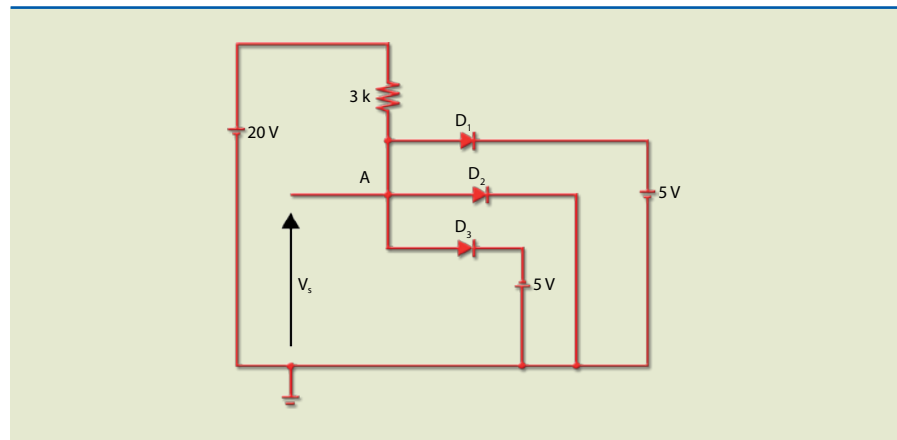


2. Determine a tensão  $V_s$  no esquema da figura 2.33, considerando os diodos ideais.

Figura 2.33

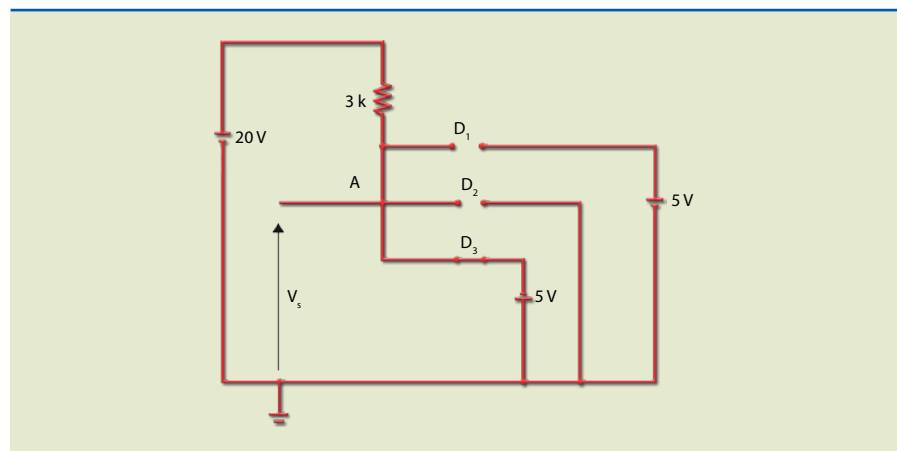


*Solução:*

O circuito será analisado de acordo com os possíveis estados para os diodos. Como são três diodos, admitem-se oito combinações, pois cada diodo pode estar em condução ou cortado. Algumas dessas combinações são altamente improváveis ou impossíveis e, portanto, serão descartadas. Por exemplo, aparentemente, a bateria de 20 V promove a condução dos três diodos. Iniciemos a análise imaginando que os três diodos estão conduzindo. Para essa situação, há uma inconsistência, pois o ponto A estaria com três valores de tensão (5 V, 0 V e -5 V), o que não é possível.

Vamos considerar outra combinação (aparentemente a mais provável), que é  $D_1$  e  $D_2$  cortados e  $D_3$  em condução (figura 2.34).

Figura 2.34



Nesse caso, se o diodo  $D_3$  está em condução, seu anodo está em -5 V. Consequentemente,  $D_2$  está em polarização reversa com -5 V e  $D_1$ , com -10 V. Assim, a suposição inicial ( $D_1$  e  $D_2$  cortados e  $D_3$  em condução) é verdadeira.

Resposta final:  $V_s = -5$  V.

# Capítulo 3

## Aplicações de diodos semicondutores



A alimentação de todos os circuitos eletrônicos é feita por meio de tensão contínua, porém a tensão na rede é alternada. Os circuitos que convertem tensão CA em CC são chamados de conversores ou retificadores. Sua função é converter a tensão senoidal em pulsante, que, em seguida, é filtrada e eventualmente aplicada em um regulador de tensão. O dispositivo utilizado para obter a retificação é o diodo de junção, estudado no capítulo anterior.

### 3.1 Retificador de meia onda

O circuito retificador de meia onda é composto por um único diodo acoplado na saída de um transformador. Graças a essa configuração, após a passagem pelo diodo, observam-se somente semiciclos positivos, pois durante o semiciclo negativo a tensão na carga é nula.

Quando a tensão de entrada ( $V_e$ ) for positiva, o diodo conduzirá e a tensão na carga será igual à tensão de entrada descontando 0,7 V. Se a tensão de pico de entrada ( $V_p$ ) for muito maior que 0,7 V, a tensão na carga será praticamente igual a  $V_e$ . No semiciclo negativo ( $V_e < 0$ ), o diodo estará cortado e toda a tensão estará aplicada entre seus terminais; por isso, o diodo deve ter uma tensão de ruptura maior que  $V_p$ . A figura 3.1 apresenta situações do circuito e formas de onda.

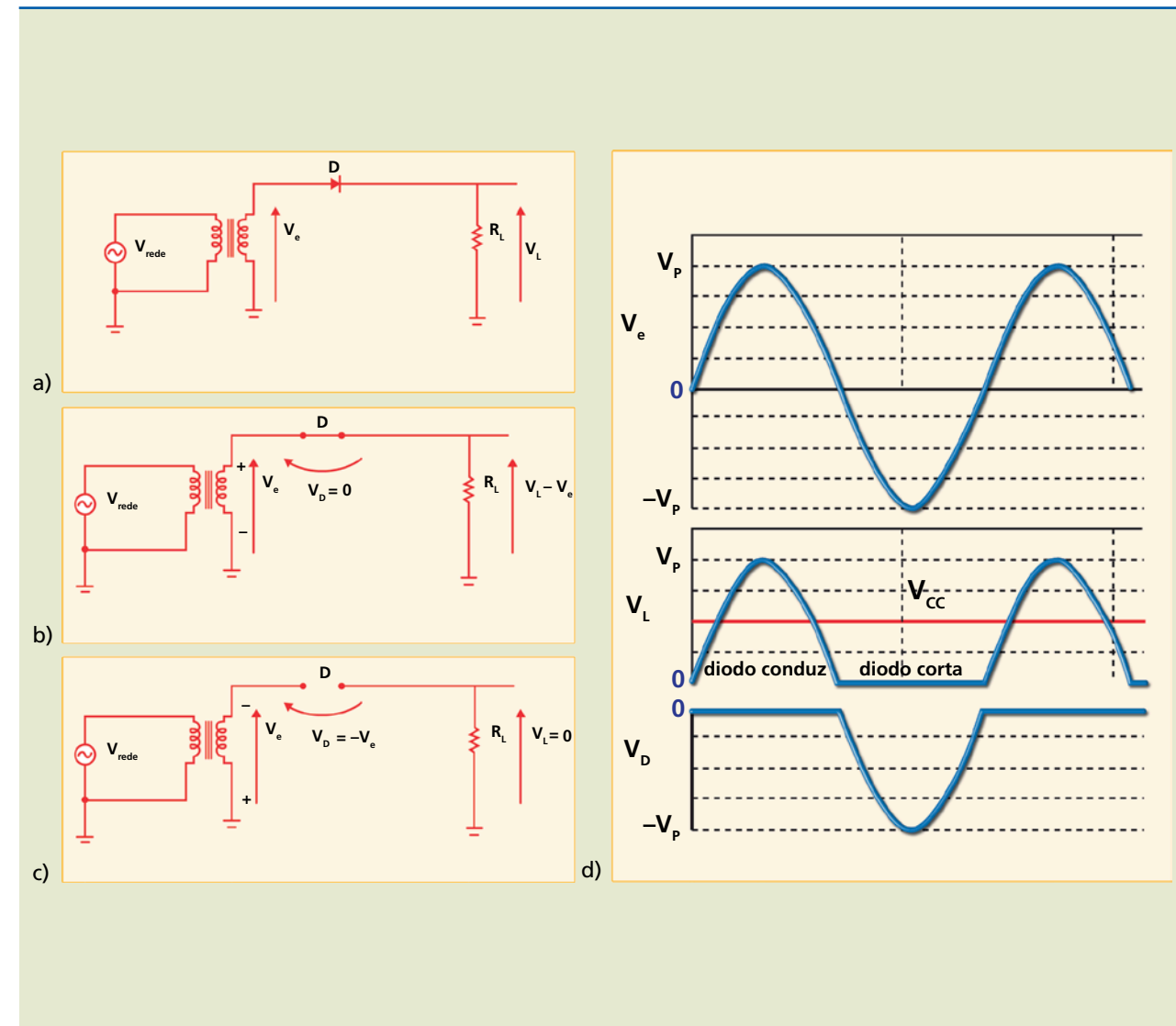
A função de um retificador é manter uma tensão contínua na saída. A tensão na carga tem um componente contínuo, aqui denominado  $V_{CC}$  ( $V_{DC}$ , em inglês), que se calcula por:

$$V_{CC} = \frac{V_p}{\pi} \quad (3.1)$$

Portanto, a corrente na carga vale:

$$I_{CC} = \frac{V_{CC}}{R_L} \quad (3.2)$$

**Obs.:** a tensão média ( $V_{CC}$ ) é medida por um voltímetro CC.



**Figura 3.1**

- (a) Circuito retificador de meia onda;
- (b) circuito equivalente no semiciclo positivo;
- (c) circuito equivalente no semiciclo negativo;
- (d) formas de onda de entrada, na carga e no diodo.

Para essa mesma forma de onda, o valor da tensão eficaz (medida por um voltímetro True RMS) é dado por:

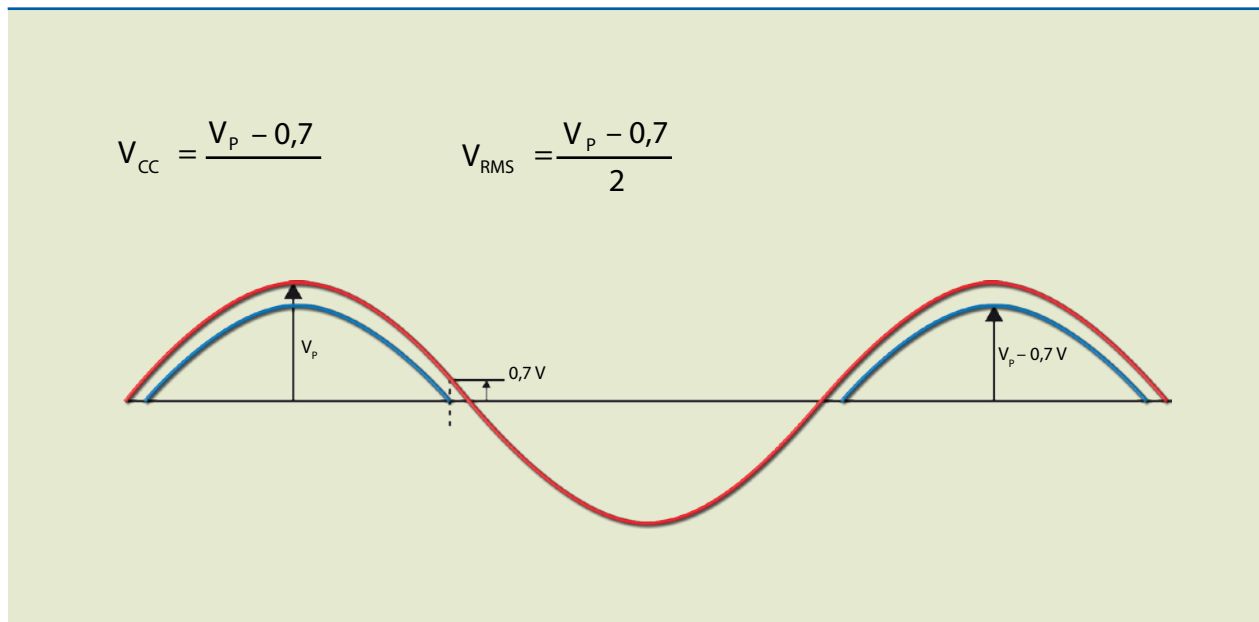
$$V_{RMS} = \frac{V_p}{2} \quad (3.3)$$

**Obs.:** a tensão eficaz é medida por um voltímetro True RMS AC + DC.

As expressões anteriores são verdadeiras quando o valor de pico é muito maior que 0,7 V; caso contrário, deve-se subtrair 0,7 V de  $V_p$  (figura 3.2). Nesse caso, os valores da tensão média e da tensão eficaz são calculados, respectivamente, por:

$$V_{CC} = \frac{V_p - 0,7}{\pi} \quad V_{RMS} = \frac{V_p - 0,7}{2}$$





**Figura 3.2**

Formas de onda de entrada e saída quando a entrada é da ordem de grandeza da barreira de potencial.

É importante lembrar que o diodo deve ser dimensionado de acordo com seus valores de corrente e tensão.

**Dimensionamento do diodo**

Os principais limites elétricos encontrados em um **datasheet** de diodo são:

- $V_{RRM}$  = máxima tensão de pico reversa
- $V_{RMS}$  = máxima tensão eficaz
- $V_{CC}$  = máxima tensão CC reversa
- $I_{AV}$  = máxima corrente contínua
- $I_{FSM}$  = máxima corrente de surge

Para esse retificador de meia onda, os valores das tensões e corrente do diodo devem ter no mínimo os seguintes limites:

- $V_{RRM} > V_P$
- $I_{AV} > \frac{V_P}{R_L \cdot \pi}$
- $V_{RMS} > \frac{V_P}{2}$
- $V_{CC} > \frac{V_P}{\pi}$

Para o diodo 1N4001, por exemplo, os limites são:

$V_{RRM} = 50 \quad I_{AV} = 1A \quad V_{RMS} = 35 V \quad V_{CC} = 50 V$

**Datasheet** é um documento com especificações do componente.

Consideremos que no circuito da figura 3.1  $V_P = 17 V$  e o diodo 1N4001 com  $R_L = 100 \Omega$ .

Os valores são:

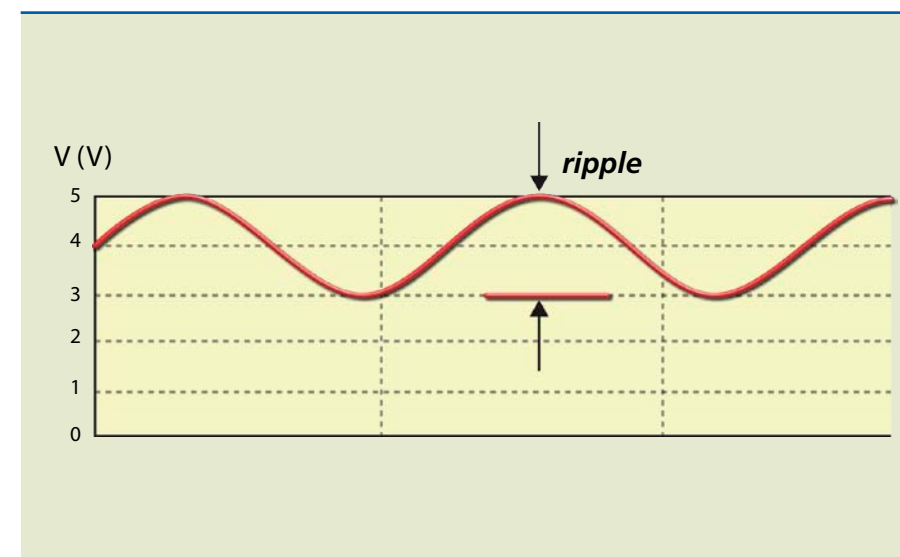
$V_{CC} = \frac{17 - 0,7}{\pi} = 5,2 V, \quad I_{CC} > \frac{5,2 V}{100} = 52 mA$  e

valor eficaz =  $\frac{17V}{2} = 8,5 V$

Podemos observar que esses valores estão bem abaixo dos limites.

**3.2 Retificador de meia onda com filtro capacitivo**

Esse tipo de retificador apresenta, além do diodo retificador, um capacitor associado em paralelo a carga. A função do capacitor é diminuir o *ripple*. Quanto menor for o *ripple* da tensão de saída de um retificador, melhor será sua qualidade. A figura 3.3 ajuda a entender o que é *ripple*. Nela, uma tensão senoidal de 1 V de pico está sobreposta a uma tensão CC (também chamada de nível de *offset*) de 4 V. Se usarmos um voltímetro CC para medir essa tensão, ele indicará exatamente 4 V.



**Figura 3.3**

Tensão senoidal com nível de *offset* ilustrando o conceito de *ripple*.

Para uma tensão retificada de meia onda, se o valor de pico for muito maior que o *ripple*, este pode ser estimado aproximadamente por:

$V_{ripple} = \frac{V_P}{f \cdot C \cdot R} \quad (3.4)$

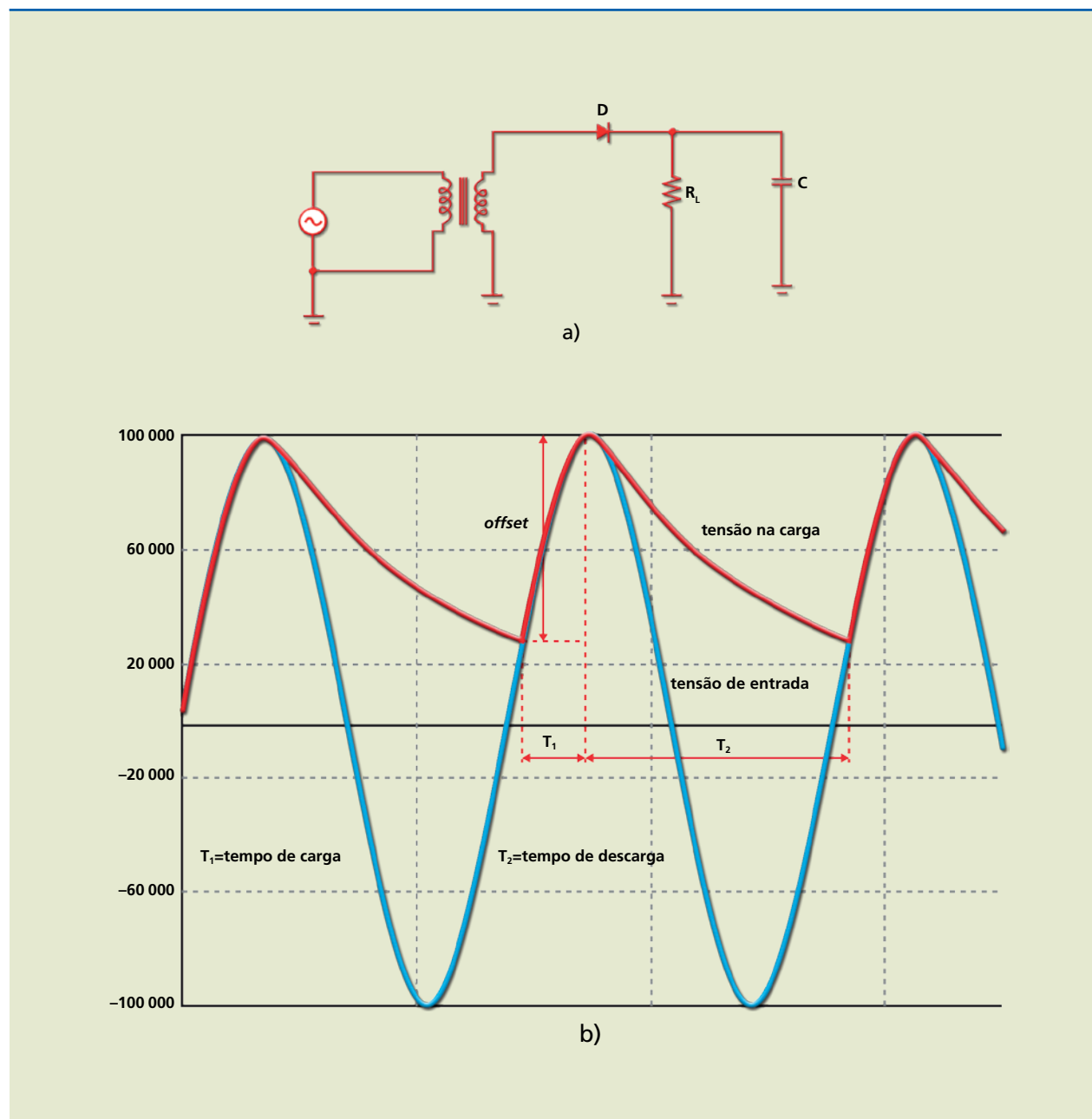


em que:

- $V_p$  é o valor da tensão de pico alternada (em volts),
- $C$  o valor da capacitância do capacitor (em farads),
- $f$  a frequência (em Hz) do *ripple* (meia onda de 60 Hz e onda completa de 120 Hz) e
- $R$  o valor da carga (em ohms).

A figura 3.4 mostra o circuito e as formas de onda da tensão na carga ( $R_L$ ) e na entrada do retificador, para uma tensão senoidal de alimentação.

**Figura 3.4**  
Retificador de meia onda  
com filtro capacitivo:  
(a) circuito e  
(b) formas de onda da  
tensão na carga e de  
entrada (secundário  
do transformador).



Na figura 3.4b, durante o intervalo de tempo  $T_1$ , o diodo conduz, porque o valor da tensão de entrada é maior que o valor da tensão na carga. Desse modo, o capacitor se carrega até atingir o valor de pico da tensão de entrada.

Durante o intervalo de tempo  $T_2$ , a tensão de entrada é menor que a tensão na carga. Assim, o diodo corta a corrente e o capacitor se descarrega na carga  $R_L$  (na prática, a carga é um circuito qualquer que consome corrente, como um receptor de rádio). Quando novamente a tensão de entrada passa a ser maior que a tensão na carga, o diodo volta a conduzir, repondo a carga perdida durante o intervalo  $T_2$ .

Observe que, ao aumentar a capacitância, o tempo de carga diminui e, conseqüentemente, o valor de pico da corrente no diodo aumenta. Por isso, é preciso ter cuidado ao projetar circuitos com valores de capacitância elevados.

### 3.3 Retificador de onda completa

Um retificador de onda completa é formado por dois diodos, aproveitando, portanto, os dois semiciclos da tensão senoidal da rede. Em consequência, o valor da tensão contínua na carga aumenta e o *ripple* diminui, em comparação com o circuito de meia onda.

Nos retificadores de onda completa, a conexão dos diodos pode ser feita de duas maneiras, resultando em dois tipos de retificadores com características distintas: com *center tap* e em ponte.

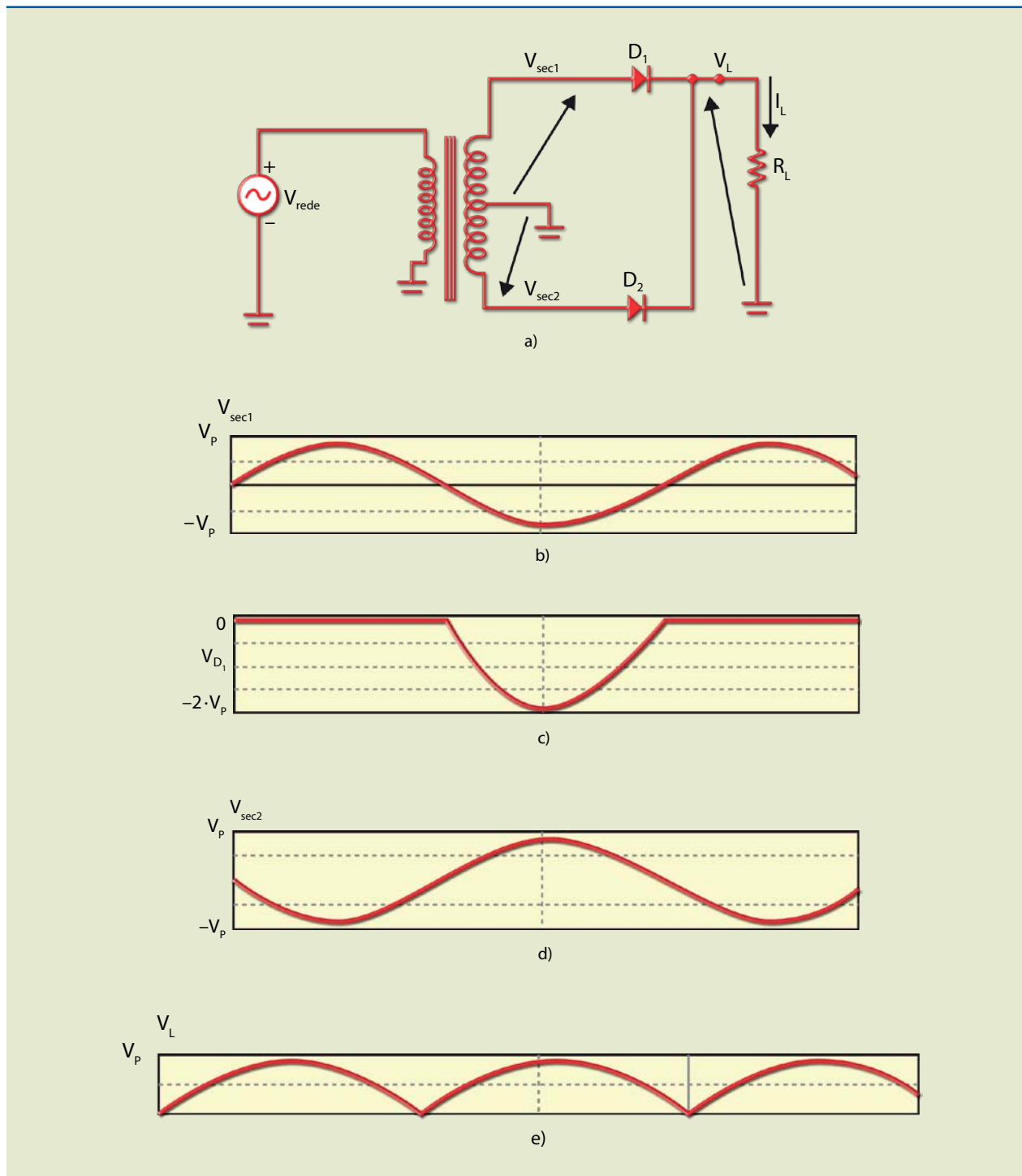
#### 3.3.1 Retificador de onda completa com *center tap*

Esse tipo de retificador utiliza um transformador com tomada central (*center tap*). Os diodos são ligados em cada uma das saídas opostas ao *center tap* e, como resultado, obtêm-se duas tensões defasadas de  $180^\circ$  entre si.

Ao aplicar tensão no primário do transformador, observa-se que, durante o semiciclo positivo da tensão de entrada, o diodo  $D_1$  conduz e o  $D_2$  corta. No semiciclo negativo da tensão de entrada, invertem-se as condições:  $D_2$  conduz e  $D_1$  corta. As figuras 3.5b, 3.5c, 3.5d e 3.5e mostram as formas de onda no secundário do transformador e na carga. Observe que as duas tensões dos terminais em relação ao terra (terminal central do secundário) estão defasadas de  $180^\circ$  entre si. Consideraremos como tensão de entrada cada uma das tensões no secundário, entre uma extremidade e o terra (*center tap*), com valor de pico igual a  $V_p$  e defasadas de  $180^\circ$ , isto é:

$$V_{\text{sec1}} = V_p \cdot \text{sen}\omega t \quad \text{e} \quad V_{\text{sec2}} = -V_p \cdot \text{sen}\omega t$$





**Figura 3.5**

- (a) Circuito do retificador de onda completa com center tap;
- (b) tensão de entrada  $V_{sec1}$ ;
- (c) tensão no diodo  $D_1$ ;
- (d) tensão de entrada  $V_{sec2}$ ;
- (e) tensão na carga.

Calcula-se a tensão contínua na carga por:

$$V_{CC} = \frac{2 \cdot V_P}{\pi} \quad (3.5)$$

Note que ela é o dobro da tensão CC no caso de meia onda.

A corrente média na carga é obtida por:

$$I_{CC} = \frac{2 \cdot V_P}{R_L \cdot \pi} \quad (3.6)$$

Para essa mesma forma de onda, o valor eficaz (tensão medida por um voltímetro RMS) é calculado por:

$$V_{RMS} = \frac{V_P}{\sqrt{2}} \quad (3.7)$$

**Dimensionamento do diodo**

Para esse circuito, o diodo deve ter no mínimo os seguintes limites:

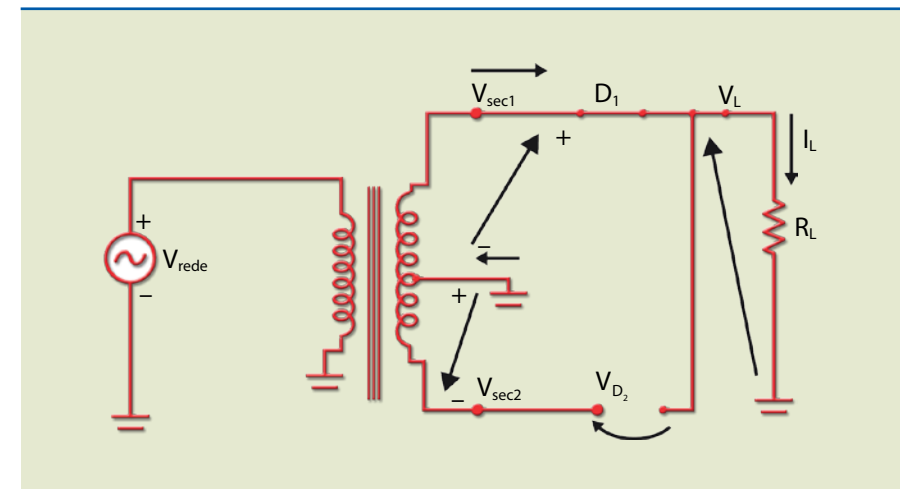
- $V_{RRM} > 2 \cdot V_P$
- Como a corrente média por diodo é a metade da corrente média na carga:

$$I_{AV} > \frac{V_P}{R_L \cdot \pi}$$

- Máxima tensão eficaz:  $V_{RMS} > \frac{V_P}{\sqrt{2}}$
- Máxima tensão contínua reversa:  $V_{CC} > \frac{2 \cdot V_P}{\pi}$

As figuras 3.6 e 3.7 mostram o comportamento dos diodos nos semiciclos positivo e negativo. Para facilitar a compreensão, eles estão representados no modelo simplificado (chave fechada e chave aberta).

No semiciclo positivo, o diodo  $D_1$  conduz e o diodo  $D_2$  corta (figura 3.6).



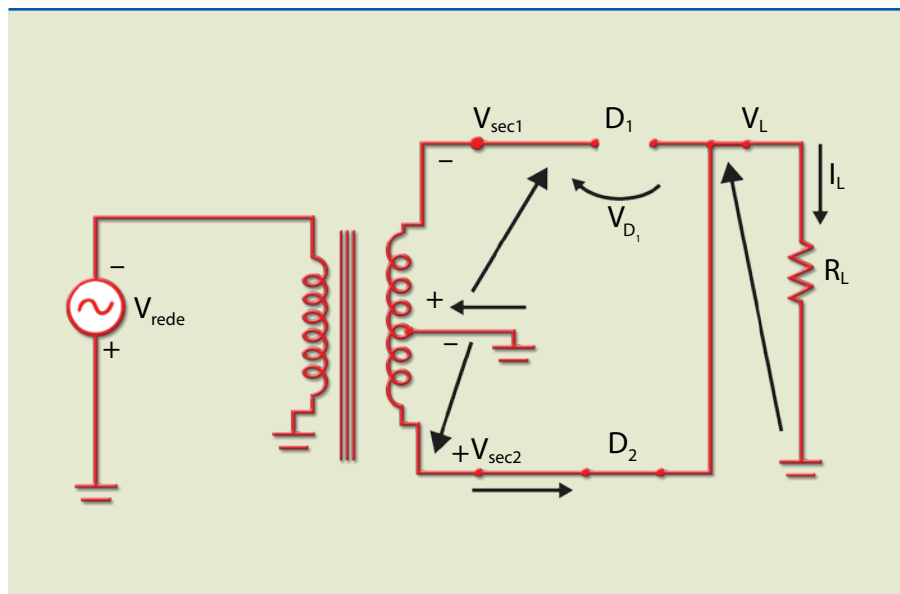
**Figura 3.6**

Retificador de onda completa com center tap – condução no semiciclo positivo.



No semiciclo negativo, o diodo  $D_2$  conduz e o diodo  $D_1$  corta, mas o sentido da corrente na carga não muda (figura 3.7).

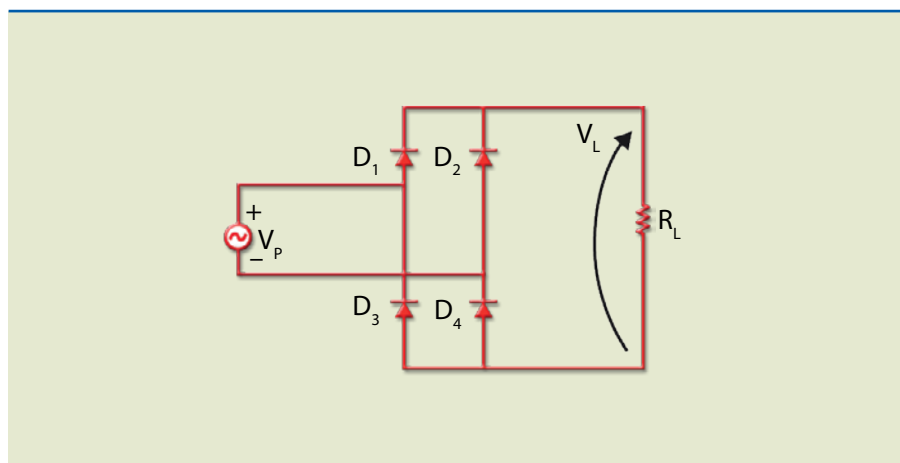
**Figura 3.7**  
Retificador de onda completa com *center tap* – condução no semiciclo negativo.



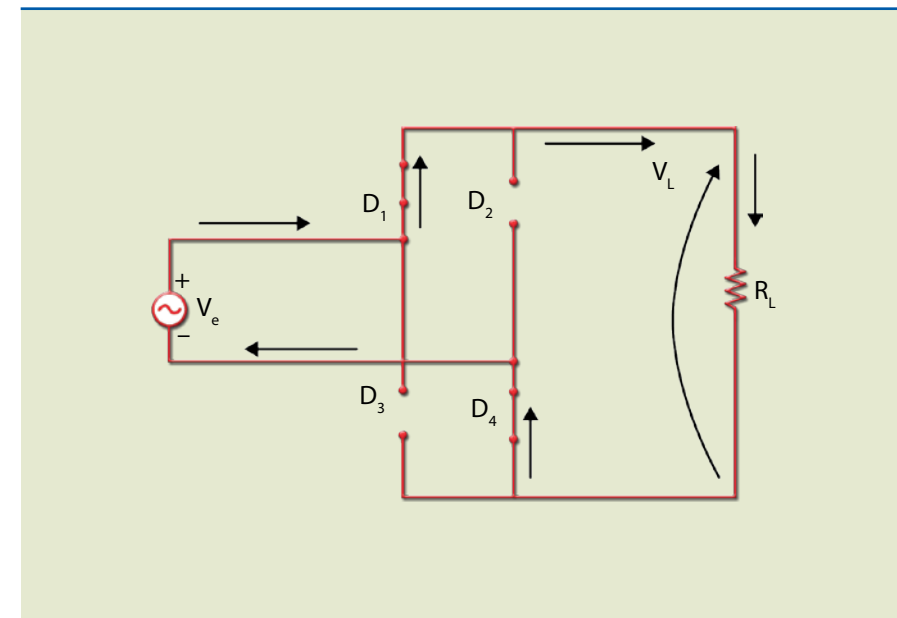
### 3.3.2 Retificador de onda completa em ponte

O retificador de onda completa apresentado na figura 3.8 não necessita de transformador com tomada central (somente quando há intenção de transformar a tensão) e utiliza quatro diodos. A tensão de entrada ( $V_e$ ) pode ser tanto a tensão da rede como a do secundário de um transformador.

**Figura 3.8**  
Retificador de onda completa em ponte.

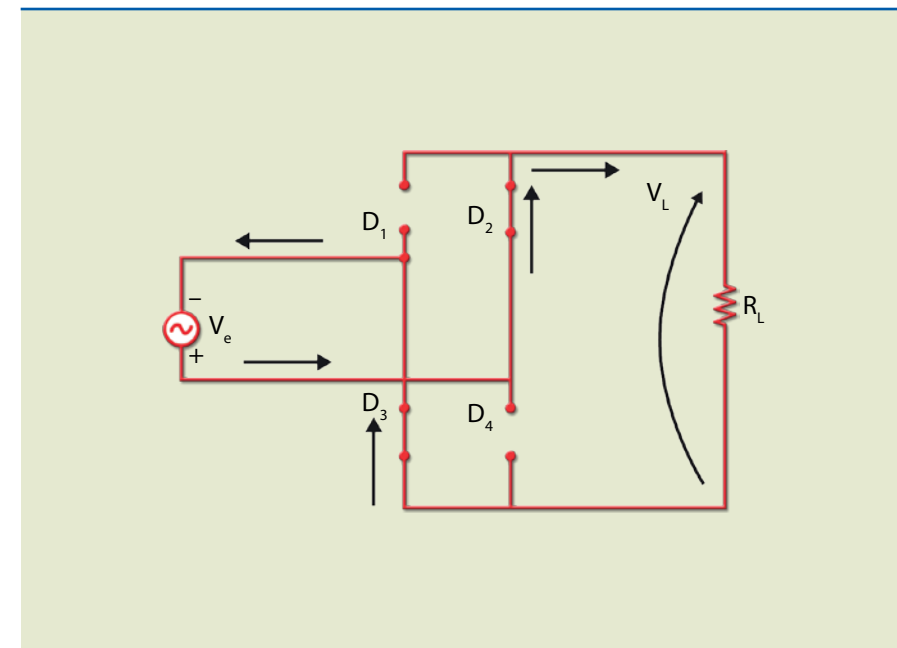


Observando a tensão senoidal aplicada na entrada, pode-se perceber que, durante o semiciclo positivo da tensão de entrada, os diodos  $D_1$  e  $D_4$  estão polarizados diretamente e os diodos  $D_2$  e  $D_3$  cortados. Como existem dois diodos conduzindo ao mesmo tempo e eles estão em série, a queda de tensão será de 1,4 V. Isso significa que, para haver tensão na carga, a tensão de entrada deve ser maior que 1,4 V.



**Figura 3.9**  
Retificador de onda completa em ponte – condução no semiciclo positivo.

Como mostra a figura 3.10, no semiciclo negativo, invertem-se as condições: os diodos  $D_2$  e  $D_3$  conduzem e os diodos  $D_1$  e  $D_4$  estão cortados; o sentido da corrente na carga continua o mesmo.



**Figura 3.10**  
Retificador de onda completa em ponte – condução no semiciclo negativo.

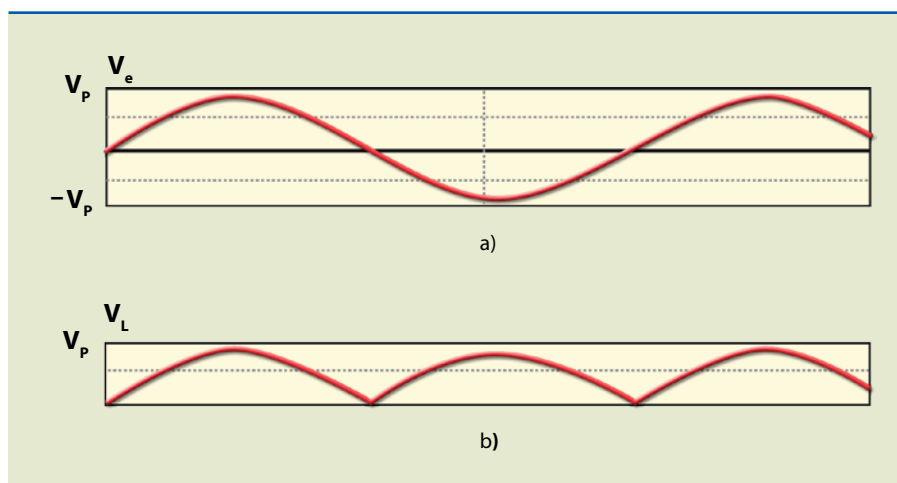
A máxima tensão de pico inversa que cada diodo deve suportar é aproximadamente  $-V_P$ , em que  $V_P$  é o valor de pico da tensão senoidal de entrada.

A figura 3.11 ilustra as formas de onda de entrada e na carga. Observe a perda de tensão (1,4 V) ao longo do caminho da corrente. Esse valor deve ser descontado no cálculo da tensão média e da tensão eficaz na carga.



**Figura 3.11**

Formas de onda: (a) de entrada e (b) na carga.



Calcula-se a tensão contínua na carga por:

$$V_{CC} = \frac{2 \cdot (V_P - 1,4 V)}{\pi}$$

Para essa mesma forma de onda, o valor eficaz (tensão medida por um voltímetro RMS) é obtido por:

$$V_{RMS} = \frac{V_P - 1,4 V}{\sqrt{2}}$$

**Dimensionamento do diodo**

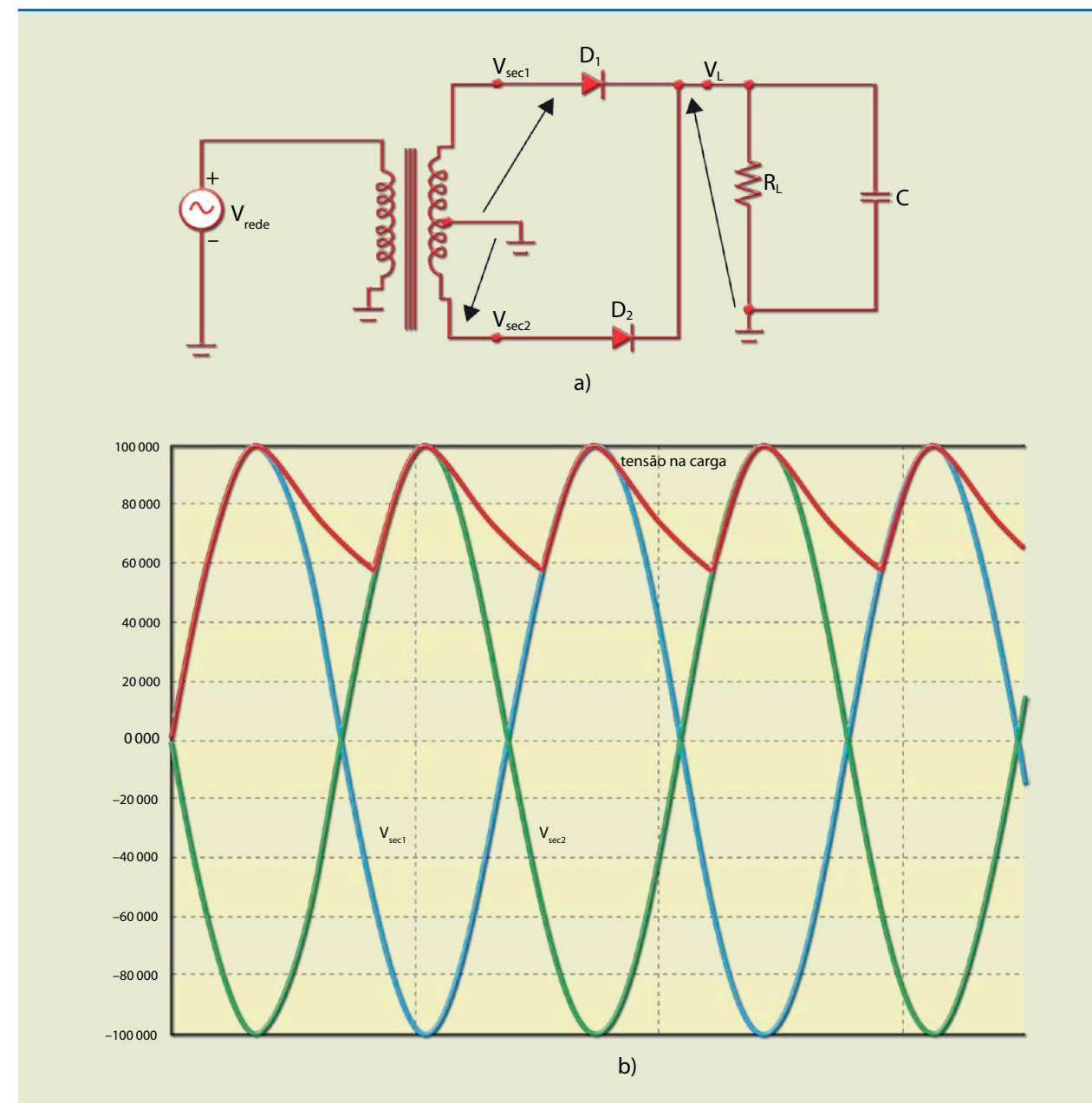
Para esse circuito, o diodo deve ter no mínimo os seguintes limites:

- $V_{RRM} > V_P$
- $I_{AV} > \frac{V_P}{R_L \cdot \pi}$
- Máxima tensão eficaz:  $V_{RMS} > \frac{V_P}{\sqrt{2}}$
- Máxima tensão contínua reversa:  $V_{CC} > \frac{2 \cdot V_P}{\pi}$

**3.4 Retificador de onda completa com filtro capacitivo**

Como apresentado no retificador de meia onda, a adição de um capacitor diminui o *ripple* e aumenta o valor da tensão contínua. A figura 3.12 mostra os

gráficos das tensões no secundário e na carga para um valor de pico de tensão de entrada igual a 100 V, em circuito meia onda com capacitor.



Observando a figura 3.12, é possível notar o aumento em relação aos valores médio e eficaz, assim como a diminuição do *ripple*, em comparação com o retificador de meia onda, que utiliza valores semelhantes de capacitor e carga.

**3.5 Ponte retificadora como componente**

Para construir um retificador em ponte, podem ser utilizados quatro diodos ou um único componente com os quatro diodos conectados internamente. A figura 3.13 mostra o símbolo de uma ponte retificadora.

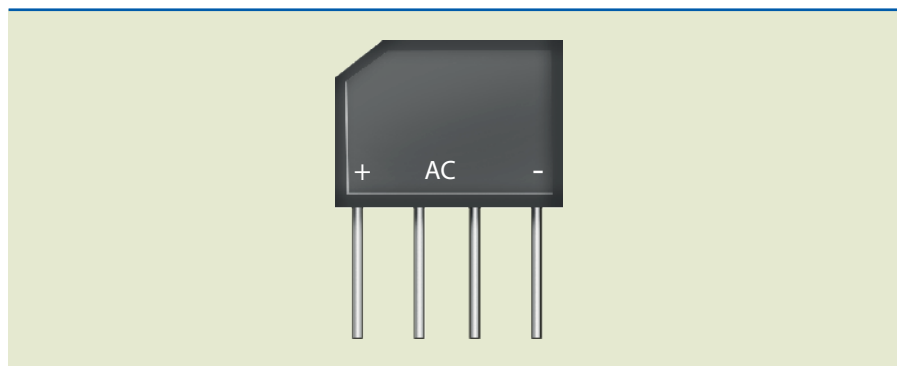
**Figura 3.12**

Retificador de onda completa com filtro capacitivo: (a) circuito e (b) formas de onda da tensão na carga e de entrada (secundário do transformador).



**Figura 3.13**

Ponte com indicação dos terminais.

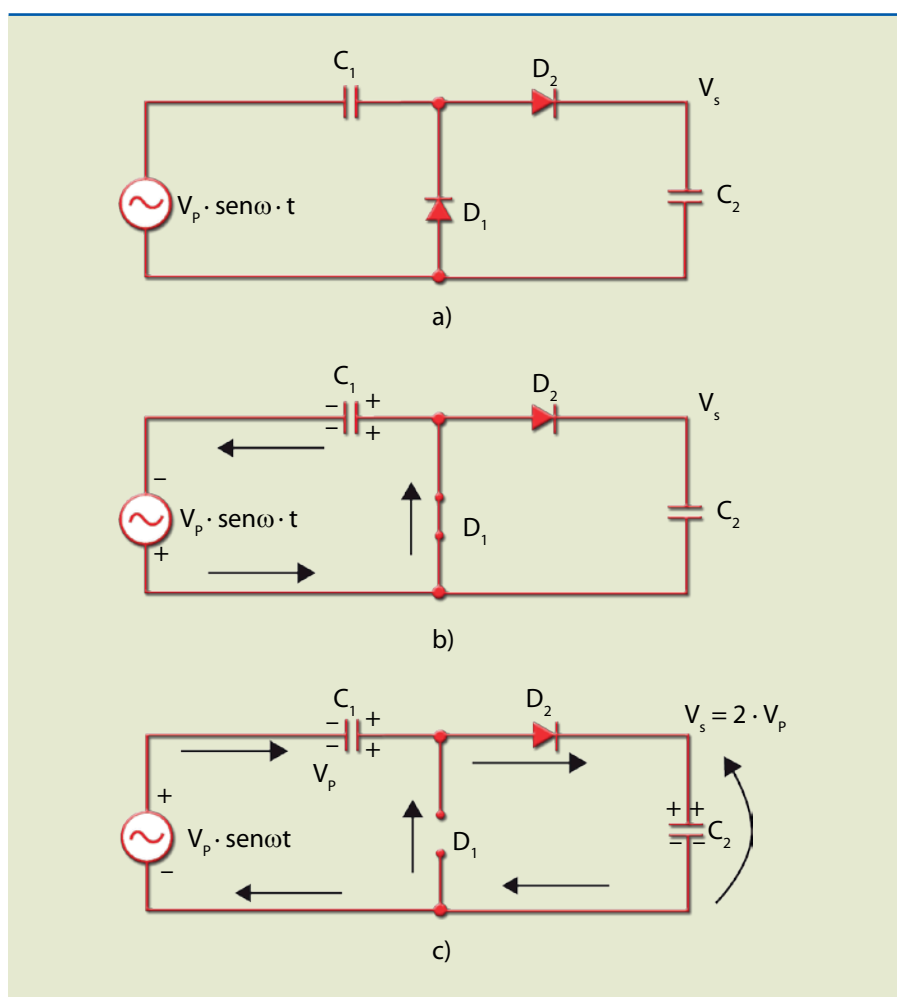


### 3.6 Dobrador de meia onda

É um circuito eletrônico utilizado para obter valores elevados de tensões CC a partir de tensão CA. No circuito da figura 3.14a, a entrada é senoidal, com  $V_p$  de pico. No semiciclo negativo, o capacitor ( $C_1$ ) se carregará com o valor de pico da tensão de entrada e, com a polaridade indicada na figura 3.14b, o diodo  $D_1$  conduzirá e o  $D_2$  estará cortado. No semiciclo positivo (figura 3.14c), o diodo  $D_1$  cortará e o  $D_2$  conduzirá, fazendo  $C_2$  se carregar até aproximadamente  $2 \cdot V_p$ .

**Figura 3.14**

- (a) Dobrador de meia onda;
- (b) carga de  $C_1$  durante o semiciclo negativo;
- (c) carga de  $C_2$  durante o semiciclo positivo.

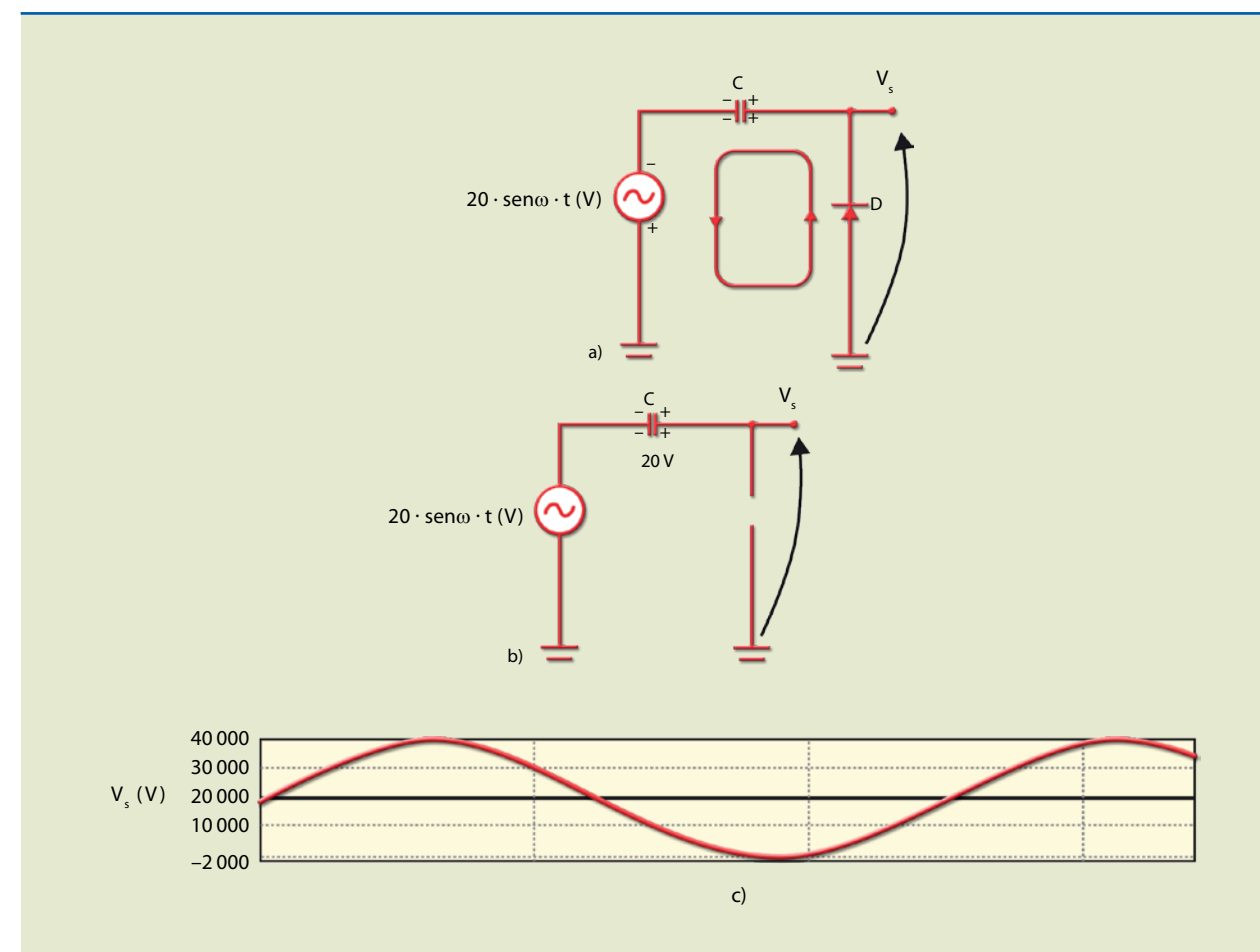


### 3.7 Grampeador de tensão

É um circuito que adiciona um nível CC (positivo ou negativo) a uma tensão alternada. No semiciclo negativo (figura 3.15a), o diodo conduz e o capacitor se carrega com o valor de pico da tensão de entrada (20 V). No semiciclo positivo (figura 3.15b), o diodo corta e a tensão na saída passa a ser  $20 \cdot \text{sen}\omega t + 20$ . Observe que esse circuito é a primeira parte do dobrador de tensão apresentado na seção 3.6. A figura 3.15c mostra a forma de onda.

**Figura 3.15**

- Grampeador positivo:
- (a) semiciclo negativo,
- (b) semiciclo positivo e
- (c) forma de onda.



Se o diodo for invertido à senoide, será adicionado um valor médio negativo.

### 3.8 Limitadores

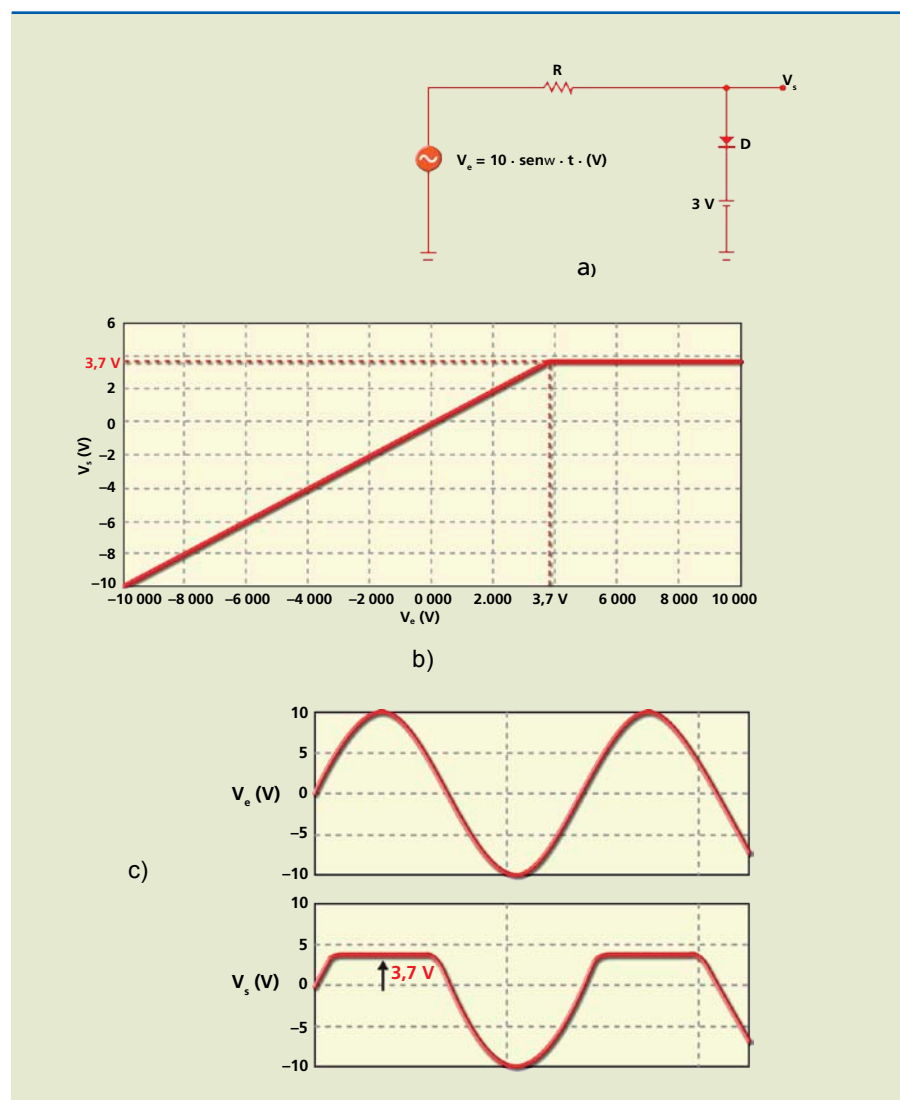
São circuitos que limitam a tensão entre dois valores, usados, em geral, para proteger um circuito contra excesso de tensão. Na figura 3.16a, enquanto a tensão de entrada for menor que 3,7 V (3 V da bateria e 0,7 V do diodo), o diodo permanecerá cortado e a tensão de saída será igual à de entrada ( $V_s = V_e$ ); quando  $V_e$  for maior que 3,7 V, o diodo conduzirá e a tensão de saída será constante, igual a 3,7 V (3 + 0,7). A figura 3.16b mostra a curva de transferência, que é o gráfico que relaciona a tensão de saída com a de entrada, e a figura 3.16c, as formas de onda de entrada e de saída.





**Figura 3.16**

- (a) Circuito limitador;
- (b) curva de transferência e
- (c) formas de onda de entrada e de saída.

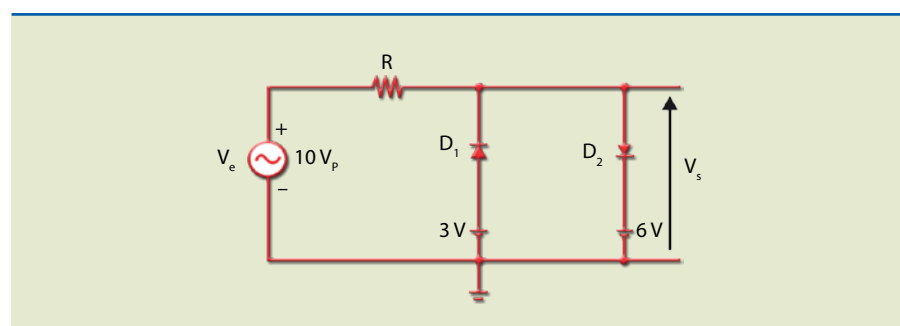


**Exemplo**

Com base no circuito da figura 3.17:

- a) desenhar a curva de transferência ( $V_s \times V_e$ );
- b) desenhar a tensão na saída, considerando a entrada senoidal, com  $10 V_{pico}$ , em modelo com bateria (0,7 V).

**Figura 3.17**

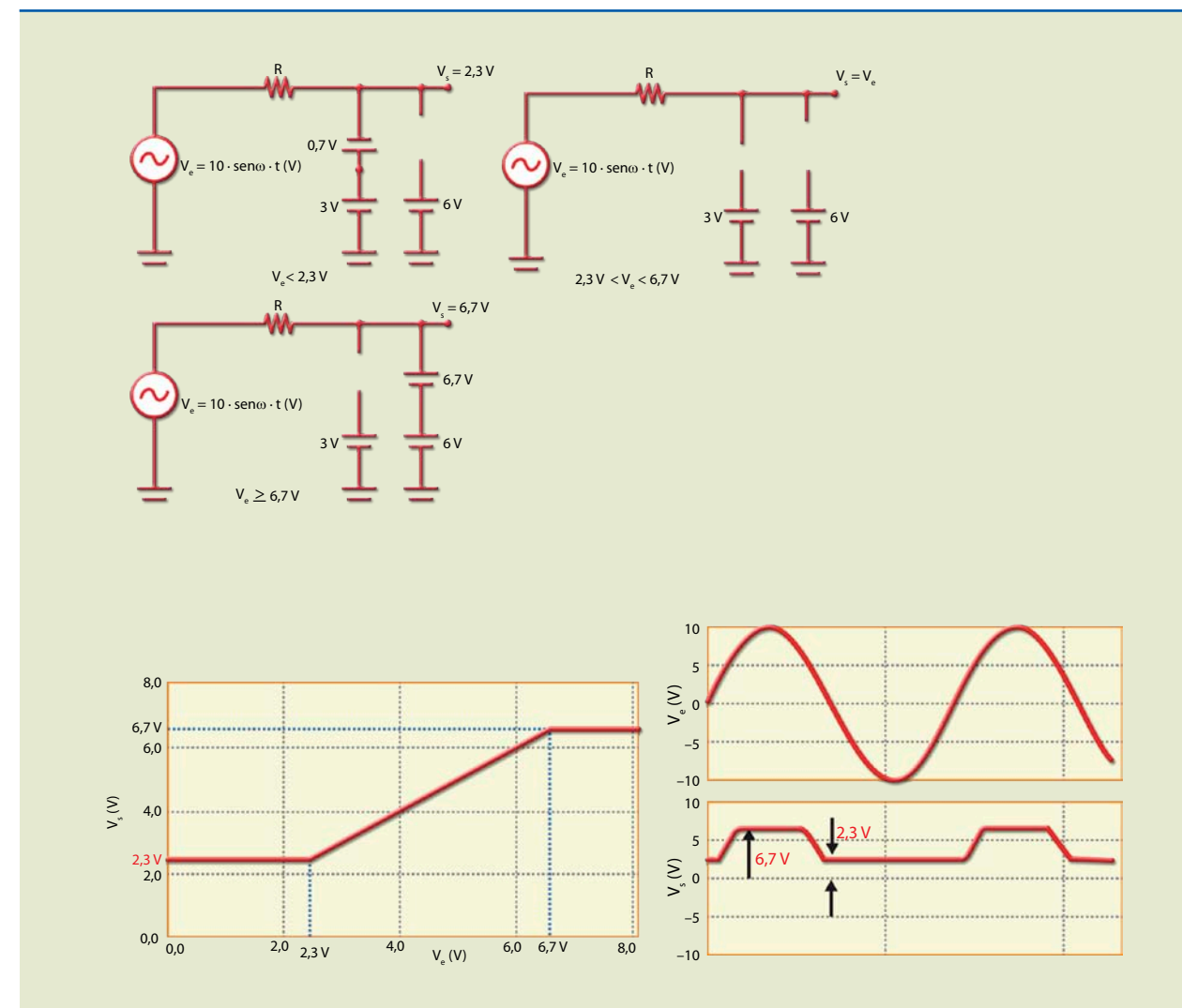


**Solução:**

a) Existem dois pontos de transição. O primeiro ocorre em 2,3 V e o segundo, em 6,7 V. Se  $V_e < 2,3 V$ , o diodo  $D_1$  conduzirá e o  $D_2$  cortará; portanto, a saída será igual a 2,3 V. Se  $V_e > 2,3 V$  e  $V_e < 6,7 V$ , os dois diodos estarão cortados; assim, a saída será igual à entrada. Se  $V_e > 6,7 V$ , o diodo  $D_2$  conduzirá e o  $D_1$  cortará; desse modo, a saída será igual a 6,7 V.

b) Figura 3.18

**Figura 3.18**



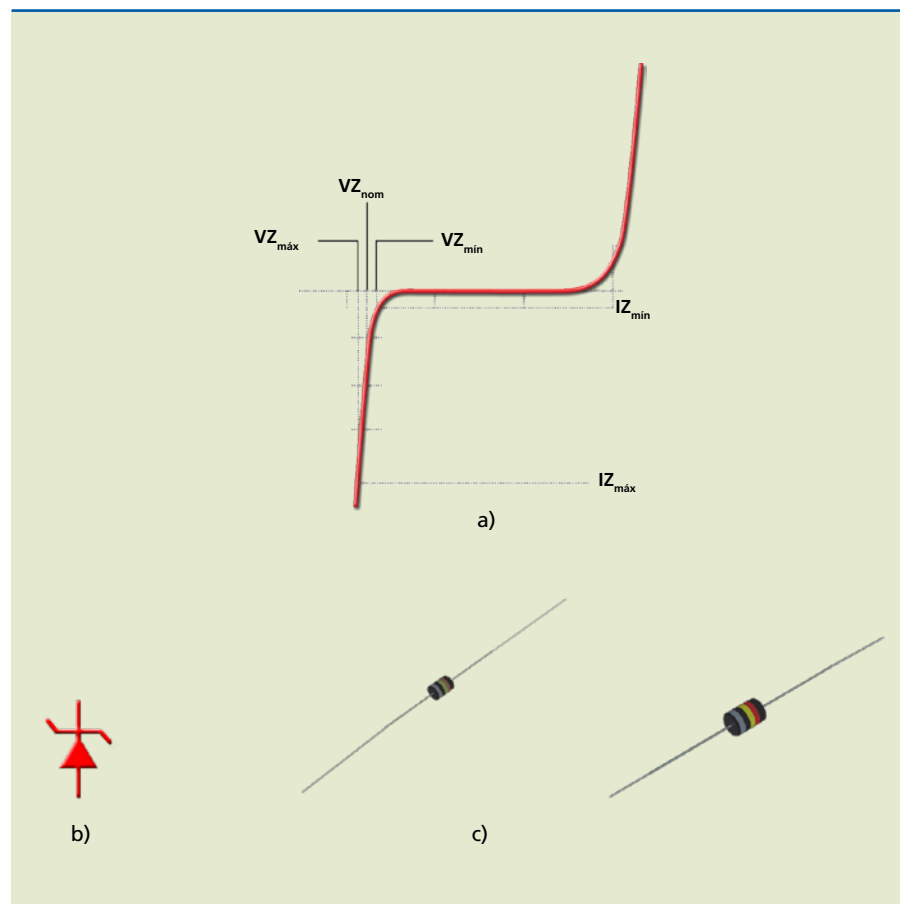
**3.9 Diodo Zener**

Os diodos Zener são projetados para operar na região de ruptura, onde grandes variações de corrente produzem pequenas variações de tensão, permitindo, assim, que se construa um regulador de tensão. A figura 3.19 mostra a curva característica com a região de operação, no joelho, o símbolo e o aspecto físico do diodo Zener.



**Figura 3.19**

Diodo Zener:  
 (a) curva característica,  
 (b) símbolo e  
 (c) aspecto físico.



A região de trabalho do diodo Zener está compreendida entre  $I_{Zmin}$  (menor corrente que mantém a regulação) e  $I_{Zmax}$  (máxima corrente antes de ocorrer a destruição do componente por efeito Joule). Estão associados aos valores de corrente máxima e mínima os valores de tensão (que são muito próximos). A tensão nominal é a tensão de especificação ( $V_{Znom}$ ). Outra especificação importante é a potência máxima que o diodo pode dissipar ( $P_{Zmax}$ ). Esse valor está relacionado à tensão aproximadamente por:

$$P_{Zmax} = V_{Znom} \times I_{Zmax} \text{ (visto que } V_{Znom} \text{ é aproximadamente igual a } V_{Zmax}\text{).}$$

Em geral, podemos estimar  $I_{Zmin}$  por:

$$I_{Zmin} = \frac{I_{Zmax}}{10} \text{ e } I_{Zmax} = \frac{P_{Zmax}}{V_{Znom}}$$

Os valores de potência mais conhecidos são: 0,25 W, 0,5 W, 1 W, 5 W, 10 W e 50 W.

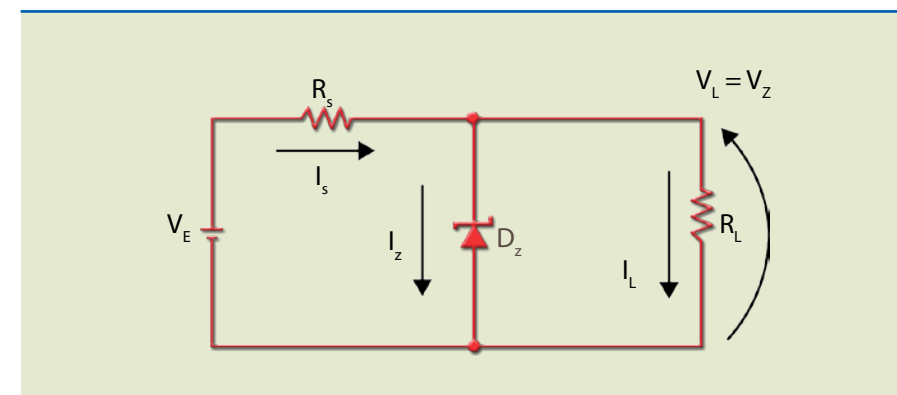
Os valores de tensão Zener estão compreendidos entre 3,3 V e 75 V.

Exemplos de diodos Zener comerciais: 1N4729A para 3,6 V, 1N4730A para 3,9 V e 1N4735A para 6,2 V.

Se escolhermos o 1N4735A de 1 W, a máxima corrente que ele pode conduzir é:

$$I_{Zmax} = 1 \text{ W} / 6,2 \text{ V} = 161 \text{ mA}$$

e a mínima aproximadamente 16 mA.



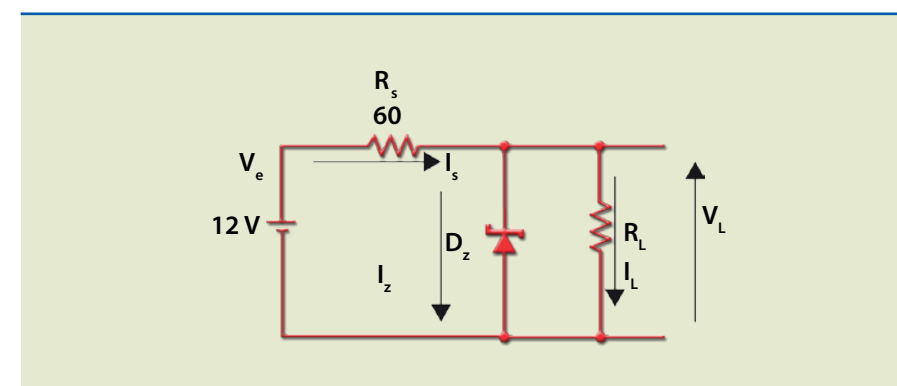
**Figura 3.20**

Circuito regulador com Zener.

No circuito da figura 3.20, a resistência  $R_S$  deve ser dimensionada considerando que o circuito mantenha a regulação mesmo que a carga varie entre um máximo e um mínimo e ao mesmo tempo a tensão de entrada varie entre dois limites ( $V_{emax}$  e  $V_{emin}$ ) e a potência dissipada no Zener não exceda o limite ( $P_{Zmax}$ ). Para que o Zener regule de maneira correta, a corrente não pode cair abaixo de um mínimo ( $I_{Zmin}$ ) nem superar um valor máximo, pois nesses casos o Zener sofrerá danos.

**Exemplo**

Considere o diodo Zener 1N4735 de 0,5 W ( $V_Z = 6,2 \text{ V}$ ,  $I_{Zmax} = 80 \text{ mA}$  e  $I_{Zmin} = 8 \text{ mA}$ ) instalado no circuito da figura 3.21. Determine os limites que pode ter  $R_L$  para que o Zener opere na região de regulação.



**Figura 3.21**



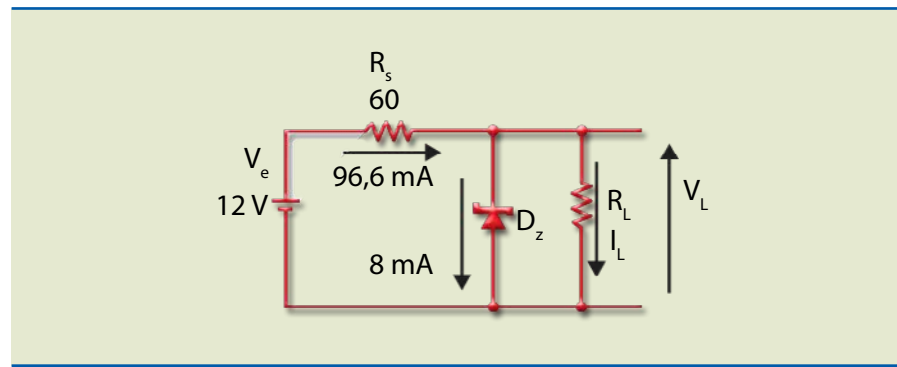
*Solução:*

Considerando que o Zener está operando normalmente ( $V_L = V_Z = 6,2 \text{ V}$ ), a corrente  $I_S$  valerá sempre:

$$I_S = \frac{12 \text{ V} - 6,2 \text{ V}}{0,06 \text{ k}} = 96,6 \text{ mA}$$

O que acontece se  $R_L$  diminuir seu valor? Passará a drenar maior valor de corrente, fazendo diminuir a corrente no Zener. Portanto, pode-se admitir que  $R_{L\text{min}}$  está associado à menor corrente no Zener. Vamos impor então  $I_Z = I_{Z\text{min}} = 8 \text{ mA}$ . Nessas condições, a corrente na carga  $R_L$  vale:

Figura 3.22

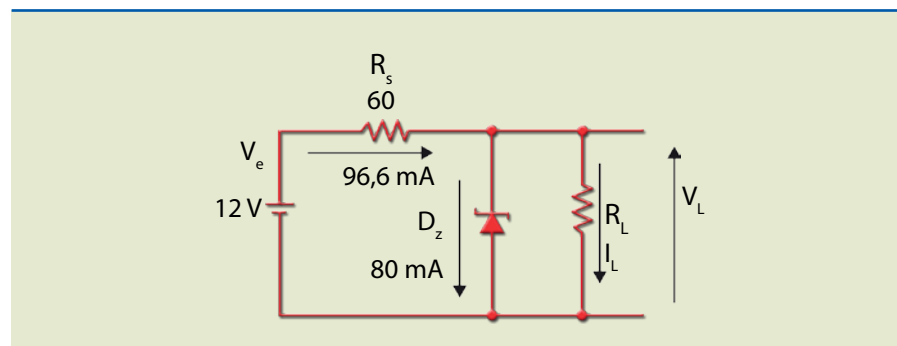


$I_L = 96,6 - 8 = 88,6 \text{ mA}$ , o que significa uma resistência de:

$$R_L = \frac{6,2 \text{ V}}{88,6 \text{ mA}} = 70 \Omega$$

No entanto, se  $R_L$  aumentar seu valor, conseqüentemente a corrente na carga diminuirá e a corrente no Zener aumentará. Por exemplo, se  $R_L$  for infinito (circuito aberto), toda a corrente em  $R_S$  (96,6 mA) circulará no Zener, o que resultará em sua destruição. Para evitar isso, é necessário que exista uma resistência de carga que drene o excesso de corrente. Consideremos agora o caso limite superior de corrente no Zener.

Figura 3.23



A corrente na carga será igual a:  $I_L = 96,6 - 80 = 16,6 \text{ mA}$ , o que significa uma resistência de:

$$R_L = \frac{6,2 \text{ V}}{16,6 \text{ mA}} = 376 \Omega$$

