 \text{ k}\Omega + 2 \text{ k}\Omega} = 1,8 \text{ k}\Omega$$



**Figura 7.5** Circuito em série-paralelo para o Exemplo 7.2.



**Figura 7.6** Representação esquemática do circuito na Figura 7.5 após a substituição da resistência equivalente  $R'$  pela combinação em paralelo de  $R_2$  e  $R_3$ .

Ao redesenhar o circuito com a resistência  $R'$  inserida, temos a configuração na Figura 7.6.

Você pode se sentir tentado a combinar os resistores em série  $R_1$  e  $R'$ , e a redesenhar o circuito. Entretanto, um exame cuidadoso da Figura 7.6 revela que, tendo em vista que os dois ramos resistivos estão em paralelo, a tensão é a mesma através de cada ramo. Isto é, a tensão pela combinação em série de  $R_1$  e  $R'$  é 12 V, e aquela pelo resistor  $R_4$  é 12 V. O resultado é que  $I_4$  pode ser determinado diretamente usando-se a lei de Ohm, como ocorre a seguir:

$$I_4 = \frac{V_4}{R_4} = \frac{E}{R_4} = \frac{12 \text{ V}}{8,2 \text{ k}\Omega} = 1,46 \text{ mA}$$

Na realidade, pela mesma razão,  $I_4$  poderia ser determinado diretamente a partir da Figura 7.5. Como a tensão total através da combinação em série de  $R_1$  e  $R'$  é 12 V, a regra do divisor de tensão pode ser aplicada para determinar a tensão  $V_2$ , como ocorre a seguir:

$$V_2 = \left( \frac{R'}{R' + R_1} \right) E = \left( \frac{1,8 \text{ k}\Omega}{1,8 \text{ k}\Omega + 6,8 \text{ k}\Omega} \right) 12 \text{ V} = 2,51 \text{ V}$$

A corrente  $I_s$  pode ser encontrada de duas maneiras. Calcule a resistência total e use a lei de Ohm, ou calcule a corrente através do outro ramo em paralelo e aplique a lei de Kirchhoff para corrente. Tendo em vista que já temos a corrente  $I_4$ , a segunda abordagem será aplicada:

$$I_1 = \frac{E}{R_1 + R'} = \frac{12 \text{ V}}{6,8 \text{ k}\Omega + 1,8 \text{ k}\Omega} = 1,40 \text{ mA}$$

e  $I_s = I_1 + I_4 = 1,40 \text{ mA} + 1,46 \text{ mA} = 2,86 \text{ mA}$

- b) Os medidores foram inseridos de maneira apropriada na Figura 7.7. Observe que o voltímetro está entre ambos os resistores, tendo em vista que a tensão através dos elementos em paralelo é a mesma. Além disso, observe que o amperímetro está em série com o resistor  $R_4$ , fazendo com que a corrente do medidor seja a mesma que atravessa o resistor em série. A fonte de alimentação exibe a corrente fornecida.

Sem dúvida, o Exemplo 7.2 revelou como o estudo cuidadoso de um circuito pode eliminar passos desnecessários em busca da solução desejada. Muitas vezes, vale a pena reservar um tempo extra para refletir e examinar cuidadosamente um circuito antes de tentar todas as equações que pareçam apropriadas.

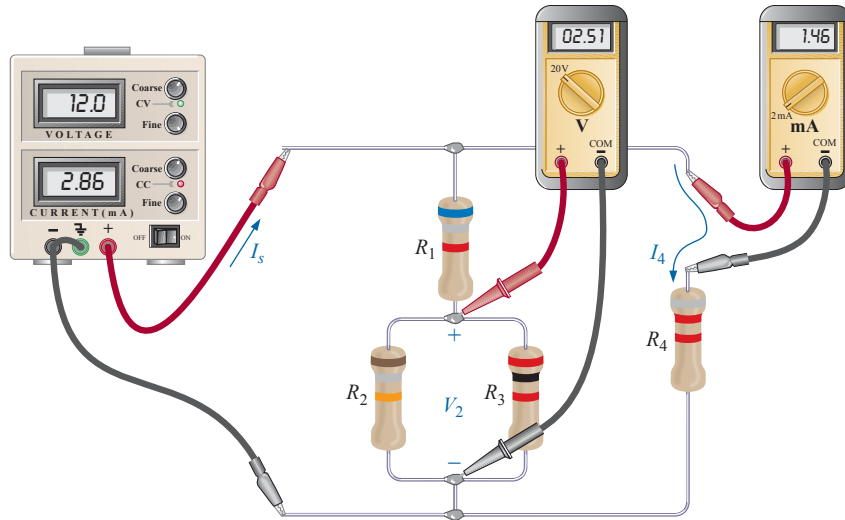


Figura 7.7 Inserção de um amperímetro e de um voltmímetro para medir  $I_4$  e  $V_2$ , respectivamente.

## 7.4 MÉTODO DO DIAGRAMA EM BLOCOS

No exemplo anterior, usamos o método da redução e retorno para descobrir as incógnitas desejadas. O sentido parecia relativamente óbvio, e a solução, relativamente fácil de compreender. Entretanto, ocasionalmente o método não é tão óbvio, e talvez você precise olhar para grupos de elementos em vez de componentes individuais. Assim que o agrupamento de elementos revelar o método mais direto, você poderá examinar o impacto dos componentes individuais em cada grupo. Esse agrupamento de elementos é chamado de *método do diagrama em blocos*, e é usado nos exemplos a seguir.

Na Figura 7.8, os blocos  $B$  e  $C$  estão em paralelo (pontos  $b$  e  $c$  em comum), e a fonte de tensão  $E$  está em série com o bloco  $A$  (ponto  $a$  em comum). A combinação em paralelo de  $B$  e  $C$  também está em série com  $A$  e com a fonte de tensão  $E$ , devido aos pontos em comum  $b$  e  $c$ , respectivamente.

Para assegurar que a análise a ser seguida seja a mais clara e simples possível, a equação a seguir é usada para combinações em série e em paralelo de elementos.

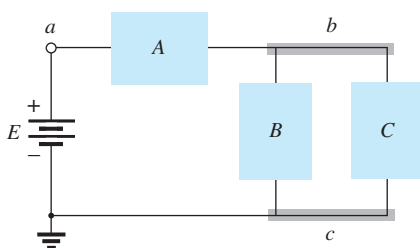


Figura 7.8 Introdução ao método do diagrama em blocos.

Para os resistores em série  $R_1$  e  $R_2$ , uma vírgula é inserida entre suas notações subscritas, como é mostrado a seguir:

$$R_{1,2} = R_1 + R_2$$

Para os resistores em paralelo  $R_1$  e  $R_2$ , o símbolo em paralelo é inserido entre suas notações subscritas, como é mostrado a seguir:

$$R_{\parallel 2} = R_1 \parallel R_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

Se cada bloco na Figura 7.8 fosse um único elemento resistivo, teria-se, como resultado, o circuito na Figura 7.9. Observe que ele é uma réplica exata da Figura 7.3 no Exemplo 7.1. Os blocos  $B$  e  $C$  estão em paralelo, e sua combinação está em série com o bloco  $A$ .

Entretanto, como mostra o exemplo a seguir, a mesma configuração de bloco pode resultar em um circuito totalmente diferente.

### EXEMPLO 7.3

Determine todas as correntes e tensões do circuito na Figura 7.10.

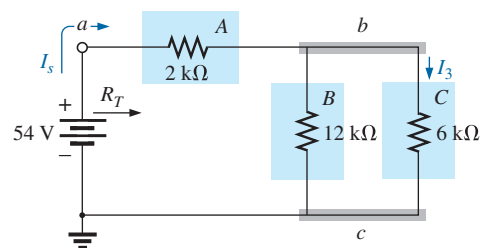


Figura 7.9 Formato do diagrama em blocos da Figura 7.3.

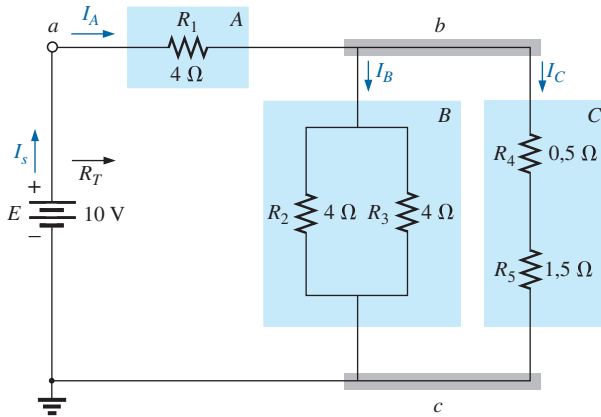


Figura 7.10 Exemplo 7.3.

Solução:

Os blocos *A*, *B* e *C* têm a mesma posição relativa, mas os componentes internos são diferentes. Observe que os blocos *B* e *C* ainda estão em paralelo, e o bloco *A* está em série com a combinação em paralelo. Primeiro, reduza cada bloco a um único elemento e proceda como descrito para o Exemplo 7.1.

Nesse caso:

$$A: R_A = 4 \Omega$$

$$B: R_B = R_2 \parallel R_3 = R_{2\parallel 3} = \frac{R}{N} = \frac{4 \Omega}{2} = 2 \Omega$$

$$C: R_C = R_4 + R_5 = R_{4,5} = 0,5 \Omega + 1,5 \Omega = 2 \Omega$$

Os blocos *B* e *C* ainda estão em paralelo, e

$$R_{B\parallel C} = \frac{R}{N} = \frac{2 \Omega}{2} = 1 \Omega$$

com  $R_T = R_A + R_{B\parallel C} = 4 \Omega + 1 \Omega = 5 \Omega$  (Observe a similaridade entre essa equação e aquela obtida para o Exemplo 7.1.)

e  $I_S = \frac{E}{R_T} = \frac{10 \text{ V}}{5 \Omega} = 2 \text{ A}$

Podemos descobrir as correntes  $I_A$ ,  $I_B$  e  $I_C$  usando a redução do circuito na Figura 7.10 (lembre-se do Passo 3) como fizemos na Figura 7.11. Observe que  $I_A$ ,  $I_B$  e  $I_C$  são os mesmos nas figuras 7.10 e 7.11 e, portanto, também aparecem na Figura 7.11. Em outras palavras, as correntes  $I_A$ ,  $I_B$  e  $I_C$  na Figura 7.11 têm o mesmo valor absoluto que as mesmas correntes na Figura 7.10. Temos:

$$I_A = I_S = 2 \text{ A}$$

e  $I_B = I_C = \frac{I_A}{2} = \frac{I_S}{2} = \frac{2 \text{ A}}{2} = 1 \text{ A}$

Voltando ao circuito na Figura 7.10, temos:

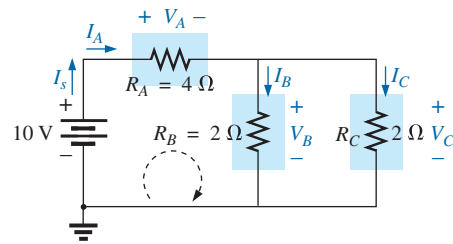


Figura 7.11 Equivalente reduzido da Figura 7.10.

$$I_{R_2} = I_{R_3} = \frac{I_B}{2} = 0,5 \text{ A}$$

As tensões  $V_A$ ,  $V_B$  e  $V_C$  de qualquer uma das figuras são:

$$V_A = I_A R_A = (2 \text{ A})(4 \Omega) = 8 \text{ V}$$

$$V_B = I_B R_B = (1 \text{ A})(2 \Omega) = 2 \text{ V}$$

$$V_C = V_B = 2 \text{ V}$$

Aplicando a lei de Kirchhoff para tensões para a malha indicada na Figura 7.11, obtemos:

$$\sum_{\text{C}} V = E - V_A - V_B = 0$$

$$E = E_A + V_B = 8 \text{ V} + 2 \text{ V}$$

ou

$$10 \text{ V} = 10 \text{ V (confere)}$$

### EXEMPLO 7.4

Outra variação possível da Figura 7.8 aparece na Figura 7.12. Determine todas as correntes e tensões.

Solução:

$$R_A = R_{1\parallel 2} = \frac{(9 \Omega)(6 \Omega)}{9 \Omega + 6 \Omega} = \frac{54 \Omega}{15} = 3,6 \Omega$$

$$R_B = R_3 + R_{4\parallel 5} = 4 \Omega + \frac{(6 \Omega)(3 \Omega)}{6 \Omega + 3 \Omega} = 4 \Omega + 2 \Omega = 6 \Omega$$

$$R_C = 3 \Omega$$

O circuito na Figura 7.12 pode então ser redesenhado na forma reduzida, como mostra a Figura 7.13. Observe as similaridades entre esse circuito e os circuitos nas figuras 7.9 e 7.11. Temos:

$$R_T = R_A + R_{B\parallel C} = 3,6 \Omega + \frac{(6 \Omega)(3 \Omega)}{6 \Omega + 3 \Omega}$$

$$= 3,6 \Omega + 2 \Omega = 5,6 \Omega$$

$$I_S = \frac{E}{R_T} = \frac{16,8 \text{ V}}{5,6 \Omega} = 3 \text{ A}$$

$$I_A = I_S = 3 \text{ A}$$

Ao aplicarmos a regra do divisor de corrente, temos:

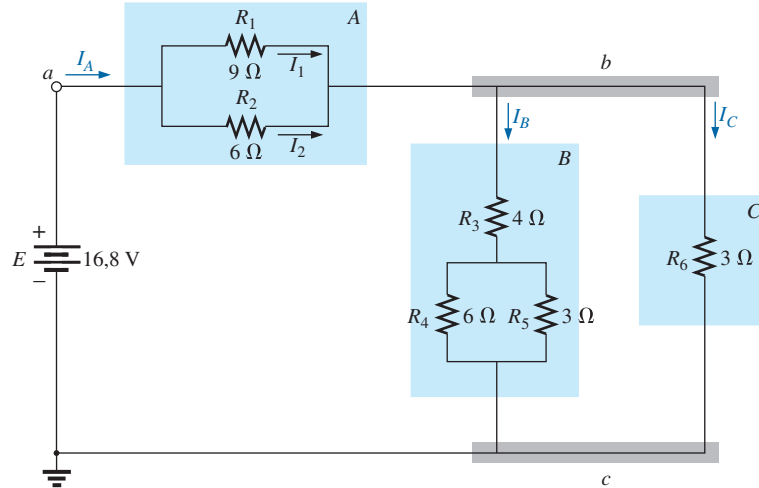


Figura 7.12 Exemplo 7.4.

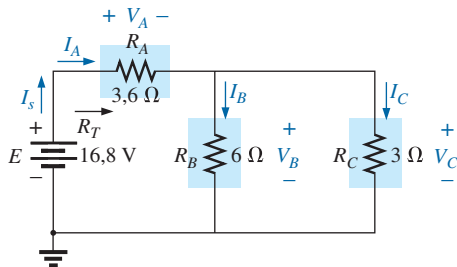


Figura 7.13 Equivalente reduzido da Figura 7.12.

$$I_B = \frac{R_C I_A}{R_C + R_B} = \frac{(3 \Omega)(3 \text{ A})}{3 \Omega + 6 \Omega} = \frac{9 \text{ A}}{9} = 1 \text{ A}$$

Pela lei de Kirchhoff para corrente:

$$I_C = I_A - I_B = 3 \text{ A} - 1 \text{ A} = 2 \text{ A}$$

Pela lei de Ohm:

$$V_A = I_A R_A = (3 \text{ A})(3,6 \Omega) = 10,8 \text{ V}$$

$$V_B = I_B R_B = V_C = I_C R_C = (2 \text{ A})(3 \Omega) = 6 \text{ V}$$

Ao retornar ao circuito original (Figura 7.12) e aplicar a regra do divisor de corrente, temos:

$$I_1 = \frac{R_2 I_A}{R_2 + R_1} = \frac{(6 \Omega)(3 \text{ A})}{6 \Omega + 9 \Omega} = \frac{18 \text{ A}}{15} = 1,2 \text{ A}$$

Pela lei de Kirchhoff para corrente:

$$I_2 = I_A - I_1 = 3 \text{ A} - 1,2 \text{ A} = 1,8 \text{ A}$$

As figuras 7.9, 7.10 e 7.12 são apenas algumas de uma variedade infinita de configurações que o circuito pode assumir ao começar pelo arranjo básico na

Figura 7.8. Elas foram incluídas na nossa discussão para enfatizar a importância de considerar cada região do circuito independentemente antes de encontrar a solução para o circuito como um todo.

Os blocos na Figura 7.8 podem ser arranjados de diversas maneiras. Na realidade, não há limite para o número de configurações em série-paralelo que podem aparecer dentro de um determinado circuito. Pelo contrário, o método do diagrama em blocos pode ser usado efetivamente para reduzir a complexidade aparente de um sistema ao identificar os principais componentes em série e em paralelo do circuito. Esse método é demonstrado nos exemplos a seguir.

## 7.5 EXEMPLOS DESCRITIVOS

### EXEMPLO 7.5

Calcule a corrente  $I_4$  e a tensão  $V_2$  para o circuito na Figura 7.14 usando o método do diagrama de blocos.

Solução:

Observe as similaridades com o circuito na Figura 7.5. Nesse caso, desejamos conhecer somente algumas

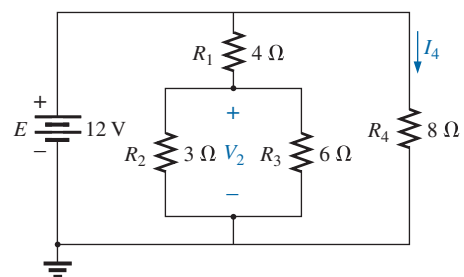


Figura 7.14 Exemplo 7.5.

grandezas em particular, e não uma solução completa. Portanto, seria uma perda de tempo calcular todas as correntes e tensões do circuito. O método empregado deve possibilitar apenas a obtenção das incógnitas desejadas. Com o uso do método do diagrama em blocos, o circuito apresenta a estrutura básica mostrada na Figura 7.15, que indica claramente que os três ramos estão em paralelo e que a tensão entre os terminais de *A* e *B* é a tensão de saída da fonte. Agora está óbvio que a corrente  $I_4$  é dada pela razão entre a tensão da bateria e a resistência associada ao bloco *B*. Caso se deseje, o bloco *A* pode ser ainda subdividido, como ilustra a Figura 7.16, de modo a identificar *C* e *D* como elementos em série, para que a tensão  $V_2$  possa ser determinada com o auxílio da regra dos divisores de tensão, desde que as resistências associadas a *C* e a *D* sejam reduzidas a um único valor. Esse é um exemplo de como um esboço mental do método pode ser feito antes de se aplicar leis, regras etc., a fim de evitar caminhos sem saída e frustrações.

Aplicando a lei de Ohm, temos:

$$I_4 = \frac{E}{R_B} = \frac{E}{R_4} = \frac{12 \text{ V}}{8 \Omega} = 1,5 \text{ A}$$

Combinando os resistores  $R_2$  e  $R_3$  da Figura 7.14, temos:

$$R_D = R_2 \parallel R_3 = 3 \Omega \parallel 6 \Omega = \frac{(3 \Omega)(6 \Omega)}{3 \Omega + 6 \Omega} = 2 \Omega$$

e aplicando a regra dos divisores de tensão, temos:

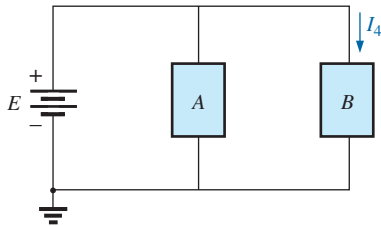


Figura 7.15 Diagrama de blocos da Figura 7.14.

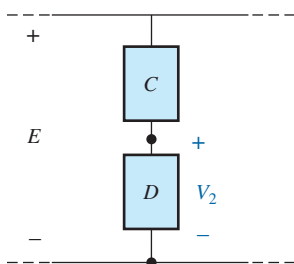


Figura 7.16 Diagrama alternativo de blocos para o primeiro ramo em paralelo da Figura 7.14.

$$V_2 = \frac{R_D E}{R_D + R_C} = \frac{(2 \Omega)(12 \text{ V})}{2 \Omega + 4 \Omega} = \frac{24 \text{ V}}{6} = 4 \text{ V}$$

**EXEMPLO 7.6**

Determine as correntes e as tensões indicadas para o circuito na Figura 7.17.

Solução:

Novamente é solicitado o valor de apenas algumas incógnitas específicas. Quando o circuito é redesenhado, é particularmente importante observar quais incógnitas serão mantidas e quais terão de ser determinadas usando-se a configuração original. O diagrama em blocos para esse circuito pode ser o ilustrado na Figura 7.18, que mostra claramente que *A* e *B* estão em série. Observe o número de incógnitas que foram preservadas nesse formato. A tensão  $V_1$  será a mesma entre os terminais dos três ramos em paralelo na Figura 7.17, enquanto  $V_5$  será a tensão entre os terminais de  $R_4$  e  $R_5$ . As correntes desconhecidas  $I_2$  e  $I_4$  são perdidas, pois são correntes que percorrem apenas um dos ramos de uma associação em paralelo. Entretanto, uma vez que  $V_1$  e  $V_5$  sejam conhecidas, essas correntes podem ser determinadas usando-se a lei de Ohm.

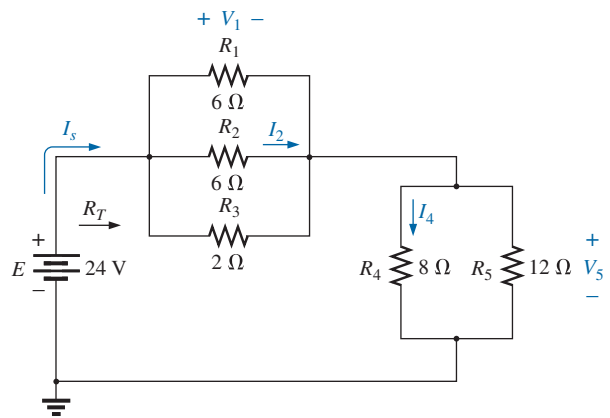


Figura 7.17 Exemplo 7.6.

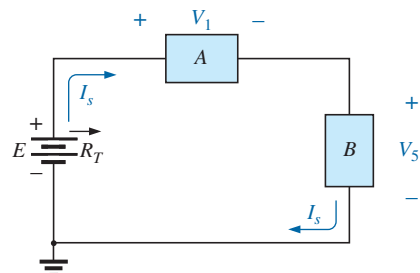


Figura 7.18 Diagrama de blocos para o circuito da Figura 7.17.



$$R_{1||2} = \frac{R}{N} = \frac{6 \Omega}{2} = 3 \Omega$$

$$R_4 = R_{1||2||3} = \frac{(3 \Omega)(2 \Omega)}{3 \Omega + 2 \Omega} = \frac{6 \Omega}{5} = 1,2 \Omega$$

$$R_B = R_{4||5} = \frac{(8 \Omega)(12 \Omega)}{8 \Omega + 12 \Omega} = \frac{96 \Omega}{20} = 4,8 \Omega$$

A forma reduzida do circuito na Figura 7.17 então aparece como mostra a Figura 7.19, e:

$$R_T = R_{1||2||3} + R_{4||5} = 1,2 \Omega + 4,8 \Omega = 6 \Omega$$

$$I_s = \frac{E}{R_T} = \frac{24 \text{ V}}{6 \Omega} = 4 \text{ A}$$

com  $V_1 = I_s R_{1||2||3} = (4 \text{ A})(1,2 \Omega) = 4,8 \text{ V}$   
 $V_5 = I_s R_{4||5} = (4 \text{ A})(4,8 \Omega) = 19,2 \text{ V}$

Aplicando a lei de Ohm, temos:

$$I_4 = \frac{V_5}{R_4} = \frac{19,2 \text{ V}}{8 \Omega} = 2,4 \text{ A}$$

$$I_2 = \frac{V_2}{R_2} = \frac{V_1}{R_2} = \frac{4,8 \text{ V}}{6 \Omega} = 0,8 \text{ A}$$

O exemplo a seguir demonstra que podemos ter tensões desconhecidas não apenas entre os terminais de um elemento, mas também entre dois pontos quaisquer de um circuito. Além disso, a importância de redesenhar o circuito de modo a fazê-lo adquirir um formato mais familiar também é apresentada na análise que se segue.

**EXEMPLO 7.7**

a) Determine as tensões  $V_1$ ,  $V_3$  e  $V_{ab}$  no circuito mostrado na Figura 7.20.

b) Calcule a corrente  $I_s$  fornecida pela fonte.

Soluções:

Esse é um exemplo de uma situação em que pode ser melhor redesenhar o circuito antes de começar a análise. Visto que a combinação das duas fontes não afeta o cálculo das incógnitas, o circuito é redesenhado como mostra a Figura 7.21, estabelecendo um circuito

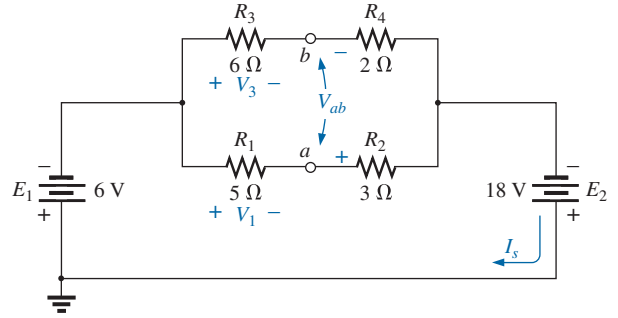


Figura 7.20 Exemplo 7.7.

paralelo no qual a tensão total da fonte aparece sobre os terminais dos ramos em paralelo. A tensão da fonte resultante da combinação é dada pela diferença entre as tensões das fontes originais, tendo a polaridade da fonte original de maior tensão.

a) Observe a semelhança com a Figura 7.16, que nos permite usar a regra dos divisores de tensão para determinar  $V_1$  e  $V_3$ :

$$V_1 = \frac{R_1 E}{R_1 + R_2} = \frac{(5 \Omega)(12 \text{ V})}{5 \Omega + 3 \Omega} = \frac{60 \text{ V}}{8} = 7,5 \text{ V}$$

$$V_3 = \frac{R_3 E}{R_3 + R_4} = \frac{(6 \Omega)(12 \text{ V})}{6 \Omega + 2 \Omega} = \frac{72 \text{ V}}{8} = 9 \text{ V}$$

A tensão de circuito aberto,  $V_{ab}$ , é determinada aplicando-se a lei de Kirchhoff para tensões à malha indicada na Figura 7.21, no sentido horário a partir do ponto  $a$ . Temos:

$$+V_1 - V_3 + V_{ab} = 0$$

e  $V_{ab} = V_3 - V_1 = 9 \text{ V} - 7,5 \text{ V} = 1,5 \text{ V}$

b) Pela lei de Ohm:

$$I_1 = \frac{V_1}{R_1} = \frac{7,5 \text{ V}}{5 \Omega} = 1,5 \text{ A}$$

$$I_3 = \frac{V_3}{R_3} = \frac{9 \text{ V}}{6 \Omega} = 1,5 \text{ A}$$

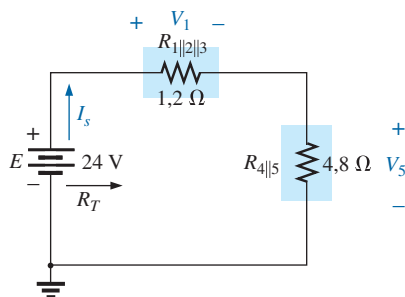


Figura 7.19 Forma reduzida do circuito da Figura 7.17.

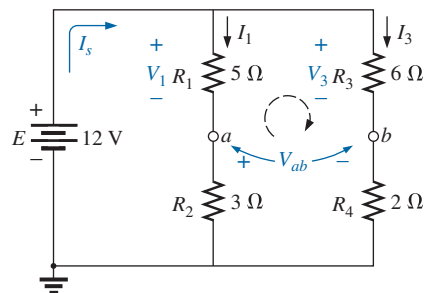


Figura 7.21 Circuito da Figura 7.20 redesenhado.

Aplicando a lei de Kirchhoff para correntes, temos:

$$I_s = I_1 + I_3 = 1,5 \text{ A} + 1,5 \text{ A} = \mathbf{3 \text{ A}}$$

**EXEMPLO 7.8**

Determine, no circuito da Figura 7.22, as tensões  $V_1$  e  $V_2$  e a corrente  $I$ .

Solução:

Seria realmente difícil analisar o circuito na forma em que aparece na Figura 7.22, com a notação simbólica para as fontes e a ligação ao terra no canto superior esquerdo do diagrama. Entretanto, quando o circuito é redesenhado no formato ilustrado na Figura 7.23, as relações entre os ramos e o papel das incógnitas ficam consideravelmente mais claros. Observe a conexão comum ao terra e o uso explícito de fontes de tensão. Agora, é óbvio que:

$$V_2 = -E_1 = \mathbf{-6 \text{ V}}$$

O sinal negativo indica simplesmente que a polaridade escolhida para  $V_2$  na Figura 7.18 é oposta à real. Aplicando a lei de Kirchhoff para tensões à malha indicada, obtemos:

$$e \quad -E_1 + V_1 - E_2 = 0$$

$$V_1 = E_2 + E_1 = 18 \text{ V} + 6 \text{ V} = \mathbf{24 \text{ V}}$$

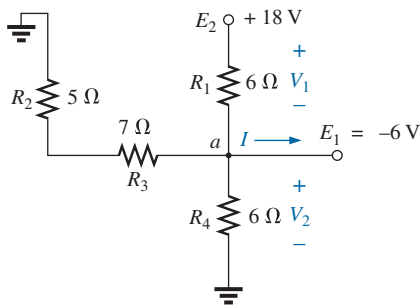


Figura 7.22 Exemplo 7.8.

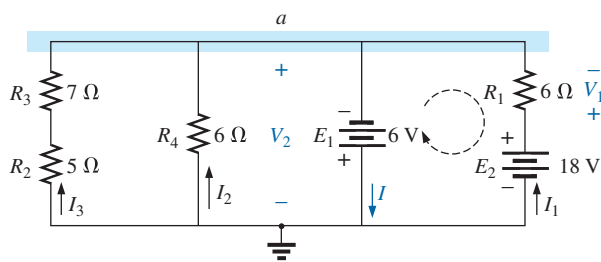


Figura 7.23 Circuito da Figura 7.22 redesenhado.

Aplicando a lei de Kirchhoff para correntes ao nó  $a$ , temos:

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

$$= \frac{V_1}{R_1} + \frac{E_1}{R_4} + \frac{E_1}{R_2 + R_3}$$

$$= \frac{24 \text{ V}}{6 \Omega} + \frac{6 \text{ V}}{6 \Omega} + \frac{6 \text{ V}}{12 \Omega}$$

$$= 4 \text{ A} + 1 \text{ A} + 0,5 \text{ A}$$

$$I = \mathbf{5,5 \text{ A}}$$

O exemplo a seguir mostra claramente o fato de que as técnicas aprendidas até este capítulo têm um campo de aplicação muito vasto, e não serão substituídas por métodos mais sofisticados. Embora ainda não tenhamos introduzido o conceito de **transistor** neste livro, os valores das tensões contínuas em um circuito que contém um transistor podem ser determinados com o auxílio de regras e leis básicas introduzidas nos capítulos iniciais deste livro.

**EXEMPLO 7.9**

Considerando o transistor na configuração mostrada na Figura 7.24, em que  $V_B$  e  $V_{BE}$  foram fornecidas:

- Determine a tensão  $V_E$  e a corrente  $I_E$ .
- Calcule  $V_1$ .
- Determine  $V_{BC}$  utilizando o fato de que a aproximação  $I_C = I_E$  é frequentemente usada em circuitos que envolvem transistores.
- Calcule  $V_{CE}$  utilizando as informações obtidas nos itens anteriores.

Solução:

- A partir da Figura 7.24, podemos determinar que:

$$V_2 = V_B = 2 \text{ V}$$

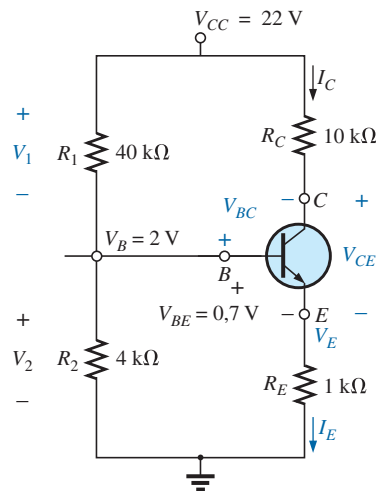


Figura 7.24 Exemplo 7.9.

Aplicando a lei de Kirchoff para tensões à malha inferior, obtemos:

$$V_2 - V_{BE} + V_E = 0$$

ou  $V_E = V_2 + V_{BE} = 2 \text{ V} - 0,7 \text{ V} = 1,3 \text{ V}$

e  $I_E = \frac{V_E}{R_E} = \frac{1,3 \text{ V}}{1 \text{ k}\Omega} = 1,3 \text{ mA}$

b) Aplicando a lei de Kirchoff para tensões no lado de entrada (lado esquerdo do circuito), obtemos:

$$V_2 + V_1 - V_{CC} = 0$$

e  $V_1 = V_{CC} - V_2$

mas  $V_2 = V_B$

e  $V_1 = V_{CC} - V_2 = 22 \text{ V} - 2 \text{ V} = 20 \text{ V}$

c) Se redesenharmos a parte do circuito que nos interessa, obteremos o resultado visto na Figura 7.25, em que a aplicação da lei de Kirchoff para tensões resulta em:

$$V_C + V_{R_C} - V_{CC} = 0$$

e  $V_C = V_{CC} - V_{R_C} = V_{CC} - I_C R_C$

mas  $I_C = I_E$

e  $V_C = V_{CC} - I_E R_C = 22 \text{ V} - (1,3 \text{ mA})(10 \text{ k}\Omega) = 9 \text{ V}$

Então:  $V_{BC} = V_B - V_C = 2 \text{ V} - 9 \text{ V} = -7 \text{ V}$

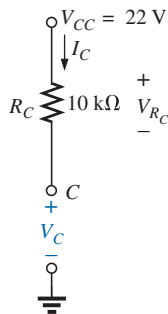


Figura 7.25 Determinação de  $V_C$  para o circuito da Figura 7.24.

d)  $V_{CE} = V_C - V_E = 9 \text{ V} - 1,3 \text{ V} = 7,7 \text{ V}$

**EXEMPLO 7.10**

Calcule as correntes e tensões indicadas na Figura 7.26. Solução: Redesenhando esse circuito, depois de combinar os elementos em série, obtemos o circuito visto na Figura 7.27, e:

$$I_5 = \frac{E}{R_{(1,2,3)4} + R_5} = \frac{72 \text{ V}}{12 \text{ k}\Omega + 12 \text{ k}\Omega} = \frac{72 \text{ V}}{24 \text{ k}\Omega} = 3 \text{ mA}$$

com:

$$V_7 = \frac{R_{7((8,9))} E}{R_{7((8,9))} + R_6} = \frac{(4,5 \text{ k}\Omega)(72 \text{ V})}{4,5 \text{ k}\Omega + 12 \text{ k}\Omega} = \frac{324 \text{ V}}{16,5} = 19,6 \text{ V}$$

$$I_6 = \frac{V_7}{R_{7((8,9))}} = \frac{19,6 \text{ V}}{4,5 \text{ k}\Omega} = 4,35 \text{ mA}$$

e  $I_s = I_5 + I_6 = 3 \text{ mA} + 4,35 \text{ mA} = 7,35 \text{ mA}$

Como a diferença de potencial entre os pontos *a* e *b* na Figura 7.26 tem o valor fixo de *E* volts, o circuito à direita ou à esquerda não é afetado se reconstruirmos o circuito conforme ilustra a Figura 7.28. Podemos determinar todas as incógnitas, exceto  $I_s$ , analisando cada circuito de maneira independente. Para

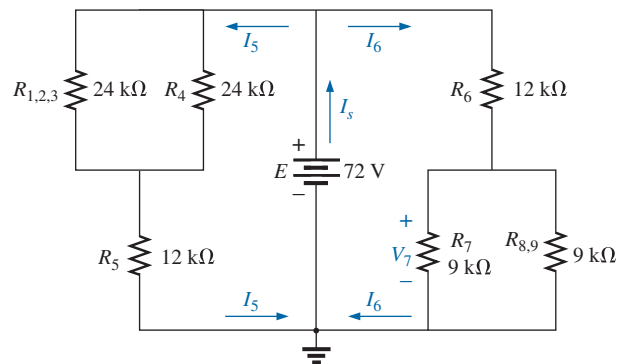


Figura 7.27 Circuito da Figura 7.26 redesenhado.

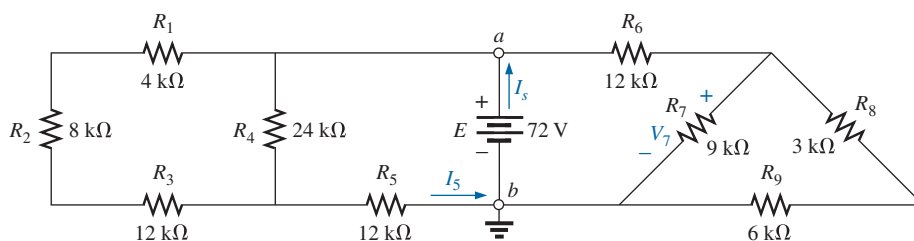


Figura 7.26 Exemplo 7.10.

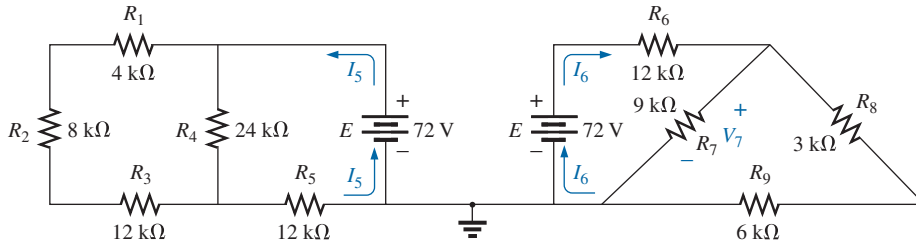


Figura 7.28 Uma abordagem alternativa para o Exemplo 7.10.

determinar  $I_s$ , temos de calcular a corrente fornecida por cada uma das fontes e adicioná-las, como na solução anterior; ou seja,  $I_s = I_5 + I_6$ .

**EXEMPLO 7.11**

Considerando o circuito na Figura 7.29:

- a) determine as tensões  $V_a$ ,  $V_b$  e  $V_c$ ;
- b) calcule as tensões  $V_{ac}$  e  $V_{bc}$ ;
- c) calcule a corrente  $I_2$ ;
- d) calcule a corrente fornecida pela fonte  $I_{s3}$ ;
- e) insira os voltímetros para medir as tensões  $V_a$  e  $V_{bc}$  e a corrente  $I_{s3}$ .

Soluções:

- a) O circuito é redesenhado na Figura 7.30 para indicar claramente o arranjo entre os elementos. Primeiro, observe que a tensão  $V_a$  passa diretamente através da fonte de tensão  $E_1$ . Portanto:

$$V_a = E_1 = 20 \text{ V}$$

O mesmo é verdade para a tensão  $V_c$ , que passa diretamente pela fonte de tensão  $E_3$ . Portanto:

$$V_c = E_3 = 8 \text{ V}$$

Para descobrir a tensão  $V_b$ , que na realidade é a tensão através de  $R_3$ , temos de aplicar a lei de Kirchhoff para tensões em torno da malha 1, como é feito a seguir:

$$+E_1 - E_2 - V_3 = 0$$

e  $V_3 = E_1 - E_2 = 20 \text{ V} - 5 \text{ V} = 15 \text{ V}$

e  $V_b = V_3 = 15 \text{ V}$

- b) A tensão  $V_{ac}$ , que é na realidade a tensão pelo resistor  $R_1$ , pode então ser determinada como a seguir:

$$V_{ac} = V_a - V_c = 20 \text{ V} - 8 \text{ V} = 12 \text{ V}$$

Similarmente, a tensão  $V_{bc}$ , que é na realidade a tensão através do resistor  $R_2$ , pode então ser determinada como a seguir:

$$V_{bc} = V_b - V_c = 15 \text{ V} - 8 \text{ V} = 7 \text{ V}$$

- c) A corrente  $I_2$  pode ser determinada usando-se a lei de Ohm:

$$I_2 = \frac{V_2}{R_2} = \frac{V_{bc}}{R_2} = \frac{7 \text{ V}}{4 \Omega} = 1,75 \text{ A}$$

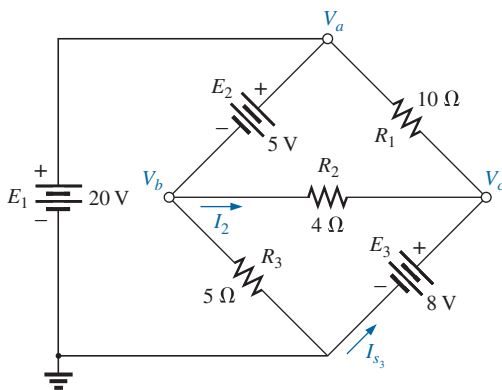


Figura 7.29 Exemplo 7.11.

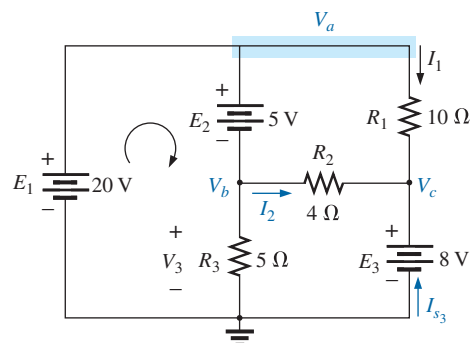


Figura 7.30 Circuito na Figura 7.29 redesenhado para definir o caminho para as incógnitas desejadas de forma mais adequada.

d) A corrente fornecida pela fonte  $I_{s_3}$  pode ser determinada usando-se a lei de Kirchhoff para corrente no nó  $c$ :

$$\sum I_i = \sum I_o$$

$$I_1 + I_2 + I_{s_3} = 0$$

e

$$I_{s_3} = -I_1 - I_2 = -\frac{V_1}{R_1} - I_2$$

com  $V_1 = V_{ac} = V_a - V_c = 20 \text{ V} - 8 \text{ V} = 12 \text{ V}$   
de maneira que

$$I_{s_3} = -\frac{12 \text{ V}}{10 \Omega} - 1,75 \text{ A} = -1,2 \text{ A} - 1,75 \text{ A} = \mathbf{-2,95 \text{ A}}$$

revelando que a corrente está, na realidade, sendo forçada através da fonte  $E_3$  na direção oposta daquela mostrada na Figura 7.29.

e) Ambos os voltmímetros têm uma leitura positiva, como mostra a Figura 7.31, enquanto o amperímetro tem uma leitura negativa.

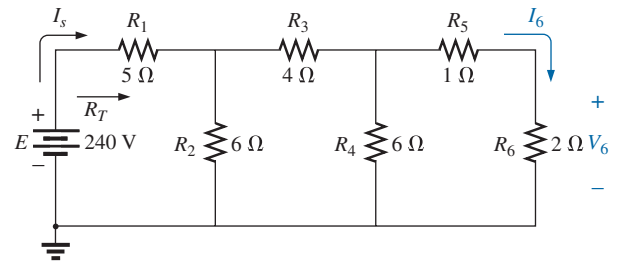


Figura 7.32 Circuito em cascata.

Efetuada as combinações de elementos em série e em paralelo, como mostra a Figura 7.33, obtemos o circuito reduzido mostrado na Figura 7.34, e:

$$R_T = 5 \Omega + 3 \Omega = 8 \Omega$$

$$I_S = \frac{E}{R_T} = \frac{240 \text{ V}}{8 \Omega} = 30 \text{ A}$$

Retornando a  $I_6$  (Figura 7.35), descobrimos que:

e

$$I_1 = I_S$$

$$I_3 = \frac{I_S}{2} = \frac{30 \text{ A}}{2} = 15 \text{ A}$$

e, por fim (Figura 7.36),

$$I_6 = \frac{(6 \Omega) I_3}{6 \Omega + 3 \Omega} = \frac{6}{9} (15 \text{ A}) = 10 \text{ A}$$

e

$$V_6 = I_6 R_6 = (10 \text{ A})(2 \Omega) = \mathbf{20 \text{ V}}$$

## 7.6 CIRCUITOS EM CASCATA

Um **circuito em cascata** de três seções é mostrado na Figura 7.32. A razão para o uso dessa terminologia se torna óbvia ao se observar sua estrutura repetitiva. Basicamente, duas abordagens são usadas para resolver os problemas associados a circuitos desse tipo.

### Método 1

Calcule a resistência total do circuito e a corrente fornecida pela fonte e, em seguida, repita os passos no sentido inverso até obter a corrente ou a tensão desejada. Aplicaremos esse método para determinar  $V_6$  na Figura 7.32.

### Método 2

Associe uma letra à corrente no último ramo do circuito e analise o circuito na direção da fonte, mantendo explícita essa corrente ou qualquer outra em que esteja in-

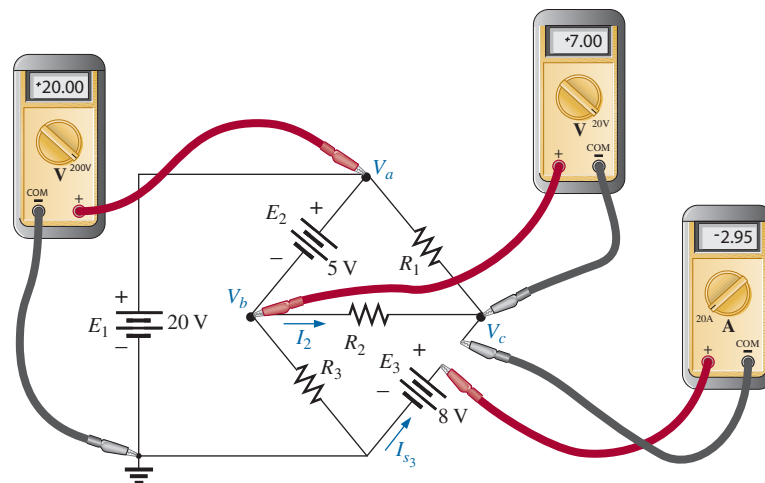


Figura 7.31 Circuito complexo para o Exemplo 7.11.

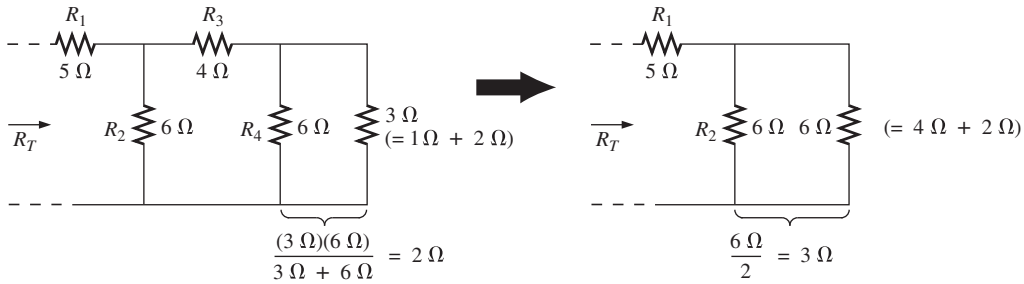


Figura 7.33 Retorno à fonte para determinar  $R_T$  para o circuito na Figura 7.32.

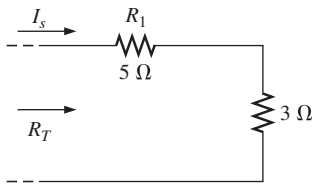


Figura 7.34 Cálculo de  $R_T$  e  $I_s$ .

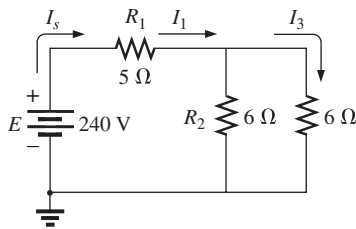


Figura 7.35 Retorno a  $I_6$ .

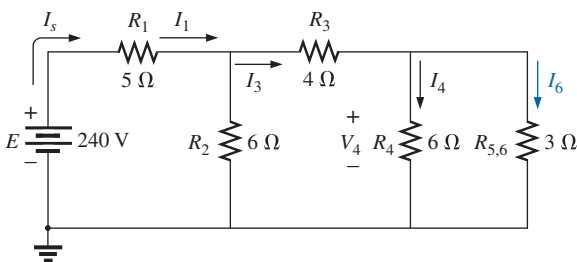


Figura 7.36 Cálculo de  $I_6$ .

interessado. A corrente desejada pode então ser determinada diretamente. A melhor maneira de descrever esse método é pela análise do mesmo circuito que consideramos na Figura 7.32, redesenhado na Figura 7.37.

A notação designada para a corrente através do ramo final é  $I_6$ :

$$I_6 = \frac{V_4}{R_5 + R_6} = \frac{V_4}{1 \Omega + 2 \Omega} = \frac{V_4}{3 \Omega}$$

ou  $V_4 = (3 \Omega)I_6$

de modo que  $I_4 = \frac{V_4}{R_4} = \frac{(3 \Omega)I_6}{6 \Omega} = 0,5I_6$

e  $I_3 = I_4 + I_6 = 0,5I_6 + I_6 = 1,5I_6$

$$V_3 = I_3R_3 = (1,5I_6)(4 \Omega) = (6 \Omega)I_6$$

Também,  $V_2 = V_3 + V_4 = (6 \Omega)I_6 + (3 \Omega)I_6 = (9 \Omega)I_6$

assim,  $I_2 = \frac{V_2}{R_2} = \frac{(9 \Omega)I_6}{6 \Omega} = 1,5I_6$

e  $I_s = I_2 + I_3 = 1,5I_6 + 1,5I_6 = 3I_6$

com  $V_1 = I_1R_1 = I_sR_1 = (5 \Omega)I_s$

logo:  $E = V_1 + V_2 = (5 \Omega)I_s + (9 \Omega)I_6$   
 $= (5 \Omega)(3I_6) + (9 \Omega)I_6 = (24 \Omega)I_6$

e  $I_6 = \frac{E}{24 \Omega} = \frac{240 \text{ V}}{24 \Omega} = 10 \text{ A}$

com  $V_6 = I_6R_6 = (10 \text{ A})(2 \Omega) = 20 \text{ V}$

o mesmo valor que foi obtido usando-se o Método 1.

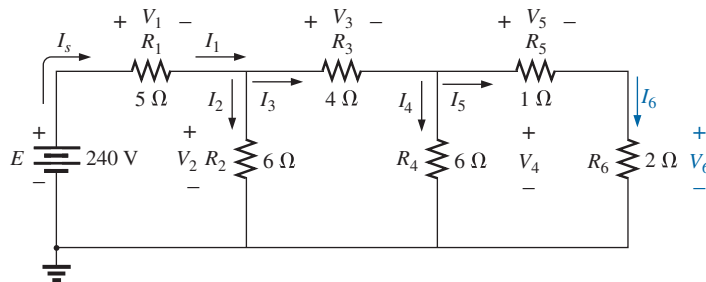


Figura 7.37 Abordagem alternativa para o circuito em cascata.

## 7.7 FONTE COM DIVISOR DE TENSÃO (COM CARGA E SEM CARGA)

Quando o termo *carga* é usado para descrever a fonte com divisor de tensão, ele se refere à aplicação de um elemento, um circuito, ou um sistema a uma fonte que drena a corrente desta. Em outras palavras,

*o carregamento de um sistema é o processo de introduzir elementos que drenarão corrente do sistema. Quanto mais pesada a corrente, maior o efeito de carga.*

Lembre-se de que vimos na Seção 5.10 que a aplicação de uma carga pode afetar a tensão terminal de uma fonte devido à resistência interna.

### Condições sem carga

Através de um circuito divisor de tensão como o que aparece na Figura 7.38, uma série de tensões termi-

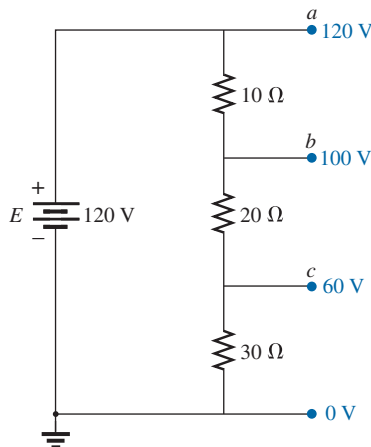


Figura 7.38 Fonte com divisor de tensão.

nais diferentes podem ser disponibilizadas por uma única fonte. Em vez de ter uma única fonte de 120 V, temos agora tensões terminais de 100 V e 60 V disponíveis — um resultado maravilhoso para um circuito tão simples. Entretanto, pode haver desvantagens. Uma delas é que as cargas resistivas aplicadas podem ter valores muito próximos daqueles que formam o circuito com divisor de tensão.

Em geral,

*para que uma fonte com divisor de tensão seja efetiva, as cargas resistivas aplicadas devem ser significativamente maiores do que os resistores que aparecem no circuito com divisor de tensão.*

Para demonstrar a validade da declaração anterior, examinaremos agora o efeito da aplicação de resistores com valores muito próximos aos do circuito com divisor de tensão.

### Condições com carga

Na Figura 7.39, resistores de 20 Ω foram conectados a cada uma das tensões terminais. Observe que esse valor é igual a um dos resistores no circuito com divisor de tensão e muito próximo dos outros dois.

A tensão  $V_a$  não é afetada pela carga  $R_{L1}$ , tendo em vista que a carga está em paralelo com a tensão da fonte  $E$ . O resultado é  $V_a = 120$  V, que é o mesmo do nível sem carga. Para determinar  $V_b$ , temos primeiro que observar que  $R_3$  e  $R_{L3}$  estão em paralelo e  $R'_3 = R_3 \parallel R_{L3} = 30 \Omega \parallel 20 \Omega = 12 \Omega$ . A combinação em paralelo resulta em:

$$R'_2 = (R_2 + R'_3) \parallel R_{L2} = (20 \Omega + 12 \Omega) \parallel 20 \Omega = 32 \Omega \parallel 20 \Omega = 12,31 \Omega$$

Aplicando a regra do divisor de tensão, temos:

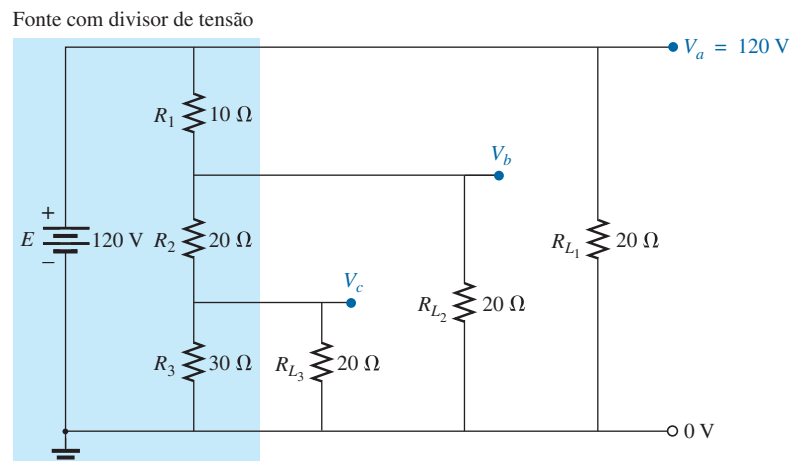


Figura 7.39 Fonte com divisor de tensão com cargas iguais ao valor médio dos elementos resistivos que formam a fonte.

$$V_b = \frac{(12,31 \Omega)(120 \text{ V})}{12,31 \Omega + 10 \Omega} = 66,21 \text{ V}$$

versus 100 V sob condições sem carga.

A tensão  $V_c$  é:

$$V_c = \frac{(12 \Omega)(66,21 \text{ V})}{12 \Omega + 20 \Omega} = 24,83 \text{ V}$$

versus 60 V sob condições sem carga.

O efeito dos resistores de carga próximos em valor ao resistor empregado no circuito com divisor de tensão é, portanto, a redução significativa de algumas das tensões terminais.

Se os resistores de carga são modificados para o nível de 1 k $\Omega$ , as tensões terminais serão todas relativamente próximas dos valores sem carga. A análise é similar à anterior, e gera os resultados a seguir:

$$V_a = 120 \text{ V} \quad V_b = 98,88 \text{ V} \quad V_c = 58,63 \text{ V}$$

Se compararmos as drenagens de corrente estabelecidas pelas cargas aplicadas, descobriremos que para o circuito na Figura 7.39:

$$I_{L_2} = \frac{V_{L_2}}{R_{L_2}} = \frac{66,21 \text{ V}}{20 \Omega} = 3,31 \text{ A}$$

e para o nível de 1 k $\Omega$ :

$$I_{L_2} = \frac{98,88 \text{ V}}{1 \text{ k}\Omega} = 98,88 \text{ mA} < 0,1 \text{ A}$$

Como demonstrado antes, quanto maior a drenagem de corrente, maior a mudança em tensão terminal com a aplicação da carga. Isso é certamente comprovado pelo fato de que  $I_{L_2}$  é em torno de 33,5 vezes maior com as cargas de 20  $\Omega$ .

O exemplo a seguir é um exercício de projeto. As especificações de tensão e de corrente de cada carga são fornecidas juntamente com as especificações terminais da fonte. Os resistores com divisor de tensão exigidos têm de ser encontrados.

### EXEMPLO 7.12

Determine  $R_1$ ,  $R_2$  e  $R_3$  para a fonte com divisor de tensão na Figura 7.40. Resistores de 2 W podem ser usados no projeto do circuito?

Solução:

$R_3$ :

$$R_3 = \frac{V_{R_3}}{I_{R_3}} = \frac{V_{R_3}}{I_s} = \frac{12 \text{ V}}{50 \text{ mA}} = 240 \Omega$$

$$P_{R_3} = (I_{R_3})^2 R_3 = (50 \text{ mA})^2 240 \Omega = 0,6 \text{ W} < 2 \text{ W}$$

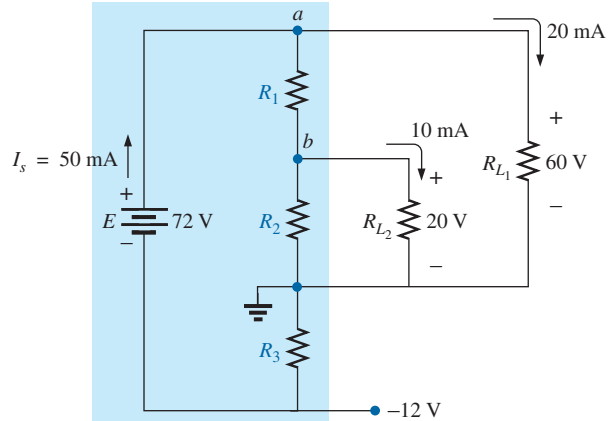


Figura 7.40 Fonte com divisor de tensão para o Exemplo 7.12.

$R_1$ : Aplicando a lei de Kirchhoff para o nó  $a$ , temos:

$$I_s - I_{R_1} - I_{L_1} = 0$$

e  $I_{R_1} = I_s - I_{L_1} = 50 \text{ mA} - 20 \text{ mA} = 30 \text{ mA}$

$$R_1 = \frac{V_{R_1}}{I_{R_1}} = \frac{V_{L_1} - V_{L_2}}{I_{R_1}} = \frac{60 \text{ V} - 20 \text{ V}}{30 \text{ mA}} = \frac{40 \text{ V}}{30 \text{ mA}} = 1,33 \text{ k}\Omega$$

$$P_{R_1} = (I_{R_1})^2 R_1 = (30 \text{ mA})^2 1,33 \text{ k}\Omega = 1,197 \text{ W} < 2 \text{ W}$$

$R_2$ : Aplicando a lei de Kirchhoff para corrente no nó  $b$ , temos:

$$I_{R_1} - I_{R_2} - I_{L_2} = 0$$

e  $I_{R_2} = I_{R_1} - I_{L_2} = 30 \text{ mA} - 10 \text{ mA} = 20 \text{ mA}$

$$R_2 = \frac{V_{R_2}}{I_{R_2}} = \frac{20 \text{ V}}{20 \text{ mA}} = 1 \text{ k}\Omega$$

$$P_{R_2} = (I_{R_2})^2 R_2 = (20 \text{ mA})^2 1 \text{ k}\Omega = 0,4 \text{ W} < 2 \text{ W}$$

Tendo em vista que  $P_{R_1}$ ,  $P_{R_2}$  e  $P_{R_3}$  são menores que 2 W, resistores de 2 W podem ser usados para o projeto.

## 7.8 CONEXÃO DE UMA CARGA A UM POTENCIÔMETRO

No caso de um potenciômetro sem carga, como o da Figura 7.41, a tensão de saída é determinada pela regra dos divisores de tensão, com  $R_T$  representando a resistência total do potenciômetro. É muito frequente a suposição de que a tensão entre os terminais de uma carga conectada ao contato móvel é determinada somente pelo potenciômetro, podendo ser ignorado o efeito da carga. Isso não é necessariamente verdadeiro, conforme será demonstrado nos próximos parágrafos.

Quando o potenciômetro é conectado a uma carga, como ilustra a Figura 7.42, a tensão de saída  $V_L$  passa a



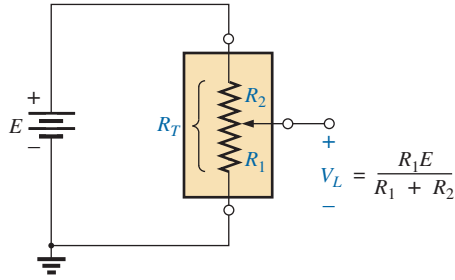


Figura 7.41 Potenciômetro sem carga.

depende da resistência da carga, visto que  $R_1$  não é como mostra a Figura 7.41, mas uma combinação paralela de  $R_1$  e  $R_L$ .

A tensão de saída agora é:

$$V_L = \frac{R'E}{R' + R_2} \text{ com } R' = R_1 \parallel R_L \quad (7.1)$$

Se você deseja ter um bom controle da tensão de saída  $V_L$  utilizando um botão, um pino, um parafuso ou qualquer outro dispositivo, é aconselhável escolher uma carga ou um potenciômetro que satisfaça à seguinte relação:

$$R_L \gg R_T \quad (7.2)$$

Em geral,

ao conectar uma carga a um potenciômetro, certifique-se de que a resistência da carga exceda em muito a resistência terminal máxima do potenciômetro, caso um bom controle da tensão de saída seja desejado.

Por exemplo, se desprezarmos a Equação 7.2, escolhermos um potenciômetro de  $1 \text{ M}\Omega$  para conectar a uma carga de  $100 \Omega$  e colocarmos o contato móvel na posição correspondente a  $1/10$  da resistência total, como mostra a Figura 7.43, teremos:

$$R' = 100 \text{ k}\Omega \parallel 100 \Omega = 99,9 \Omega$$

$$e \quad V_L = \frac{99,9 \Omega (10 \text{ V})}{99,9 \Omega + 900 \text{ k}\Omega} \cong 0,001 \text{ V} = 1 \text{ mV}$$

que é muito menor do que o valor esperado de  $1 \text{ V}$ .

Na verdade, se deslocarmos o contato móvel para o ponto médio:

$$R' = 500 \text{ k}\Omega \parallel 100 \Omega = 99,98 \Omega$$

$$e \quad V_L = \frac{(99,98 \Omega)(10 \text{ V})}{99,98 \Omega + 500 \text{ k}\Omega} \cong 0,002 \text{ V} = 2 \text{ mV}$$

que é desprezível em comparação com o valor esperado de  $5 \text{ V}$ . Mesmo quando  $R_1 = 900 \text{ k}\Omega$ ,  $V_L$  será simplesmente  $0,01 \text{ V}$ , ou seja,  $1/1.000$  da tensão disponível.

Se invertermos a situação, fazendo  $R_T = 100 \Omega$  e  $R_L = 1 \text{ M}\Omega$ , com o contato deslizante na posição correspondente a  $1/10$  de  $R_T$ , como na Figura 7.44, teremos:

$$R' = 10 \Omega \parallel 1 \text{ M}\Omega \cong 10 \Omega$$

$$e \quad V_L = \frac{10 \Omega (10 \text{ V})}{10 \Omega + 90 \Omega} = 1 \text{ V}$$

conforme desejado.

No caso de as condições corresponderem ao limite inferior da Equação 7.2 (pior caso para projeto),  $R_L = R_T = 100 \Omega$ , temos, considerando o contato móvel na posição intermediária da Figura 7.42:

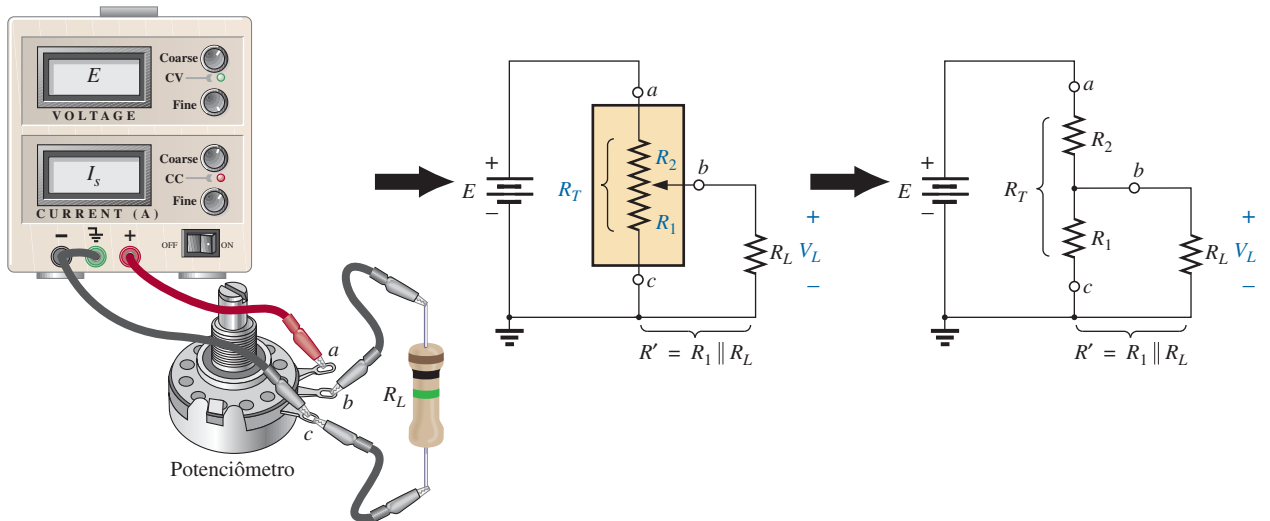


Figura 7.42 Potenciômetro com carga.

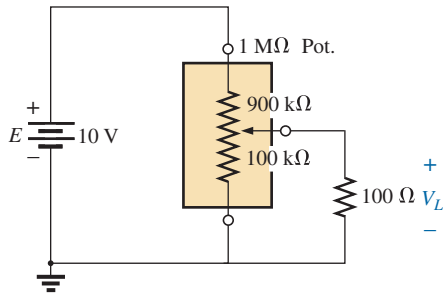


Figura 7.43 Potenciômetro carregado com  $R_L \ll R_T$ .

$$R' = 50 \Omega \parallel 100 \Omega = 33,33 \Omega$$

e

$$V_L = \frac{33,33 \Omega (10 \text{ V})}{33,33 \Omega + 50 \Omega} \cong 4 \text{ V}$$

Pode não ser o valor ideal, que seria 5 V, mas pelo menos 40 por cento da tensão  $E$  foram alcançados com o contato móvel na posição central, em vez de 0,02 por cento obtido quanto tínhamos  $R_L = 100 \Omega$  e  $R_T = 1 \text{ M}\Omega$ .

Portanto, em geral, devemos sempre tentar, ao projetar um circuito que contenha um potenciômetro, satisfazer o critério expresso pela Equação 7.2 da melhor forma possível.

Alguém poderia sugerir que escolhêssemos um potenciômetro com um valor muito pequeno de  $R_T$ , de modo a assegurar que a tensão se mantivesse constante independentemente da carga. Assim, tenha em mente que o potenciômetro tem uma especificação de potência, e para os circuitos, como o que é visto na Figura 7.44,  $P_{\text{máx}} \cong E^2/R_T = (10 \text{ V})^2/100 \Omega = 1 \text{ W}$ . Se  $R_T$  for reduzida a  $10 \Omega$ , teremos  $P_{\text{máx}} = (10 \text{ V})^2/10 \Omega = 10 \text{ W}$ , o que tornaria necessário um potenciômetro de *dimensões muito maiores*.

**EXEMPLO 7.13**

Determine as tensões de  $V_1$  e  $V_2$  para o potenciômetro com carga ilustrado na Figura 7.45.

Solução:

Ideal (sem carga):

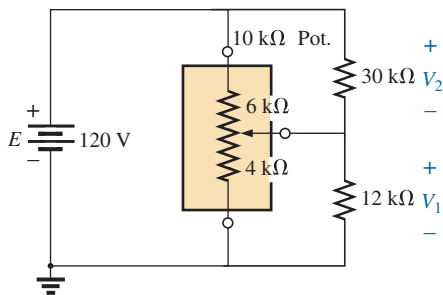


Figura 7.45 Exemplo 7.13.

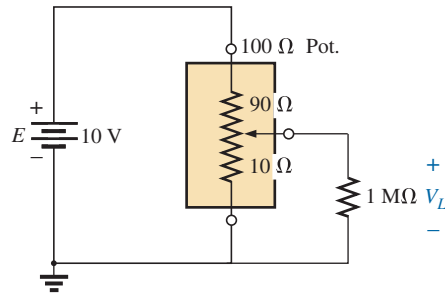


Figura 7.44 Potenciômetro carregado com  $R_L \gg R_T$ .

$$V_1 = \frac{4 \text{ k}\Omega (120 \text{ V})}{10 \text{ k}\Omega} = 48 \text{ V}$$

$$V_2 = \frac{6 \text{ k}\Omega (120 \text{ V})}{10 \text{ k}\Omega} = 72 \text{ V}$$

Com carga:

$$R' = 4 \text{ k}\Omega \parallel 12 \text{ k}\Omega = 3 \text{ k}\Omega$$

$$R'' = 6 \text{ k}\Omega \parallel 30 \text{ k}\Omega = 5 \text{ k}\Omega$$

$$V_1 = \frac{3 \text{ k}\Omega (120 \text{ V})}{8 \text{ k}\Omega} = 45 \text{ V}$$

$$V_2 = \frac{5 \text{ k}\Omega (120 \text{ V})}{8 \text{ k}\Omega} = 75 \text{ V}$$

As tensões com carga estão tão próximas das tensões ideais que o projeto pode ser considerado adequado para a carga usada. Para aplicar as tensões ideais às duas cargas, basta modificar ligeiramente a posição do cursor do potenciômetro.

**7.9 PROJETO DE AMPERÍMETROS, VOLTÍMETROS E OHMÍMETROS**

Os projetos desta seção usarão o galvanômetro de d'Arsonval da Figura 7.46, pois se trata do instrumento utilizado com maior frequência por fabricantes de instrumentos de corrente. Ele opera usando o princípio de que há uma força repulsiva entre polos magnéticos iguais. Quando uma corrente é aplicada à bobina enrolada em torno das duas palhetas, um campo magnético é estabelecido dentro da bobina, magnetizando as palhetas fixa e móvel. Tendo em vista que ambas as palhetas serão magnetizadas da mesma maneira, elas terão a mesma polaridade, e uma força de repulsão se desenvolverá entre elas. Quanto mais forte a corrente aplicada, mais fortes o campo magnético e a força de repulsão entre as palhetas. A palheta fixa vai permanecer em posição, mas a palheta móvel vai girar e fornecer uma medida da força da corrente aplicada.

Um galvanômetro de d'Arsonval fabricado pela Simpson Company aparece na Figura 7.47(a). Galvanômetros desse tipo são normalmente classificados em

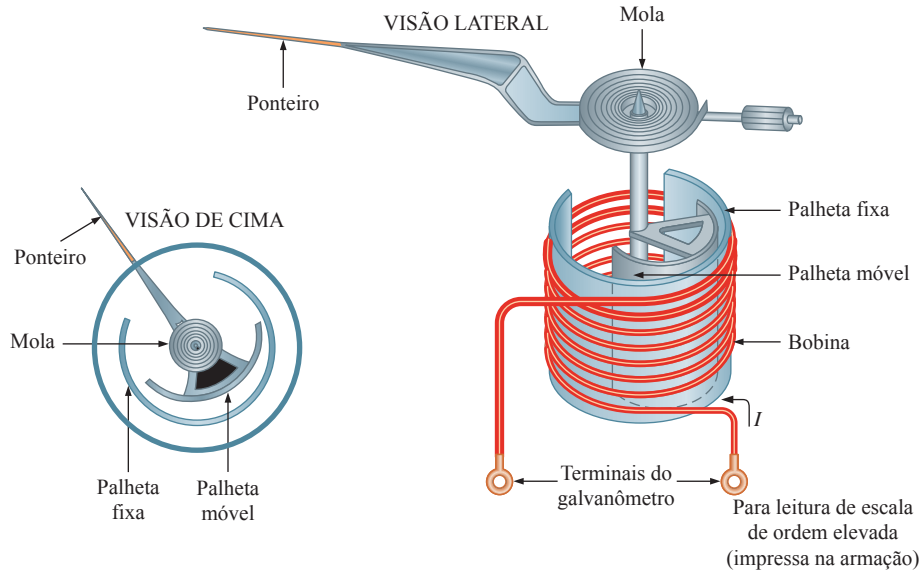


Figura 7.46 Galvanômetro de d'Arsonval.

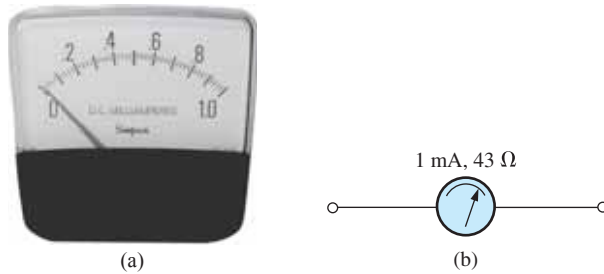


Figura 7.47 Galvanômetro de d'Arsonval; (a) foto, (b) símbolo e especificações.

termos de corrente e resistência. A sensibilidade de corrente ( $SC$ ) é a corrente que resultará em uma deflexão de fundo de escala. A resistência ( $R_m$ ) é a resistência interna do movimento. O símbolo gráfico para o galvanômetro aparece na Figura 7.47(b) com a sensibilidade de corrente e a resistência interna para a unidade da Figura 7.47(a).

Galvanômetros são normalmente classificados pela corrente e pela resistência. As especificações de um galvanômetro típico podem ser 1 mA, 50  $\Omega$ . Observe que 1 mA é a *sensibilidade de corrente* ( $SC$ ) do galvanômetro, que é a corrente exigida para uma deflexão de fundo de escala. Ela é denotada pelo símbolo  $I_{sc}$ . O 50  $\Omega$  representa a resistência interna ( $R_m$ ) do galvanômetro. Uma notação comum para o galvanômetro e suas especificações é fornecida na Figura 7.48.

### Amperímetro

A corrente máxima que um galvanômetro de d'Arsonval pode indicar independentemente corresponde à sensibilidade de corrente do galvanômetro. Entretanto,

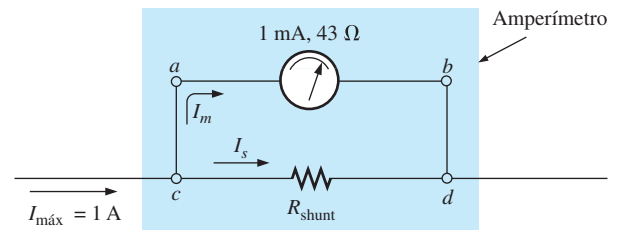


Figura 7.48 Amperímetro básico.

correntes maiores podem ser medidas se um circuito adicional for introduzido. Esse circuito, conforme mostra a Figura 7.48, resulta na construção de um amperímetro básico.

A resistência  $R_{shunt}$  na Figura 7.49 é escolhida de tal modo que, quando uma corrente de 1 A atravessa o amperímetro, a corrente no galvanômetro é de 1 mA. Se uma corrente menor que 1 A atravessar o amperímetro, o

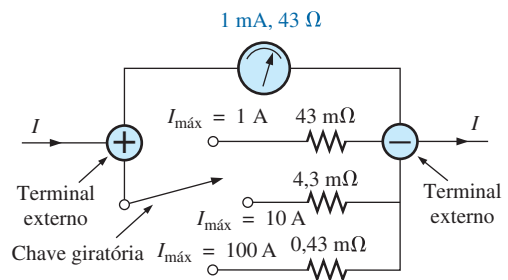


Figura 7.49 Amperímetro multifaixa.

galvanômetro terá menos de 1 mA passando por ele e terá uma deflexão menor que a de fundo de escala.

Como a tensão entre os terminais de elementos em paralelo é a mesma, a queda de potencial entre *a* e *b* na Figura 7.49 deve ser idêntica àquela entre *c* e *d*, ou seja:

$$(1 \text{ mA})(43 \Omega) = R_{\text{shunt}} I_s$$

E também  $I_s$  tem de ser igual a  $1 \text{ A} - 1 \text{ mA} = 999 \text{ mA}$ , se a corrente através do galvanômetro tiver de ser limitada em 1 mA (lei de Kirchhoff para correntes).

Portanto:

$$(1 \text{ mA})(43 \Omega) = R_{\text{shunt}}(999 \text{ mA})$$

$$R_{\text{shunt}} = \frac{(1 \text{ mA})(43 \Omega)}{999 \text{ mA}}$$

em geral  $\cong 43 \text{ m}\Omega$  (um valor-padrão)

$$R_{\text{shunt}} = \frac{R_m I_{SC}}{I_{m \cdot x} - I_{SC}} \quad (7.4)$$

Uma maneira de construir um amperímetro de várias escalas é mostrada na Figura 7.50, na qual a chave giratória determina a resistência  $R_{\text{shunt}}$  a ser usada em função da máxima corrente a ser medida. Muitos medidores utilizam a mesma escala para vários valores máximos de corrente. Uma leitura de 375, na escala de 0 a 5 mA, com a chave na posição 5, significa que a corrente medida vale 3,75 mA; com a chave na posição 50, a mesma leitura significa uma corrente de 37,5 mA, e assim por diante.

### Voltímetro

Uma modificação nos circuitos adicionais permite usar o galvanômetro de d'Arsonval no projeto de um voltmímetro. Um galvanômetro de 1 mA, 43 Ω pode também ser especificado como de 43 mV ( $1 \text{ mA} \times 43\Omega$ ), uma indicação de que a maior tensão que o galvanômetro pode medir independentemente é 43 mV. Essa especificação em milivolts é algumas vezes denominada *sensibilidade de tensão (ST)*. A construção básica de um voltmímetro é mostrada na Figura 7.50.

A resistência  $R_{\text{série}}$  é ajustada de modo a limitar a corrente que passa pelo galvanômetro a 1 mA, quando a tensão máxima é aplicada ao voltmímetro. No caso de uma tensão menor, a corrente no circuito diminui e, portanto, a deflexão do ponteiro do galvanômetro é menor.

Aplicando a lei de Kirchhoff para tensões na malha fechada vista na Figura 7.50, obtemos:

$$|10 \text{ V} - (1 \text{ mA})(R_{\text{série}})| - 43 \text{ mV} = 0$$

$$\text{ou } R_{\text{série}} = \frac{10 \text{ V} - (43 \text{ mV})}{1 \text{ mA}} = 9.957 \Omega \cong 10 \text{ k}\Omega$$

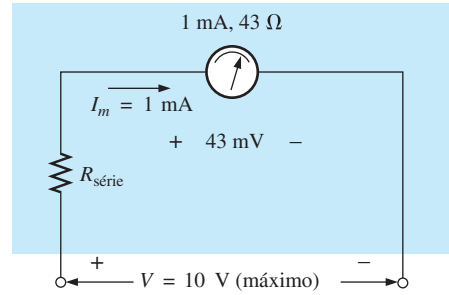


Figura 7.50 Voltímetro básico.

Em geral,

$$R_{\text{série}} = \frac{V_{m \cdot x} - V_{ST}}{I_{SC}} \quad (7.5)$$

Um dos métodos para se construir um voltmímetro de múltiplas escalas é mostrado na Figura 7.51. Se a chave giratória for colocada na posição 10 V,  $R_{\text{série}} = 10 \text{ k}\Omega$ ; com a chave em 50 V,  $R_{\text{série}} = 40 \text{ k}\Omega + 10 \text{ k}\Omega = 50 \text{ k}\Omega$ ; com a chave em 100 V,  $R_{\text{série}} = 50 \text{ k}\Omega + 40 \text{ k}\Omega + 10 \text{ k}\Omega = 100 \text{ k}\Omega$ .

### Ohmímetro

Em geral, os ohmímetros são projetados separadamente para medir resistências baixas, médias e altas. O medidor de resistência mais usado é o **ohmímetro em série**, projetado para medir valores médios de resistência. Ele é usado na configuração em série na Figura 7.52. Esse projeto é bastante diferente em relação aos projetos do amperímetro e do voltmímetro porque apresenta uma deflexão máxima do ponteiro correspondente a uma leitura de zero ohm e uma deflexão nula quando a resistência é infinita.

Para determinar a resistência em série  $R_s$ , as pontas de prova são ‘curto circuitadas’ (uma conexão direta de zero ohm entre elas) para simular uma resistência nula tendo o potenciômetro de ajuste de zero na metade do valor máximo. A resistência  $R_s$  é então ajustada de modo a permitir a passagem de uma corrente igual à sensibili-

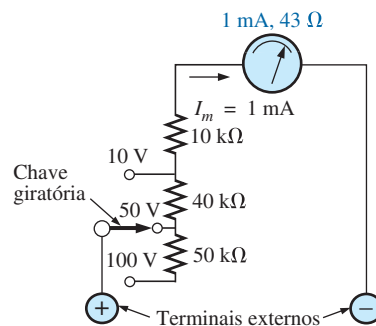


Figura 7.51 Voltímetro multifaixa.

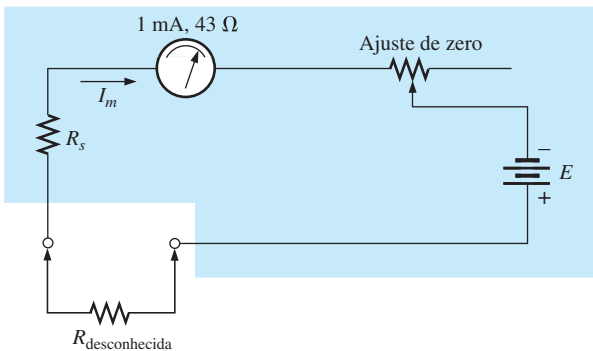


Figura 7.52 Ohmímetro em série.

dade de corrente (1 mA) do galvanômetro. Colocamos o potenciômetro de ajuste do zero na posição correspondente à metade do valor máximo, para que possam ser compensadas quaisquer variações nos componentes do medidor que resultem em uma corrente mais alta ou mais baixa que a necessária para que o ponteiro atinja o final da escala. A corrente  $I_m$  é dada por:

$$I_m(\text{fundo de escala}) = I_{sc} = \frac{E}{R_s + R_m + \frac{\text{ajuste de zero}}{2}} \quad (7.6)$$

e

$$R_s = \frac{E}{I_{sc}} - R_m - \frac{\text{ajuste de zero}}{2} \quad (7.7)$$

Se colocarmos agora uma resistência desconhecida entre os terminais externos do aparelho, a corrente será reduzida provocando a deflexão do ponteiro menor que a de fundo de escala. Se deixarmos os terminais abertos, simulando uma resistência infinita, não haverá deflexão do ponteiro, pois a corrente que percorre o circuito será nula.

Um instrumento projetado para medir resistências muito baixas é mostrado na Figura 7.53. Ele é capaz de medir níveis de resistência entre 10 mΩ (0,01 Ω) e 100 mΩ



Figura 7.53 Nanovoltímetro. (Cortesia da PhotoObjects/Getty Images.)

(0,1 Ω) e tensões entre 10 mV e 100 V. Devido a sua capacidade para medições de resistências muito baixas, seu circuito é muito mais sofisticado do que o que acabamos de descrever. Nele são empregados componentes eletrônicos que eliminam as imprecisões introduzidas pelas resistências das pontas de prova e dos contatos, sendo considerado semelhante ao sistema que descrevemos pois é totalmente portátil e também necessita de uma bateria CC para efetuar as medidas. Pontas de provas especiais são empregadas para minimizar qualquer resistência adicional ao circuito de medição.

O **megohmímetro** é um instrumento usado para medir valores de resistência muito elevados. É usado principalmente para testar o isolamento de linhas de transmissão, máquinas elétricas, transformadores, entre outros equipamentos. Para medir grandes valores de resistência, primeiro é gerada uma tensão contínua elevada com o auxílio de um gerador manual. Quando o eixo do gerador gira com uma velocidade maior que um dado valor especificado, é possível fixar a tensão de saída em um valor, em geral 250, 500 ou 1.000 V — uma boa razão para ser cuidadoso ao usá-lo. Uma foto de um instrumento comercial desse tipo é mostrada na Figura 7.54. O modelo da foto pode medir resistências entre zero e 5.000 MΩ.

## 7.10 APLICAÇÕES

### Reforço de uma bateria de automóvel

Embora o reforço de uma bateria de automóvel possa parecer inicialmente uma simples aplicação de circuitos paralelos, na realidade é uma operação série-paralela que merece alguma análise. Conforme abordado no Capítulo 2, toda fonte CC possui uma resistência interna. Para uma bateria chumbo-ácido típica de automóvel, sua resistência interna é muito pequena — está na faixa de miliohm.



Figura 7.54 Megohmímetro. (Cortesia da Dja65/Shutterstock.)

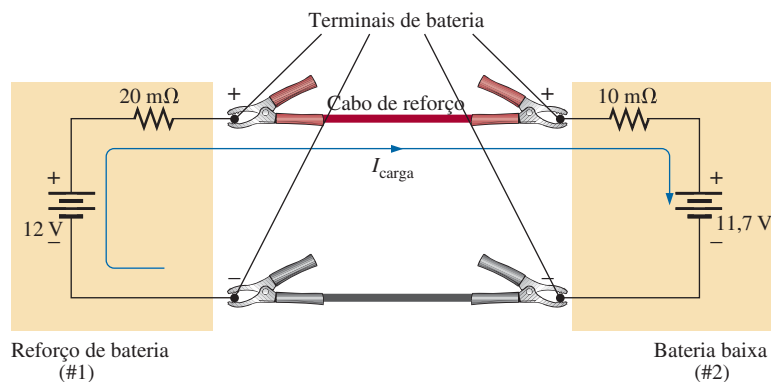
Na maioria dos casos, essa baixa resistência garante que a maior parte da tensão (ou da potência) seja entregue à carga, e não perdida na resistência interna. Na Figura 7.55, a bateria #2 foi descarregada porque os faróis foram deixados ligados por três horas durante uma sessão de cinema. Felizmente, um amigo que se assegurou de que os faróis do seu próprio automóvel estavam desligados tem uma bateria totalmente carregada (identificada na Figura 7.55 por #1) e também um bom conjunto de cabos com comprimento em torno de 5 m, com fio de bitola #6 e garras bem projetadas. O investimento que se faz em um bom conjunto de cabos, de comprimento e capacidade suficientes, é algo prudente, principalmente no caso de se viver em um local de clima frio. A flexibilidade, proporcionada pelo cabo, também é uma característica bastante desejada em certas condições. Verifique a bitola do fio, não apenas a grossura da cobertura isolante. Recebe-se pelo que se paga, pois o cobre é a parte mais cara do cabo. Frequentemente, os rótulos informam que se trata de um cabo de ‘alta capacidade’, mas a bitola do fio é muito alta.

A sequência adequada dos eventos na operação de reforço da bateria de um automóvel depende com frequência de com quem se fala ou de qual informação se lê. Por motivo de segurança, algumas pessoas recomendam que o automóvel com a bateria carregada esteja desligado no momento de realizar as conexões. No entanto, isso pode criar um problema imediato se a bateria descarregada estiver em uma condição muito ruim, de modo que quando for conectada à bateria ‘boa’, ela drene imediatamente uma corrente tal que deixe os dois automóveis sem condições de partida. Com isso em mente, faz algum sentido deixar o motor do automóvel em funcionamento para garantir que o processo de carga continue até que o motor do outro automóvel dê a partida. *Como acidentes acontecem, é bastante recomendável que a pessoa que faz as conexões use algum tipo de equipamento de proteção ocular; mesmo que seja apenas um par de óculos. Gaste*

*o tempo suficiente para se certificar de qual é o terminal positivo e qual é o negativo em ambos os automóveis. Se isso não parecer imediatamente óbvio, tenha em mente que o terminal negativo, ou terra, é geralmente conectado ao chassi do automóvel com um fio relativamente curto e de alta capacidade de corrente.*

Quando estiver certo da identificação dos terminais positivo e negativo, prenda primeiro a garra do fio vermelho dos cabos reforçadores na bateria descarregada — ao mesmo tempo, certifique-se de que a outra garra vermelha não entre em contato com a bateria ou com o automóvel. Em seguida, conecte a outra extremidade do fio vermelho ao terminal positivo da bateria carregada. Agora, prenda a garra de uma extremidade do fio preto dos cabos reforçadores no terminal negativo da bateria reforçadora e, finalmente, prenda a outra extremidade do fio preto no bloco do motor do veículo parado (não a prenda no negativo da bateria descarregada) longe do carburador, das mangueiras de combustível ou das partes móveis do automóvel. Finalmente, alguém deve manter uma aceleração no veículo com a bateria boa enquanto a partida for dada no outro veículo. Após ter dado partida no veículo, remova os cabos na *ordem inversa*, começando com o cabo conectado ao bloco do motor. Seja sempre cuidadoso para garantir que as garras não toquem a bateria ou o chassi do automóvel, nem se aproximem de quaisquer partes móveis.

Algumas pessoas acham que o automóvel que tem a bateria boa deve carregar a bateria ruim de 5 a 10 minutos antes de dar partida no veículo com a bateria ruim, de modo que esse veículo use essencialmente a própria bateria no processo de partida. Tenha em mente que no instante em que os cabos reforçadores são conectados, o veículo que tem a bateria reforçadora estará empenhado na carga da própria bateria e da bateria descarregada. Durante a partida, a bateria carregada será solicitada a fornecer uma alta corrente para dar partida no outro veículo. Isso é uma



**Figura 7.55** Reforço de uma bateria de automóvel.

carga muito grande para uma única bateria. No caso da situação mostrada na Figura 7.55, a tensão da bateria #2 é menor que a da bateria #1, e a corrente de carga circulará conforme o mostrado. A resistência em série com a bateria reforçadora é devida mais ao longo comprimento do cabo reforçador para o outro veículo. A corrente é limitada apenas pelos resistores de miliohm em série com as baterias, porém, a diferença de tensão é muito pequena, de maneira que a corrente de partida estará em uma faixa segura para os cabos envolvidos. A corrente inicial de carga será  $I = (12\text{ V} - 11,7\text{ V}) / (20\text{ m}\Omega + 10\text{ m}\Omega) = 0,3\text{ V} / 30\text{ m}\Omega = 10\text{ A}$ . Durante a partida, os níveis de corrente devem ser como mostra a Figura 7.56 para os níveis de resistência e para as tensões de bateria supostos. Durante a partida, considere que a resistência interna do circuito de partida seja  $0,1\ \Omega = 100\text{ m}\Omega$ . Observe que a bateria do veículo com problema agora foi carregada até  $11,8\text{ V}$  com um aumento associado ao nível de potência. A presença de duas baterias requer que a análise espere pelos métodos apresentados no próximo capítulo.

Observe também que a corrente drenada pelo circuito de partida da bateria descarregada está acima de  $100\text{ A}$ , e que a maioria dos valores de corrente de partida é fornecida pela bateria que está sendo carregada. Portanto, em essência, a maior parte da corrente de partida é fornecida pela bateria descarregada. A bateria boa fornece uma carga inicial à bateria ruim, bem como uma corrente adicional

para a partida do veículo. Porém, a bateria descarregada é a fonte primária da corrente de partida. Por essa importante razão, é aconselhável deixar que o processo de carga dure de 5 a 10 minutos antes que se dê a partida no veículo. Se a bateria descarregada estiver realmente em mau estado com um nível de tensão de  $11\text{ V}$ , os níveis de corrente serão invertidos, sendo que a bateria boa fornecerá  $68,75\text{ A}$  e a bateria ruim, apenas  $37,5\text{ A}$ . Assim, é bastante óbvio que quanto pior o estado da bateria ruim, maior a corrente drenada da bateria boa. Pode acontecer também que a bateria ruim esteja em um estado tão ruim que não aceite carga ou não forneça sua cota de corrente de partida. Isso pode resultar em contínuas tentativas de partida sem sucesso e, possivelmente, na danificação da bateria boa devido às enormes quantidades de corrente drenada. Uma vez que tenha sido dada a partida e os cabos reforçadores tenham sido removidos, o veículo com a bateria descarregada continuará com o motor em funcionamento porque o alternador fornecerá corrente para a carga (carregando a bateria e providenciando a tensão CC necessária) após a ignição.

A discussão anterior foi bastante simples, mas vamos investigar o que poderia acontecer se, em uma noite escura e chuvosa, você estivesse com pressa e conectasse os cabos incorretamente, conforme mostra a Figura 7.57. O resultado seria duas baterias em série de forma aditiva e um caminho de baixíssima resistência. A corrente resultante pode teoricamente ser extremamente alta

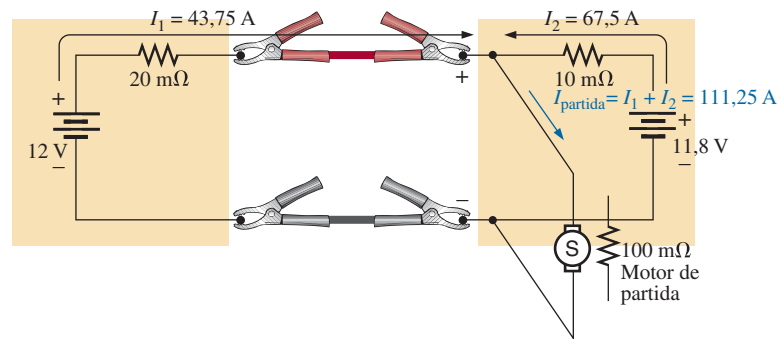


Figura 7.56 Níveis de corrente durante a partida.

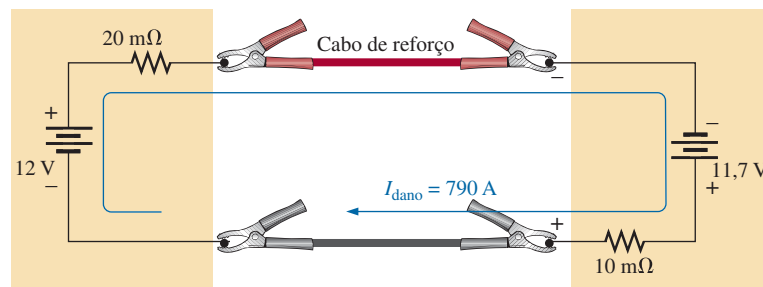


Figura 7.57 Níveis de corrente caso a bateria reforçadora tenha sido conectada incorretamente.

$[I = (12 \text{ V} + 11,7 \text{ V})/30 \text{ m}\Omega = 23,7 \text{ V}/30 \text{ m}\Omega = 790 \text{ A}]$ , danificando, talvez permanentemente, o sistema elétrico dos dois automóveis e, o pior de tudo, causando uma explosão que poderia ferir alguém seriamente. Portanto, é muito importante que o processo de reforço de uma bateria seja realizado com grande cuidado. Use uma lanterna, verifique duas vezes as conexões e esteja seguro de que todos estejam afastados das conexões quando acionar a ignição do veículo.

Antes de finalizar o assunto, devemos ressaltar que receber um reforço de um caminhão-reboque resulta em uma situação diferente: as conexões na bateria do caminhão são muito seguras; o cabo do caminhão usa um fio de maior capacidade de corrente com isolamento mais espesso; as garras também são bem maiores e fazem excelente conexão com sua bateria; e a bateria é de maior capacidade de corrente para esse tipo de carga esperada. O resultado é uma resistência interna menor do lado da bateria boa e uma capacidade de corrente maior por parte da bateria do caminhão. Nesse caso, o caminhão estará realmente dando a partida no carro com problema, que simplesmente reage ao surto de potência fornecida.

## Circuitos eletrônicos

A operação da maioria dos sistemas eletrônicos requer uma distribuição da tensão CC por todo o projeto. Embora uma explicação completa da necessidade de uma tensão CC (já que existe um sinal CA a ser amplificado) tenha de esperar pelos cursos introdutórios de circuitos eletrônicos, a análise CC será feita de uma maneira muito parecida como a que foi descrita neste capítulo. Em outras palavras, este capítulo e os anteriores contêm as informações fundamentais para a realização da análise CC da maioria dos circuitos eletrônicos que forem estudados, desde que se conheça as características CC dos dispositivos eletrônicos. Por exemplo, o circuito mostrado na Figura 7.58 utiliza um transistor que será estudado em detalhes em qualquer curso de fundamentos de eletrônica. A tensão CC entre a base (*B*) do transistor e o emissor (*E*) é cerca

de 0,7 V sob condições normais de operação, e a corrente do coletor (*C*) está relacionada à corrente de base por  $I_C = \beta I_B$  (o valor de  $\beta$  varia de transistor para transistor). Esses fatos nos permitem determinar todas as correntes e tensões CC do circuito usando as leis apresentadas neste capítulo. Portanto, de forma geral, esteja motivado pelo fato de que o conteúdo deste capítulo encontrará numerosas aplicações nos cursos seguintes.

No caso do circuito mostrado na Figura 7.58, podemos começar nossa análise aplicando a lei de Kirchhoff para tensões no circuito da base (a malha esquerda):

$$\begin{aligned} +V_{BB} - V_{R_B} - V_{BE} &= 0 & \text{ou} & & V_{BB} &= V_{R_B} + V_{BE} \\ \text{e} & & & & V_{R_B} &= V_{BB} - V_{BE} = 12 \text{ V} - 0,7 \text{ V} = 11,3 \text{ V} \\ \text{assim} & & & & V_{R_B} &= I_B R_B = 11,3 \text{ V} \\ \text{e} & & & & I_B &= \frac{V_{R_B}}{R_B} = \frac{11,3 \text{ V}}{220 \text{ k}\Omega} = 51,4 \mu\text{A} \\ \text{Portanto:} & & & & I_C &= \beta I_B = 50 I_B = 50(51,4 \mu\text{A}) = 2,57 \text{ mA} \end{aligned}$$

Para o circuito de saída (a malha da direita):

$$\begin{aligned} +V_{CE} + V_{R_C} - V_{CC} &= 0 & \text{ou} & & V_{CC} &= V_{R_C} + V_{CE} \\ \text{com} & & & & V_{CE} &= V_{CC} - V_{R_C} = V_{CC} - I_C R_C \\ & & & & &= 12 \text{ V} - (2,57 \text{ mA})(2 \text{ k}\Omega) \\ & & & & &= 12 \text{ V} - 5,14 \text{ V} = 6,86 \text{ V} \end{aligned}$$

Para uma análise CC típica de um transistor, todas as correntes e tensões de interesse agora são conhecidas:  $I_B$ ,  $V_{BE}$ ,  $I_C$  e  $V_{CE}$ . Todos os valores de tensões, correntes e potências restantes para os outros elementos do circuito agora podem ser determinados usando-se as leis básicas aplicadas neste capítulo.

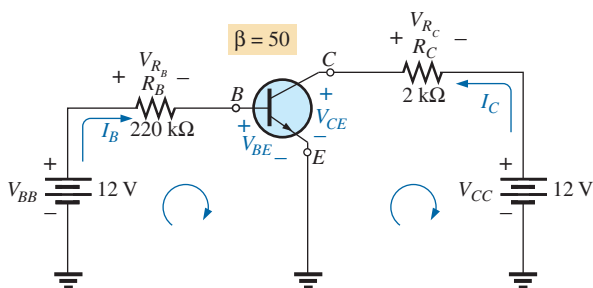
O exemplo anterior é um exercício típico que terá de ser resolvido no primeiro curso de eletrônica. No momento, é necessário apenas que se conheça um pouco do dispositivo e se entenda as razões das relações entre as diversas correntes e tensões do dispositivo.

## 7.11 ANÁLISE COMPUTACIONAL

### PSpice

**Fonte com divisor de tensão.** Agora, o PSpice será usado para verificar os resultados do Exemplo 7.12. Os valores calculados dos resistores serão substituídos, e os valores de tensões e correntes serão verificados para ver se eles são iguais aos obtidos manualmente.

O circuito é desenhado conforme descrito nos capítulos anteriores, usando-se apenas as ferramentas já descritas (veja a Figura 7.59) — de certa maneira, é um exercício prático relativo a tudo o que foi aprendido sobre o **Cap- ture CIS Edition**. Observe, nesse caso, como a rotação do primeiro resistor ativa a rotação dos resistores restantes. Além disso, é uma vantagem interessante poder colocar



**Figura 7.58** Níveis de polarização de um amplificador transistorizado.



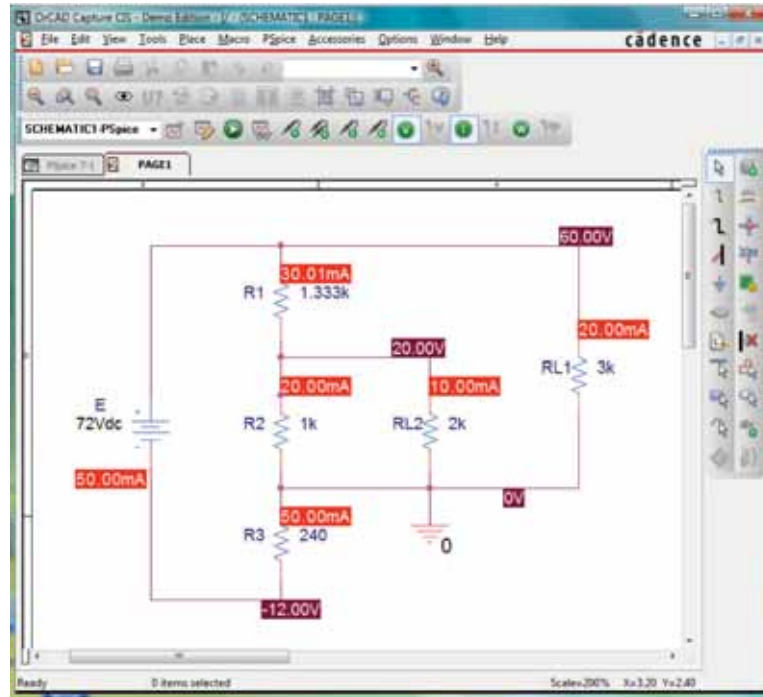


Figura 7.59 Uso do PSpice na verificação dos resultados do Exemplo 7.12.

um resistor após o outro sem ter de selecionar a opção **End Mode**. Tenha cuidado especial com a colocação do GND garantindo que **0/SOURCE** seja usado. Observe também que, para o resistor  $R_1$ , que é visto na Figura 7.59, foi digitado o valor 1,333 k $\Omega$  em vez de 1,33 k $\Omega$ , como no Exemplo 7.12. Quando executarmos o programa, veremos que as soluções dadas pelo computador não são iguais às soluções obtidas manualmente no nível de precisão desejado, a menos que essa alteração seja feita.

Visto que todas as tensões são relativas ao GND, a tensão sobre  $R_{L1}$  é 60 V; sobre  $R_{L2}$ , 20 V; e sobre  $R_3$ , -12 V. Os valores das correntes também coincidem com os valores calculados manualmente, sendo  $I_E = 50$  mA,  $I_{R1} = 30$  mA,  $I_{R2} = 20$  mA,  $I_{R3} = 50$  mA,  $I_{R_{L2}} = 10$  mA e  $I_{R_{L1}} = 20$  mA. Dentre as opções de grandezas mostradas na Figura 7.59, a opção **W** foi desabilitada para permitir a concentração nos valores de corrente e tensão. Nesse caso, os valores também são iguais aos da solução manual.

## PROBLEMAS

### Seções 7.2–7.5 Circuitos em série-paralelo

1. Quais elementos (elementos individuais, não combinações de elementos) dos circuitos na Figura 7.60 estão em série? Quais estão em paralelo? Na medida em que você confere suas suposições, certifique-se de que os elementos em série tenham a mesma corrente e que os elementos em paralelo tenham mesma tensão. Restrinja suas decisões a elementos únicos, não a combinações de elementos.
2. Determine  $R_T$  para os circuitos na Figura 7.61.
3. Calcule a resistência total para a configuração da Figura 7.62.
- \*4. Calcule a resistência  $R_T$  para o circuito da Figura 7.63. Dica! Se ele era infinito em comprimento, como a resistência do próximo resistor de 1  $\Omega$  vertical se compararia com a resistência desejada  $R_T$ ?
- \*5. A resistência total  $R_T$  para o circuito da Figura 7.64 é 7,2 k $\Omega$ . Calcule a resistência  $R_1$ .
6. Considerando o circuito na Figura 7.65.
  - a) Temos  $I_5 = I_5 = I_6$ ? Justifique sua resposta.
  - b) Se  $I_5 = 10$  A e  $I_1 = 4$  A, calcule  $I_2$ .
  - c) A igualdade  $I_1 + I_2 = I_3 + I_4$  é verdadeira? Justifique.
  - d) Se  $V_2 = 8$  V e  $E = 14$  V, determine  $V_3$ .
  - e) Se  $R_1 = 4$   $\Omega$ ,  $R_2 = 2$   $\Omega$ ,  $R_3 = 4$   $\Omega$  e  $R_4 = 6$   $\Omega$ , qual é o  $R_T$ ?
  - f) Se todos os resistores da configuração são de 20  $\Omega$ , qual é a corrente fornecida pela fonte se a tensão aplicada for 20 V?
  - g) Usando os valores da parte (f), determine a potência fornecida pela bateria e a potência absorvida pela resistência total  $R_T$ .
7. Considerando a Figura 7.66.
  - a) Determine  $R_T$ .
  - b) Calcule  $I_s$ ,  $I_1$  e  $I_2$ .
  - c) Calcule a tensão  $V_a$ .

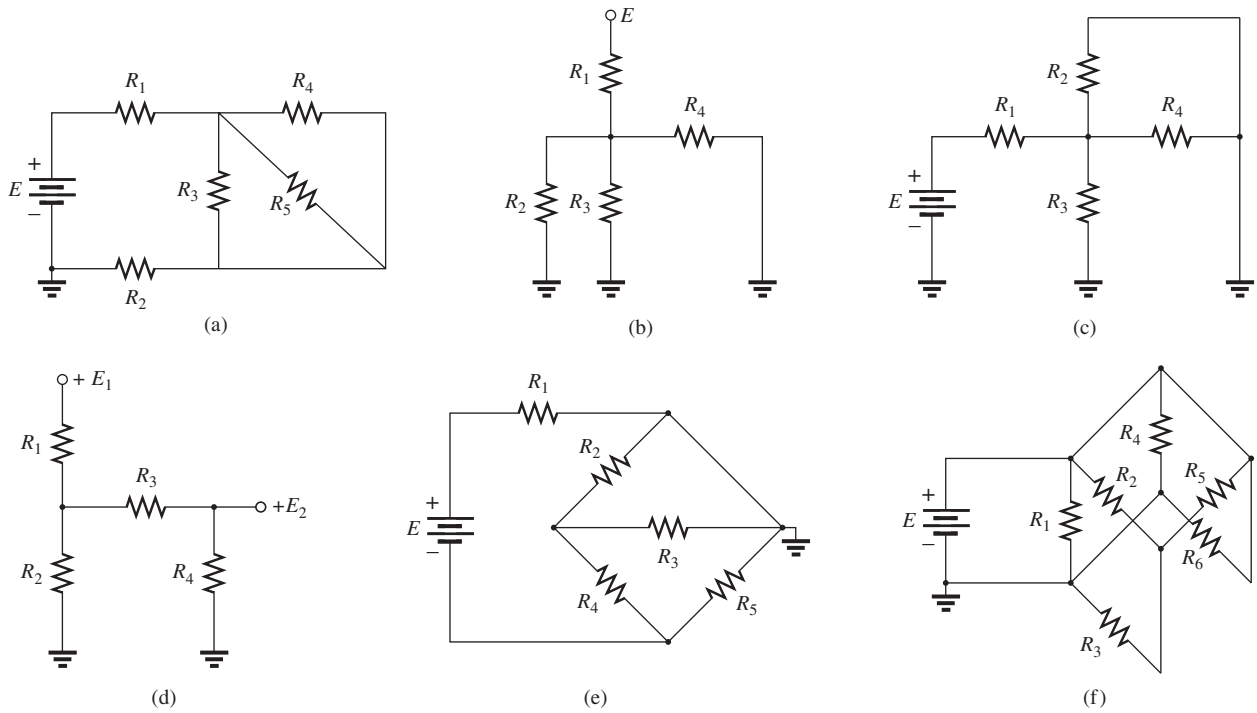


Figura 7.60 Problema 1.

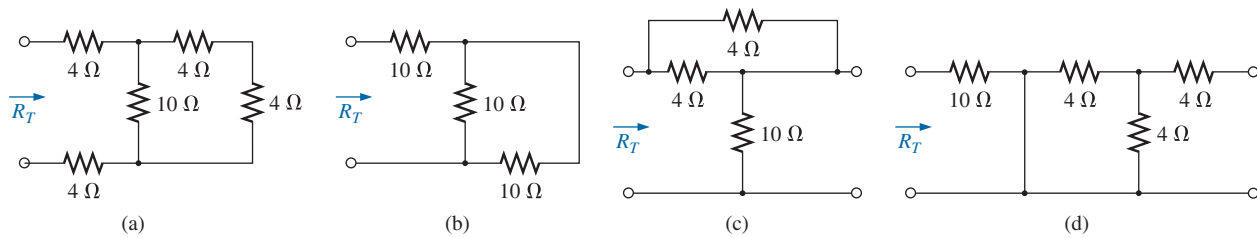


Figura 7.61 Problema 2.

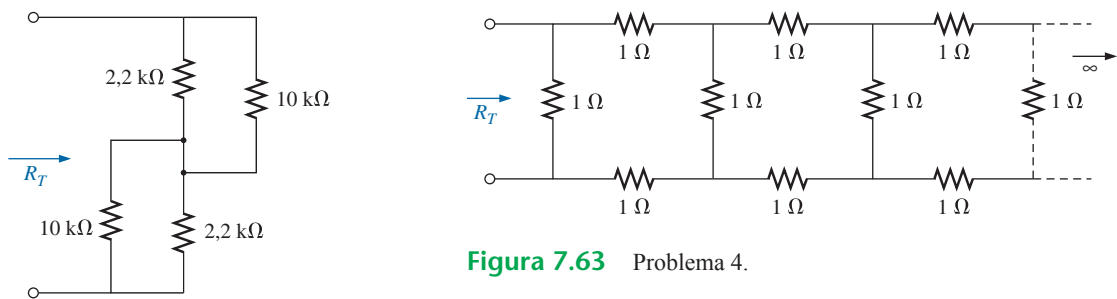


Figura 7.63 Problema 4.

Figura 7.62 Problema 3.

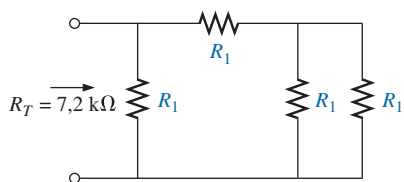


Figura 7.64 Problema 5.

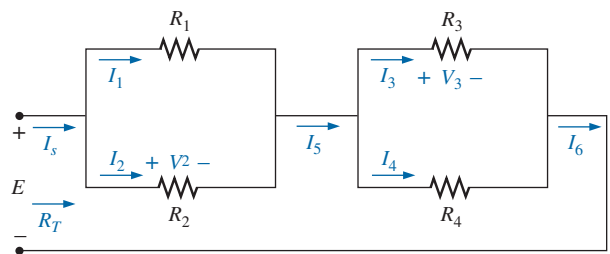


Figura 7.65 Problema 6.

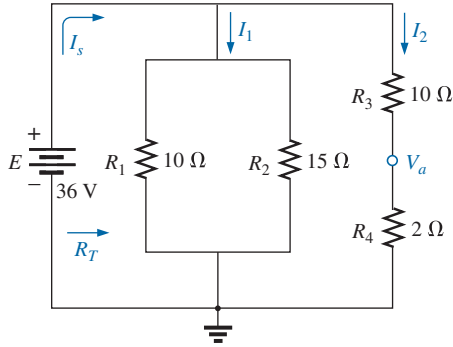


Figura 7.66 Problema 7.

8. Considerando o circuito da Figura 7.67:
  - a) Calcule as tensões  $V_a$  e  $V_b$ .
  - b) Calcule as correntes  $I_1$  e  $I_s$ .
9. Considerando o circuito da Figura 7.68:
  - a) Calcule as tensões  $V_a$ ,  $V_b$  e  $V_c$ .
  - b) Calcule as correntes  $I_1$  e  $I_2$ .

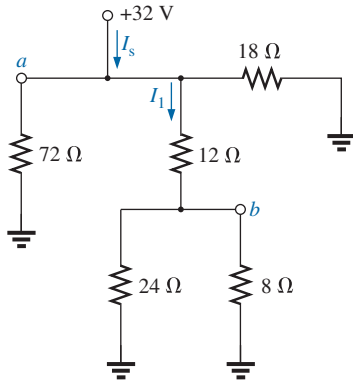


Figura 7.67 Problema 8.

10. Considerando a placa de circuito na Figura 7.69, calcule:
  - a) a resistência total  $R_T$  da configuração;
  - b) a corrente drenada da fonte se a tensão aplicada for 48 V;
  - c) a leitura do voltímetro aplicado.
11. No circuito da Figura 7.70 todos os resistores são iguais. Quais são seus valores?
- \*12. Considerando o circuito na Figura 7.71, calcule:
  - a) as correntes  $I_s$ ,  $I_2$  e  $I_6$ ;
  - b) as tensões  $V_1$  e  $V_5$ ;
  - c) a potência fornecida para o resistor de 3 kΩ.
13. a) Calcule o valor absoluto e o sentido das correntes  $I$ ,  $I_1$ ,  $I_2$  e  $I_3$  para o circuito na Figura 7.72.  
 b) Indique o sentido de cada uma na Figura 7.72.
14. Determine as correntes  $I_1$  e  $I_2$  para o circuito na Figura 7.73, construído a partir de valores-padrão.
- \*15. Considerando o circuito na Figura 7.74:
  - a) Determine as correntes  $I_s$ ,  $I_1$ ,  $I_3$  e  $I_4$ .
  - b) Calcule  $V_a$  e  $V_{bc}$ .
16. Para o circuito na Figura 7.75:
  - a) Determine a corrente  $I_1$ .
  - b) Calcule as correntes  $I_2$  e  $I_3$ .
  - c) Determine os níveis de tensão  $V_a$  e  $V_b$ .
- \*17. Determine os valores CC para o circuito com um transistor mostrado na Figura 7.76, considerando o fato de que  $V_{BE} = 0,7$  V,  $V_E = 2$  V, e  $I_C = I_E$ . Em outras palavras:
  - a) determine  $I_E$  e  $I_C$ ;
  - b) calcule  $I_B$ ;
  - c) determine  $V_B$  e  $V_C$ ;
  - d) calcule  $V_{CE}$  e  $V_{BC}$ .

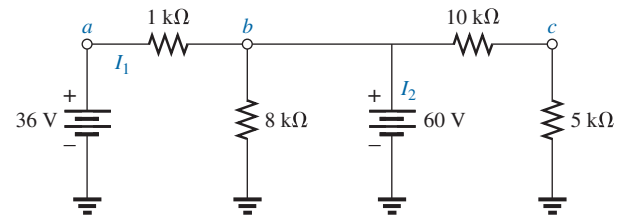


Figura 7.68 Problema 9.

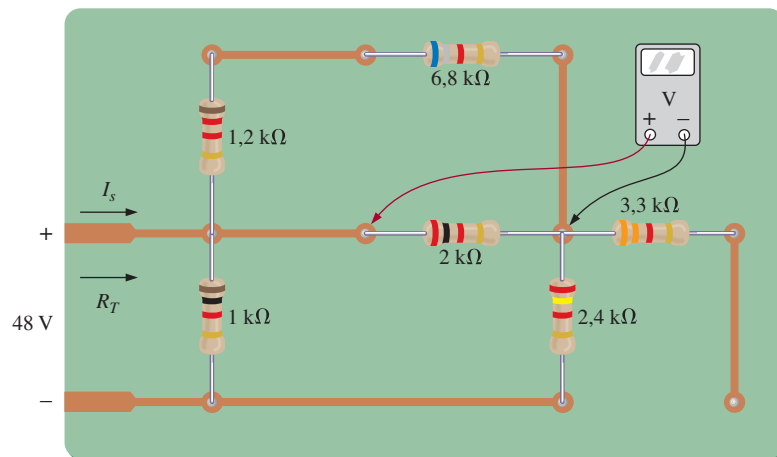


Figura 7.69 Problema 10.

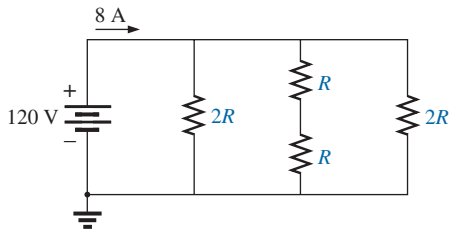


Figura 7.70 Problema 11.

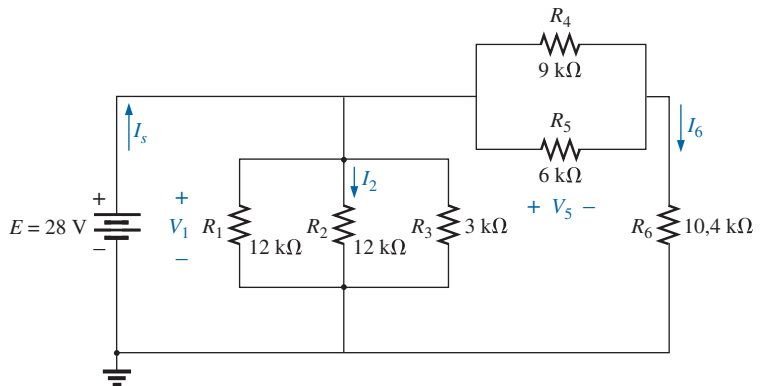


Figura 7.71 Problema 12.

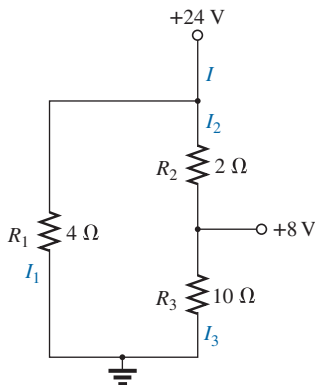


Figura 7.72 Problema 13.

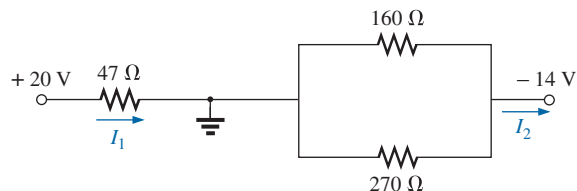


Figura 7.73 Problema 14.

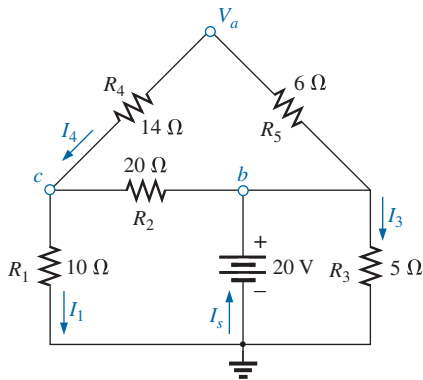


Figura 7.74 Problema 15.

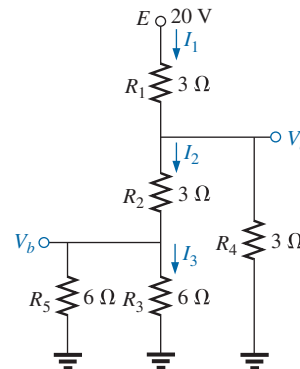


Figura 7.75 Problema 16.

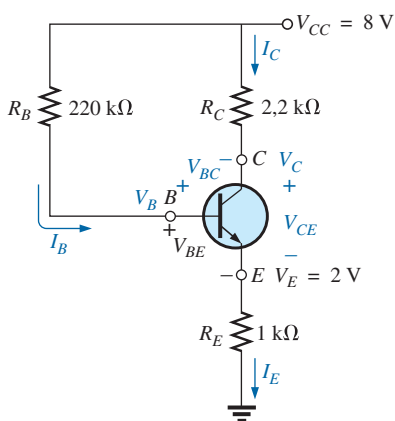


Figura 7.76 Problema 17.

18. Considerando o circuito na Figura 7.77:
  - a) Determine a corrente  $I$ .
  - b) Calcule  $V_1$ .
- \*19. Considerando o circuito na Figura 7.78:
  - a) Determine  $R_T$  combinando elementos resistivos.
  - b) Calcule  $V_1$  e  $V_4$ .
  - c) Calcule  $I_3$  (com sentido).
  - d) Determine  $I_s$  calculando a corrente através de cada elemento e, a seguir, aplicando a lei de Kirchhoff para corrente. Depois, calcule  $R_T$  de  $R_T = E/I_s$ , e compare a resposta com a solução da parte (a).
20. Determine a tensão  $V_{ab}$  e a corrente  $I$  para o circuito da Figura 7.79. Lembre a discussão de circuitos abertos e curtos-circuitos na Seção 6.8.
- \*21. Considerando o circuito da Figura 7.80:
  - a) Determine a tensão  $V_{ab}$ .

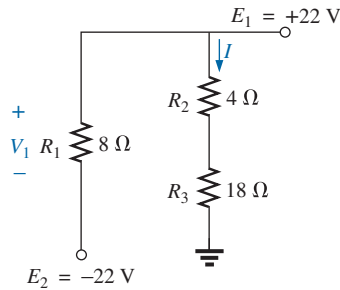


Figura 7.77 Problema 18.

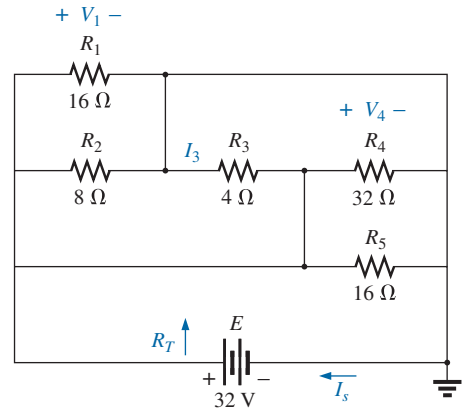


Figura 7.78 Problema 19.

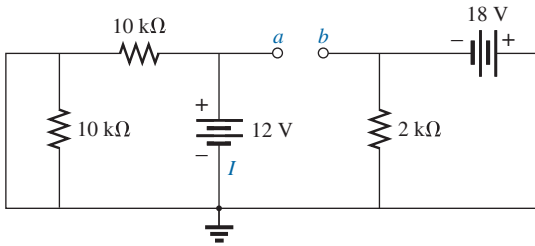


Figura 7.79 Problema 20.

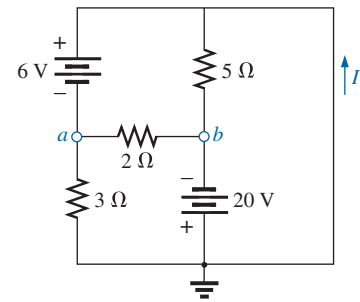


Figura 7.80 Problema 21.

- b) Calcule a corrente  $I$ .
- c) Calcule as tensões  $V_a$  e  $V_b$ .
- \*22. Considerando o circuito na Figura 7.81:
  - a) Determine a corrente  $I$ .
  - b) Calcule a tensão de circuito aberto  $V$ .
- \*23. Considerando o circuito na Figura 7.82, calcule a resistência  $R_3$ , sendo 2 A a corrente que passa através dela.
- \*24. Se todos os resistores do cubo mostrado na Figura 7.83 forem de  $10 \Omega$ , qual a resistência total? (*Sugestão*: Formule algumas hipóteses em relação à distribuição de corrente no cubo.)
- \*25. A leitura do voltímetro visto na Figura 7.84 é  $V = 27 \text{ V}$ :
  - a) O circuito funciona corretamente?
  - b) Em caso negativo, qual seria o possível motivo da leitura incorreta?

**Seção 7.6 Circuitos em cascata**

- 26. Considerando o circuito em cascata mostrado na Figura 7.85:
  - a) Determine a corrente  $I$ .
  - b) Determine a corrente  $I_7$ .
  - c) Determine as tensões  $V_3$ ,  $V_5$  e  $V_7$ .
  - d) Calcule a potência dissipada por  $R_7$  e compare-a com a potência fornecida pela fonte de 240 V.
- 27. Considerando o circuito em cascata mostrado na Figura 7.86:
  - a) Determine  $R_T$ .
  - b) Calcule  $I$ .
  - c) Calcule a potência fornecida para  $R_7$ .
- \*28. Determine a potência dissipada pela resistência de carga de 6  $\Omega$  vista na Figura 7.87.

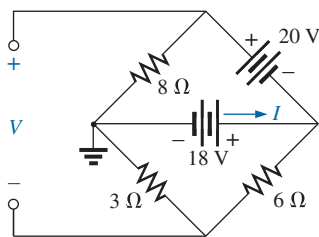


Figura 7.81 Problema 22.

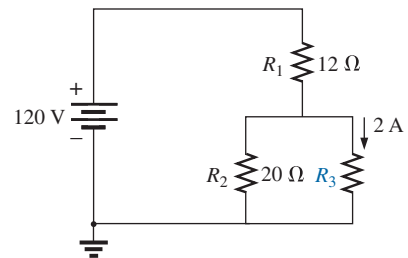


Figura 7.82 Problema 23.

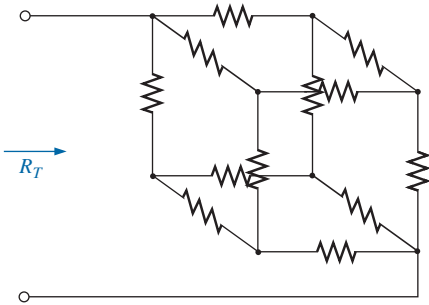


Figura 7.83 Problema 24.

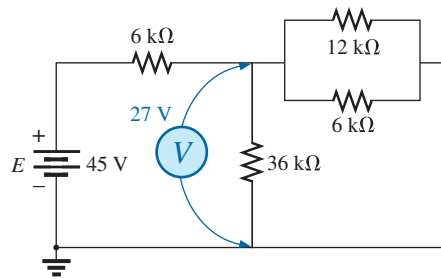


Figura 7.84 Problema 25.

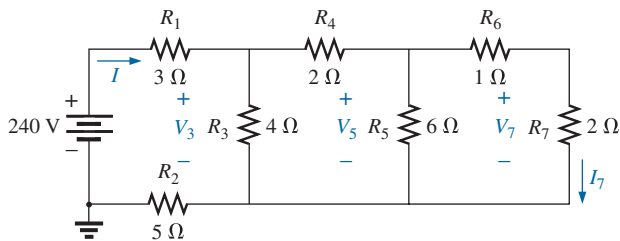


Figura 7.85 Problema 26.

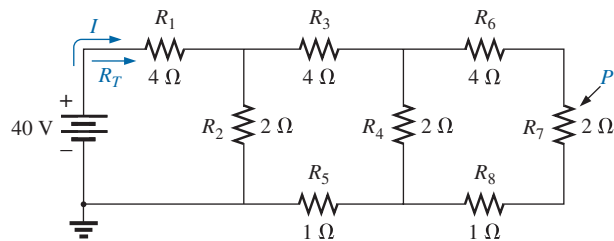


Figura 7.86 Problema 27.

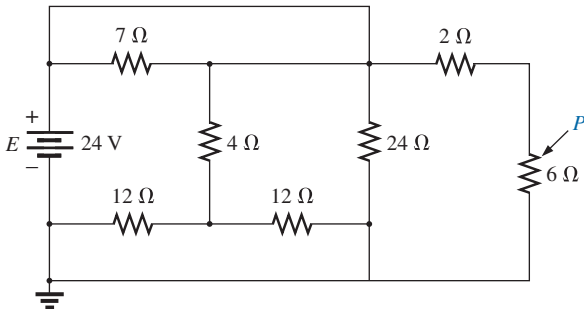


Figura 7.87 Problema 28.

29. Para a configuração de cascatas múltiplas mostrada na Figura 7.88:

- Determine  $I$ .
- Calcule  $I_4$ .
- Determine  $I_6$ .
- Determine  $I_{10}$ .

**Seção 7.7** Fonte com divisor de tensão (com carga e sem carga)

30. Dada a fonte com divisor de tensão vista na Figura. 7.89:

- determine a tensão  $E$  da fonte de alimentação;
- determine os valores dos resistores de carga  $R_{L2}$  e  $R_{L3}$ ;
- determine os valores dos resistores  $R_1$ ,  $R_2$  e  $R_3$  do divisor de tensão.

\*31. Determine os valores dos resistores da fonte com divisor de tensão para a configuração mostrada na Figura 7.90. Determine também a especificação de potência para cada resistor e compare os valores entre si.

\*32. Uma lâmpada de estúdio exige 40 V a 50 mA para produzir uma luz bastante clara. Projete um arranjo de divisor de tensão que funcione de maneira adequada a partir de uma

fonte de 120 V, fornecendo uma corrente de 200 mA. Use resistores com valores tão próximos quanto possível dos valores-padrão, e especifique a potência mínima de cada um.

**Seção 7.8** Conexão de uma carga a um potenciômetro

\*33. Considerando o sistema mostrado na Figura 7.91, responda:

- À primeira vista, ele parece ter sido bem projetado?
- Sem a carga de 10 kΩ, quais valores de  $R_1$  e de  $R_2$  estabelecem 3 V nos terminais de  $R_2$ ?
- Determine os valores de  $R_1$  e  $R_2$  quando a carga é inserida para estabelecer  $V_{R_L} = 3V$ , e compare-os com os resultados do item (b).

\*34. Para o potenciômetro visto na Figura 7.92, responda:

- Quais são os valores das tensões  $V_{ab}$  e  $V_{bc}$  sem carga ( $R_{L1} = R_{L2} = \infty \Omega$ )?
- Quais são os valores das tensões  $V_{ab}$  e  $V_{bc}$  usando-se a carga indicada na figura?
- Qual a potência dissipada pelo potenciômetro usando-se as resistências de carga indicadas na Figura 7.92?
- Qual a potência dissipada pelo potenciômetro sem carga? Compare-a com o resultado do item (c).

**Seção 7.9** Projeto de amperímetros, voltímetros e ohmímetros

35. Considere um galvanômetro de d'Arsonval de 1 mA, 100 Ω e responda:

- Qual é a sensibilidade de corrente?
- Projete um amperímetro de 20 A usando o galvanômetro acima. Mostre o circuito e os valores dos componentes.

36. Usando um galvanômetro de d'Arsonval de 50 μA, 1.000 Ω, projete um miliamperímetro de multifaixa que tenha escalas de 25 mA, 50 mA e 100 mA. Mostre o circuito e os valores dos componentes.

37. Considere um galvanômetro de d'Arsonval de 50 μA, 1.000 Ω.

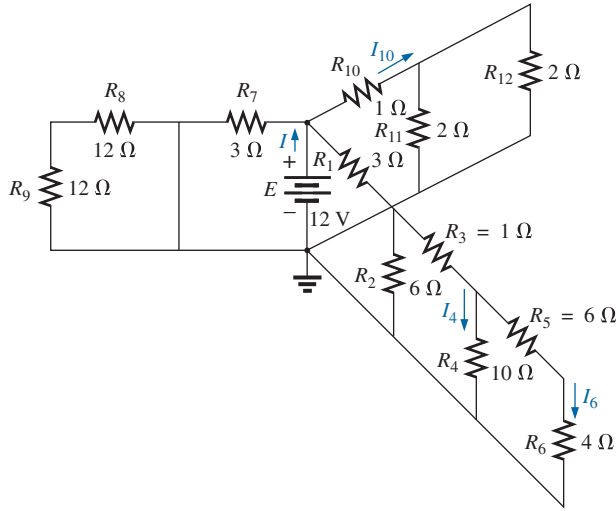


Figura 7.88 Problema 29.

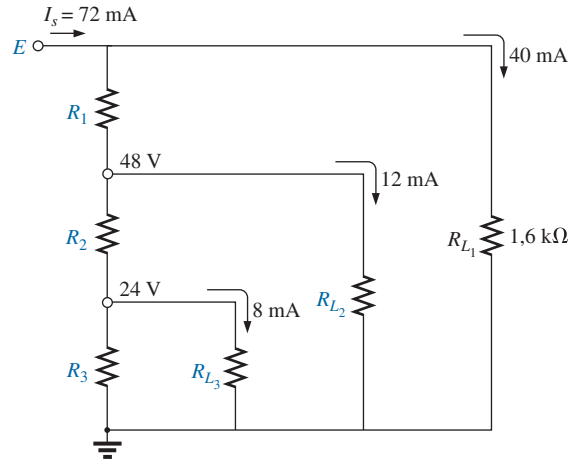


Figura 7.89 Problema 30.

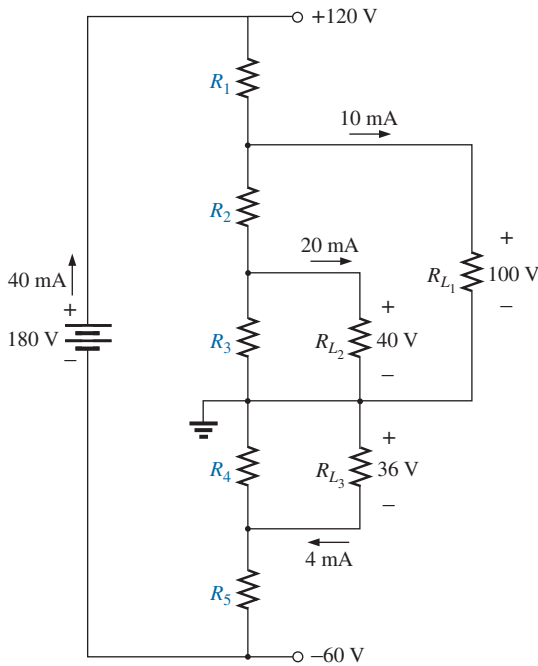


Figura 7.90 Problema 31.

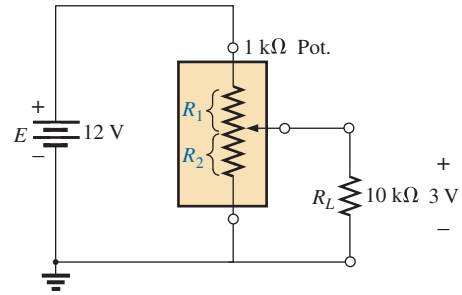


Figura 7.91 Problema 33.

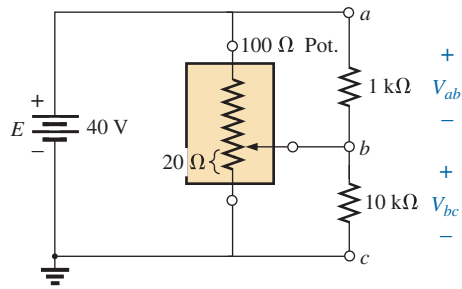


Figura 7.92 Problema 34.

- a) Projete um voltímetro CC de 15 V. Mostre o circuito e os valores dos componentes.
- b) Qual a razão Ω/V para esse voltímetro?
- 38. Usando um galvanômetro de d'Arsonval de 1 mA, 100 Ω, projete um voltímetro com escalas de 5, 50 e 500 V. Mostre o circuito e os valores dos componentes.
- 39. Um medidor digital tem uma resistência interna de 10 MΩ na escala de 0,5 V. Se você quisesse construir um voltímetro analógico usando um galvanômetro de d'Arsonval com o mesmo valor de resistência interna, qual deveria ser a sensibilidade de corrente?

- \*40. a) Projete um ohmímetro em série usando um galvanômetro de 100 μA, 1.000 Ω, um ajuste de zero com um valor máximo de 2 kΩ, uma bateria de 3 V e um resistor em série cujo valor deve ser determinado.
- b) Determine a resistência necessária para as deflexões de fundo de escala, de 3/4 da escala, de 1/2 da escala e de 1/4 da escala.
- c) Usando os resultados do item (b), desenhe a escala a ser usada juntamente com esse ohmímetro.
- 41. Descreva a construção básica e o funcionamento de um megohmímetro.

- \*42. Determine a leitura de um ohmímetro para a configuração mostrada na Figura 7.93.

### Seção 7.11 Análise computacional

43. Usando PSpice ou Multisim, verifique os resultados do Exemplo 7.2.
44. Usando PSpice ou Multisim, confirme as soluções do Exemplo 7.5.
45. Usando PSpice ou Multisim, verifique os resultados do Exemplo 7.10.
46. Usando PSpice ou Multisim, calcule a tensão  $V_6$  da Figura 7.32.
47. Usando PSpice ou Multisim, calcule as tensões  $V_b$  e  $V_c$  da Figura 7.40.

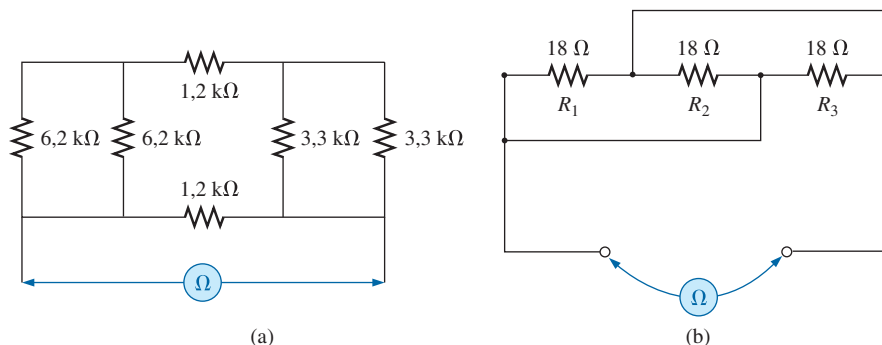


Figura 7.93 Problema 42.

## GLOSSÁRIO

**Circuito em cascata:** Circuito que consiste em uma série de combinações em série-paralelo e que tem a aparência de uma escada.

**Circuito em série-paralelo:** Rede composta por uma combinação das séries e dos ramos paralelos.

**Configuração complexa:** Circuito no qual nenhum dos elementos está em série ou em paralelo.

**Fonte com divisor de tensão:** Circuito que pode fornecer uma gama de níveis de tensão para uma aplicação.

**Galvanômetro de d'Arsonval:** Galvanômetro que opera no princípio de que há uma repulsão entre polos magnéticos

iguais. Os dois polos são palhetas dentro de uma bobina fixa. Uma palheta é fixa e a outra é móvel com um ponteiro conectado. Quanto mais alta a corrente aplicada, maior a deflexão da palheta móvel e maior a deflexão do ponteiro.

**Megohmímetro:** Instrumento destinado a medir resistências muito altas na faixa dos megohms.

**Ohmímetro em série:** Instrumento para medir resistências no qual o galvanômetro está conectado em série com a resistência desconhecida.

**Transistor:** Dispositivo eletrônico de três terminais que pode ser usado para amplificação ou chaveamento.