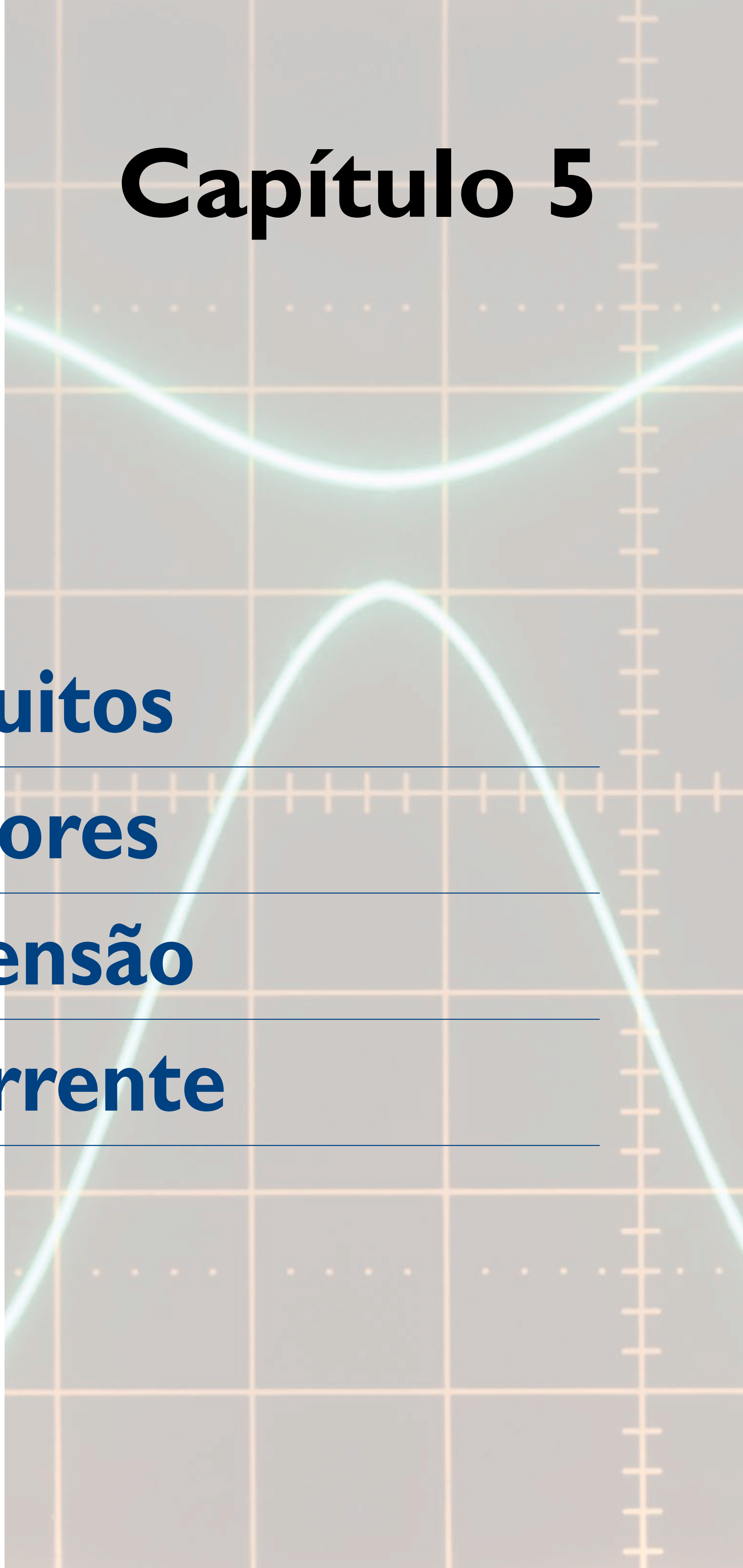


Capítulo 5

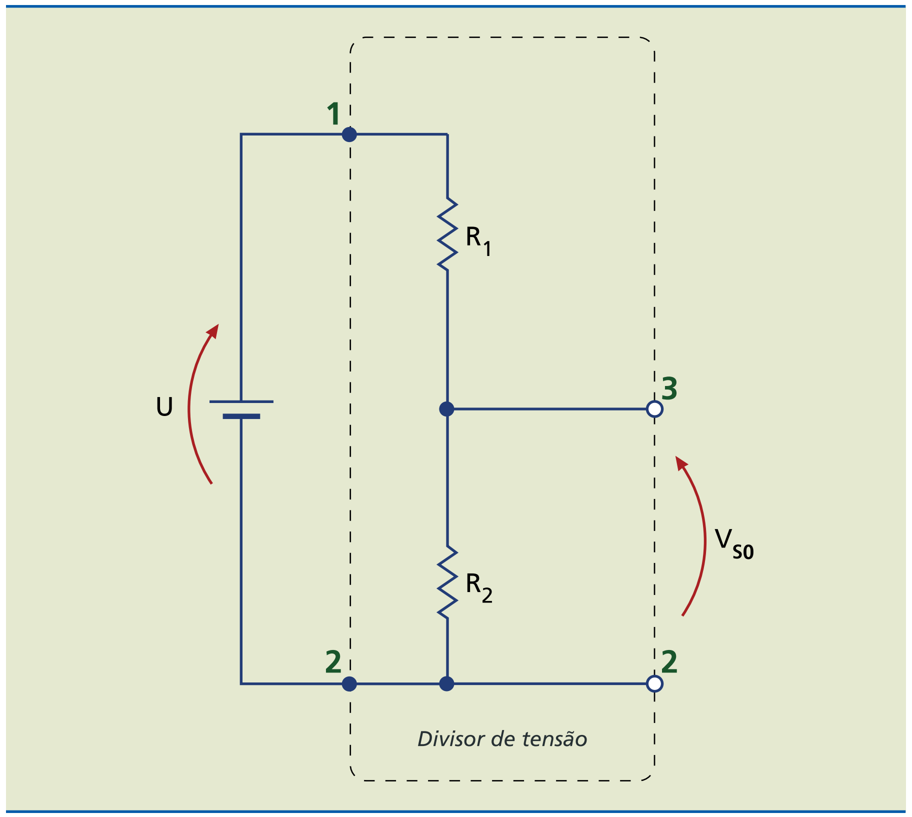
Circuitos divisores de tensão e corrente

Os circuitos divisores fornecem em sua saída uma tensão ou uma corrente com valor menor que o de entrada.

5.1 Divisores de tensão

A figura 5.1 ilustra o circuito divisor de tensão básico. A tensão de entrada U é aplicada nos terminais 1 e 2. A tensão de saída V_{S0} é obtida entre os terminais 3 e 2, sendo este último comum para a entrada e para a saída. Nesta seção, vamos estudar os circuitos divisores de tensão sem carga e com carga, cada tipo permitindo diferentes configurações. Em cada caso, a tensão de saída será representada por V_{S0} (sem carga) ou por V_S (com carga). A seguir, vamos calcular a tensão de saída tanto para o circuito da figura 5.1 como para variantes desse circuito empregadas na prática.

Figura 5.1
Circuito básico de um divisor de tensão.



5.1.1 Divisor de tensão sem carga

Nessa situação, **nenhuma carga** (resistência) é conectada aos terminais 3 e 2 da saída. A divisão de tensão pode ser feita com tensão de saída constante ou variável.

A ligação de uma carga nesses pontos do circuito faz com que a tensão de saída fique menor do que o valor calculado (ver seção 5.1.2).

Divisor com tensão de saída constante

Retomando a figura 5.1, vamos calcular a tensão de saída V_{S0} em função da tensão de entrada U e das resistências R_1 e R_2.

A resistência total da associação em série de R_1 e R_2 vale:

$$R_T = R_1 + R_2 \quad (5.1)$$

A corrente I que passa pelos resistores é obtida pela lei de Ohm:

$$I = \frac{U}{R_T} = \frac{U}{R_1 + R_2} \quad (5.2)$$

Como a tensão de saída V_{S0} é a tensão sobre o resistor R_2, podemos obtê-la pela lei de Ohm e pela equação 5.2:

$$V_{S0} = R_2 I = R_2 \frac{U}{R_1 + R_2}$$

$$V_{S0} = U \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (5.3)$$

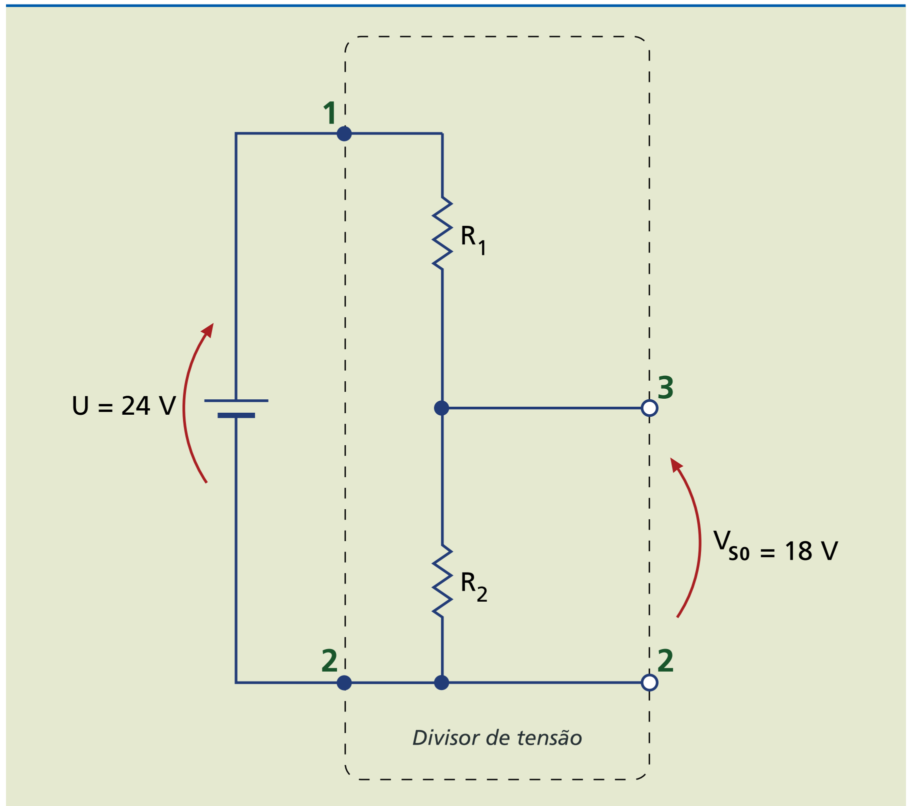
Essa é a equação da tensão de saída do circuito divisor de tensão em vazio (sem carga), que pode ser descrita da seguinte forma:

> A tensão de saída (V_S) é igual à tensão U da fonte (gerador) multiplicada pela razão entre a resistência R_2 sobre a qual se mede V_S e a somatória das resistências do circuito $R_1 + R_2$.

Exemplo

Determine as resistências do circuito divisor de tensão de modo a obter a tensão de saída em vazio de 18 V, sabendo que a resistência total do circuito vista da fonte ($R_1 + R_2$) é de 6 kΩ e a tensão de entrada é de 24 V (figura 5.2).

Figura 5.2
Divisor de tensão.



Solução:

O enunciado diz que $R_T = R_1 + R_2 = 6\ k\Omega$.

Usando a equação 5.3, obtém-se:

$$V_{S0} = 18 = 24\frac{R_2}{6},$$

resultando em $R_2 = 4{,}50\ k\Omega$ e $R_1 = R_T = R_2 = 6 - 4{,}5 = 1{,}5\ k\Omega$.

Divisor com tensão de saída variável

As duas estratégias a seguir permitem a obtenção de tensões variáveis na saída. A primeira delas provê tensão continuamente variável entre 0 (zero) e U. A segunda fornece apenas um número finito de valores predefinidos.

Divisor com resistência variável

Resistores variáveis têm tipicamente três terminais. Dois deles (A e B) são fixos e conectados às extremidades do resistor. Resistores desse tipo são feitos de carbono ou fio metálico. Seu formato pode ser linear (figuras 5.3a e 5.3b) ou circular (figuras 5.3c e 5.3d). Um cursor, que desliza sobre o elemento resistivo, é conectado ao terminal C.

O potenciômetro é um dispositivo de resistência variável utilizado em circuitos eletrônicos, no qual a posição do cursor pode ser alterada. Construtivamente, é semelhante ao mostrado na figura 5.3c. O resistor que o constitui também pode ser feito de fio.

O *trimpot* (figura 2.5) é um resistor variável cuja resistência é alterada por um pequeno parafuso. É empregado apenas para ajustes do equipamento, permanecendo travado durante sua operação. Sua estrutura é semelhante à dos resistores da figura 5.3.

Para aplicações de elevada potência, empregam-se os reostatos, construtivamente semelhantes ao resistor da figura 5.3a.

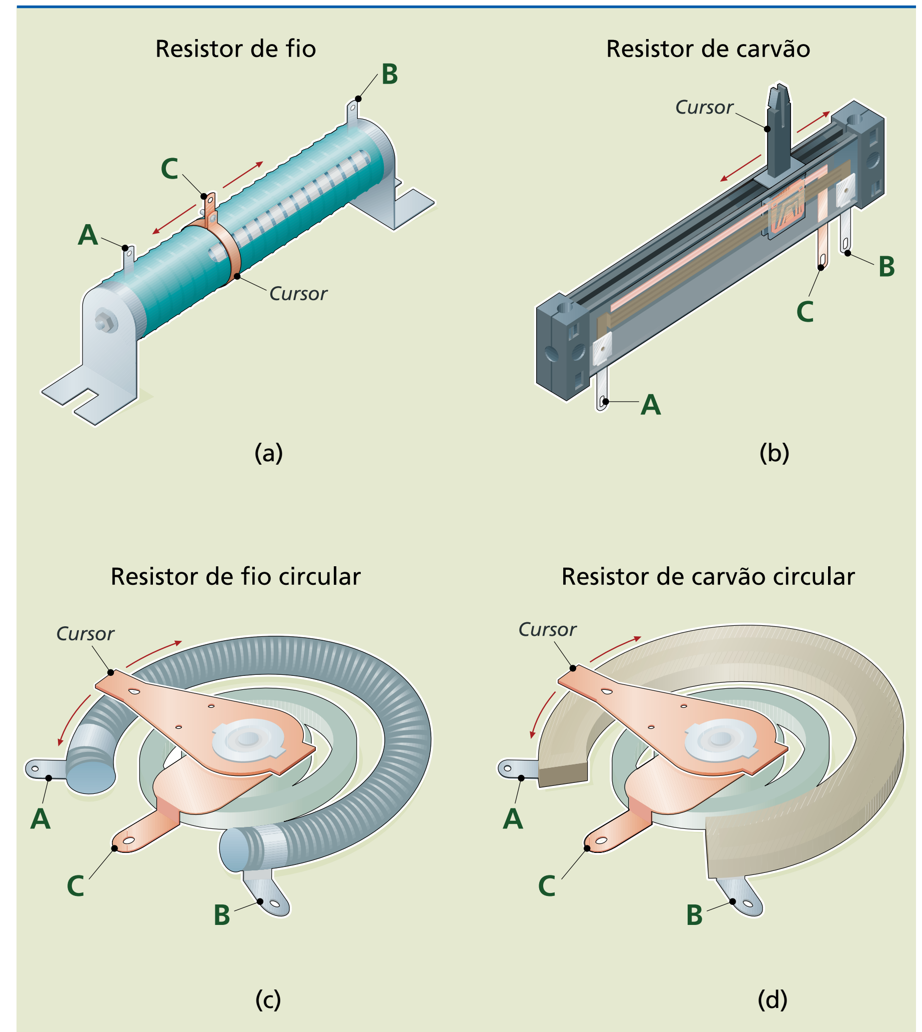
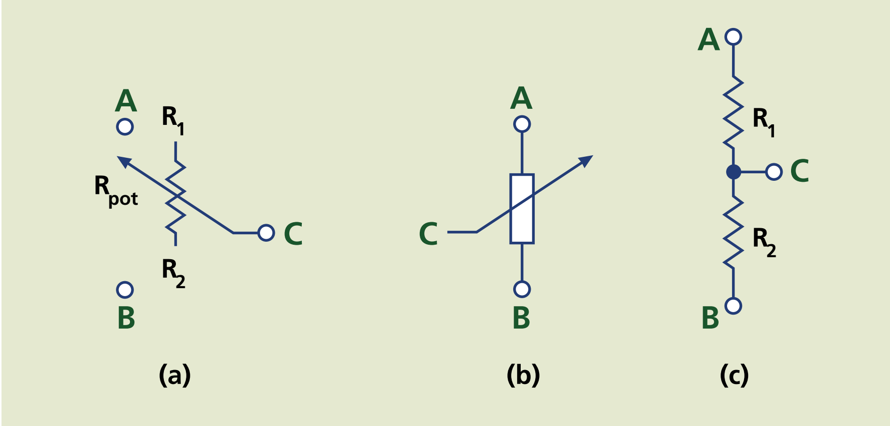


Figura 5.3
Detalhes construtivos de resistores variáveis. A resistência entre os terminais B e C varia de zero a $R_T = R_{pot}$ ao mudar a posição do cursor C do terminal B para o A, enquanto a resistência entre os terminais A e C varia de R_{pot} a zero. R_{pot} é o valor nominal do resistor variável.

A figura 5.4 ilustra duas representações gráficas para resistores variáveis de três terminais (figuras 5.4a e 5.4b) e um modelo simples (figuras 5.4c) de duas resistências R_1 e R_2, que será utilizado para o cálculo das tensões e correntes no circuito. R_1 representa a resistência entre os terminais A e C; R_2, a resistência entre os terminais C e B.

Figura 5.4
Representação gráfica para potenciômetros e *trimpots*.

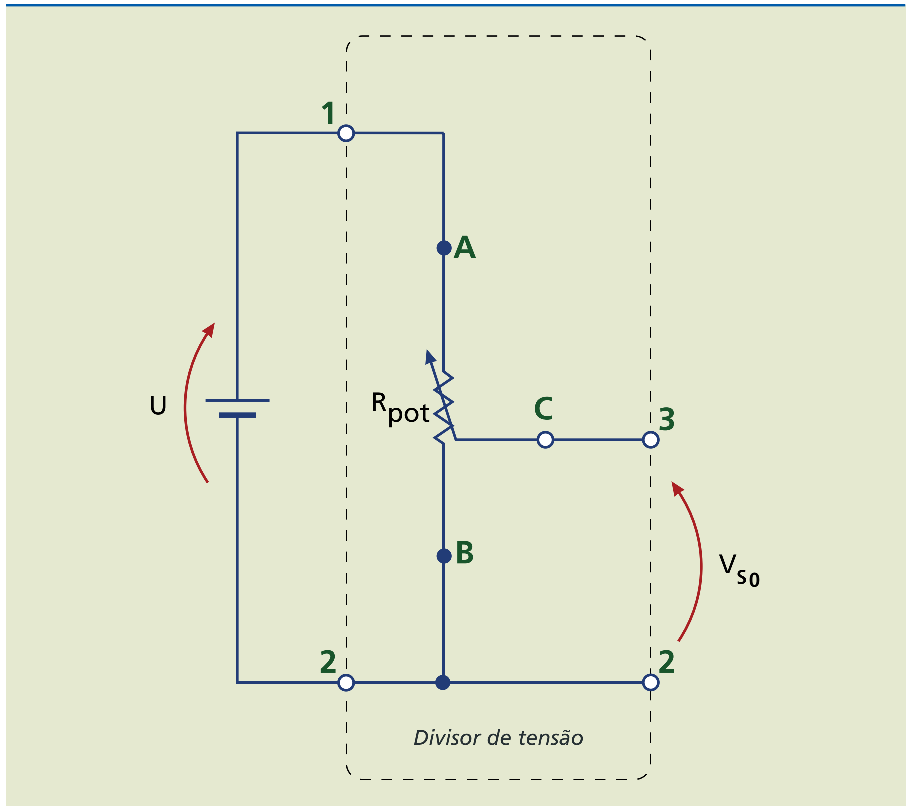


Os circuitos analisados a seguir apresentam resistores variáveis.

Caso *a*: tensão variável entre 0 e U ($0 \le V_{S0} \le U$)

Para obter tensões entre 0 e U, emprega-se apenas um potenciômetro ligado aos terminais da fonte do circuito, conforme ilustrado na figura 5.5.

Figura 5.5
Divisor de tensão variável: caso *a*.



Substituindo o resistor variável da figura 5.5 pelo modelo equivalente da figura 5.4c, obtém-se circuito idêntico ao da figura 5.1. Utilizando a equação 5.3, analisam-se três casos distintos:

- Cursor C no ponto B, $R_2 = 0$ e $V_{S0} = 0$.
- Cursor C no ponto A, $R_2 = R_{pot}$ e $V_{S0} = U$.
- Cursor C em um ponto intermediário qualquer, $R_2 = kR_{pot}$ ($k = 0$ para o cursor no ponto A e $k = 1$ para C no ponto B; para outras posições, $0 < k < 1$); obtém-se:

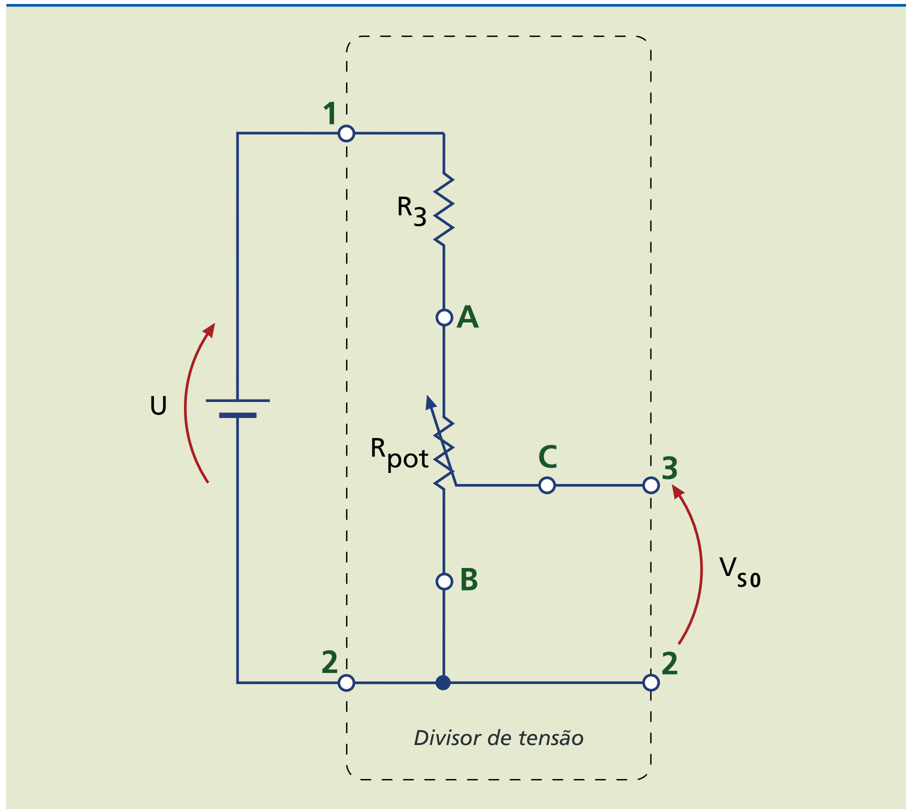
$$V_{S0} = U\frac{R_2}{R_1 + R_2} = U\frac{kR_{pot}}{R_{pot}} = kU\ (0 \le k \le 1) \quad (5.4)$$

A tensão de saída assume valores entre 0 e U.

Caso *b*: tensão variável com limite superior ou inferior

Em certas situações, é necessário limitar os valores da tensão. Quando se pretende limitar o **valor máximo** da tensão de saída V_S, emprega-se um circuito como o da figura 5.6.

Figura 5.6
Divisor de tensão com limitação superior no valor V_{SUP} ($0 \le V_{S0} \le V_{SUP}$). O resistor R_3 impede que a tensão ultrapasse V_{SUP}.



Assim, a ligação de um resistor R_3 no circuito permite impor um limite superior à tensão de saída: $0 \le V_{S0} < V_{SUP}$.

Conforme a posição do cursor, é possível ressaltar três casos distintos, aplicando a equação 5.3:

- Cursor C no ponto B, $R_2 = 0$ e $V_{S0} = 0$.
- Cursor C no ponto A, $R_2 = R_{pot}$; determina-se o valor V_{SUP}:

$$V_{S0} = V_{SUP} = U\frac{R_{pot}}{R_{pot} + R_3} \quad (5.5)$$

- Cursor C em um ponto intermediário qualquer, $R_2 = kR_{pot}$, em que k é um número entre 0 e 1; obtém-se:

$$V_{S0} = U\frac{kR_{pot}}{R_{pot} + R_3} \rightarrow 0 \leq V_{S0} \leq V_{SUP} \quad (5.6)$$

A tensão de saída assume qualquer valor entre 0 e V_{SUP}.

Para limitar o **valor mínimo** de V_{S0}, emprega-se o circuito da figura 5.7.

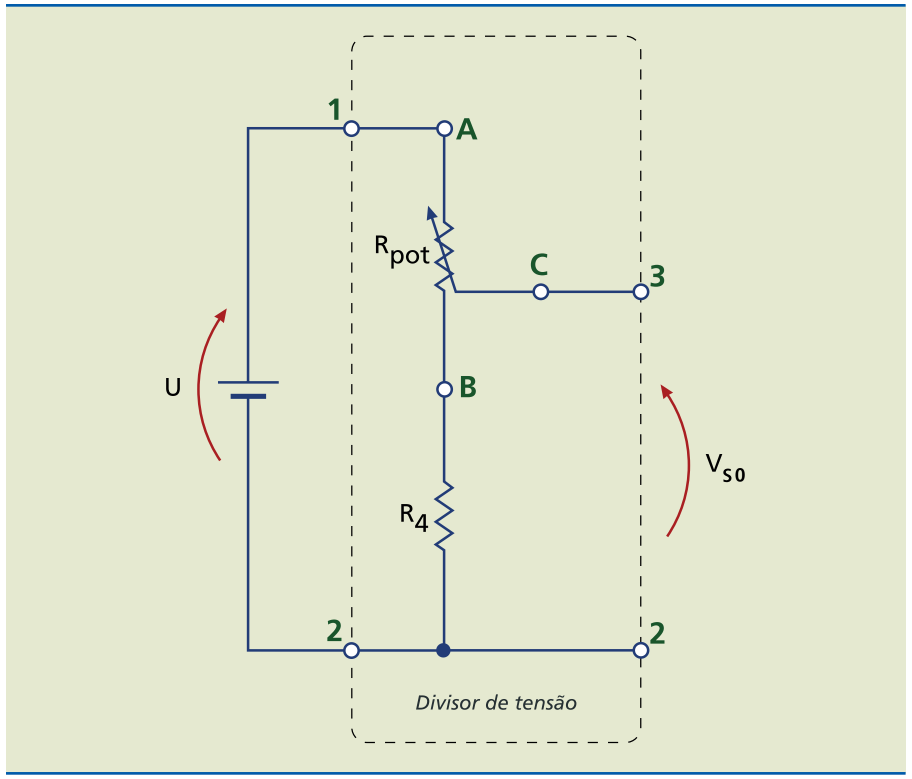


Figura 5.7
Divisor de tensão com limitação inferior no valor V_{INF} ($V_{INF} \leq V_{S0} < U$).

É possível, assim, impor um limite inferior à tensão de saída: $V_{INF} \leq V_{S0} < U$.

Na figura 5.7, a tensão de saída varia de V_{INF} a U. O resistor R_4 impede que a tensão mínima de saída chegue a 0, limitando-a em V_{INF}.

Utilizando a equação 5.3, analisam-se três casos distintos:

- Cursor C no ponto B, $R_2 = 0$; V_{S0} assume o valor V_{INF}:

$$V_{S0} = V_{INF} = U\frac{R_4}{R_{pot} + R_4} \quad (5.7)$$

- Cursor C no ponto A, $R_2 = R_{pot}$; obtém-se $V_{S0} = U$.
- Cursor C em um ponto intermediário qualquer, $R_2 = kR_{pot}$; chega-se a:

$$V_{S0} = U\frac{kR_{pot} + R_4}{R_{pot} + R_4} \rightarrow V_{INF} \leq V_{S0} \leq U \quad (5.8)$$

A tensão de saída assume qualquer valor entre V_{INF} e U.

No caso de limite duplo (figura 5.8), isto é, **limites inferior** V_{INF} e **superior** V_{SUP} à tensão de saída: $V_{INF} \leq V_{S0} < V_{SUP}$.

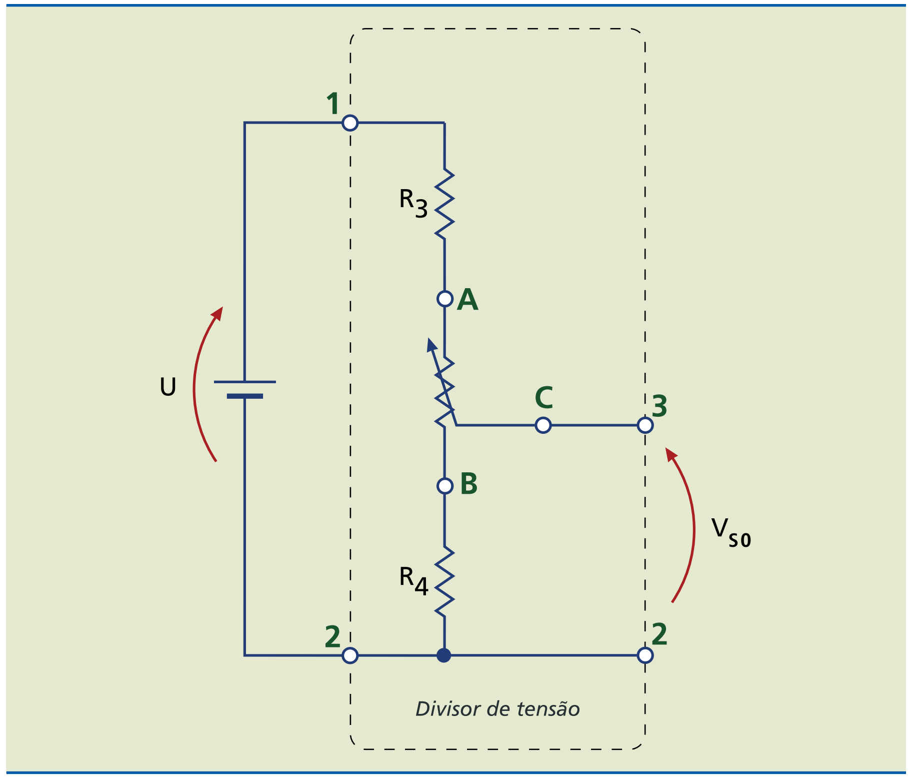


Figura 5.8
Divisor de tensão com limites inferior e superior na tensão de saída ($V_{INF} \leq V_{S0} < V_{SUP}$).

Aplicando a equação 5.3, observam-se três casos distintos:

- Cursor C no ponto B, $R_2 = 0$; V_{S0} assume o valor V_{INF}:

$$V_{S0} = V_{INF} = U\frac{R_4}{R_{pot} + R_4 + R_3} \quad (5.9)$$

- Cursor C no ponto A, $R_2 = R_{pot}$; V_{S0} assume o valor V_{SUP}:

$$V_{S0} = V_{SUP} = U\frac{R_{pot} + R_4}{R_{pot} + R_3 + R_4} \quad (5.10)$$

- Cursor C em um ponto intermediário qualquer, $R_2 = kR_{pot}$; obtém-se:

$$V_{S0} = U\frac{kR_{pot} + R_4}{R_{pot} + R_3 + R_4} \rightarrow V_{INF} \leq V_{S0} \leq V_{SUP} \quad (5.11)$$

A tensão de saída assume qualquer valor entre V_{INF} e V_{SUP}.

Exemplo

Dada uma fonte de 120 V com potência máxima de 240 mW, projete um circuito divisor de tensão sem carga que forneça tensões de saída na faixa $60\ V \leq V_{S0} \leq 100\ V$, utilizando o circuito da figura 5.8.

Solução:

Como a potência fornecida pela fonte é limitada, calcula-se o mínimo valor possível para $R_T = R_3 + R_4 + R_{pot}$:

$$P_{fonte} = 240\ mW = \frac{U^2}{R_T} = \frac{120^2}{R_T}$$

Daí obtém-se RT = 60 kΩ.

Aplica-se a equação 5.9:

$$V_{S0} = V_{INF} = 60 = U\frac{R_4}{R_{pot} + R_4 + R_3} = 120\frac{R_4}{60\ k\Omega},$$

resultando em R4 = 30,0 kΩ.

Utiliza-se a equação 5.10:

$$V_{S0} = V_{SUP} = 100\ V = U\frac{R_{pot} + R_4}{R_{pot} + R_3 + R_4} = 120\frac{R_{pot} + 30\ k\Omega}{60\ k\Omega},$$

obtendo $R_{pot} = 20{,}0\ k\Omega$.

Como $R_T = 60\ k\Omega = R_3 + R_4 + R_{pot} = R3 + 30\ k\Omega + 20\ k\Omega$, então R3 = 10,0 kΩ.

Divisor com seletor de tensão

A tensão de saída assume valores predefinidos sem passar por valores intermediários. Em lugar do resistor variável, usa-se uma chave seletora com resistores fixos para que se obtenham os valores desejados (figura 5.9).

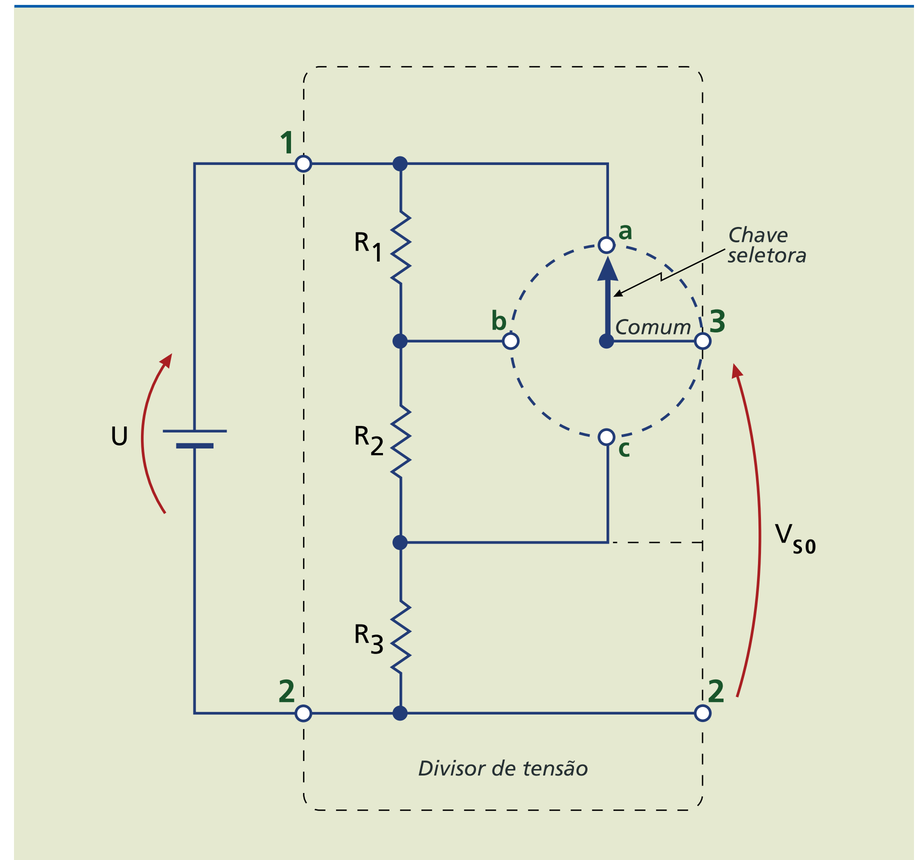


Figura 5.9
Divisor de tensão com chave seletora.

Assim:

- Chave na posição *a*:

$$V_{S0} = U$$

- Chave na posição *b*:

$$V_{S0} = U\frac{R_2 + R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \quad (5.12)$$

- Chave na posição *c*:

$$V_{S0} = U\frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \quad (5.13)$$

Exemplo

Determine as tensões de saída do circuito da figura 5.9, com R_1 = 2k2 Ω, R2 = 3k3 Ω, R3 = 1k5 Ω e U = 14 V.

Solução:

- Na posição *a*: V_{S0} = 14 V.

- Na posição *b*: $V_{S0} = U\frac{R_2 + R_3}{R_1 + R_2 + R_3} = 14\frac{3300 + 1500}{2200 + 3300 + 1500} = 9{,}60\ V$

- Na posição *c*: $V_{S0} = U\frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3} = 14\frac{1500}{2200 + 3300 + 1500} = 3{,}00\ V$

5.1.2 Divisor de tensão com carga

Consiste em acrescentar à saída de um dos circuitos anteriores uma carga denominada R_L (figura 5.10). A tensão de saída com carga V_S é menor que os valores V_{S0} anteriormente calculados sem a inserção de carga.

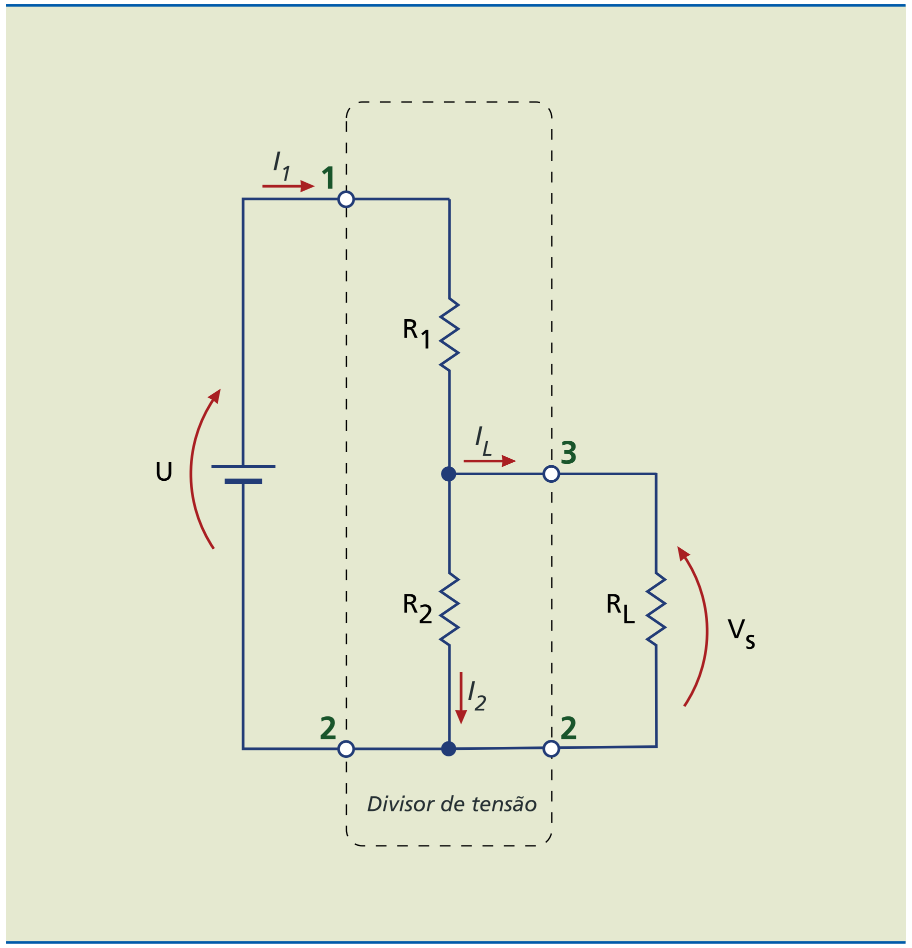


Figura 5.10
Divisor de tensão com carga conectada à saída.

O que acontece nessa situação:

- Ao inserir R_L nos terminais de saída, a corrente I_1 através do resistor R_1 sofre acréscimo, passando a ser $I_1 = I_2 + I_L$. Aumento na corrente significa queda de tensão maior no resistor R_1, causando decréscimo em V_S.
- Nota-se na figura 5.10 que R_L está em paralelo com R_2, reduzindo o valor da resistência equivalente entre os terminais 3 e 2. Pela equação 5.3, verifica-se que a tensão de saída sofre decréscimo.

Cálculo de V_S

Associando R_L em paralelo com R_2, obtém-se o resistor equivalente R_2'. O circuito da figura 5.10 pode ser, então, redesenhado, conforme a figura 5.11.

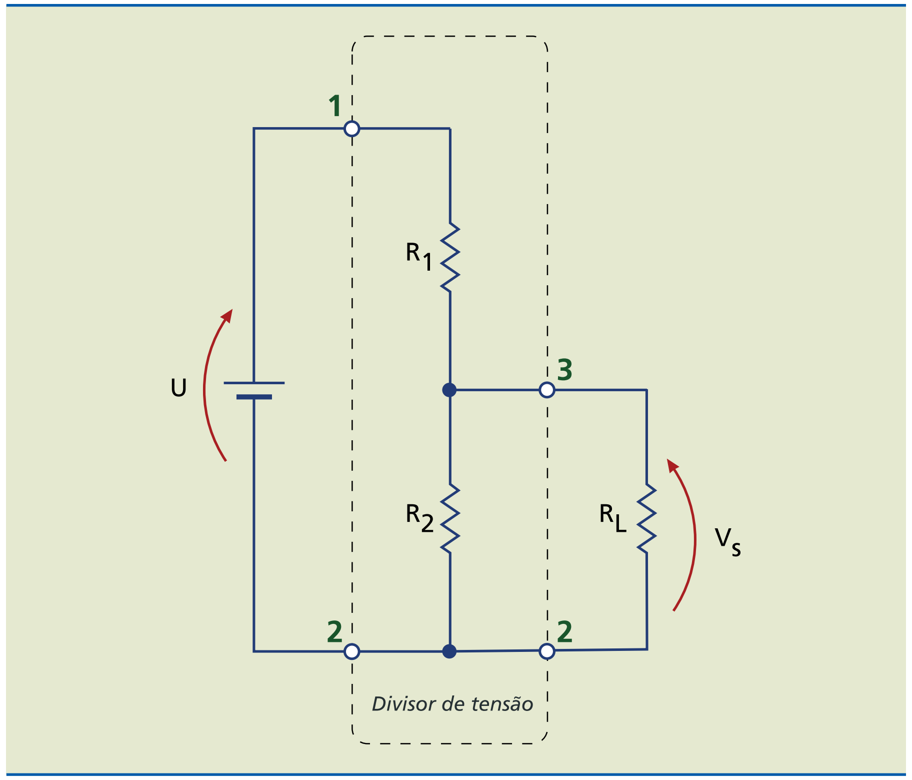


Figura 5.11
Circuito simplificado do divisor de tensão com carga conectada à saída.

Tem-se um novo divisor de tensão com resistor superior de valor R_1 e resistor inferior de valor R_2, dado por:

$$R_2' = \frac{R_2 R_L}{R_2 + R_L} \quad (5.14)$$

A resistência total vista entre os terminais 1 e 2 vale:

$$R_T = R_1 + \frac{R_2 R_L}{R_2 + R_L} \quad (5.15)$$

A tensão de saída V_S pode ser facilmente calculada pela fórmula do divisor de tensão sem carga (equação 5.3), obtendo-se:

$$V_S = U\frac{\dfrac{R_2R_L}{R_2+R_L}}{R_1+\dfrac{R_2R_L}{R_2+R_L}}$$

$$V_S = U\frac{R_2R_L}{R_1R_2+R_1R_L+R_2R_L} \quad (5.16)$$

Curiosidade

Se o numerador e o denominador da equação 5.16 forem divididos por R_L, obtém-se:

$$V_S = U\frac{(R_2R_L)\div R_L}{(R_1R_2+R_1R_L+R_2R_L)\div R_L} = U\frac{R_2}{\left(\dfrac{R_1R_2}{R_L}\right)+R_1+R_2} \quad (5.17)$$

Se R_L for muito maior que R_1 e R_2, o termo $\left(\dfrac{R_1R_2}{R_L}\right)$ torna-se muito pequeno, valendo a relação:

$$V_S \approx U\frac{R_2}{R_1+R_2} \quad (5.18)$$

Essa é a equação do divisor de tensão sem carga.

Como tal equação é aproximada, convém saber quanto R_L deve ser maior que R_1 e R_2 para que o erro não seja muito grande. Por exemplo, se a resistência da carga for dez vezes maior que o valor de R_1 e de R_2, o erro resultante ao usar a equação 5.18 será menor que 10%. Isso pode ser comprovado no próximo exemplo, em que se calcula a tensão de saída V_S para diferentes valores de R_L.

Exemplo

Determine a tensão de saída V_S no circuito da figura 5.12 para os seguintes valores de R_L:

- R_L = 3k3 Ω
- R_L = 30 kΩ
- R_L = 100 kΩ
- R_L = ∞ (divisor de tensão sem carga)

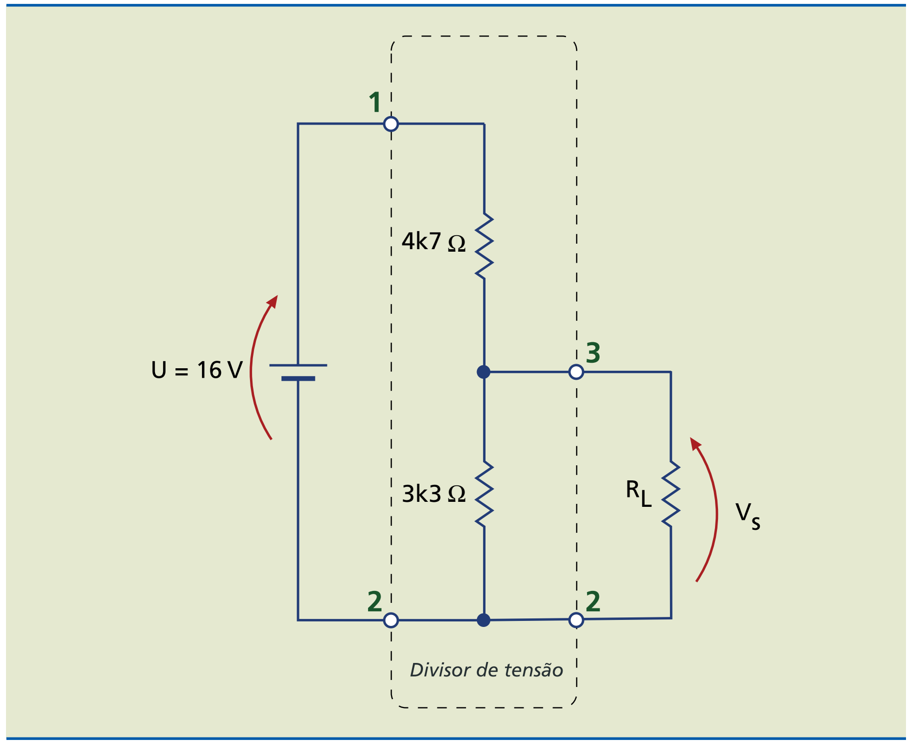


Figura 5.12
Divisor de tensão com carga.

Solução:

Para R_L = 3k3 Ω:

$$V_S = 16\frac{3k3 \cdot 3k3}{4k7 \cdot 3k3 + 4k7 \cdot 3k3 + 3k3 \cdot 3k3} = 4{,}16\ \text{V}$$

Para R_L = 30 kΩ:

$$V_S = 16\frac{3k3 \cdot 30k}{4k7 \cdot 3k3 + 4k7 \cdot 30k + 3k3 \cdot 30k} = 6{,}20\ \text{V}$$

Para R_L = 100 kΩ:

$$V_S = 16\frac{3k3 \cdot 100k}{4k7 \cdot 3k3 + 4k7 \cdot 100k + 3k3 \cdot 100k} = 6{,}47\ \text{V}$$

Para R_L = ∞ (divisor de tensão sem carga):

$$V_S = 16\frac{3k3}{4k7+3k3} = 6{,}60\ \text{V}$$

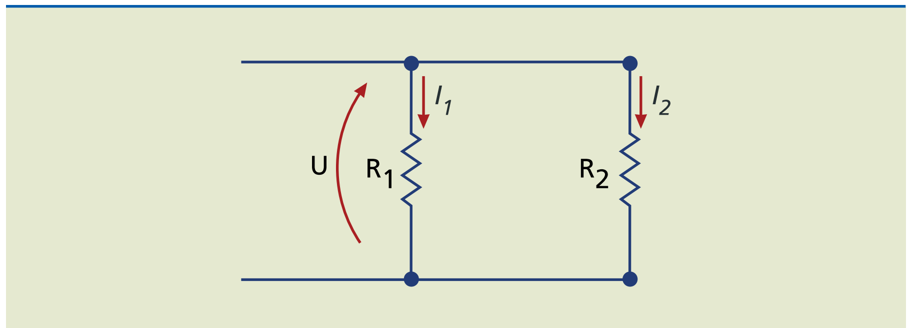
Nota-se que, quanto maior o valor de R_L, menor sua influência na tensão de saída. Além disso, o valor da tensão de saída com carga se aproxima do valor sem carga.

No caso de $R_L = 30\ k\Omega$, que é cerca de dez vezes os valores de R_1 e R_2, a equação do divisor sem carga introduz um erro da ordem de 6% em relação à do divisor com carga. Aumentando o valor de R_L, esse erro torna-se desprezível.

5.2 Circuito divisor de corrente

Vamos analisar aqui apenas a situação do divisor de corrente fixo. Calculam-se a seguir as correntes I_1 e I_2 em função da corrente total I e das resistências R_1 e R_2, mostradas na figura 5.13.

Figura 5.13
Divisor de corrente.



Aplicando a lei de Ohm, obtêm-se as correntes I_1 e I_2 sobre os resistores R_1 e R_2. Como estão associados em paralelo, eles ficam submetidos à mesma tensão U.

$$\begin{cases} I_1 = \dfrac{U}{R_1} \\ I_2 = \dfrac{U}{R_2} \end{cases} \quad (5.19)$$

Pela primeira lei de Kirchhoff, calcula-se a corrente total I:

$$I = I_1 + I_2 = \frac{U}{R_{eq}} \quad (5.20)$$

R_{eq} é a resistência equivalente da associação em paralelo de R_1 e R_2, calculada por:

$$R_{eq} = \frac{R_1R_2}{R_1 + R_2} \quad (5.21)$$

Da equação 5.20, obtém-se:

$$U = R_{eq}I \quad (5.22)$$

Substituindo a equação 5.22 em 5.19:

$$\begin{cases} I_1 = \dfrac{R_{eq}I}{R_1} = \dfrac{\dfrac{R_1R_2}{R_1+R_2}I}{R_1} \Rightarrow I_1 = \dfrac{R_2}{R_1+R_2}I \\ I_2 = \dfrac{R_{eq}I}{R_2} = \dfrac{\dfrac{R_1R_2}{R_1+R_2}I}{R_1} \Rightarrow I_2 = \dfrac{R_1}{R_1+R_2}I \end{cases} \quad (5.23)$$

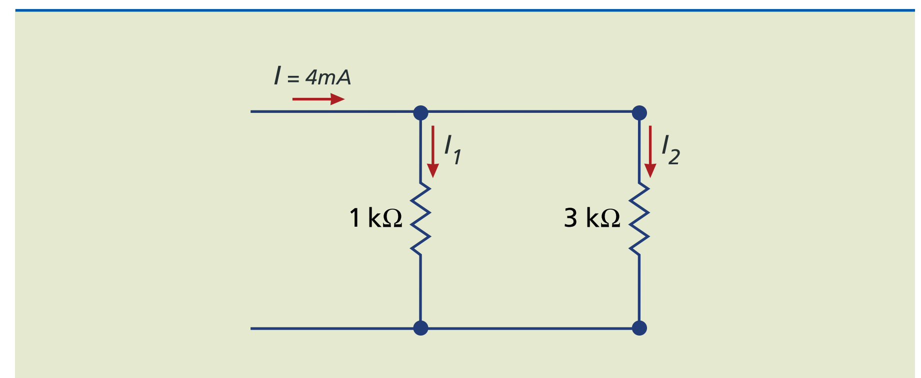
Conclusão

Uma vez conhecida a corrente total do gerador no circuito em paralelo, a corrente em cada resistência é o produto da corrente total pela razão entre a resistência do outro ramo e a soma das resistências do circuito em paralelo.

Exemplo

Determine as correntes I_1 e I_2 do circuito da figura 5.14.

Figura 5.14
Divisor de corrente.



Solução:

As correntes I_1 e I_2 são calculadas por:

$$\begin{cases} I_1 = \dfrac{R_2}{R_1+R_2}I = \dfrac{3\ k\Omega}{1\ k\Omega + 3\ k\Omega} 4\ mA = 3{,}00\ mA \\ I_2 = \dfrac{R_1}{R_1+R_2}I = \dfrac{1\ k\Omega}{1\ k\Omega + 3\ k\Omega} 4\ mA = 1{,}00\ mA \end{cases}$$