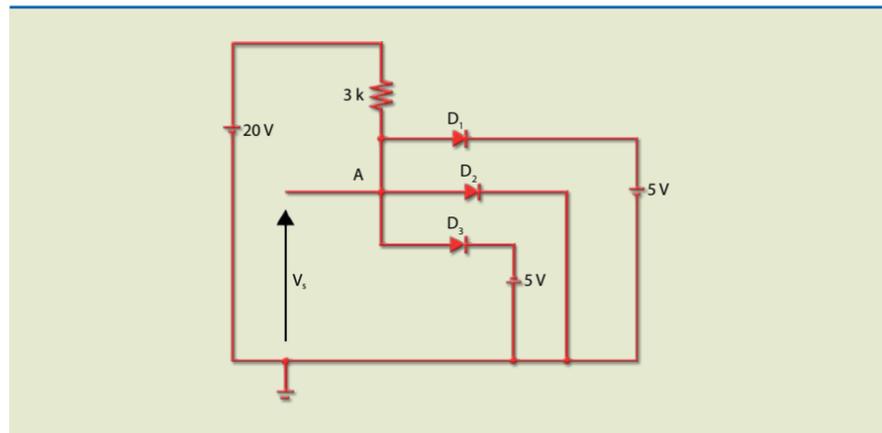


2. Determine a tensão V_s no esquema da figura 2.33, considerando os diodos ideais.

Figura 2.33

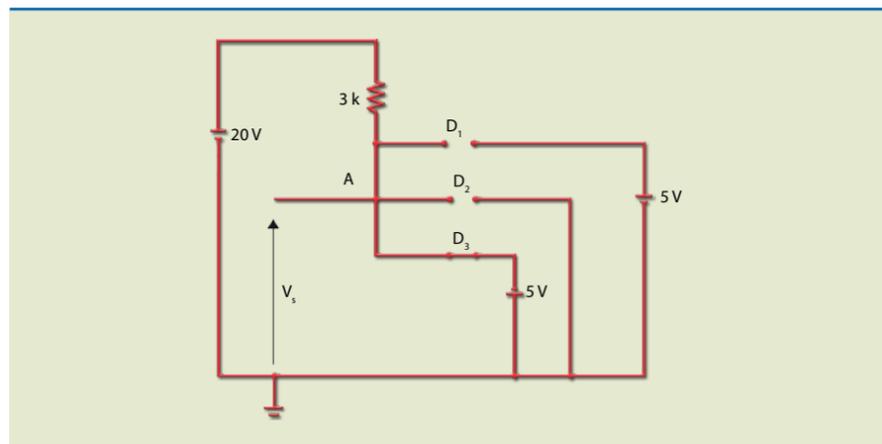


Solução:

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.

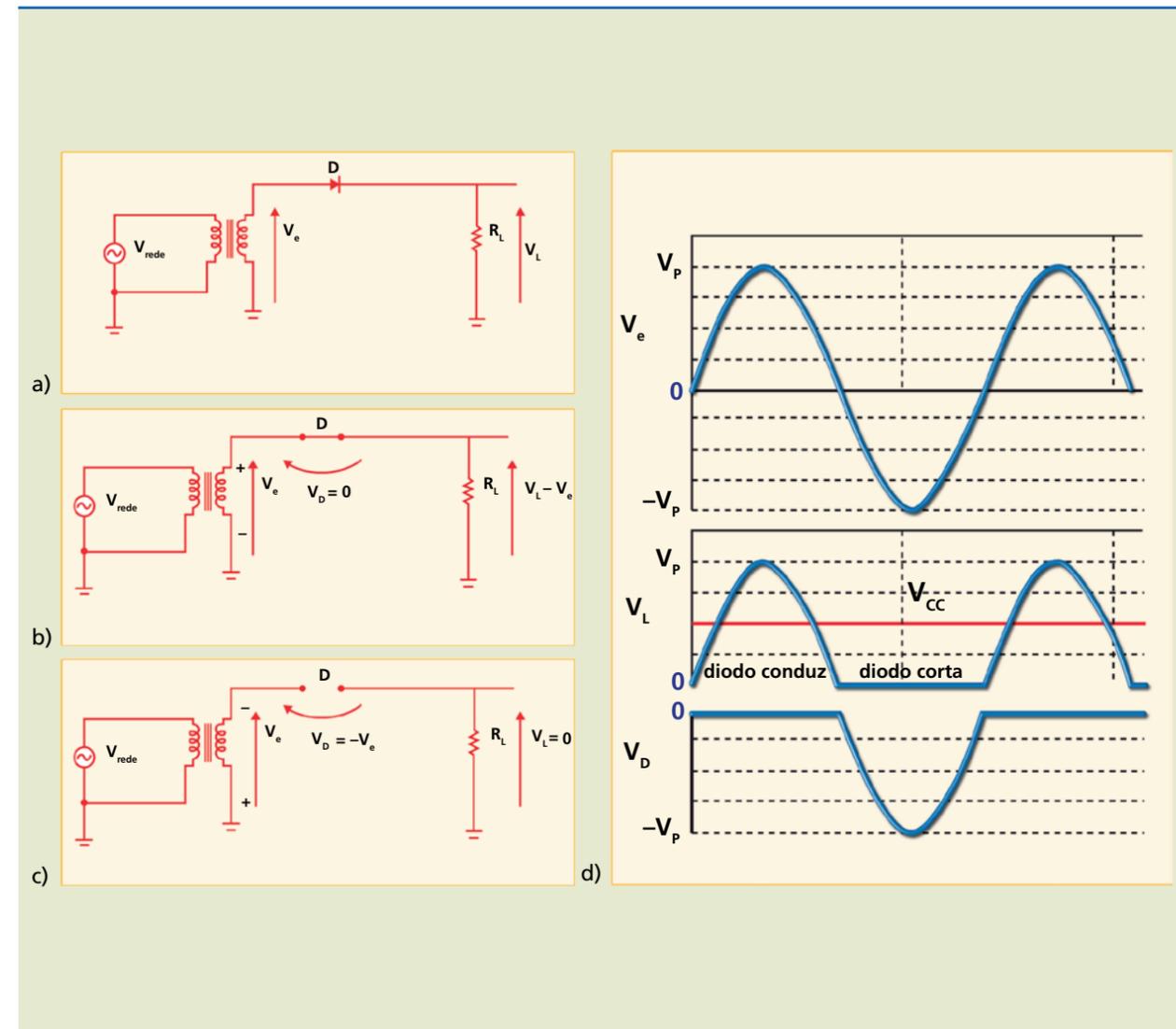


Figura 3.1

- (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:

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



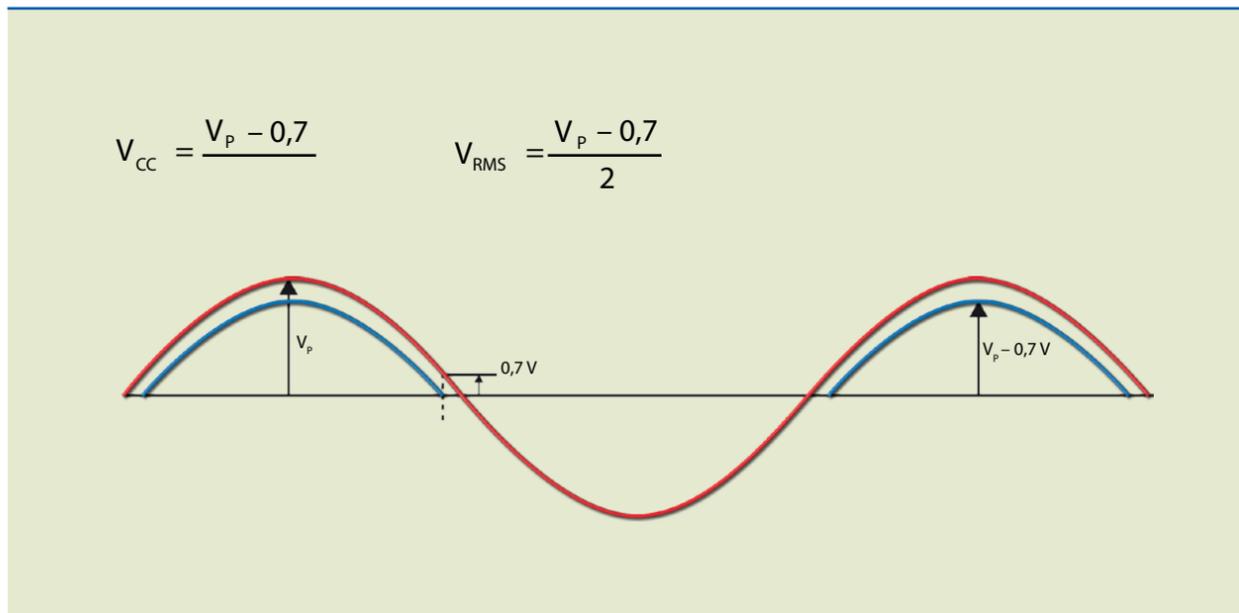


Figura 3.2

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.

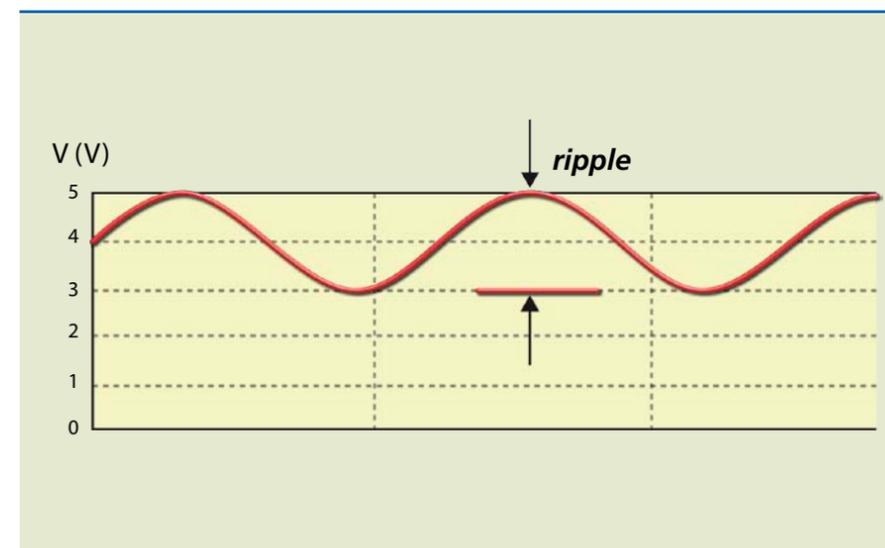


Figura 3.3

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:

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



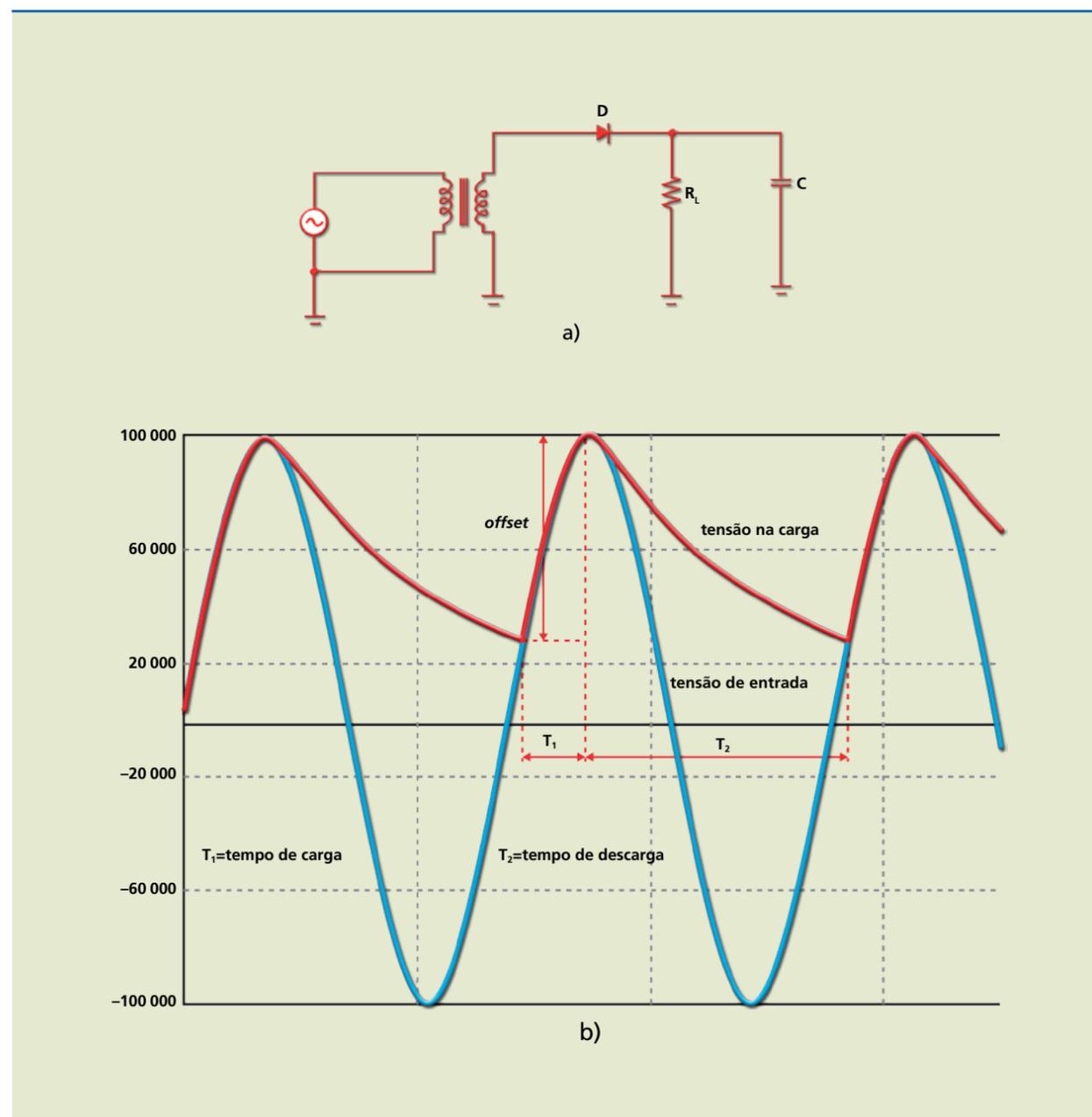
em que:

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).

- 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.



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° 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° 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° , isto é:

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



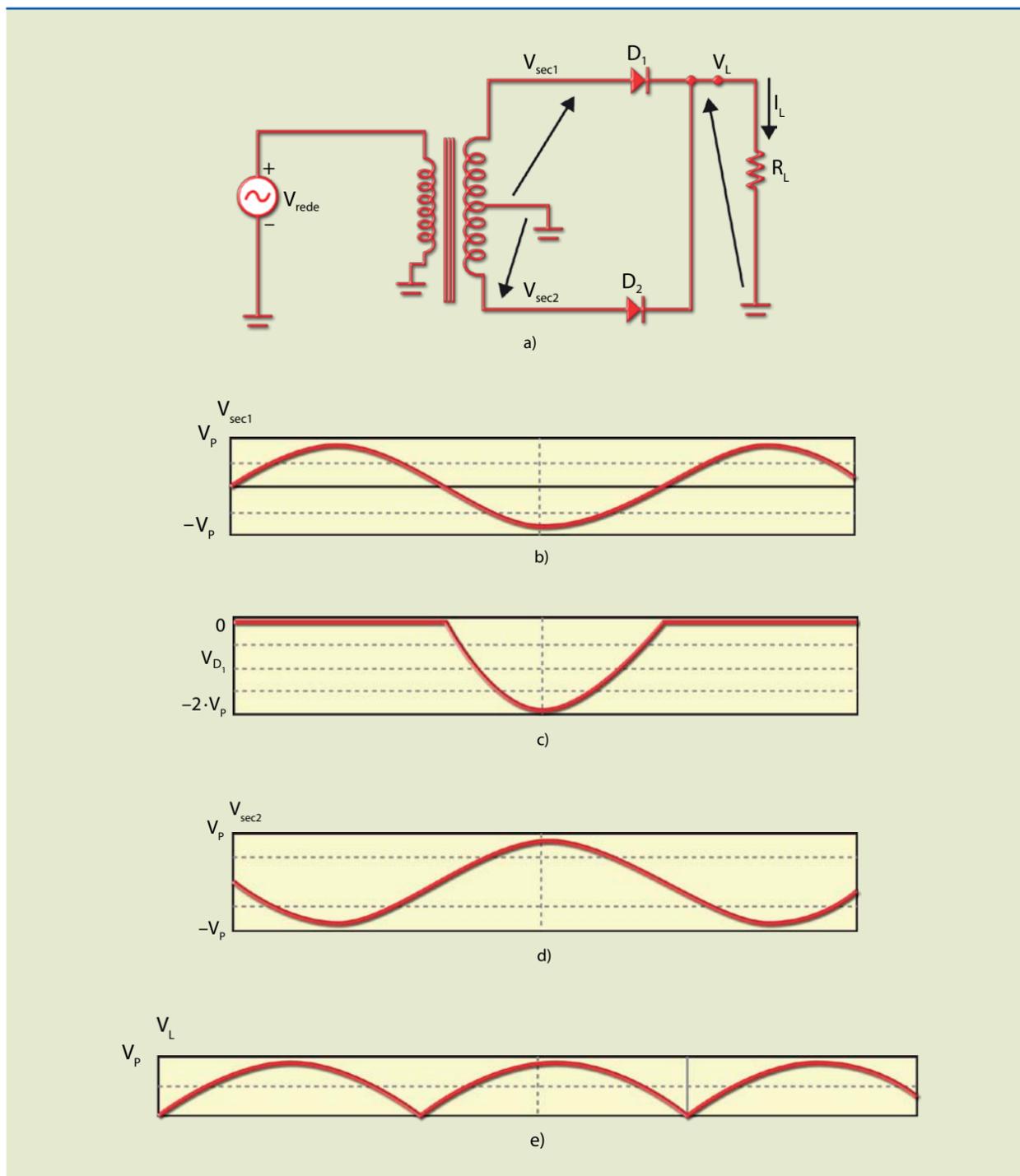


Figura 3.5

- (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).

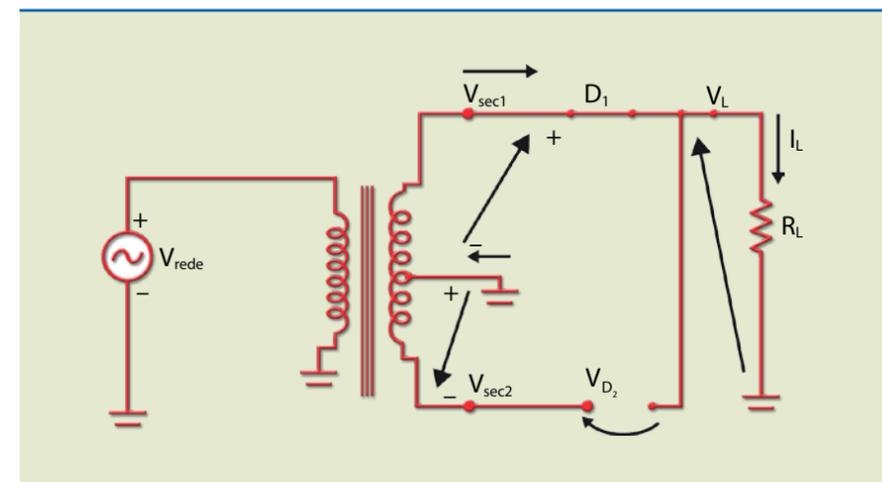


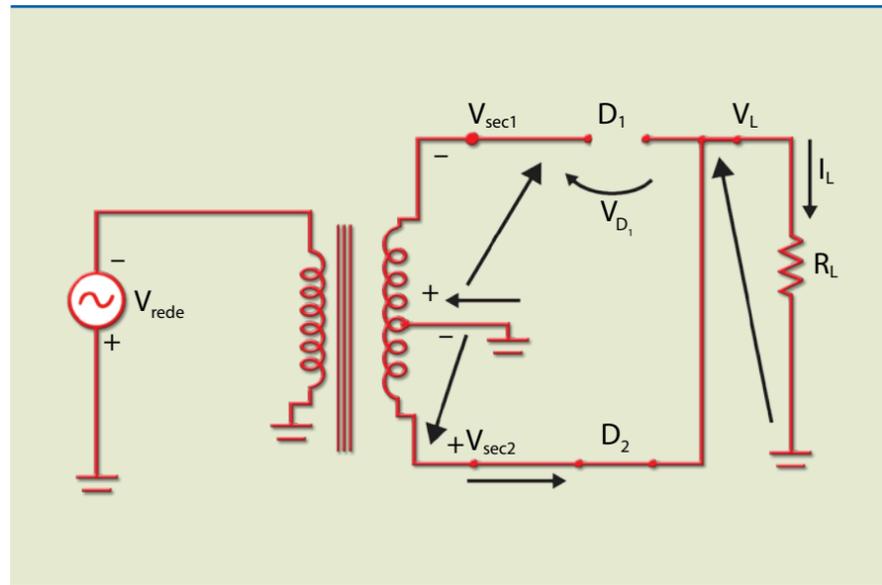
Figura 3.6

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).

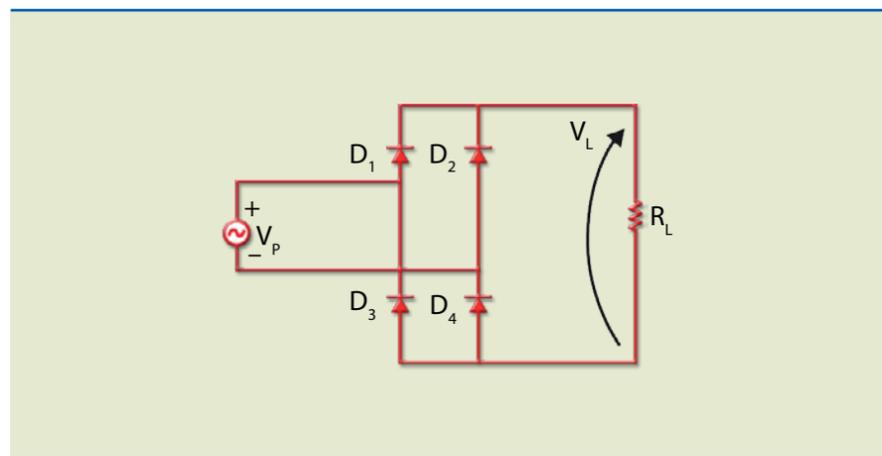
Figura 3.7
Retificador de onda completa com *center tap* – condução no semiciclo negativo.



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.

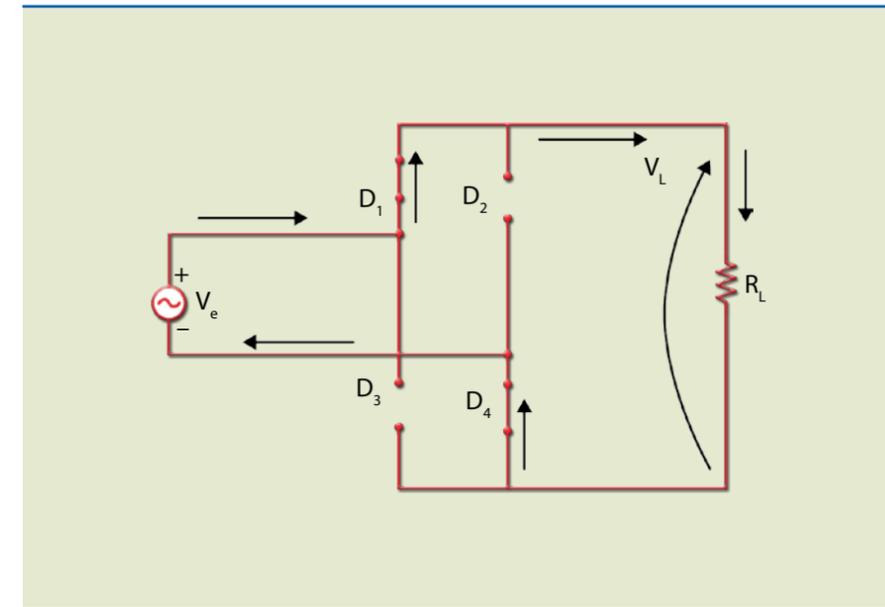


Figura 3.9
Retificador de onda completa em ponte – condução no semiciclo positivo.

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.

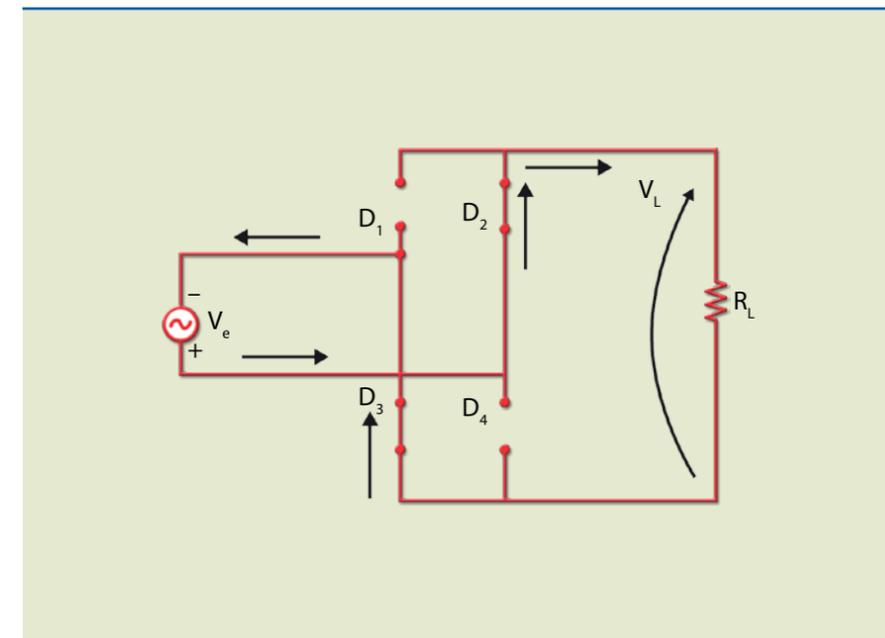


Figura 3.10
Retificador de onda completa em ponte – condução no semiciclo negativo.

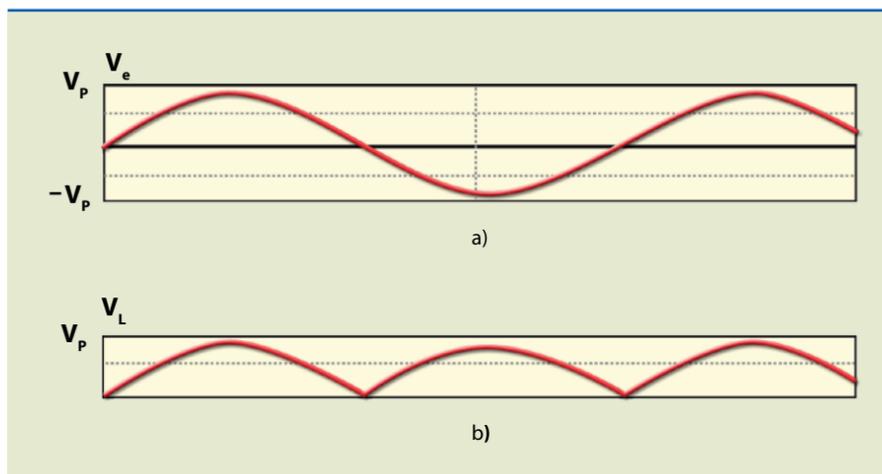
A máxima tensão de pico inversa que cada diodo deve suportar é aproximadamente $-V_p$, em que V_p é o valor de pico da tensão senoidal de entrada.

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

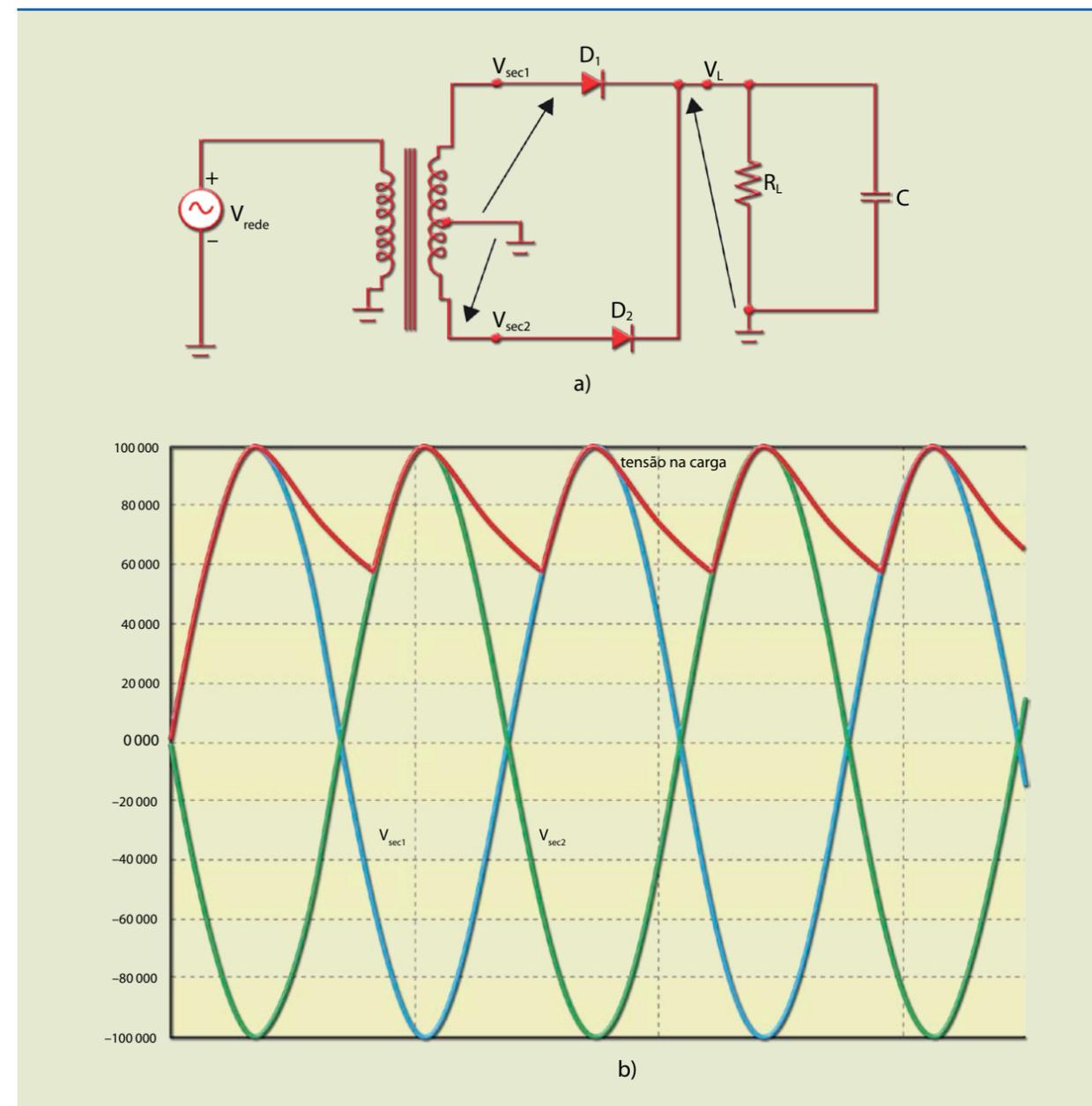
Para esse circuito, o diodo deve ter no mínimo os seguintes limites:

- $V_{RRM} > V_P$
- $I_{AV} > \frac{V_P}{R_L \cdot \pi}$
- 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.

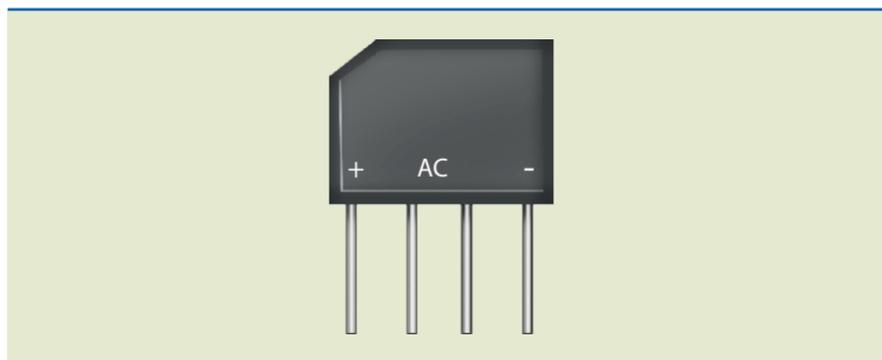
Figura 3.12

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.

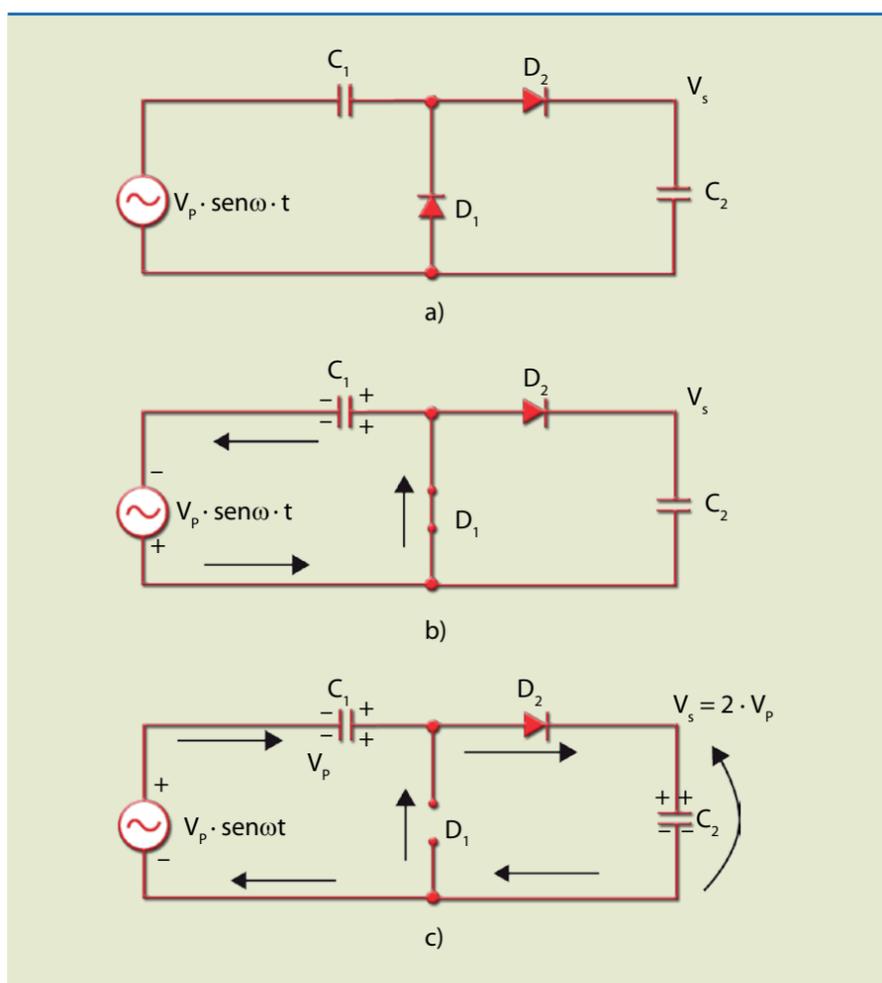


3.6 Dobrador de meia onda

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.

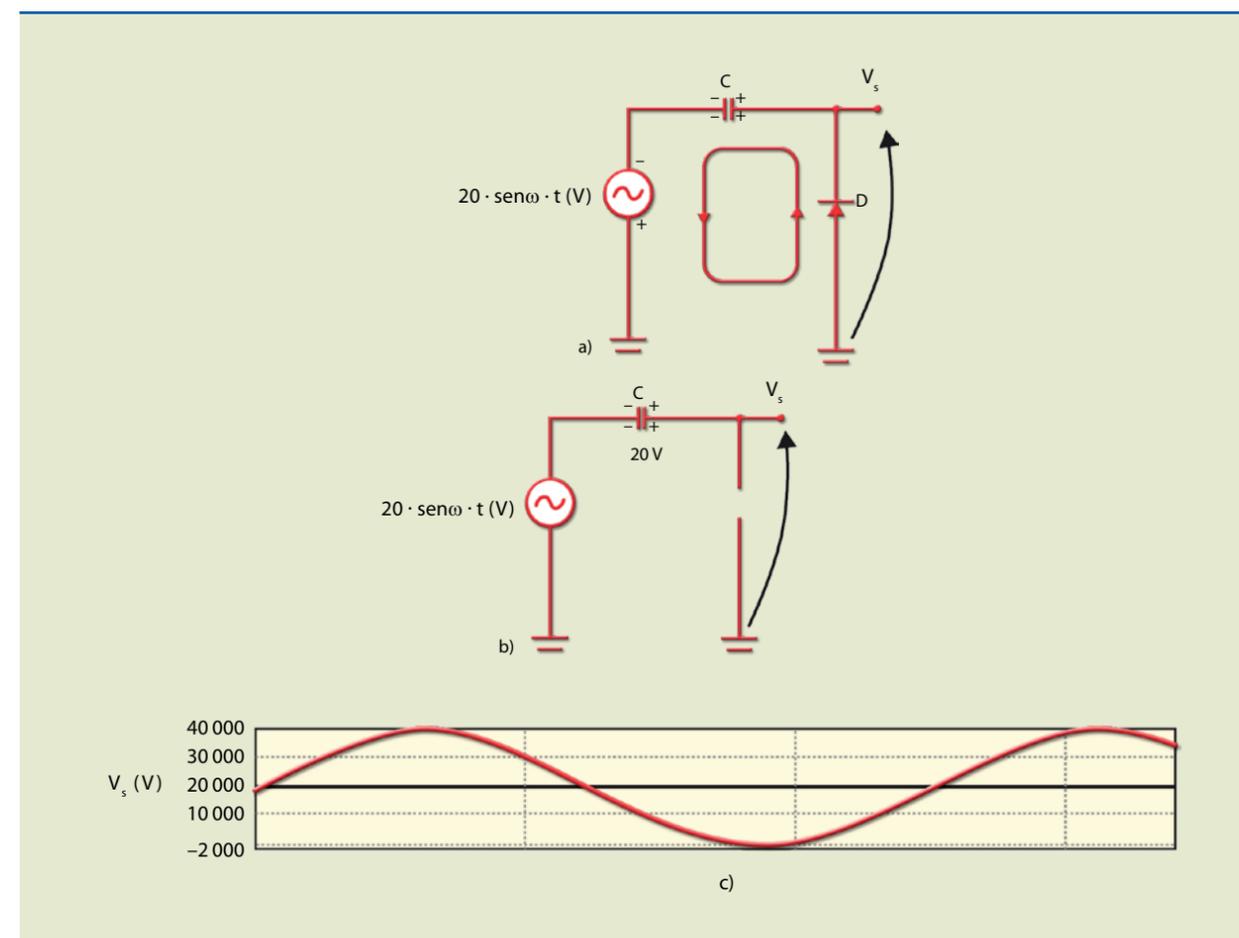


3.7 Grampeador de tensão

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.

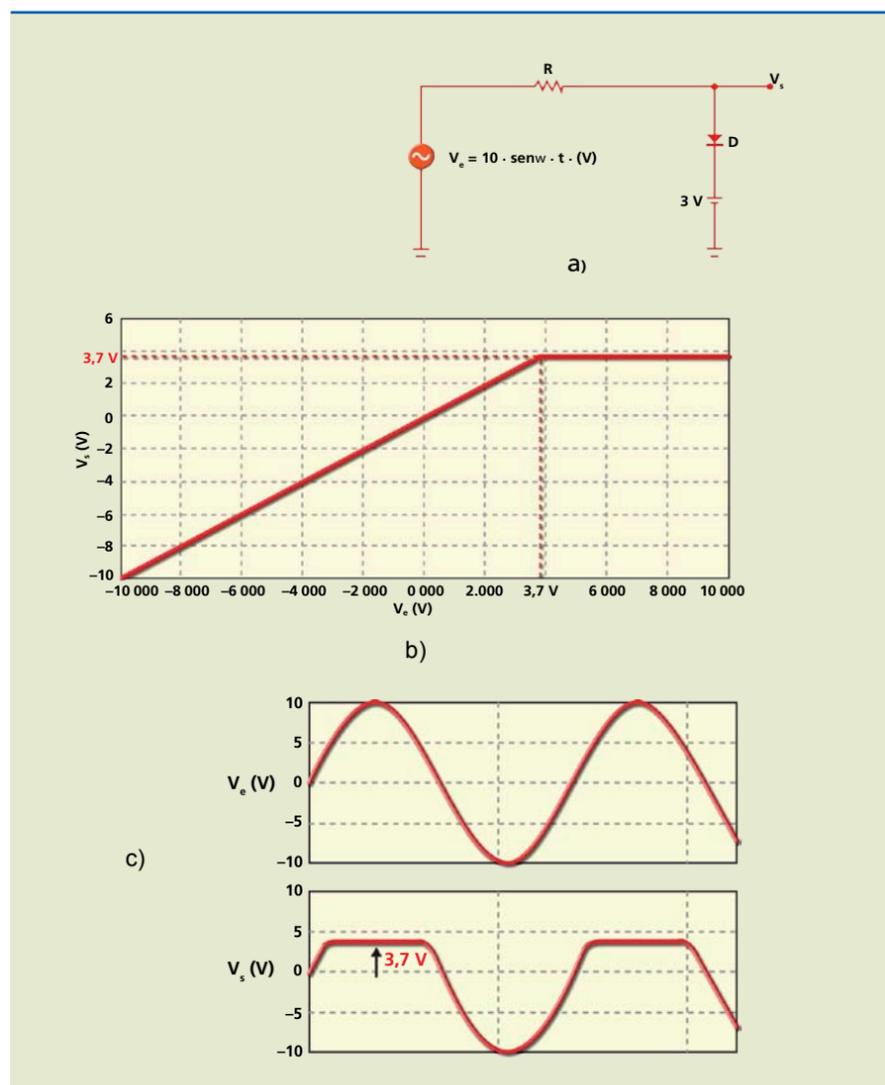
3.8 Limitadores

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.

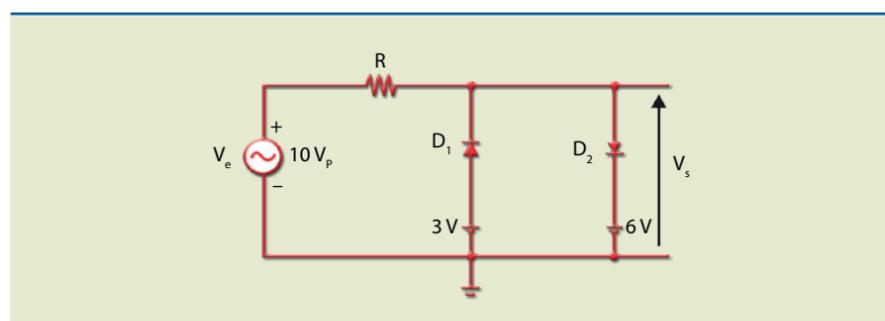


Exemplo

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

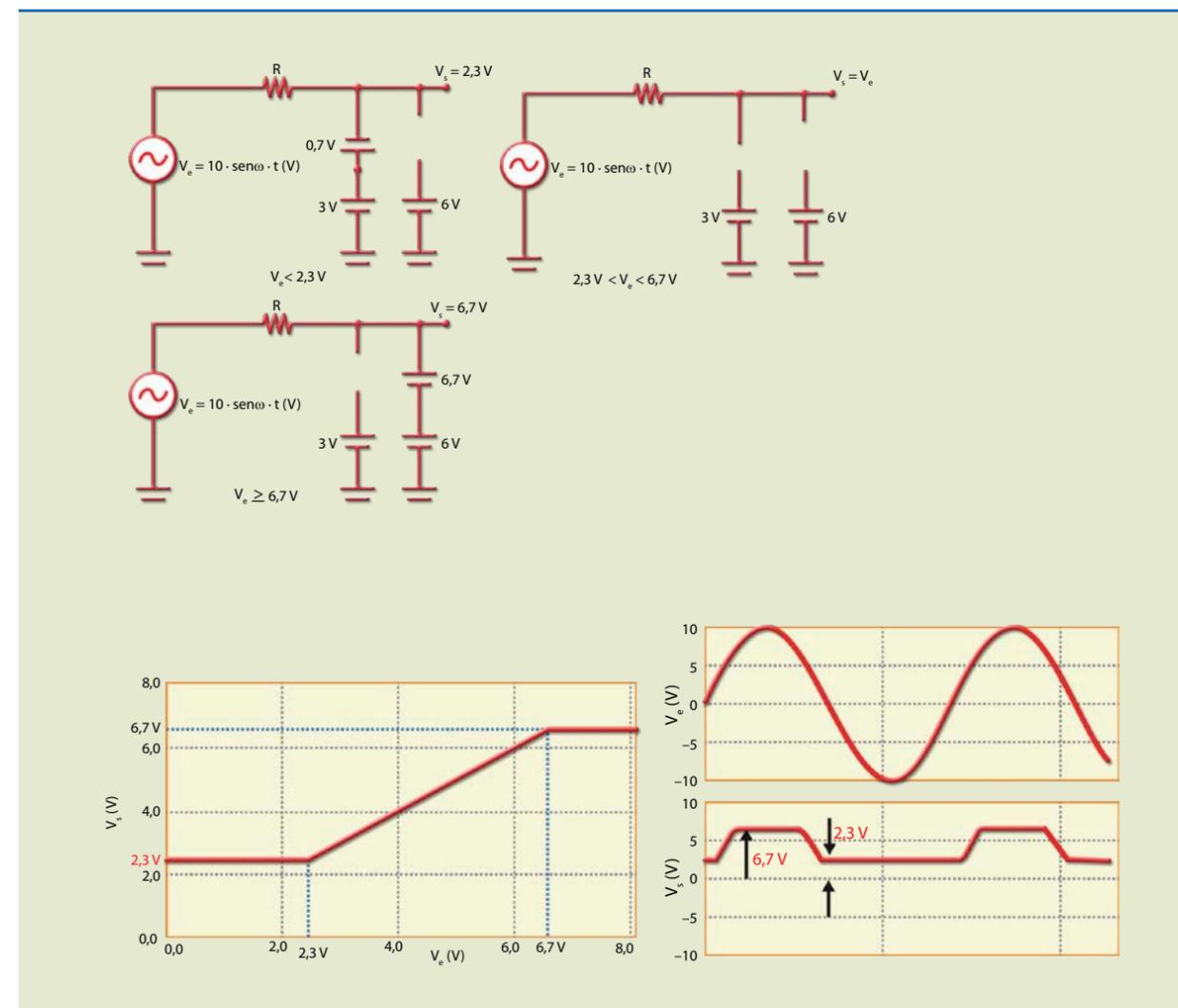


Solução:

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



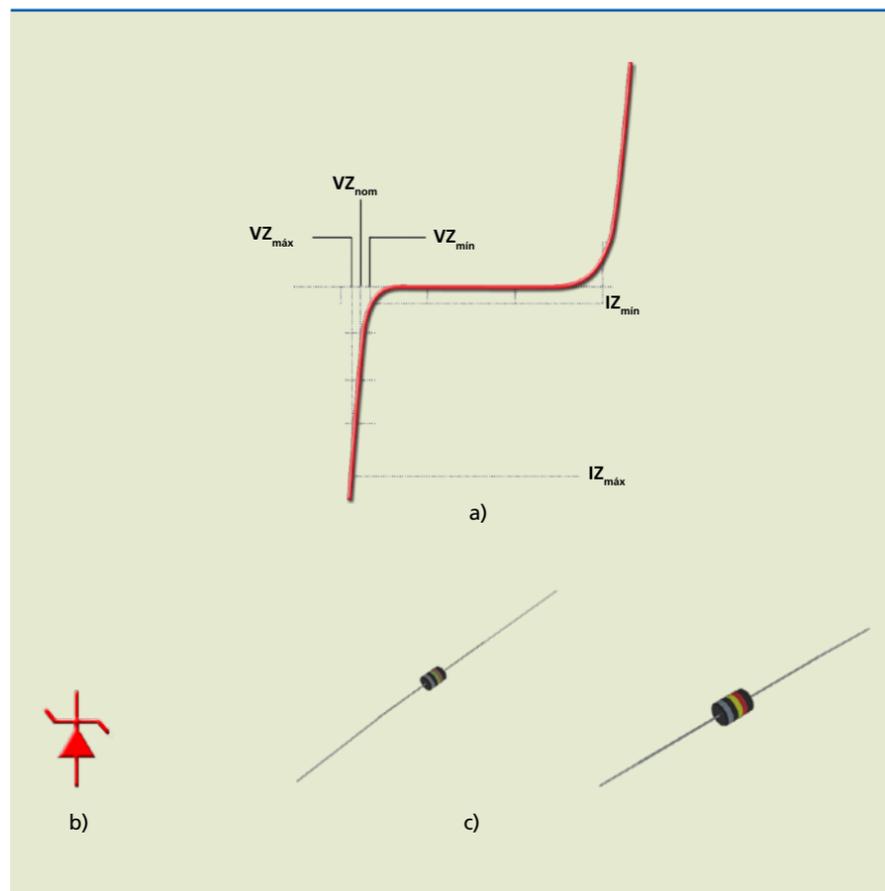
3.9 Diodo Zener

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 $I_{Zmáx}$ (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 ($P_{Zmáx}$). Esse valor está relacionado à tensão aproximadamente por:

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

Em geral, podemos estimar I_{Zmin} por:

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

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:

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

e a mínima aproximadamente 16 mA.

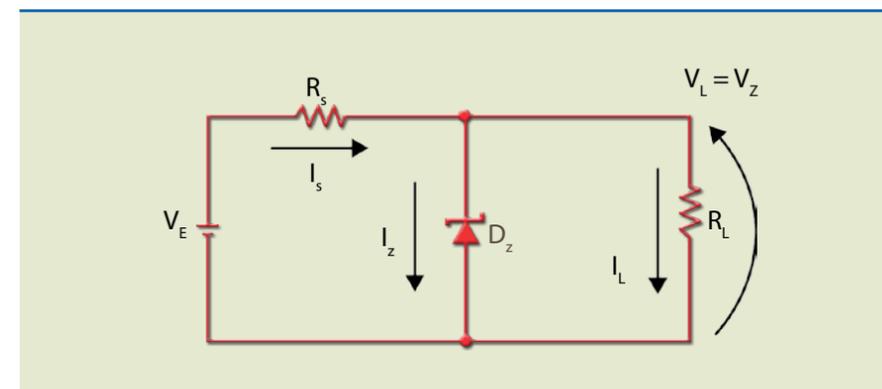


Figura 3.20

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 ($V_{emáx}$ e $V_{emín}$) e a potência dissipada no Zener não exceda o limite ($P_{Zmáx}$). 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 ($V_Z = 6,2 \text{ V}$, $I_{Zmáx} = 80 \text{ mA}$ 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.

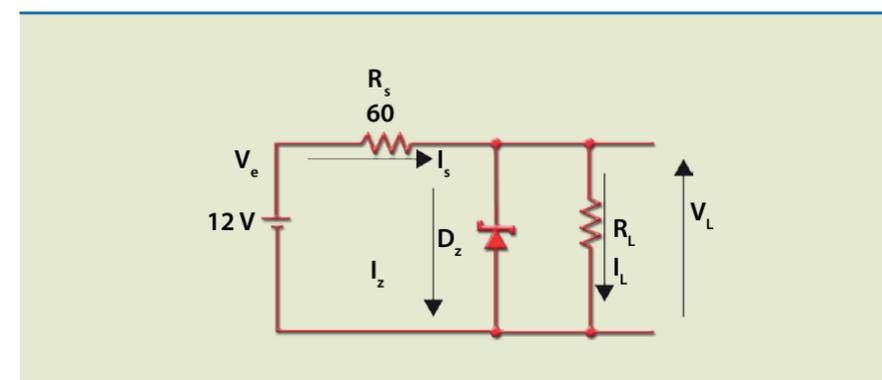


Figura 3.21



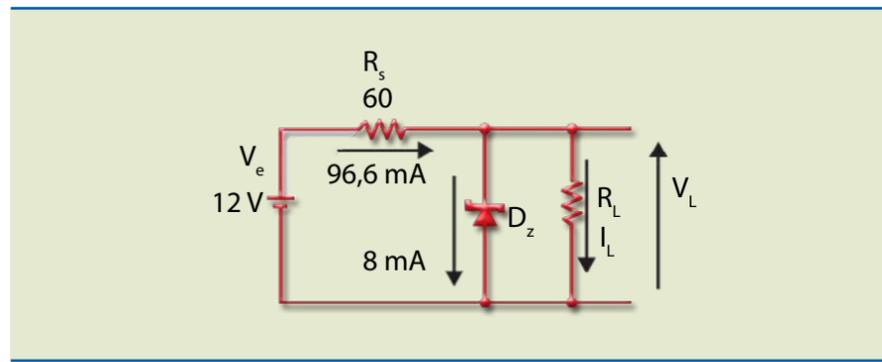
Solução:

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

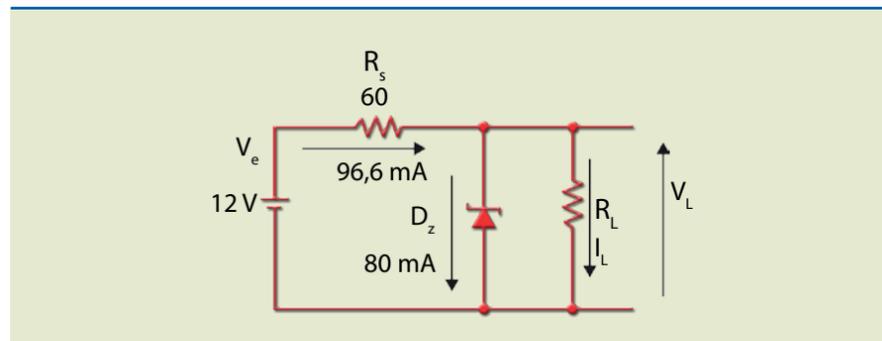


$I_L = 96,6 - 8 = 88,6 \text{ mA}$, o que significa uma resistência de:

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

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:

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

