

# Aplicações do Diodo 2



## 2.1 INTRODUÇÃO

A construção, as características e os modelos de diodos semicondutores foram introduzidos no Cap. 1. O objetivo inicial deste capítulo é desenvolver conhecimento suficiente do funcionamento do diodo em várias configurações, utilizando modelos apropriados para cada tipo de aplicação. Ao final do capítulo, o padrão fundamental de comportamento de diodos em circuitos dc e ac deve estar perfeitamente compreendido. Os conceitos aprendidos neste capítulo terão importância significativa nos capítulos seguintes. Por exemplo, diodos são frequentemente empregados na descrição da fabricação de transistores e na análise, nos domínios dc e ac, de circuitos que empregam transistores.

O conteúdo deste capítulo irá revelar um lado interessante e muito positivo do estudo de áreas como dispositivos e sistemas eletrônicos — uma vez entendido o comportamento básico de um dispositivo, sua função e resposta podem ser determinadas para uma variedade infinita de configurações. A faixa de aplicação não tem limites, ainda que as características e modelos permaneçam os mesmos. A análise desenvolvida será desde a que emprega a característica real do diodo até a que utiliza modelos aproximados quase que exclusivamente. Torna-se importante que o papel e a resposta de vários elementos em um sistema eletrônico sejam entendidos sem que se tenha que recorrer continuamente a procedimentos matemáticos extensos. Isto é realizado pelo processo de aproximação, o qual pode exigir muita habilidade. Embora os resultados obtidos utilizando as características reais possam ser um pouco diferentes daqueles obtidos pela utilização de várias aproximações, tenha em mente que as próprias características fornecidas por uma folha de especificações podem ser ligeiramente diversas das características do dispositivo na prática. Em outras palavras, as características de um diodo semicondutor 1N4001 podem variar de um elemento para outro em um mesmo lote. A variação pode ser pequena, mas será quase sempre suficiente para validar a aproximação empregada na análise. Considere também os outros elementos do circuito: o resistor com valor nominal de  $100\ \Omega$  é exatamente de  $100\ \Omega$ ? A tensão aplicada é exatamente de  $10\ \text{V}$ , ou talvez de  $10,08\ \text{V}$ ? Todas estas tolerâncias contribuem para a crença geral de que uma resposta determinada por meio de um conjunto apropriado de aproximações pode normalmente ser “tão precisa” quanto aque-

la que emprega todas as características. Neste livro, a ênfase é direcionada ao desenvolvimento de um conhecimento suficiente de um dispositivo, através do uso de aproximações apropriadas, evitando, assim, um nível desnecessário de complexidade matemática. Detalhes suficientes serão normalmente fornecidos, entretanto, para permitirem uma análise matemática detalhada, se desejada.

## 2.2 ANÁLISE POR RETA DE CARGA

A carga aplicada terá normalmente um impacto importante no ponto ou região de operação de um dispositivo. Se a análise for feita de maneira gráfica, uma reta poderá ser desenhada sobre a curva característica do dispositivo, representando a carga aplicada. A interseção da reta de carga com a curva característica determinará o ponto de operação do sistema. Tal análise é chamada, por motivos óbvios, *análise por reta de carga*. Embora a maioria dos circuitos com diodos analisados neste capítulo não empregue a abordagem da reta de carga, a técnica é frequentemente utilizada nos capítulos subsequentes, e esta introdução apresenta a aplicação mais simples do método. Permite ainda uma validação da técnica aproximada, descrita ao longo de todo o restante deste capítulo.

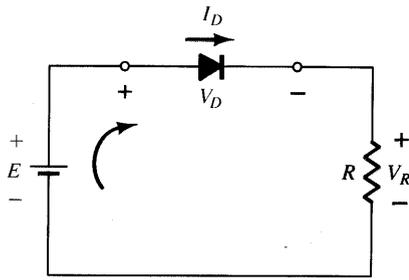
Considere o circuito da Fig. 2.1a, empregando um diodo que tem as características da Fig. 2.1b. Nesta Fig. 2.1a, note que a “pressão” estabelecida pela bateria tenta forçar uma corrente através do circuito no sentido horário. O fato de esta corrente e o sentido de condução do diodo estarem “casados” revela que o diodo está no estado “ligado” e a condução foi estabelecida. A polaridade resultante através do diodo será como mostrada e o primeiro quadrante ( $V_D$  e  $I_D$  positivo) da Fig. 2.1b será a região de interesse para polarização direta.

Aplicando a lei das tensões de Kirchhoff no circuito em série da Fig. 2.1a, resulta em

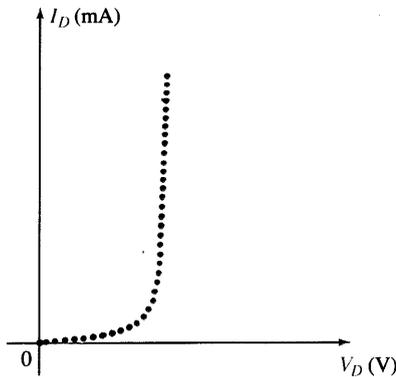
$$E - V_D - V_R = 0$$

ou  $E = V_D + I_D R$  (2.1)

As duas variáveis da Eq. (2.1) ( $V_D$  e  $I_D$ ) são as mesmas representadas pelos eixos coordenados da Fig. 2.1b, que mostra



(a)



(b)

Fig. 2.1 Configuração série do diodo: (a) circuito; (b) curva característica.

a curva característica do diodo. Esta semelhança permite traçar graficamente a Eq. (2.1) sobre a curva característica da Fig. 2.1b.

As interseções da reta de carga com a curva característica do diodo podem ser facilmente determinadas empregando-se o fato de que, em qualquer ponto do eixo horizontal,  $I_D = 0$  A e de que, em qualquer ponto do eixo vertical,  $V_D = 0$  V.

Se atribuirmos  $V_D = 0$  V na Eq. (2.1) e solucioná-la para  $I_D$ , temos o valor de  $I_D$  no eixo vertical. Portanto, como  $V_D = 0$  V, a Eq. (2.1) torna-se

$$E = V_D + I_D R$$

$$= 0 \text{ V} + I_D R$$

e

$$I_D = \frac{E}{R} \Big|_{V_D=0 \text{ V}} \tag{2.2}$$

como mostrado na Fig. 2.2. Se atribuirmos  $I_D = 0$  A na Eq. (2.1) e solucioná-la para  $V_D$ , temos o valor de  $V_D$  no eixo horizontal. Portanto, com  $I_D = 0$  A, a Eq. (2.1) torna-se como mostrado

$$E = V_D + I_D R$$

$$= V_D + (0 \text{ A})R$$

e

$$V_D = E \Big|_{I_D=0 \text{ A}} \tag{2.3}$$

na Fig. 2.2. Uma linha reta traçada entre os dois pontos definirá a reta de carga, desenhada na Fig. 2.2. Modifique o valor de  $R$  (a carga) e a interseção com o eixo vertical modificar-se-á. O resultado será uma mudança na inclinação da reta de carga e um ponto de interseção diferente entre a reta de carga e a curva característica do dispositivo.

Temos agora uma reta de carga definida pelo sistema e uma curva característica definida pelo dispositivo. O ponto de interseção entre as duas curvas representa o ponto de operação para este circuito. Desenhando simplesmente uma linha vertical até o eixo horizontal, a tensão do diodo  $V_{DQ}$  pode ser determinada, enquanto que uma linha horizontal do ponto de interseção até o eixo vertical fornecerá o valor de  $I_{DQ}$ . A corrente  $I_D$  é, na verdade, a corrente que circula em toda a configuração série na Fig. 2.1a. O ponto de operação é normalmente chamado *ponto quiescente* (abreviado “pt Q”) para refletir suas qualidades de “imobilidade, inércia”, assim definidas para um circuito dc.

A solução obtida pela interseção das duas curvas é a mesma que seria obtida por uma solução matemática simultânea das Eqs. (2.1) e (1.4) [ $I_D = I_S(e^{kV_D/Tk} - 1)$ ]. Uma vez que a curva para um diodo possui características não-lineares, a matemática envolvida exigiria a utilização de técnicas não-lineares que estão além da necessidade e alcance deste livro. A análise por reta de carga descrita acima fornece uma solução com um mínimo de esforço e provê uma descrição “pictorial” do motivo pelo qual os valores da solução para  $V_{DQ}$  e  $I_{DQ}$  foram obtidos. Os próximos dois exemplos demonstrarão técnicas introduzidas acima e revelarão a facilidade relativa com a qual a reta de carga pode ser determinada utilizando as Eqs. (2.2) e (2.3).

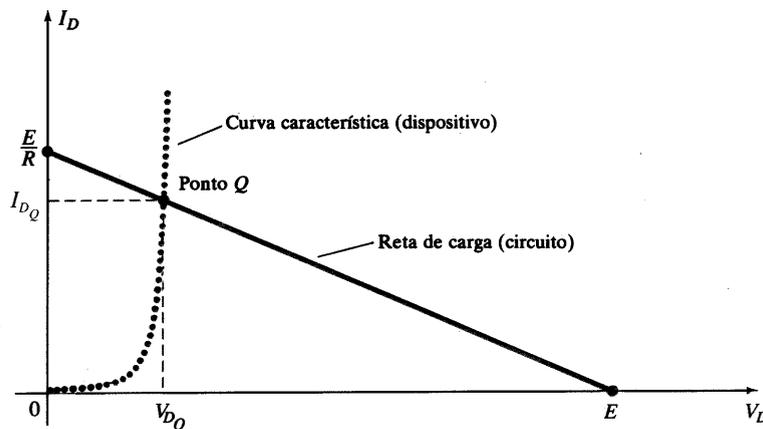


Fig. 2.2 Desenhando a reta de carga e determinando o ponto de operação.

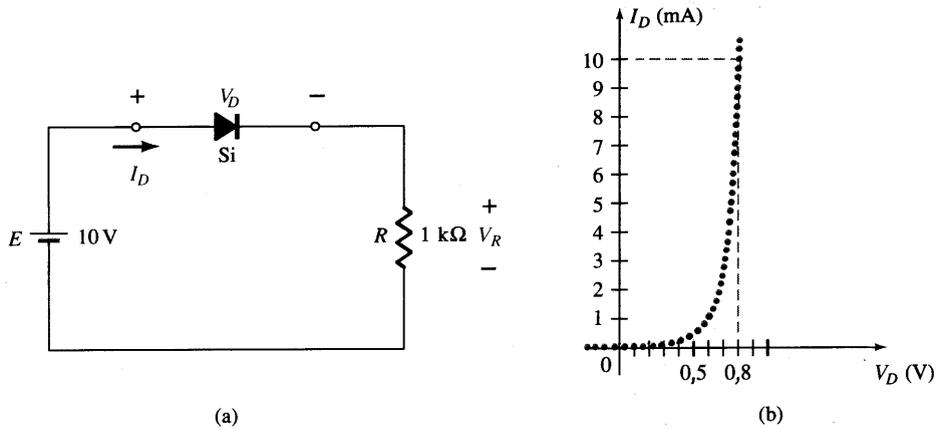


Fig. 2.3 (a) Circuito; (b) características.

**EXEMPLO 2.1**

Para a configuração série do diodo da Fig. 2.3a, e empregando as características do diodo da Fig. 2.3b, determine:

- (a)  $V_{D_Q}$  e  $I_{D_Q}$ .
- (b)  $V_R$ .

**Solução**

(a) Eq. (2.2):  $I_D = \frac{E}{R} \Big|_{V_D=0\text{ V}} = \frac{10\text{ V}}{1\text{ k}\Omega} = 10\text{ mA}$

Eq. (2.3):  $V_D = E \Big|_{I_D=0\text{ A}} = 10\text{ V}$

A reta de carga resultante aparece na Fig. 2.4. A interseção entre a reta de carga e a curva característica define o ponto  $Q$  como

$V_{D_Q} \cong 0,78\text{ V}$

$I_{D_Q} \cong 9,25\text{ mA}$

O valor de  $V_D$  é certamente uma estimativa, e a precisão de  $I_D$  é limitada pela escala escolhida. Maior precisão exigiria um diagrama muito maior e seria, provavelmente, impraticável.

- (b)  $V_R = I_R R = I_{D_Q} R = (9,25\text{ mA})(1\text{ k}\Omega) = 9,25\text{ V}$   
ou  $V_R = E - V_D = 10\text{ V} - 0,78\text{ V} = 9,22\text{ V}$

A diferença nos resultados é devida à precisão com a qual o gráfico pode ser lido. Idealmente, os resultados obtidos em ambos os métodos deveria ser os mesmos.

**EXEMPLO 2.2**

Repita a análise do Exemplo 2.1 com  $R = 2\text{ k}\Omega$ .

**Solução**

(a) Eq. (2.2):  $I_D = \frac{E}{R} \Big|_{V_D=0\text{ V}} = \frac{10\text{ V}}{2\text{ k}\Omega} = 5\text{ mA}$

Eq. (2.3):  $V_D = E \Big|_{I_D=0\text{ A}} = 10\text{ V}$

A reta de carga resultante aparece na Fig. 2.5. Note que, quanto maior o valor da carga, menor é a inclinação da reta e menor a corrente do diodo. O ponto  $Q$  resultante é definido por

$V_{D_Q} \cong 0,7\text{ V}$

$I_{D_Q} \cong 4,6\text{ mA}$

- (b)  $V_R = I_R R = I_{D_Q} R = (4,6\text{ mA})(2\text{ k}\Omega) = 9,2\text{ V}$   
com  $V_R = E - V_D = 10\text{ V} - 0,7\text{ V} = 9,3\text{ V}$

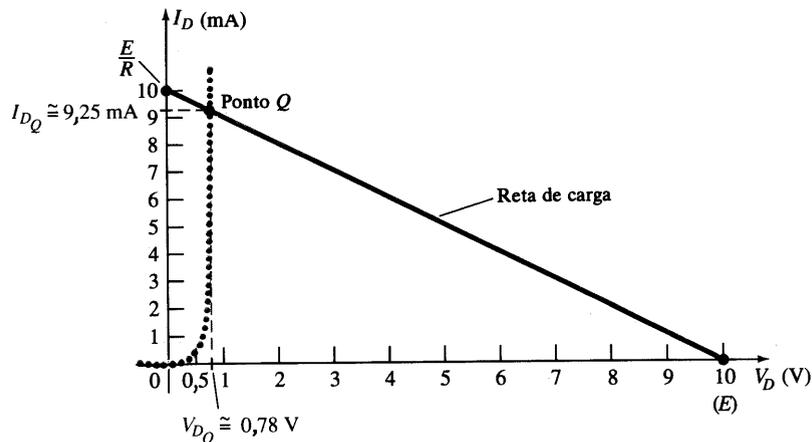


Fig. 2.4 Solução para o Exemplo 2.1.

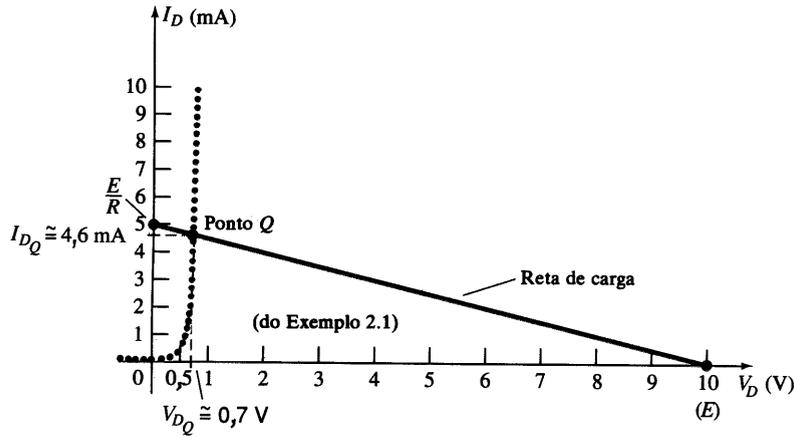


Fig. 2.5 Solução do Exemplo 2.2.

A diferença nos valores é novamente devida à precisão com que o gráfico pode ser lido. Certamente, entretanto, os resultados fornecem um valor esperado para a tensão  $V_R$ .

Como visto nos exemplos acima, a reta de carga é determinada unicamente pela configuração empregada, enquanto que a curva característica é definida pelo dispositivo escolhido. Se adotarmos agora o modelo aproximado para o diodo e não alterarmos a configuração do sistema, a reta de carga será exatamente a mesma obtida nos exemplos acima. Na realidade, os próximos dois exemplos repetem a análise dos Exemplos 2.1 e 2.2, utilizando o modelo aproximado, permitindo, assim, uma comparação dos resultados.

**EXEMPLO 2.3**

Repita o Exemplo 2.1, utilizando o modelo equivalente aproximado para o diodo semicondutor de silício.

**Solução**

A reta de carga é redesenhada na Fig. 2.6 com as mesmas interseções definidas no Exemplo 2.1. A curva característica do circuito equivalente aproximado para o diodo também foi traçada no mesmo gráfico. O ponto  $Q$  resultante:

$$V_{D_Q} = 0,7 \text{ V}$$

$$I_{D_Q} = 9,25 \text{ mA}$$

Os resultados obtidos no Exemplo 2.3 são extremamente interessantes. O valor de  $I_{D_Q}$  é exatamente o mesmo obtido no Exemplo 2.1, utilizando uma curva característica muito mais fácil de desenhar do que a da Fig. 2.4. O valor de  $V_D = 0,7 \text{ V}$  é bastante diferente de  $0,78 \text{ V}$  do Exemplo 2.1; entretanto, se compararmos às outras tensões do circuito, são certamente valores aproximados.

**EXEMPLO 2.4**

Repita o Exemplo 2.2, utilizando o modelo equivalente aproximado para o diodo semicondutor de silício.

**Solução**

A reta de carga é redesenhada na Fig. 2.7 com as mesmas interseções definidas no Exemplo 2.2. A curva característica do circuito equivalente aproximado para o diodo também foi traçada no mesmo gráfico. O ponto  $Q$  resultante:

$$V_{D_Q} = 0,7 \text{ V}$$

$$I_{D_Q} = 4,6 \text{ mA}$$

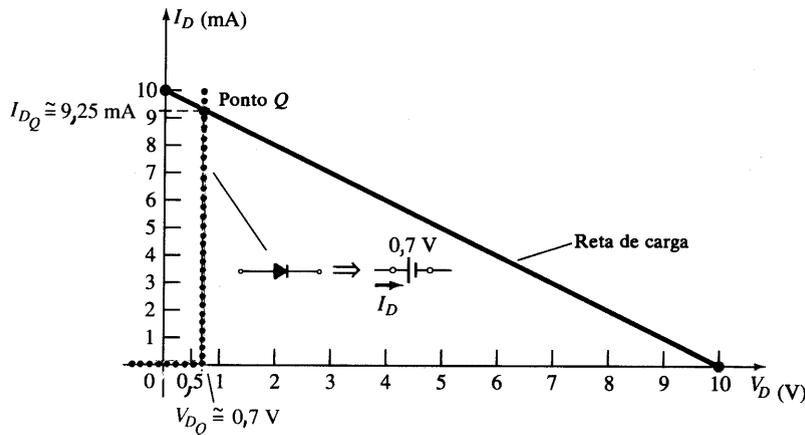


Fig. 2.6 Solução do Exemplo 2.1, utilizando o modelo aproximado do diodo.

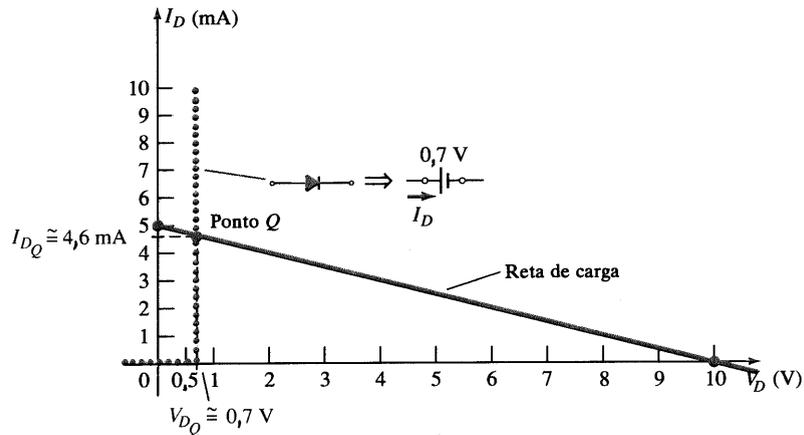


Fig. 2.7 Solução do Exemplo 2.2, utilizando o modelo aproximado do diodo.

No Exemplo 2.4, os resultados obtidos tanto para  $V_{D_Q}$  como para  $I_{D_Q}$  são iguais aos obtidos utilizando-se as características completas no Exemplo 2.2. Os exemplos acima demonstraram que os níveis de corrente e tensão obtidos utilizando-se o modelo aproximado foram bem próximos dos resultados encontrados para os casos em que foram empregadas as características completas. Isto sugere, e será aplicado nas seções a seguir, que o uso de aproximações apropriadas pode produzir soluções que são muito próximas à resposta real, sem se preocupar muito em reproduzir apropriadamente as características e escolher uma escala suficientemente grande. No próximo exemplo iremos um passo adiante e substituiremos o modelo ideal. Os resultados revelarão as condições que devem ser satisfeitas para se aplicar o modelo equivalente adequadamente.

### EXEMPLO 2.5

Repita o Exemplo 2.1, utilizando o modelo ideal do diodo.

#### Solução

Como mostrado na Fig. 2.8, a reta de carga continua sendo a mesma, entretanto a curva característica do diodo ideal intercepta

agora a reta de carga no eixo vertical. O ponto  $Q$  é definido, portanto, por

$$V_{D_Q} = 0 \text{ V}$$

$$I_{D_Q} = 10 \text{ mA}$$

Os resultados geram desconfiança quanto à precisão, pois são muito diferentes dos encontrados no Exemplo 2.1. Certamente eles fornecem alguma indicação dos valores de tensão e corrente para serem esperados relativos aos outros valores de tensão do circuito, mas o esforço adicional de simplesmente incluir a queda de 0,7 V sugere que a abordagem empregada no Exemplo 2.3 é mais adequada.

A utilização do modelo ideal do diodo deve, portanto, ser reservada aos casos em que a função de um diodo é mais importante do que níveis de tensão que diferem em dezenas de volts, e nos casos em que as tensões aplicadas são consideravelmente maiores do que a tensão de limiar  $V_T$ . Nas próximas seções, o modelo aproximado será empregado exclusivamente, pois os níveis de tensão obtidos serão sensíveis a variações próximas de  $V_T$ . Nas seções posteriores, o modelo ideal será empregado mais amiúde, uma vez que as tensões aplicadas serão freqüentemente muito maiores que  $V_T$ , e, além disso, os autores desejam assegurar que a função do diodo seja entendida clara e corretamente.

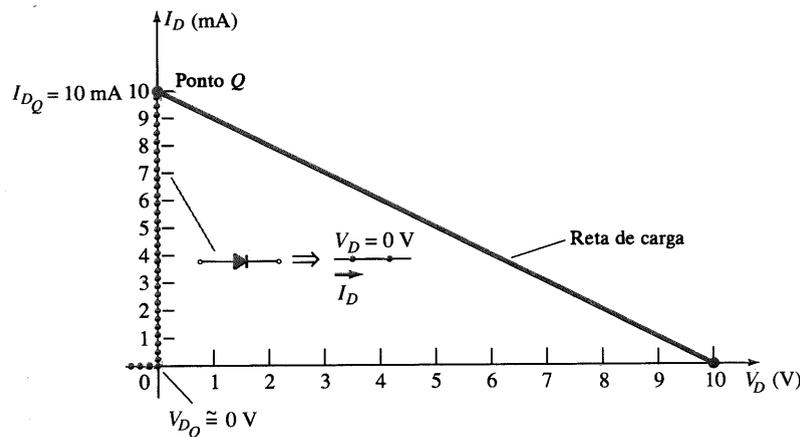


Fig. 2.8 Solução do Exemplo 2.1, utilizando o modelo ideal do diodo.



### 2.3 APROXIMAÇÕES PARA O DIODO

Na seção 2.2, revelamos que os resultados obtidos utilizando o modelo equivalente aproximado eram bem próximos, se não iguais, aos resultados encontrados utilizando todas as características do diodo. Na verdade, se levarmos em conta todas as possíveis variações devido a tolerâncias, temperatura, e assim por diante, certamente poderíamos considerar uma solução “tão precisa” quanto a outra. Uma vez que a utilização do modelo aproximado normalmente resulta em uma redução de esforço e tempo para se obter os resultados desejados, esta será a abordagem empregada neste livro, a menos que se especifique o contrário. Relembre o seguinte:

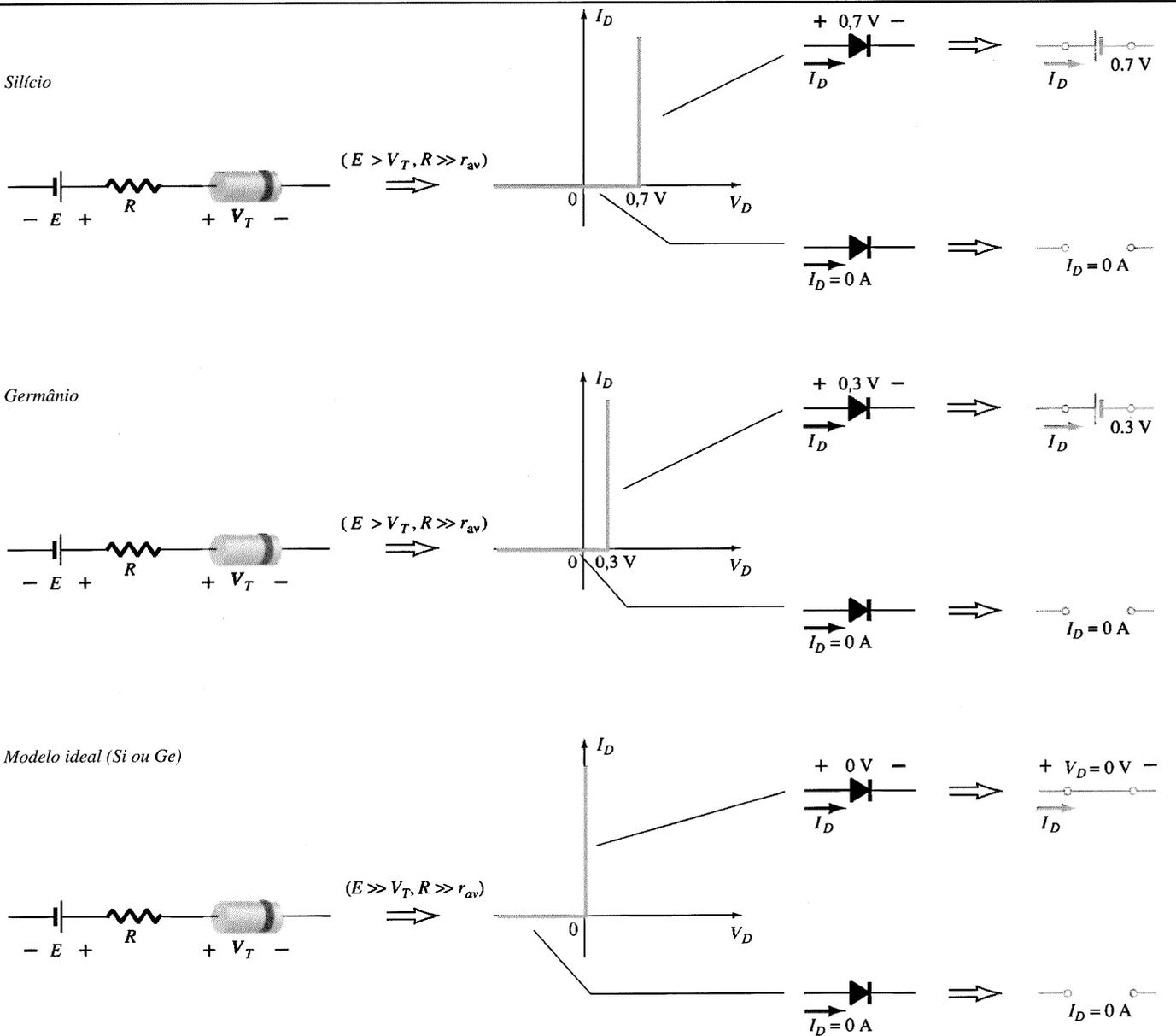
*O propósito principal deste livro é desenvolver um conhecimento geral do comportamento, capacidades, e possíveis áreas de aplicação de um dispositivo de tal maneira que*

*minimize a necessidade de extensos desenvolvimentos matemáticos.*

O modelo equivalente completo introduzido no Cap. 1 não foi empregado na análise por reta de carga porque  $r_{av}$  é tipicamente muito menor do que os outros elementos em série do circuito. Se o valor de  $r_{av}$  for próximo aos valores dos outros elementos em série do circuito, o modelo equivalente completo pode ser aplicado da maneira descrita na Seção 2.2.

Como preparo para as análises que estão por vir, o Quadro 2.1 foi desenvolvido para recordar as características importantes, modelos e condições de aplicação para os modelos ideal e aproximado do diodo. Embora o diodo de silício seja utilizado quase que exclusivamente, devido sobretudo às suas características de temperatura, o diodo de germânio é ainda utilizado, e portanto incluído no Quadro 2.1. Assim como o diodo de silício, o diodo

QUADRO 2.1 Modelo de Diodos Semicondutores Ideal e Aproximado



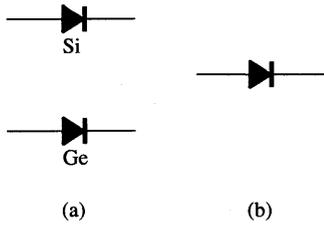


Fig. 2.9 (a) Notação do modelo aproximado; (b) notação do modelo ideal.

de germânio é considerado um circuito aberto para tensões abaixo de  $V_T$ . Este diodo entrará no estado “ligado” quando  $V_D \geq V_T = 0,3 \text{ V}$ .

Não esqueça de que  $0,7 \text{ V}$  e  $0,3 \text{ V}$  nos circuitos equivalentes não são fontes independentes de energia. Estes valores de tensão existem para simplesmente nos lembrar que há um “preço a pagar”, quando se liga um diodo. Um diodo isolado em uma bancada de laboratório não indicará  $0,7 \text{ V}$  ou  $0,3 \text{ V}$  se um voltímetro for colocado entre os seus terminais. A queda de tensão no diodo ocorrerá quando este estiver “ligado”, e indica o nível de tensão mínimo necessário para que a condução seja estabelecida.

Nas próximas seções, demonstraremos o impacto dos modelos do Quadro 2.1 na análise de configurações de diodo. Nas situações em que o circuito equivalente aproximado for empregado, o símbolo do diodo aparecerá como mostrado na Fig. 2.9a, para os diodos de silício e germânio. Se as condições são tais que o modelo ideal do diodo pode ser empregado, o símbolo do diodo será como mostrado na Fig. 2.9b.

## 2.4 CONFIGURAÇÕES SÉRIE DE DIODOS COM ENTRADAS DC

Nesta seção, o modelo aproximado é utilizado para investigar configurações série de diodos com entradas dc. O assunto estabelecerá uma base na análise do diodo, cuja abordagem será feita nas seções e capítulos seguintes. O procedimento descrito pode, na verdade, ser aplicado a circuitos com uma quantidade qualquer de diodos e em várias configurações.

Para cada configuração, o estado de cada diodo deve ser inicialmente determinado. Quais diodos estão “ligados” e quais estão “desligados”? Uma vez definidos, o equivalente apropriado que se estabeleceu na Seção 2.3 pode ser substituído, e os parâmetros restantes do circuito determinados.

*Em geral, um diodo está no estado “ligado” se a corrente estabelecida pelas fontes é tal que sua direção está no mesmo sentido que a seta do símbolo do diodo, e  $V_D \geq 0,7 \text{ V}$  para o silício e  $V_D \geq 0,3 \text{ V}$  para o germânio.*

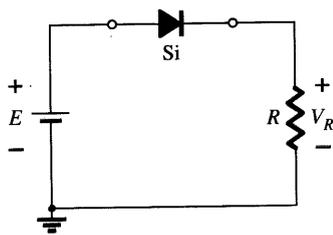


Fig. 2.10 Configuração série do diodo.

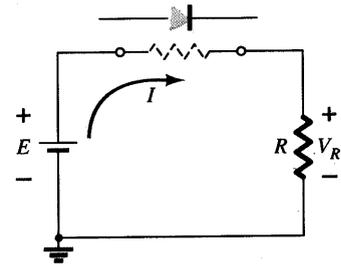


Fig. 2.11 Determinando o estado do diodo da Fig. 2.10.

Para cada configuração, substitua *mentalmente* os diodos por elementos resistivos e note a direção resultante da corrente como sendo resultado das tensões aplicadas (“pressão”). Se a direção resultante está no mesmo sentido que a seta do símbolo do diodo, a condução será estabelecida através do diodo, e o dispositivo está no estado “ligado”. A descrição acima depende, é óbvio, de a fonte fornecer uma tensão maior do que a tensão do limiar ( $V_T$ ) de cada diodo.

Se um diodo está no estado “ligado”, tanto se pode considerar uma queda de  $0,7 \text{ V}$  através do elemento, como o circuito pode ser redesenhado com o circuito equivalente mostrado no Quadro 2.1. Normalmente, a preferência será incluir a queda de  $0,7\text{-V}$  através de cada diodo “ligado”, e desenhar uma linha através de cada diodo no estado “desligado” ou aberto. Inicialmente, entretanto, o método de substituição será utilizado para assegurar que as tensões apropriadas e os níveis de corrente estão determinados.

O circuito em série da Fig. 2.10, descrito com alguns detalhes na Seção 2.2, será utilizado para demonstrar a abordagem descrita nos parágrafos acima. O estado do diodo é determinado primeiro substituindo-se mentalmente o diodo por um elemento resistivo, como mostrado na Fig. 2.11. A direção resultante de  $I$  está “casada” com a seta do símbolo do diodo, e já que  $E > V_T$ , o diodo está no estado “ligado”. O circuito é, portanto, redesenhado conforme Fig. 2.12, com o modelo equivalente apropriado para o diodo de silício diretamente polarizado. Note que a polaridade de  $V_D$  corresponderia à mesma polaridade se o diodo fosse um elemento resistivo. A tensão resultante e os valores de corrente são os seguintes:

$$V_D = V_T \tag{2.4}$$

$$V_R = E - V_T \tag{2.5}$$

$$I_D = I_R = \frac{V_R}{R} \tag{2.6}$$

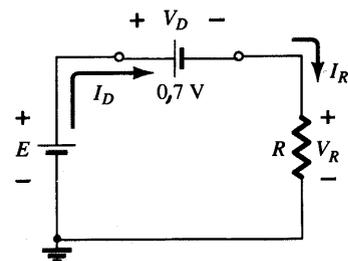


Fig. 2.12 Substituindo pelo modelo equivalente o diodo “ligado” da Fig. 2.10.

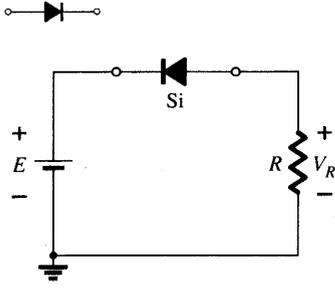


Fig. 2.13 Invertendo o diodo da Fig. 2.10.

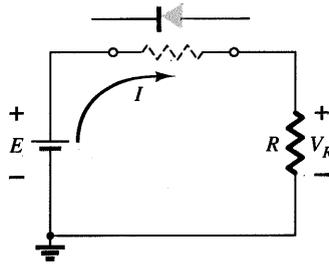


Fig. 2.14 Determinando o estado do diodo da Fig. 2.13.

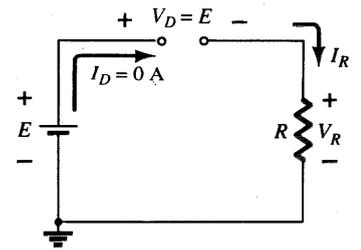


Fig. 2.15 Substituindo pelo modelo equivalente o diodo “desligado” da Fig. 2.13.

Na Fig. 2.13 o diodo da Fig. 2.10 foi invertido. A substituição do diodo por um elemento resistivo, como mostrado na Fig. 2.14, revela que o sentido da corrente não está de acordo com o símbolo do diodo. O diodo está no estado “desligado”, resultando no circuito equivalente da Fig. 2.15. Como o circuito está aberto, a corrente do diodo é 0 A, e a tensão através do resistor  $R$  é a seguinte:

$$V_R = I_R R = I_D R = (0 \text{ A})R = 0 \text{ V}$$

O fato de  $V_R = 0 \text{ V}$  faz com que se estabeleça  $E$  volts através do circuito aberto, assim definido pela lei das tensões de Kirchhoff. Tenha sempre em mente que, sob quaisquer circunstâncias — dc, ac, valores instantâneos, pulsos etc. —, a lei das tensões de Kirchhoff deve ser satisfeita!

**EXEMPLO 2.6**

Para a configuração série com diodo da Fig. 2.16, determine  $V_D$ ,  $V_R$  e  $I_D$ .

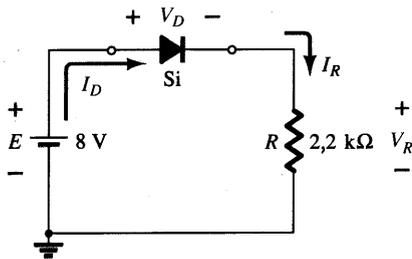


Fig. 2.16 Circuito do Exemplo 2.6.

**Solução**

Uma vez que a tensão aplicada estabelece uma corrente no sentido horário, de acordo com a seta do símbolo do diodo, o diodo está no estado “ligado”.

$$V_D = 0,7 \text{ V}$$

$$V_R = E - V_D = 8 \text{ V} - 0,7 \text{ V} = 7,3 \text{ V}$$

$$I_D = I_R = \frac{V_R}{R} = \frac{7,3 \text{ V}}{2,2 \text{ k}\Omega} \cong 3,32 \text{ mA}$$

**EXEMPLO 2.7**

Repita o Exemplo 2.6 com o diodo invertido.

**Solução**

Removendo o diodo, descobrimos que o sentido de  $I$  é oposto à seta do símbolo do diodo, e o equivalente do diodo é o circuito-aberto, não importando o modelo empregado. O resultado é o circuito da Fig. 2.17, onde  $I_D = 0 \text{ A}$  devido ao circuito-aberto. Já

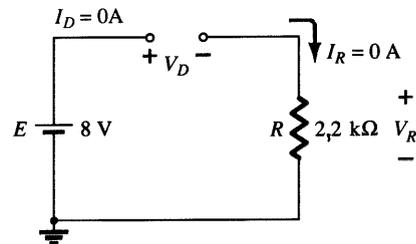


Fig. 2.17 Determinando as incógnitas do Exemplo 2.7.

que  $V_R = I_R R$ ,  $V_R = (0)R = 0 \text{ V}$ . A aplicação da lei das tensões de Kirchhoff na malha produz

$$E - V_D - V_R = 0$$

$$\text{e } V_D = E - V_R = E - 0 = E = 8 \text{ V}$$

Em particular, note no Exemplo 2.7 que, apesar de alta tensão aplicada ao diodo, ele está no estado “desligado”. A corrente é nula, mas a tensão é significativa. Como revisão, tenha em mente, nas análises a seguir, o seguinte:

1. Um circuito aberto pode ter qualquer valor de tensão através de seus terminais, entretanto a corrente é sempre zero.
2. Um curto-circuito possui 0 V em seus terminais, e a corrente é limitada somente pelo circuito restante.

No próximo exemplo, a notação da Fig. 2.18 será empregada para a tensão aplicada. Esta notação é comumente utilizada e o leitor deve tornar-se bastante familiarizado com ela. Tal notação e outros níveis de tensão definidos serão abordados mais tarde no Cap. 4.

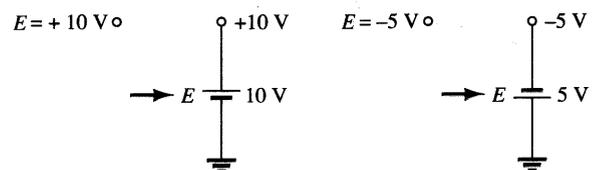


Fig. 2.18 Notação de fonte.



**EXEMPLO 2.8**

Para a configuração com diodo em série da Fig. 2.19, determine  $V_D$ ,  $V_R$  e  $I_D$ .

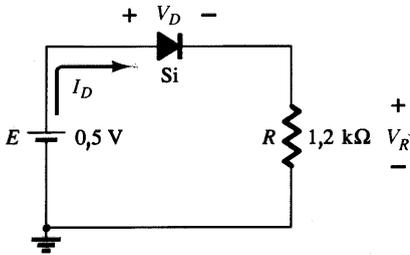


Fig. 2.19 Circuito em série com diodo do Exemplo 2.8.

**Solução**

Embora a “pressão” estabeleça uma corrente com o mesmo sentido da seta do símbolo do diodo, o valor de tensão aplicada é insuficiente para “ligar” o diodo de silício. O ponto de operação é mostrado na Fig. 2.20, determinando o circuito-aberto como a aproximação adequada. Os valores de tensão e corrente resultantes são, portanto, os seguintes:

$$I_D = 0 \text{ A}$$

$$V_R = I_R R = I_D R = (0 \text{ A})1,2 \text{ k}\Omega = 0 \text{ V}$$

e  $V_D = E = 0,5 \text{ V}$

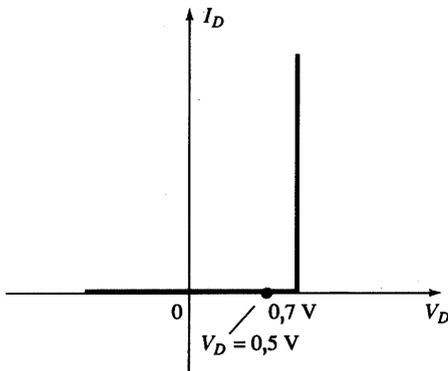


Fig. 2.20 Ponto de operação com  $E = 0,5 \text{ V}$ .

**EXEMPLO 2.9**

Determine  $V_o$  e  $I_D$  para o circuito em série da Fig. 2.21.

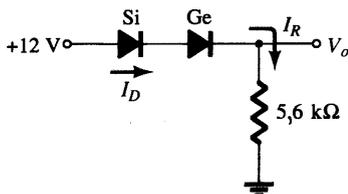


Fig. 2.21 Circuito do Exemplo 2.9.

**Solução**

Uma abordagem similar àquela utilizada no Exemplo 2.6 revelará que a corrente resultante tem o mesmo sentido das setas dos símbolos de ambos os diodos, resultando no circuito da Fig. 2.22, pois  $E = 12 \text{ V} > (0,7 \text{ V} + 0,3 \text{ V}) = 1 \text{ V}$ . Note a fonte redesenhada de  $12 \text{ V}$  e a polaridade de  $V_o$  através do resistor de  $5,6\text{-k}\Omega$ . A tensão resultante

$$V_o = E - V_{T_1} - V_{T_2} = 12 \text{ V} - 0,7 \text{ V} - 0,3 \text{ V} = 11 \text{ V}$$

e 
$$I_D = I_R = \frac{V_R}{R} = \frac{V_o}{R} = \frac{11 \text{ V}}{5,6 \text{ k}\Omega} \cong 1,96 \text{ mA}$$

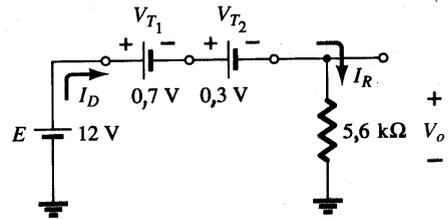


Fig. 2.22 Determinando as incógnitas do Exemplo 2.9.

**EXEMPLO 2.10**

Determine  $I_D$ ,  $V_{D_2}$  e  $V_o$  para o circuito da Fig. 2.23.

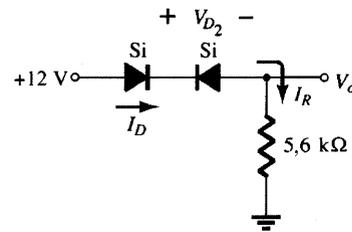


Fig. 2.23 Circuito do Exemplo 2.10.

**Solução**

A remoção dos diodos e a determinação do sentido da corrente resultante  $I$  originam o circuito da Fig. 2.24. O sentido da corrente do diodo de silício está de acordo com o seu sentido de condução, porém o mesmo não acontece com o diodo de germânio. A combinação de um curto-circuito em série com um circuito-aberto resulta sempre em um circuito-aberto e  $I_D = 0 \text{ A}$ , conforme a Fig. 2.25.

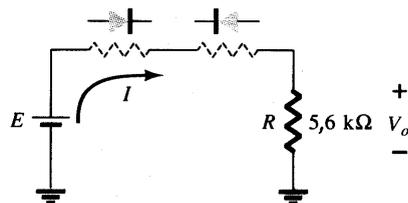


Fig. 2.24 Determinando o estado dos diodos da Fig. 2.23.

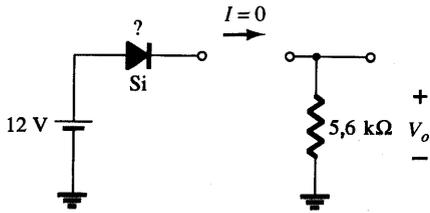


Fig. 2.25 Substituindo pelo estado equivalente o diodo aberto.

Pelo que substituiremos o diodo de silício é a questão que permanece. Para a análise a seguir neste e nos próximos capítulos, lembre-se simplesmente, para o diodo real, de que, quando  $I_D = 0 \text{ A}$ ,  $V_D = 0 \text{ V}$  (e vice-versa), como descrito no Cap. 1 para a situação em que não há polarização. As condições descritas por  $I_D = 0 \text{ A}$  e  $V_D = 0 \text{ V}$  estão indicadas na Fig. 2.26.

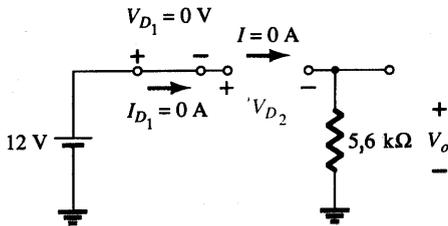


Fig. 2.26 Determinando as incógnitas do circuito do Exemplo 2.10.

$$V_o = I_R R = I_D R = (0 \text{ A}) R = 0 \text{ V}$$

e 
$$V_{D_2} = V_{\text{circuito aberto}} = E = 12 \text{ V}$$

A aplicação da lei das tensões de Kirchhoff no sentido horário nos dá

$$E - V_{D_1} - V_{D_2} - V_o = 0$$

e 
$$V_{D_2} = E - V_{D_1} - V_o = 12 \text{ V} - 0 - 0 = 12 \text{ V}$$

com 
$$V_o = 0 \text{ V}$$

**EXEMPLO 2.11**

Determine  $I$ ,  $V_1$ ,  $V_2$  e  $V_o$  para a configuração em série dc da Fig. 2.27.

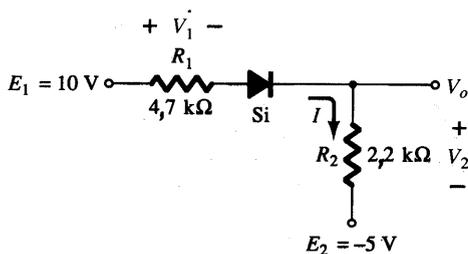


Fig. 2.27 Circuito do Exemplo 2.11.

**Solução**

As fontes são desenhadas, e o sentido da corrente é indicado na Fig. 2.28. O diodo está conduzindo, e a notação da Fig. 2.29 é incluída para indicar este estado. Note que o estado “ligado” só é percebido porque  $V_D = 0,7 \text{ V}$  é incluído na figura. Isto elimina

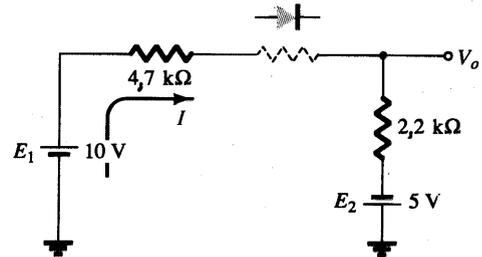


Fig. 2.28 Determinando o estado do diodo do circuito da Fig. 2.27.

a necessidade de redesenhar o circuito, e evita qualquer confusão que poderia surgir com a presença de outra fonte. Como mencionado na introdução desta seção, este talvez seja o método utilizado por quem já tem uma certa intimidade na análise de configurações com diodo. Posteriormente, toda análise será feita com referência apenas ao circuito original. Lembre-se de que

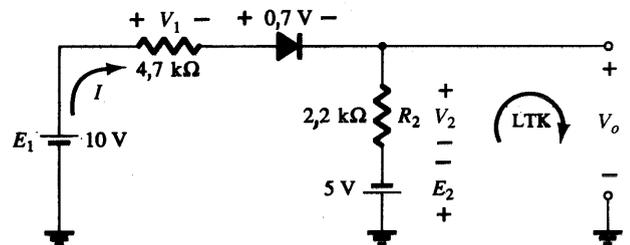


Fig. 2.29 Determinando as incógnitas do circuito da Fig. 2.27.

um diodo reversamente polarizado pode ser indicado simplesmente por uma linha através do dispositivo.

A corrente resultante através do circuito é

$$I = \frac{E_1 + E_2 - V_D}{R_1 + R_2} = \frac{10 \text{ V} + 5 \text{ V} - 0,7 \text{ V}}{4,7 \text{ k}\Omega + 2,2 \text{ k}\Omega} = \frac{14,3 \text{ V}}{6,9 \text{ k}\Omega} \cong 2,07 \text{ mA}$$

e as tensões são

$$V_1 = IR_1 = (2,07 \text{ mA})(4,7 \text{ k}\Omega) = 9,73 \text{ V}$$

$$V_2 = IR_2 = (2,07 \text{ mA})(2,2 \text{ k}\Omega) = 4,55 \text{ V}$$

A aplicação da lei das tensões de Kirchhoff à malha de saída no sentido horário resulta em

$$-E_2 + V_2 - V_o = 0$$

e 
$$V_o = V_2 - E_2 = 4,55 \text{ V} - 5 \text{ V} = -0,45 \text{ V}$$

O sinal de menos indica que  $V_o$  tem uma polaridade oposta à que aparece na Fig. 2.27.



## 2.5 CONFIGURAÇÕES PARALELA E SÉRIE-PARALELA

Os métodos aplicados na Seção 2.4 podem ser estendidos à análise de configurações paralela e série-paralela. Para cada aplicação, simplesmente adapte as etapas sequenciais utilizadas nas configurações série com diodo.

### EXEMPLO 2.12

Determine  $V_o$ ,  $I_1$ ,  $I_{D_1}$  e  $I_{D_2}$  para a configuração da Fig. 2.30.

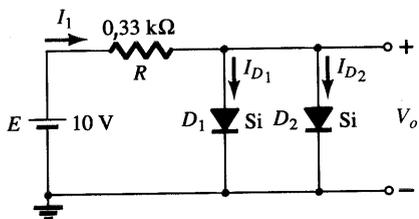


Fig. 2.30 Circuito do Exemplo 2.12.

### Solução

Para a tensão aplicada, a “pressão” da fonte estabelece uma corrente através de cada diodo com o mesmo sentido, conforme Fig. 2.31. Como o sentido da corrente resultante está de acordo com a seta do símbolo de cada diodo, e a tensão aplicada é maior do que 0,7 V, ambos os diodos estão conduzindo. A tensão através de elementos em paralelo é sempre a mesma

$$V_o = 0,7 \text{ V}$$

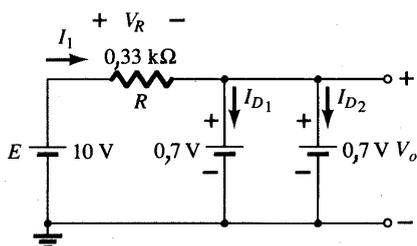


Fig. 2.31 Determinando as incógnitas do circuito do Exemplo 2.12.

A corrente

$$I_1 = \frac{V_R}{R} = \frac{E - V_D}{R} = \frac{10 \text{ V} - 0,7 \text{ V}}{0,33 \text{ k}\Omega} = 28,18 \text{ mA}$$

Assumindo que os diodos possuem características semelhantes, temos

$$I_{D_1} = I_{D_2} = \frac{I_1}{2} = \frac{28,18 \text{ mA}}{2} = 14,09 \text{ mA}$$

O Exemplo 2.12 demonstrou uma razão para colocarmos diodos em paralelo. Se a corrente máxima nominal dos diodos da Fig. 2.30 for apenas de 20 mA, uma corrente de 28,18 mA danificaria o dispositivo, se cada um deles aparecesse sozinho na Fig. 2.30. Colocando-se os dois em paralelo, a corrente fica

limitada a um valor seguro de 14,09 mA, com a mesma tensão nos terminais.

### EXEMPLO 2.13

Determine a corrente  $I$  para o circuito da Fig. 2.32.

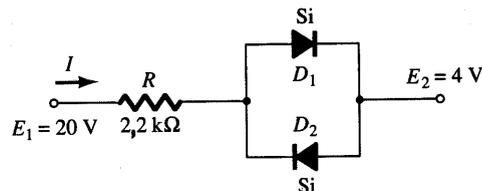


Fig. 2.32 Circuito do Exemplo 2.13.

### Solução

Redesenhando o circuito, como mostra a Fig. 2.33, verificamos que o sentido de corrente resultante é tal que o diodo  $D_1$  mantém-se ligado, e o diodo  $D_2$  desligado. A corrente resultante  $I$  é, portanto,

$$I = \frac{E_1 - E_2 - V_D}{R} = \frac{20 \text{ V} - 4 \text{ V} - 0,7 \text{ V}}{2,2 \text{ k}\Omega} \cong 6,95 \text{ mA}$$

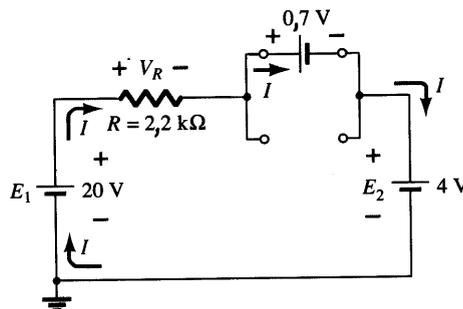


Fig. 2.33 Determinando as incógnitas para o circuito do Exemplo 2.13.

### EXEMPLO 2.14

Determine a tensão  $V_o$  para o circuito da Fig. 2.34.

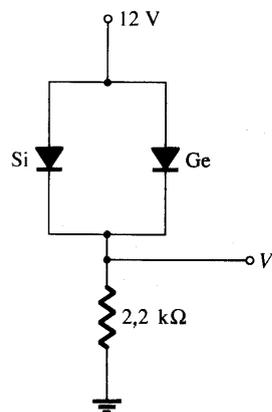


Fig. 2.34 Circuito do Exemplo 2.14.



**Solução**

Inicialmente, poder-se-ia imaginar que a tensão aplicada faria os dois diodos “conduzirem”. Entretanto, se ambos estivessem “ligados”, a queda de 0,7 V através do diodo de silício não estaria de acordo com a queda de 0,3 V do diodo de germânio, uma vez que a tensão através de elementos em paralelo tem que ser a mesma. Na realidade, o que ocorre é que, quando é ligada, a fonte aumenta a tensão fornecida de 0 V a 12 V em um certo período de tempo — provavelmente milissegundos. No instante em que a tensão no diodo de germânio atinge 0,3 V, este passa a “conduzir”, e mantém o valor da tensão em 0,3 V. O diodo de silício nunca terá, portanto, a oportunidade de conduzir, já que em seus terminais nunca haverá a tensão de 0,7 V. Por isso, o diodo de silício permanece no estado de circuito-aberto como mostra a Fig. 2.35. O resultado:

$$V_o = 12 \text{ V} - 0,3 \text{ V} = \mathbf{11,7 \text{ V}}$$

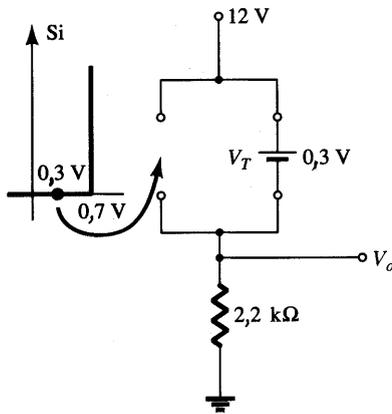


Fig. 2.35 Determinando  $V_o$  para o circuito da Fig. 2.34.

**EXEMPLO 2.15**

Determine as correntes  $I_1$ ,  $I_2$  e  $I_{D_2}$  para o circuito da Fig. 2.36.

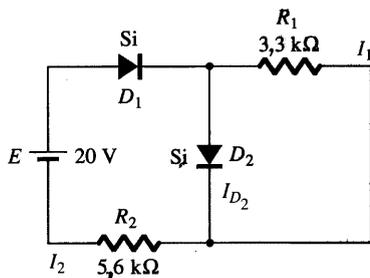


Fig. 2.36 Circuito do Exemplo 2.15.

**Solução**

A tensão aplicada (pressão) é suficiente para ligar ambos os diodos, como se percebe pelos sentidos das correntes no circuito da Fig. 2.37. Note o uso de uma notação abreviada para os diodos “ligados”, e que a solução é obtida por meio de técnicas aplicadas aos circuitos de série-paralelo.

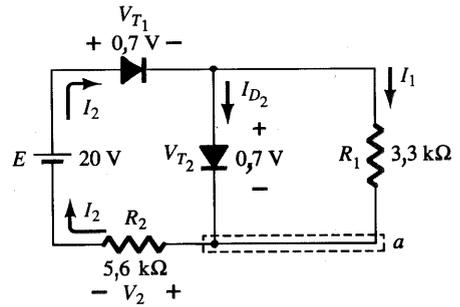


Fig. 2.37 Determinando as incógnitas do Exemplo 2.15.

$$I_1 = \frac{V_{T_2}}{R_1} = \frac{0,7 \text{ V}}{3,3 \text{ k}\Omega} = \mathbf{0,212 \text{ mA}}$$

A aplicação da lei das tensões de Kirchhoff na malha indicada, no sentido horário, produz

$$-V_2 + E - V_{T_1} - V_{T_2} = 0$$

e  $V_2 = E - V_{T_1} - V_{T_2} = 20 \text{ V} - 0,7 \text{ V} - 0,7 \text{ V} = 18,6 \text{ V}$

com  $I_2 = \frac{V_2}{R_2} = \frac{18,6 \text{ V}}{5,6 \text{ k}\Omega} = \mathbf{3,32 \text{ mA}}$

No nó inferior (a),

$$I_{D_2} + I_1 = I_2$$

e  $I_{D_2} = I_2 - I_1 = 3,32 \text{ mA} - 0,212 \text{ mA} = \mathbf{3,108 \text{ mA}}$

**2.6 PORTAS E/OU**

As ferramentas de análise estão agora a nossa disposição, e a oportunidade de estudar uma configuração utilizada em computadores demonstrará a faixa de aplicação deste dispositivo relativamente simples. Nossa análise limitar-se-á a determinar os níveis de tensão e não incluirá uma discussão detalhada sobre álgebra booleana ou lógicas positiva e negativa.

O circuito a ser analisado no Exemplo 2.16 é uma porta OU para lógica positiva. Isto significa que o nível 10 V da Fig. 2.38 corresponde a “1”, segundo a álgebra booleana, enquanto que a entrada de 0 V corresponde a “0”. Uma porta OR é tal que o nível de tensão de saída será 1 se uma ou ambas as entradas forem 1. A saída é 0 se ambas as entradas estiverem no nível 0.

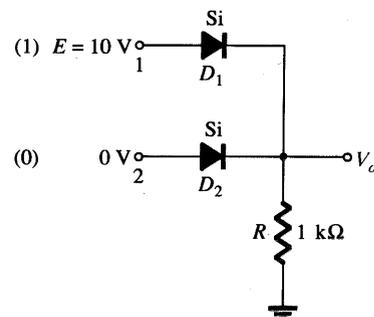


Fig. 2.38 Porta OU para lógica positiva.



A análise de portas E/OU torna-se muito mais fácil, utilizando-se o equivalente aproximado de um diodo em vez do modelo ideal, já que podemos estipular que a tensão através do diodo deve ser 0,7 V (0,3 V para Ge) para que o diodo de silício “conduza”.

Em geral, a melhor técnica é simplesmente estabelecer um sentimento sobre o estado dos diodos, observando o sentido e a “pressão” estabelecidos pelos potenciais aplicados. A análise irá, então, confirmar ou negar as afirmações iniciais.

**EXEMPLO 2.16**

Determine  $V_o$  para o circuito da Fig. 2.38.

**Solução**

Inicialmente, perceba que só há um potencial aplicado; 10 V no terminal 1. O terminal 2 com uma entrada de 0 V está aterrado, como mostra o circuito redesenhado da Fig. 2.39. A Figura 2.39 “sugere” que  $D_1$  talvez esteja “ligado” devido aos 10 V aplicados, enquanto  $D_2$  com seu lado “positivo” a 0 V esteja provavelmente “desligado”. Assumindo esses estados, teremos a configuração da Fig. 2.40.

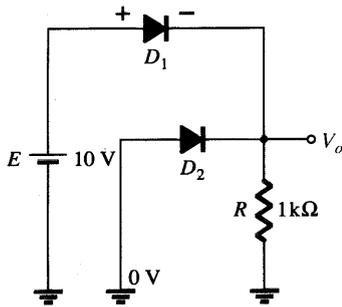


Fig. 2.39 Circuito redesenhado da Fig. 2.38.

A próxima etapa é simplesmente verificar que não há contradição em nossas afirmações. Isto é, observe que a polaridade através de  $D_1$  é suficiente para ligá-lo, e que a polaridade através de  $D_2$  o mantém desligado. Para  $D_1$ , o estado “ligado” estabelece  $V_o$  em  $V_o = E - V_D = 10 \text{ V} - 0,7 \text{ V} = 9,3 \text{ V}$ . Com 9,3 V no catodo (-) de  $D_2$  e 0 V no anodo (+),  $D_2$  está definitivamente no estado “desligado”. O sentido da corrente e o caminho resultante de condução vêm confirmar nossa suposição de que  $D_1$  esteja con-

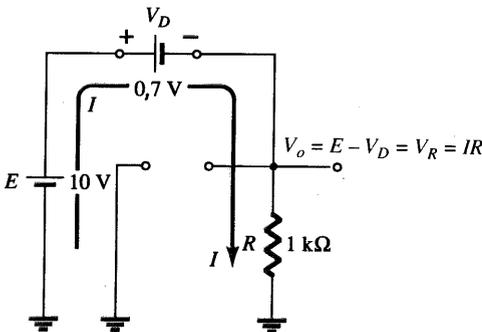


Fig. 2.40 Estados assumidos para os diodos da Fig. 2.38.

duzindo. Nossas afirmações parecem confirmadas pelas tensões e corrente resultantes, e podemos assumir como correta nossa análise inicial. O nível de tensão de saída não é 10 V, definido para a entrada 1, mas 9,3 V é suficiente para ser considerado como nível 1. A saída está, portanto, no nível 1 com apenas uma entrada ativada, o que sugere que a porta seja uma porta OU. Uma análise do mesmo circuito com duas entradas de 10 V mostrará ambos os diodos no estado “ligado” e uma saída de 9,3 V. Uma entrada de 0 V em ambas as entradas não fornecerá os 0,7 V exigidos para que os diodos entrem em condução, e a saída será 0 devido ao nível de 0-V na saída. Para o circuito da Fig. 2.40, o valor da corrente é determinado por

$$I = \frac{E - V_D}{R} = \frac{10 \text{ V} - 0,7 \text{ V}}{1 \text{ k}\Omega} = 9,3 \text{ mA}$$

**EXEMPLO 2.17**

Determine o nível de saída da porta E de lógica positiva da Fig. 2.41.

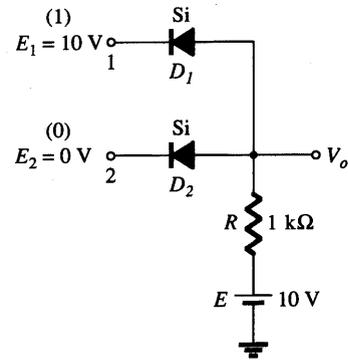


Fig. 2.41 Porta E de lógica positiva.

**Solução**

Note que neste caso uma fonte independente aparece no ramo aterrado do circuito. Por motivos que logo se tornarão óbvios, a fonte tem o mesmo nível lógico da entrada. O circuito é redesenhado na Fig. 2.42, com nossas suposições iniciais sobre o estado dos diodos. Com 10 V no catodo de  $D_1$ , assume-se que  $D_1$  está no estado “desligado”, apesar de haver uma fonte de 10 V conectada ao anodo de  $D_1$  através do resistor. Entretanto lembre-se que mencionamos na introdução desta seção que o uso do

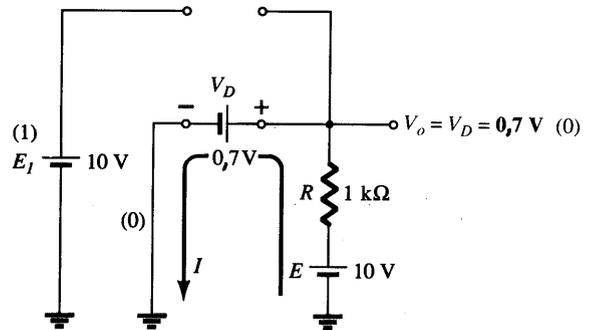


Fig. 2.42 Substituição pelos supostos estados dos diodos da Fig. 2.41.



modelo aproximado será um auxílio à análise. Para  $D_1$ , onde virá 0,7 V, se as entradas e as fontes de tensão estão no mesmo nível, criando “pressões” opostas? Supõe-se que  $D_2$  esteja no estado “ligado” devido à baixa tensão no catodo e ao fato de a fonte de 10-V estar conectada ao anodo de  $D_2$  através do resistor de 1 k $\Omega$ .

Para o circuito da Fig. 2.42, a tensão  $V_o$  é 0,7 V, devido à polarização direta do anodo  $D_2$ . Com 0,7 V no anodo de  $D_1$  e 10 V no catodo,  $D_1$  está definitivamente no estado “desligado”. A corrente  $I$  terá o sentido indicado na Fig. 2.42, e um valor igual a

$$I = \frac{E - V_D}{R} = \frac{10 \text{ V} - 0,7 \text{ V}}{1 \text{ k}\Omega} = 9,3 \text{ mA}$$

Os estados dos diodos são, portanto, confirmados, e nossa análise anterior estava correta. Embora não seja de 0 V (definida anteriormente como sendo o nível 0), a tensão de saída é suficientemente pequena para ser considerada como um nível 0. Para a porta E, portanto, uma única entrada 0 resultará em um nível 0 na saída. Os outros estados dos diodos para as hipóteses de duas entradas 0 e nenhuma entrada 0 serão examinados nos problemas ao final do capítulo.

## 2.7 ENTRADAS SENOIDAIS: RETIFICAÇÃO DE MEIA-ONDA

A análise de diodo será agora ampliada para incluir funções variantes no tempo, como a forma de onda senoidal e a onda quadrada. Não há dúvida quanto ao fato de que o grau de dificuldade irá aumentar, mas, uma vez compreendidas algumas técnicas, a análise será completamente direta e seguirá uma linha comum.

O circuito mais simples de ser examinado com um sinal variante no tempo aparece na Fig. 2.43. No momento, utilizaremos o modelo ideal (note a ausência da legenda Si ou Ge) para assegurar que a abordagem não inclua mais uma complexidade matemática.

Ao longo de um ciclo completo, definido pelo período  $T$  da Fig. 2.43, o valor médio (a soma algébrica das áreas acima e abaixo do eixo) é zero. O circuito da Fig. 2.43 chamado *retificador de meia-*

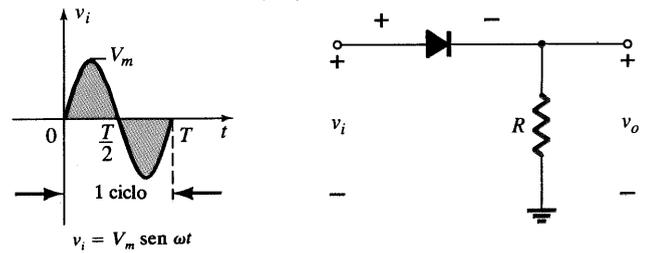


Fig. 2.43 Retificador de meia-onda.

onda irá gerar uma forma de onda  $v_o$  que possuirá um valor médio de uso particular no processo de conversão ac-dc. Quando empregado no processo de retificação, um diodo é tipicamente denominado *retificador*. Sua potência e valor máximo de corrente são normalmente muito maiores do que os dos diodos empregados em outras aplicações, como computadores e sistemas de comunicação.

Durante o intervalo  $t = 0 \rightarrow T/2$  na Fig. 2.43, a polaridade da tensão aplicada  $v_i$  é tal que estabelece uma “pressão” no sentido indicado e liga o diodo com a polaridade indicada. Substituindo pelo curto-circuito equivalente para o diodo ideal, resulta no circuito equivalente da Fig. 2.44, onde é bem óbvio que o sinal de saída é uma réplica exata do sinal da entrada. Os dois terminais definindo a tensão de saída são conectados diretamente ao sinal de entrada, via o curto-circuito produzido pelo diodo.

Para o período  $T/2 \rightarrow T$ , a polaridade da entrada  $v_i$  é mostrada na Fig. 2.45, e a polaridade resultante através do diodo ideal produz um estado “desligado” com um circuito-aberto como modelo equivalente. O resultado é a ausência de um caminho para que as cargas fluam e  $V_o = iR = (0)R = 0 \text{ V}$  para o período  $T/2 \rightarrow T$ . A entrada  $v_i$  e a saída  $v_o$  foram traçadas juntas na Fig. 2.46 para que possa haver uma comparação. O sinal de saída  $v_o$  tem agora uma área resultante média determinada por

$$V_{dc} = 0,318V_m \quad \text{meia-onda} \quad (2.7)$$

O processo de ser remover metade do sinal de entrada para estabelecer um nível dc é apropriadamente denominado *retificação de meia-onda*.

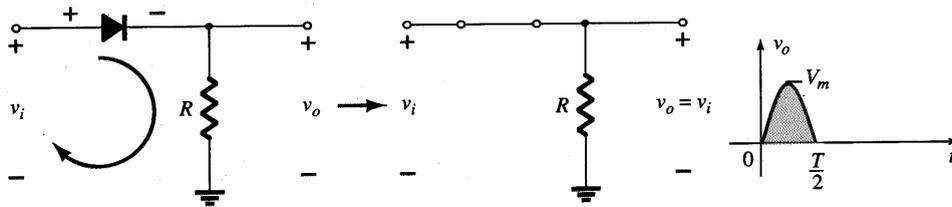


Fig. 2.44 Região de condução ( $0 \rightarrow T/2$ ).

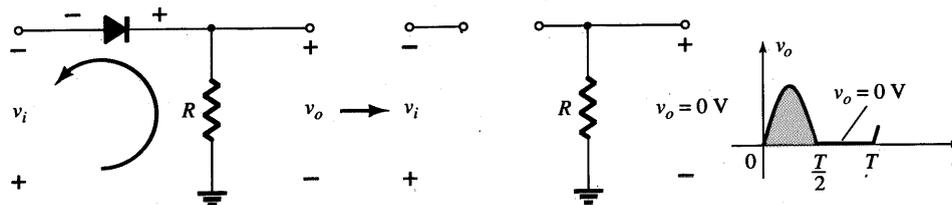


Fig. 2.45 Região de não-condução ( $T/2 \rightarrow T$ ).



O efeito de se utilizar um diodo de silício com  $V_T = 0,7 \text{ V}$  está demonstrado na Fig. 2.47 para a região em que o diodo é diretamente polarizado. O sinal aplicado deve, agora, ser de no mínimo  $0,7 \text{ V}$  para que o diodo possa “ligar-se”. Para valores de  $v_i$  menores do que  $0,7 \text{ V}$ , o diodo é ainda um circuito-aberto e  $v_o = 0 \text{ V}$ , como mostra a mesma figura. Quando em condução, a diferença entre  $v_o$  e  $v_i$  é um valor fixo de  $V_T = 0,7 \text{ V}$  e  $v_o = v_i - V_T$ , como mostrado na figura. O efeito na prática é a redução da área acima do eixo, que naturalmente reduz o nível de tensão dc resultante. Para situações onde  $V_m \gg V_T$ , a equação 2.8 pode ser aplicada para determinar o valor médio com um relativo alto grau de precisão.

$$V_{dc} \cong 0,318(V_m - V_T) \quad (2.8)$$

Na verdade, se  $V_m$  é suficientemente maior do que  $V_T$ , em geral a Eq. 2.7 é utilizada como uma primeira aproximação para  $V_{dc}$ .

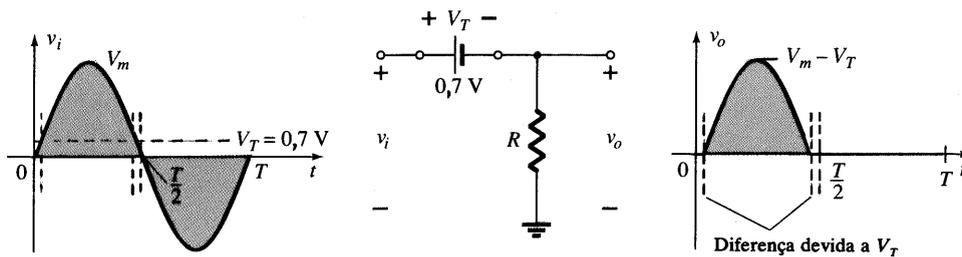


Fig. 2.47 Efeito de  $V_T$  no sinal retificado de meia-onda.

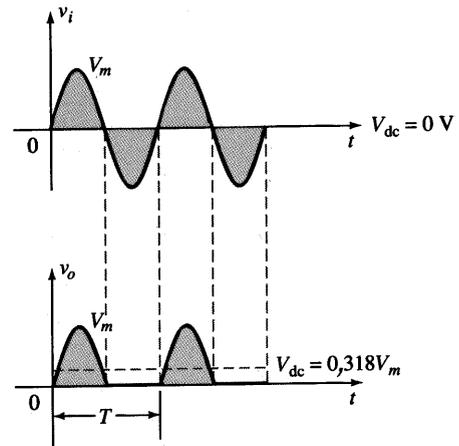


Fig. 2.46 Sinal retificado de meia-onda.

**EXEMPLO 2.18**

(a) Esboce a saída  $v_o$  e determine o nível dc de saída para o circuito da Fig. 2.48. (b) Repita o item (a) para o caso em que o diodo ideal é substituído por um diodo de silício. (c) Repita os itens (a) e (b) para  $V_m = 200 \text{ V}$ , e compare as soluções, utilizando as Eqs. (2.7) e (2.8).

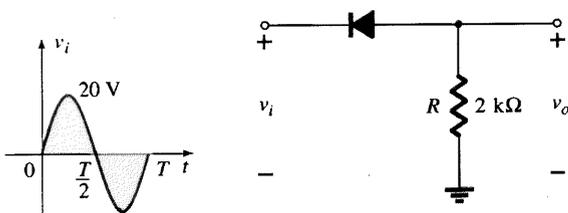


Fig. 2.48 Circuito do Exemplo 2.18.

**Solução**

(a) Nesta situação, o diodo conduzirá durante a parte negativa da entrada como mostra a Fig. 2.49, e  $v_o$  terá a forma mostrada na mesma figura

$$V_{dc} = -0,318V_m = -0,318(20 \text{ V}) = -6,36 \text{ V}$$

O sinal negativo indica que a polaridade da tensão de saída é oposta à definida na Fig. 2.48.

(b) Utilizando um diodo de silício, a saída tem a forma da Fig. 2.50 e

$$V_{dc} \cong -0,318(V_m - 0,7 \text{ V}) = -0,318(19,3 \text{ V}) \cong -6,14 \text{ V}$$

A queda resultante no nível dc é  $0,22 \text{ V}$ , ou aproximadamente 3,5%.

(c) Eq. (2.7):  $V_{dc} = -0,318V_m = -0,318(200 \text{ V}) = -63,6 \text{ V}$

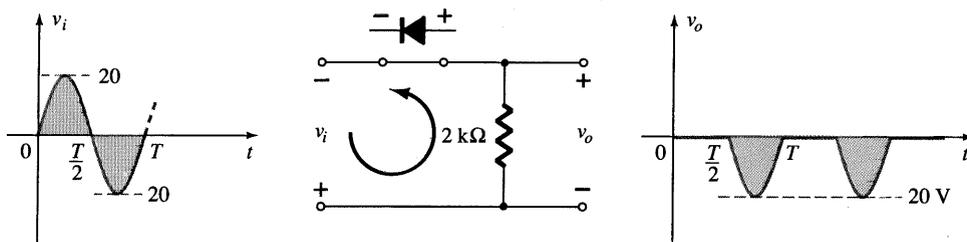


Fig. 2.49 Saída  $v_o$  resultante para o circuito do Exemplo 2.18.

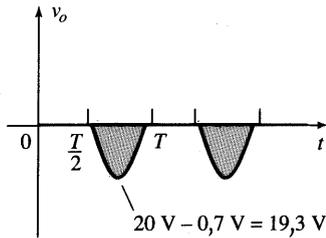


Fig. 2.50 Efeito de  $V_T$  no sinal de saída da Fig. 2.49.

$$\begin{aligned} \text{Eq. (2.8): } V_{dc} &= -0,318(V_m - V_T) = \\ &= -0,318(200 \text{ V} - 0,7 \text{ V}) \\ &= -(0,318)(199,3 \text{ V}) = \mathbf{-63,38 \text{ V}} \end{aligned}$$

que é uma diferença que pode certamente ser desprezada para a maioria das aplicações. Para o item c, a diferença e queda na amplitude devido a  $V_T$ , não seria perceptível em um osciloscópio típico, se uma escala adequada fosse utilizada.

### TPI (TPR)

A tensão de pico inversa (TPI) [ou TPR (tensão de pico reversa)] máxima é de suma importância no projeto de sistemas de retificação. Lembre-se de que a tensão máxima nominal do diodo não deve ser ultrapassada na região de polaridade reversa, ou o diodo entrará na região de avalanche Zener. A TPI máxima permitida para o retificador de meia-onda pode ser determinada da Fig. 2.51, que mostra o diodo reversamente polarizado da Fig. 2.43 com uma tensão aplicada máxima. Aplicando a lei das tensões de Kirchhoff, torna-se óbvio que a TPI máxima do diodo deve igualar-se ou ser maior do que o valor de pico da tensão aplicada. Portanto

$TPI \text{ máxima} \geq V_m$

retificador de meia-onda (2.9)

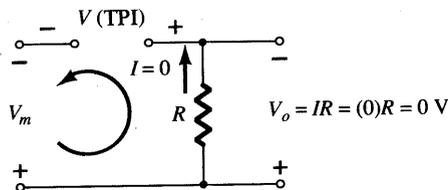


Fig. 2.51 Determinando a TPI máxima exigida para retificador de meia-onda.

## 2.8 RETIFICAÇÃO DE ONDA COMPLETA

### Circuito Ponte

O nível dc obtido a partir de uma entrada senoidal pode ser melhorado 100%, utilizando-se um processo chamado *retificação de onda completa*. O circuito mais usual empregado para realizar tal função aparece na Fig. 2.52, com seus quatro diodos em uma configuração em *ponte*. Durante o período de  $t = 0$  até  $T/2$ , a polaridade do sinal de entrada está mostrada na Fig. 2.53. As polaridades resultantes através dos diodos ideais são apresentadas também na Fig. 2.53, revelando que  $D_2$  e  $D_3$  estão conduzindo enquanto que  $D_1$  e  $D_4$  estão no estado “desligado”. O resultado é a configuração da Fig. 2.54, com sua corrente e polaridade através de  $R$  indicadas na Figura. Uma vez que os diodos são ideais, a tensão na carga  $v_o = v_i$ , como mostrado na mesma figura.

Para a região negativa do sinal de entrada, os diodos  $D_1$  e  $D_4$  estão conduzindo, resultando na configuração da Fig. 2.55. O resultado importante é que a polaridade através do resistor de carga  $R$  é a mesma da Fig. 2.53, estabelecendo um segundo pulso positivo, conforme a Fig. 2.55. Ao longo de um ciclo completo, as tensões de entrada e saída serão da forma mostrada na Fig. 2.56.

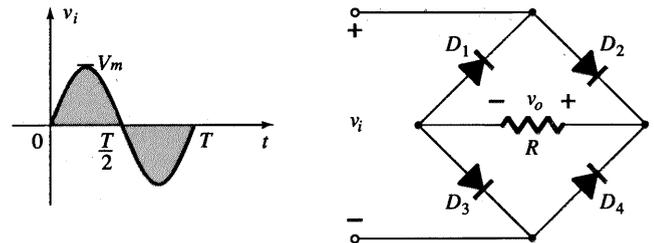


Fig. 2.52 Retificador em ponte de onda completa.

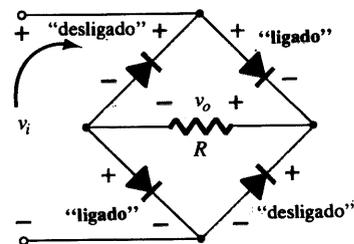


Fig. 2.53 Circuito da Fig. 2.52 para o período  $0 \rightarrow T/2$  do sinal de entrada  $v_i$ .

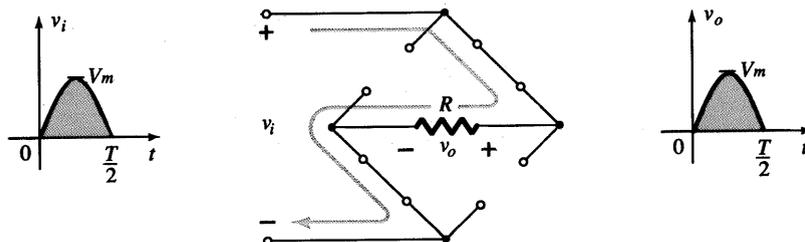


Fig. 2.54 Caminho de condução para a região positiva de  $v_o$ .

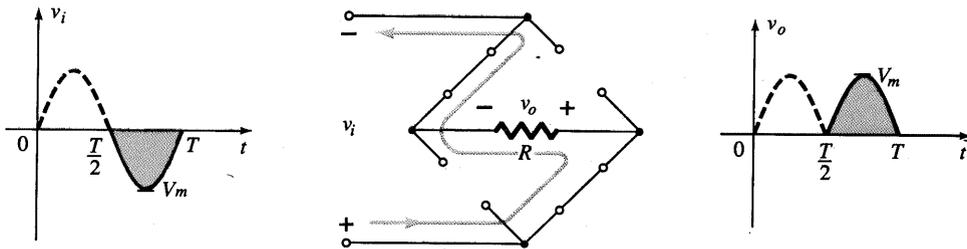


Fig. 2.55 Caminho de condução para a região negativa de  $v_i$ .

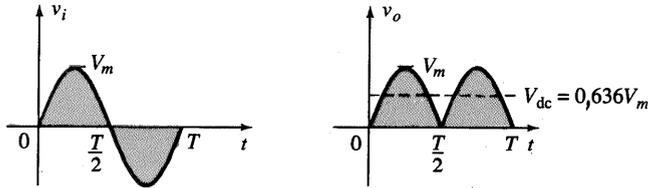


Fig. 2.56 Formas de ondas dos sinais de entrada e saída para um retificador de onda completa.

Como a área acima do eixo para um ciclo completo é agora o dobro da área obtida por um retificador de meia-onda, o nível dc foi também dobrado e

$$V_{dc} = 2(\text{Eq. 2,7}) = 2(0,318V_m)$$

ou  $V_{dc} = 0,636V_m$  onda completa (2.10)

Se diodos de silício ao invés de diodos ideais fossem empregados como mostra a Fig. 2.57, a aplicação da lei das tensões de Kirchoff ao longo do caminho de condução resultaria em

$$v_i - V_T - v_o - V_T = 0$$

e  $v_o = v_i - 2V_T$

O valor de pico da tensão de saída  $V_o$  é, portanto,

$$V_{o\text{máx}} = V_m - 2V_T$$

Para situações onde  $V_m \gg 2V_T$ , Eq. 2.11 pode ser aplicada para o valor médio com relativo alto grau de precisão.

$$V_{dc} \approx 0,636(V_m - 2V_T) \quad (2.11)$$

Novamente, portanto, se  $V_m$  é bem maior do que  $2V_T$ , então a Eq. 2.10 é normalmente aplicada como uma primeira aproximação para  $V_{dc}$ .

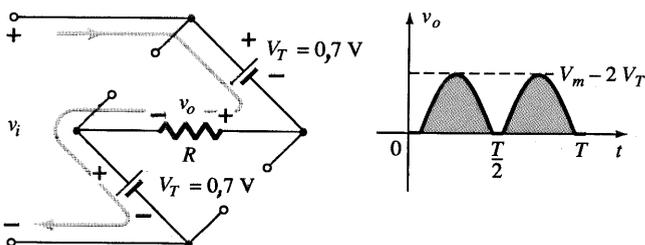


Fig. 2.57 Determinando  $V_{o\text{máx}}$  para diodos de silício na configuração em ponte.

### TPI

A TPI exigida para cada diodo (ideal) pode ser determinada da Fig. 2.58, obtida no pico positivo do sinal de entrada. Para o loop indicado, a tensão máxima através de  $R$  é  $V_m$  e a TPI máxima é definida por

$$\text{TPI} \approx V_m \quad \text{retificador em ponte de onda completa} \quad (2.12)$$

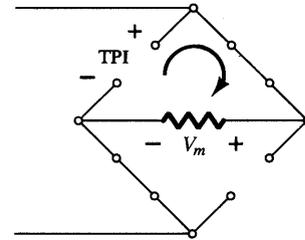


Fig. 2.58 Determinando a TPI permitida para a configuração em ponte.

### Transformador com Derivação Central (“Center Tap”)

Um retificador de onda completa também popular aparece na Fig. 2.59 com dois diodos somente; entretanto, neste caso, há a necessidade de um transformador com derivação central (center tap) para que o sinal de entrada apareça em cada seção do secundário do transformador. Durante a porção positiva de  $v_i$  aplicado ao primário do transformador, o circuito se comportará como mostra a Fig. 2.60.  $D_1$  assume o curto-circuito equivalente, e  $D_2$  o

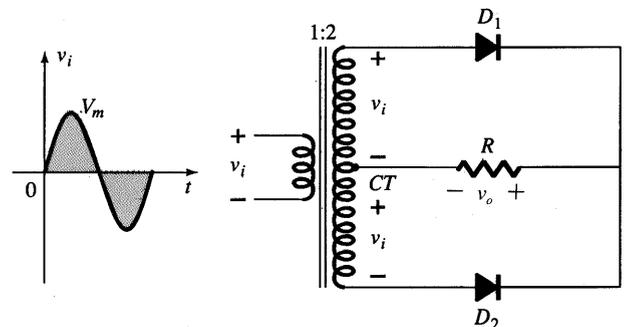


Fig. 2.59 Retificador de onda completa, utilizando transformador center tap.

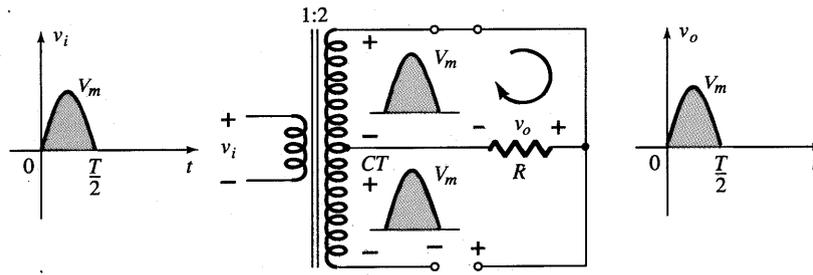


Fig. 2.60 Condições do circuito para a região positiva de  $v_i$ .

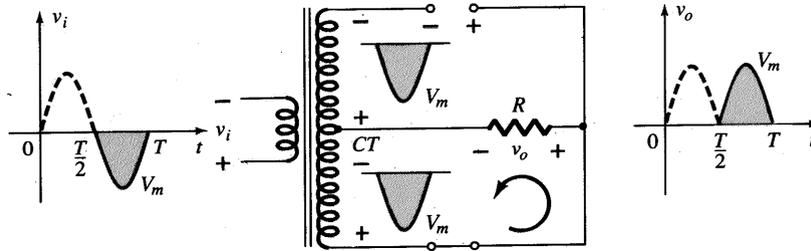


Fig. 2.61 Condições do circuito para a região negativa de  $v_i$ .

circuito-aberto equivalente, determinados pelas tensões no secundário e pelos sentidos das correntes resultantes. A tensão de saída aparece como mostra a Fig. 2.60.

Durante a porção negativa do sinal de entrada, o circuito comporta-se como mostra a Fig. 2.61, invertendo as funções dos diodos, mas mantendo a mesma polaridade da tensão através do resistor de carga  $R$ . O efeito observado na prática é a mesma saída mostrada na Fig. 2.56, com os mesmos níveis dc.

**TPI**

O circuito da Fig. 2.62 nos auxiliará a determinar a TPI para cada diodo neste retificador de onda completa. Aplicando a ten-

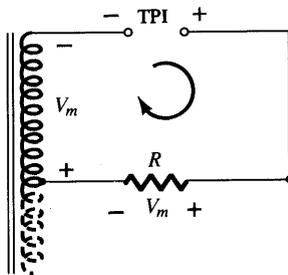


Fig. 2.62 Determinando o valor da TPI para os diodos do retificador de onda completa com transformador CT.

são máxima no secundário, e  $V_m$  sendo determinada pelo loop adjacente, resulta em

$$\begin{aligned} TPI &= V_{\text{secundária}} + V_R \\ &= V_m + V_m \end{aligned} \tag{2.13}$$

e  $TPI \cong 2V_m$  transformador CT retificador da onda completa

**EXEMPLO 2.19**

Determine a forma de onda de saída do circuito da Fig. 2.63, e calcule o nível dc na saída e a TPI exigida para cada diodo.

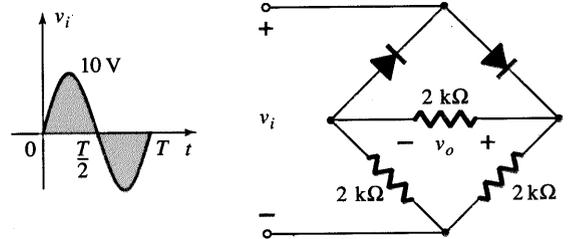


Fig. 2.63 Circuito em ponte do Exemplo 2.19.

**Solução**

O circuito comportar-se-á como mostra a Fig. 2.64 para a região positiva do sinal de entrada. Redesenhando o circuito, resulta na configuração da Fig. 2.65, onde  $v_o = v_i/2$  ou  $V_{o\text{máx}} = (10 \text{ V})/2 = 5 \text{ V}$ , como mostra a Fig. 2.65. Para a parte negativa do sinal de entrada, as funções dos diodos serão invertidas e  $v_o$  será como mostrado na Fig. 2.66.

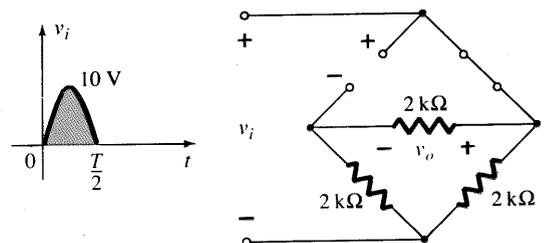


Fig. 2.64 Circuito da Fig. 2.63 para a região positiva de  $v_i$ .

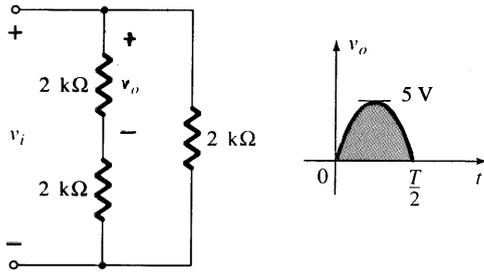


Fig. 2.65 Circuito redesenhado da Fig. 2.64.

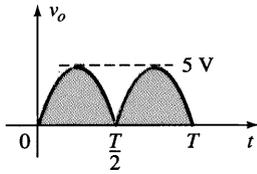


Fig. 2.66 Saída resultante do Exemplo 2.19.

O efeito da retirada de dois diodos da configuração em ponte foi, portanto, para reduzir o nível dc disponível ao seguinte valor:

$$V_{dc} = 0,636(5 \text{ V}) = \mathbf{3,18 \text{ V}}$$

mesmo valor disponível de um retificador de meia-onda com o mesmo sinal de entrada. Entretanto, a TPI, assim como foi determinada na Fig. 2.58, é igual à máxima tensão através de  $R$ , que é 5 V ou metade daquela exigida para um retificador de meia-onda com a mesma entrada.

## 2.9 CEIFADORES

Há uma variedade de circuitos com diodos chamados *ceifadores*\* que possuem a característica de “ceifar” uma porção do sinal de

entrada, sem distorcer o restante da forma de onda alternada. O retificador de meia-onda da Seção 2.7 é um exemplo da forma mais simples de um ceifador com diodo — um resistor e diodo. Dependendo da orientação do diodo, a região positiva ou negativa do sinal de entrada é “ceifada”.

Há duas categorias gerais de ceifadores: *série* e *paralelo*. A configuração série é definida como aquela que tem o diodo em série com a carga, enquanto a paralela tem o diodo em um ramo paralelo à carga.

### Série

A resposta da configuração série da Fig. 2.67a para várias formas de onda é fornecida na Fig. 2.67b. Embora inicialmente introduzido como um retificador de meia-onda (para formas de onda senoidais), não há limite aos tipos de sinais que podem ser aplicados a um ceifador. A inclusão de uma fonte dc, mostrada na Fig. 2.68, pode ter um efeito pronunciado na saída de um ceifador. Nossa discussão inicial será limitada a diodos ideais, com o efeito de  $V_T$  reservado a um exemplo na conclusão.

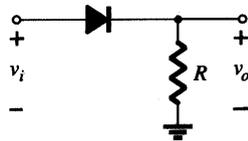
Não há um procedimento geral para a análise de circuitos do tipo mostrado na Fig. 2.68, mas existem algumas idéias para se ter em mente que auxiliam na busca de uma solução.

1. Imagine um esboço da resposta do circuito baseado na direção do diodo e nos níveis de tensão aplicados.

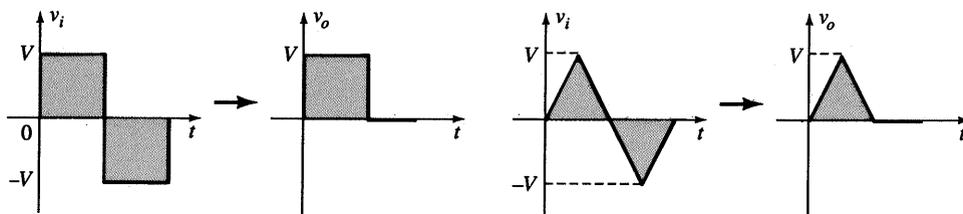
Para o circuito da Fig. 2.68, a direção do diodo sugere que o sinal  $v_i$  deva ser positivo para ligá-lo. Além disso, a fonte dc exige que a tensão  $v_i$  seja maior do que  $V$  volts para ligar o diodo. A região negativa do sinal de entrada está “pressionando” o diodo para o estado “desligado”, apoiado pela presença da fonte dc. Em geral, portanto, podemos estar bem certos de que o diodo comporta-se como um circuito-aberto (estado “desligado”) para a região negativa do sinal de entrada.

2. Determine a tensão aplicada (tensão de transição) que causará a mudança de estado do diodo.

Para o diodo ideal, a transição entre os estados ocorrerá no ponto em que  $v_d = 0 \text{ V}$  e  $i_d = 0 \text{ A}$ . A aplicação da condição  $i_d =$



(a)



(b)

Fig. 2.67 Ceifador série.

\*N.T.: Os circuitos *ceifadores* são também conhecidos como *limitadores de tensão* (ou de corrente), *seletores de amplitude* ou *cortadores*.

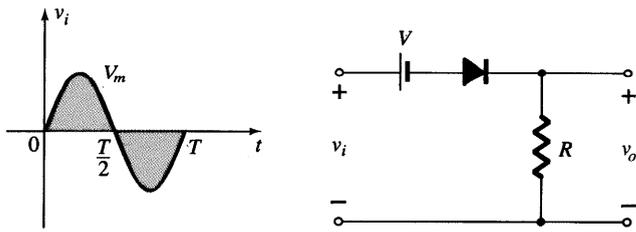


Fig. 2.68 Ceifador série com uma fonte dc.

0 em  $v_d = 0$  para o circuito da Fig. 2.68 resulta na configuração da Fig. 2.69, onde se sabe que o valor de  $v_i$  que causará uma transição do estado é

$$v_i = V \tag{2.14}$$

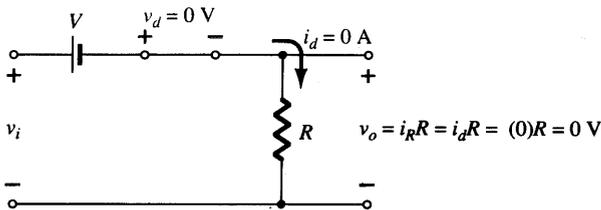


Fig. 2.69 Determinando o nível de transição para o circuito da Fig. 2.68.

Para uma tensão de entrada maior do que  $V$  volts, o diodo está no estado de curto-circuito, enquanto que para tensões de entrada menores do que  $V$  volts o diodo se encontra no estado de circuito-aberto, ou “desligado”.

3. Esteja sempre ciente dos terminais e da polaridade de  $v_o$ .

Quando o diodo está no estado de curto-circuito, tal como mostra a Fig. 2.70, a tensão de saída  $v_o$  pode ser determinada, aplicando-se a lei das tensões de Kirchhoff no sentido horário

$$v_i - V - v_o = 0 \text{ (direção CW)}$$

$$v_o = v_i - V \tag{2.15}$$

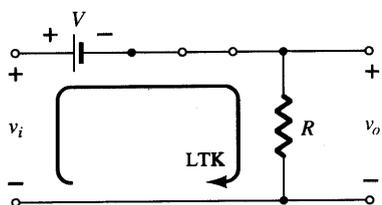


Fig. 2.70 Determinando  $v_o$ .

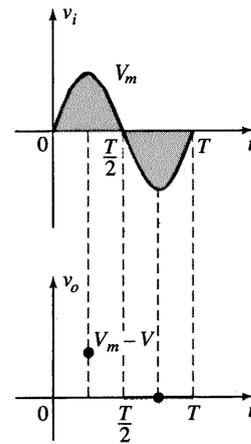


Fig. 2.71 Determinando valores de  $v_o$ .

É, portanto, possível que a tensão de saída seja traçada a partir de pontos de  $v_o$ , como demonstra a Fig. 2.71. Tenha em mente que, em um valor instantâneo de  $v_i$ , a entrada pode ser considerada uma fonte dc daquele valor e o correspondente valor dc (o valor instantâneo) da saída determinado. Por exemplo, em  $v_i = V_m$ , para o circuito da Fig. 2.68, o circuito a ser analisado aparece na Fig. 2.72. Para  $V_m > V$  o diodo está no estado de curto-circuito, e  $v_o = V_m - V$ , como mostra a Fig. 2.71.

Em  $v_i = V$ , os diodos mudam de estado, e em  $v_i = -V_m$ ,  $v_o = 0$  V, e a curva completa para  $v_o$  pode ser traçada conforme a Fig. 2.73.

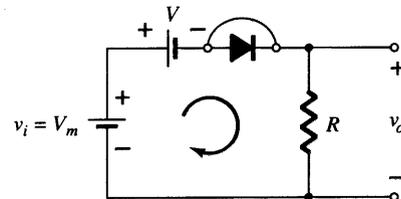


Fig. 2.72 Determinando  $v_o$ , quando  $v_i = V_m$ .

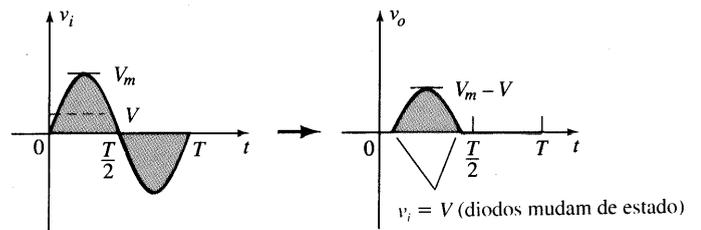


Fig. 2.73 Traçando  $v_o$ .

e

4. Pode ser útil traçar o sinal de entrada acima da saída, e determinar a saída a partir de valores instantâneos da entrada.

EXEMPLO 2.20

Determine a forma da onda de saída para o circuito da Fig. 2.74.

Solução

A experiência passada sugere que o diodo estará no estado “ligado” para a região positiva de  $v_i$  — especialmente quando con-

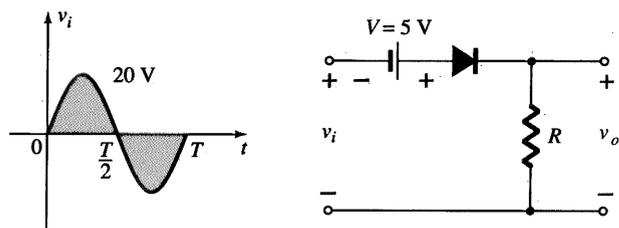


Fig. 2.74 Ceifador série para o Exemplo 2.20.

Consideramos o efeito de  $V = 5 \text{ V}$ . O circuito ficará como mostra a Fig. 2.75 e  $v_o = v_i + 5 \text{ V}$ . Substituindo  $i_d = 0$  em  $v_d = 0$  para os níveis de transição, obtemos o circuito da Fig. 2.76 e  $v_i = -5 \text{ V}$ .

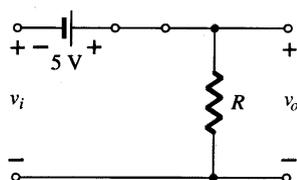


Fig. 2.75  $v_o$  com o diodo no estado ligado.

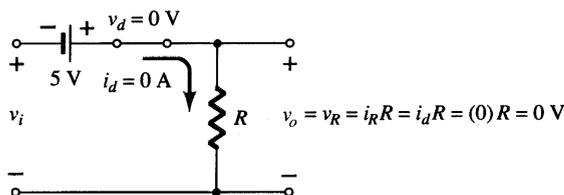


Fig. 2.76 Determinando o nível de transição para o ceifador da Fig. 2.74.

Para  $v_i$  mais negativo do que  $-5 \text{ V}$ , o diodo entrará no seu estado de circuito-aberto, enquanto que para tensões maiores do que  $-5 \text{ V}$  o diodo está no seu estado de curto-circuito. As tensões de entrada e saída aparecem na Fig. 2.77.

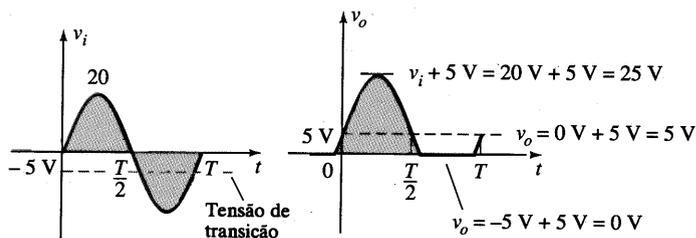


Fig. 2.77 Traçando  $v_o$  do Exemplo 2.20.

A análise dos circuitos ceifadores tendo como entradas ondas quadradas é, na realidade, mais fácil de ser realizada do que com entradas senoidais, pois apenas dois níveis são considerados. Em outras palavras, o circuito pode ser analisado como se tivesse dois níveis dc na entrada, com a saída resultante  $v_o$  determinada de forma apropriada.

**EXEMPLO 2.21**

Repita o Exemplo 2.20 para a onda quadrada, como entrada da Fig. 2.78.

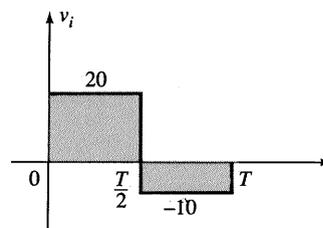


Fig. 2.78 Sinal aplicado do Exemplo 2.21.

**Solução**

Para  $v_i = 20 \text{ V}$  ( $0 \rightarrow T/2$ ), o resultado é o circuito da Fig. 2.79. O diodo está no estado de curto-circuito, e  $v_o = 20 \text{ V} + 5 \text{ V} = 25 \text{ V}$ . Para  $v_i = -10 \text{ V}$  o resultado é o circuito da Fig. 2.80, colocando o diodo no estado “desligado” e  $v_o = i_d R = (0)R = 0 \text{ V}$ . A tensão de saída resultante aparece na Fig. 2.81.

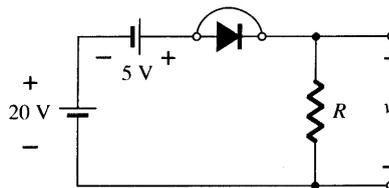


Fig. 2.79  $v_o$  com  $v_i = +20 \text{ V}$ .

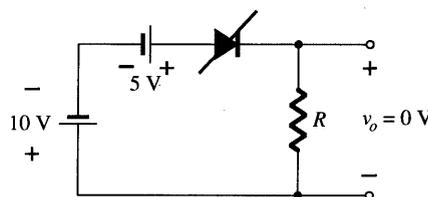


Fig. 2.80  $v_o$  com  $v_i = -10 \text{ V}$ .

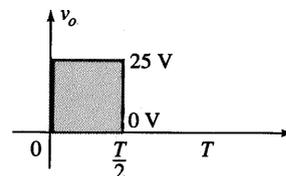


Fig. 2.81 Esboçando  $v_o$  para o Exemplo 2.21.

Note no Exemplo 2.21 que o ceifador não somente corta o sinal em  $5 \text{ V}$  de sua excursão total como também aumenta o nível dc em  $5 \text{ V}$ .

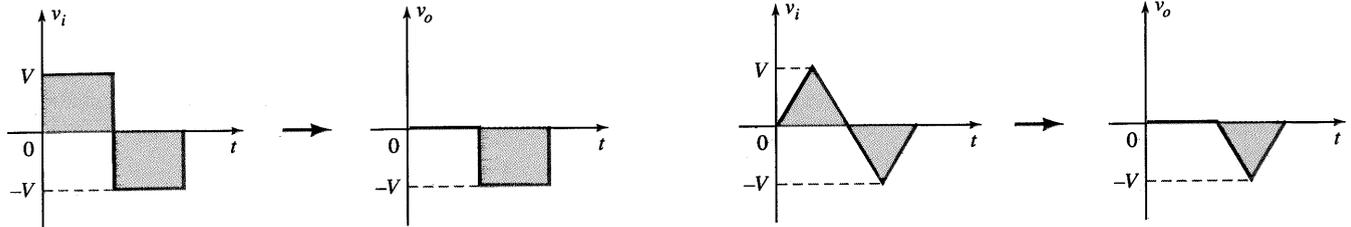
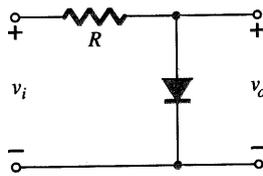


Fig. 2.82 Resposta ao ceifador paralelo.

### Paralelo

O circuito da Fig. 2.82 é a mais simples das configurações em paralelo com diodos, com a saída resultante para os mesmos sinais de entrada da Fig. 2.67. A análise das configurações em paralelo é muito semelhante à utilizada em configurações série, como demonstrado no próximo exemplo.

#### EXEMPLO 2.22

Determine  $v_o$  para o circuito da Fig. 2.83.

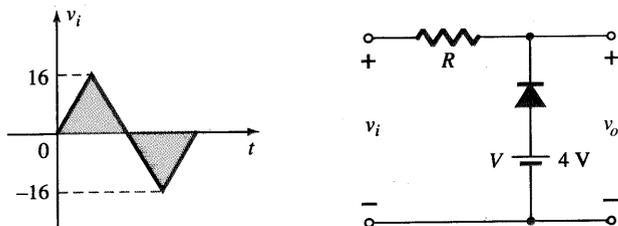


Fig. 2.83 Exemplo 2.22.

### Solução

A polaridade da fonte dc e a direção do diodo sugerem fortemente que o diodo estará no estado “ligado” para a região negativa do sinal de entrada. Para esta região, o circuito comporta-se-á como mostra a Fig. 2.84, onde os terminais definidos para  $v_o$  exigem que  $v_o = V = 4\text{ V}$ .

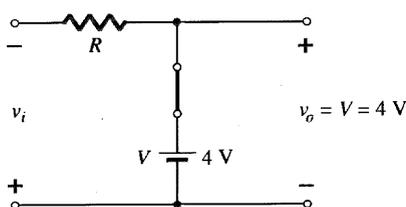


Fig. 2.84  $v_o$  para a região negativa de  $v_i$ .

O estado de transição pode ser determinado da Fig. 2.85, onde a condição  $i_d = 0\text{ A}$  com  $v_d = 0\text{ V}$  foi imposta. O resultado é  $v_i$  (transição) =  $V = 4\text{ V}$ .

Uma vez que a fonte dc está obviamente “pressionando” o diodo a ficar no estado de curto-circuito, a tensão de entrada deve ser maior do que 4 V para o diodo entrar no estado “desligado”. Qualquer valor de tensão na entrada menor do que 4 V resulta em um diodo no estado de curto-circuito.

Para o estado de circuito-aberto, o circuito comporta-se como mostra a Fig. 2.86, onde  $v_o = v_i$ . Completando o traçado de  $v_o$  resulta na forma de onda da Fig. 2.87.

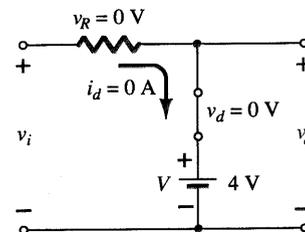


Fig. 2.85 Determinando o nível de transição para o Exemplo 2.22.

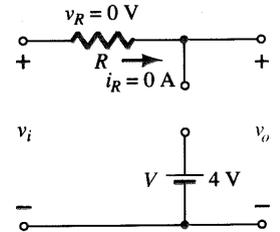


Fig. 2.86 Determinando  $v_o$  para o estado “desligado” do diodo.

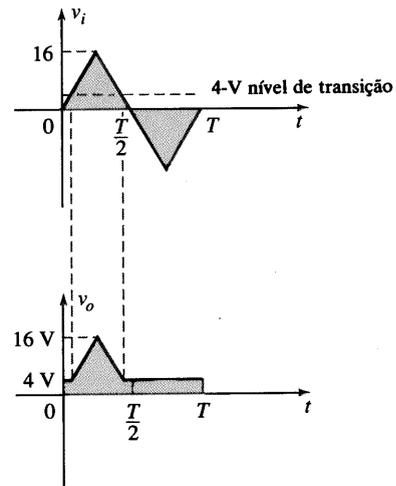


Fig. 2.87 Traçando  $v_o$  para o Exemplo 2.22.



Para examinar os efeitos de  $V_T$  na tensão de saída, o próximo exemplo especificará um diodo de silício ao invés de um diodo ideal equivalente.

**EXEMPLO 2.23**

Repita o Exemplo 2.22, utilizando um diodo de silício com  $V_T = 0,7 \text{ V}$ .

**Solução**

A tensão de transição pode ser inicialmente determinada aplicando a condição  $i_d = 0 \text{ A}$  em  $v_d = V_D = 0,7 \text{ V}$ , e obtendo o circuito da Fig. 2.88. Aplicando a lei das tensões de Kirchoff na malha de saída no sentido horário, concluímos que

$$v_i + V_T - V = 0$$

e 
$$v_i = V - V_T = 4 \text{ V} - 0,7 \text{ V} = 3,3 \text{ V}$$
  

$$v_R = i_R R = i_d R = (0) R = 0 \text{ V}$$

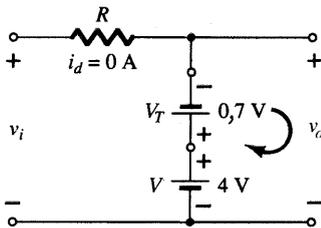


Fig. 2.88 Determinando o nível de transição para o circuito da Fig. 2.83.

Para tensões de entrada maiores do que 3,3 V, o diodo comportar-se-á como um circuito aberto, e  $v_o = v_i$ . Para tensões de entrada menores do que 3,3 V, o diodo estará no estado “ligado” e resulta no circuito da Fig. 2.89, onde

$$v_o = 4 \text{ V} - 0,7 \text{ V} = 3,3 \text{ V}$$

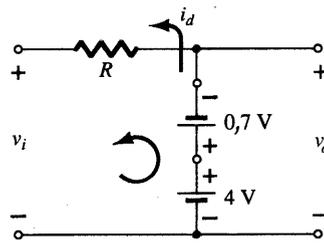


Fig. 2.89 Determinando  $v_o$  para o diodo da Fig. 2.83 no estado “ligado”.

A forma de onda resultante na saída aparece na Fig. 2.90. Note que o efeito de  $V_T$  foi somente abaixar o nível de transição de 4 V para 3,3 V.

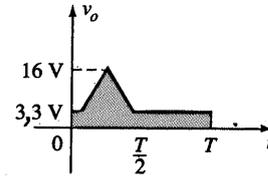


Fig. 2.90 Traçando  $v_o$  para o Exemplo 2.23.

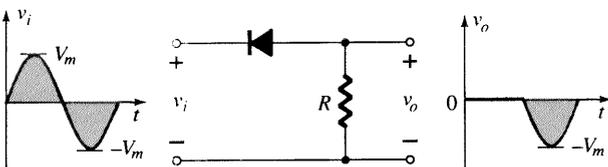
Não há dúvida de que a inclusão dos efeitos de  $V_T$  complica a análise de alguma forma, mas uma vez compreendida a análise com o diodo ideal, o procedimento para a solução, incluindo os efeitos de  $V_T$ , não será difícil.

**Sumário**

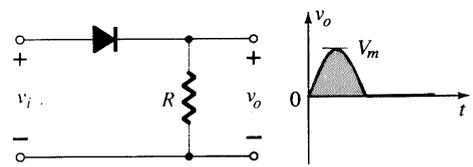
Vários ceifadores série e paralelo com a saída resultante para a entrada senoidal são mostrados na Fig. 2.91. Em particular, note a resposta da última configuração, com a característica de remover uma seção positiva e uma seção negativa, determinada pela amplitude das fontes dc.

**Ceifadores em Série Simples (Diodos ideais)**

POSITIVO



NEGATIVO



**Ceifadores em Série Polarizados (Diodos ideais)**

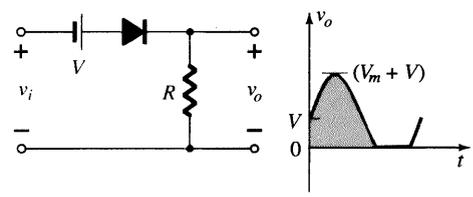
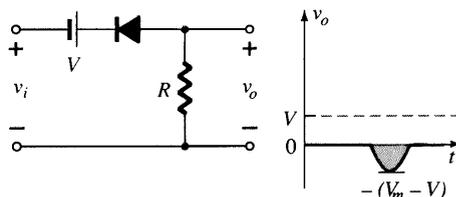
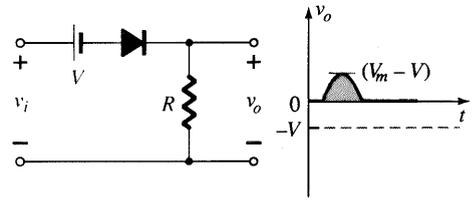
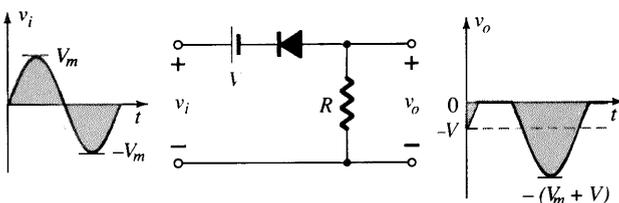
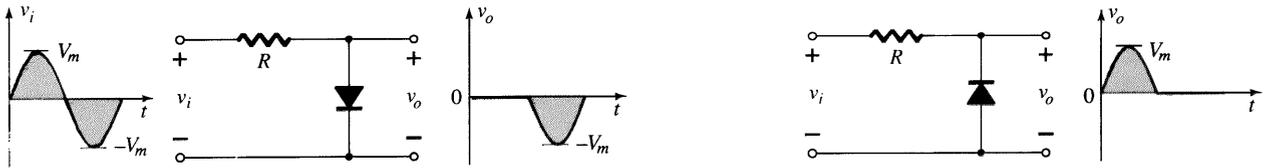


Fig. 2.91 Circuitos ceifadores.



**Ceifadores Paralelos Simples (Diodos ideais)**



**Ceifadores Paralelos Polarizados (Diodos ideais)**

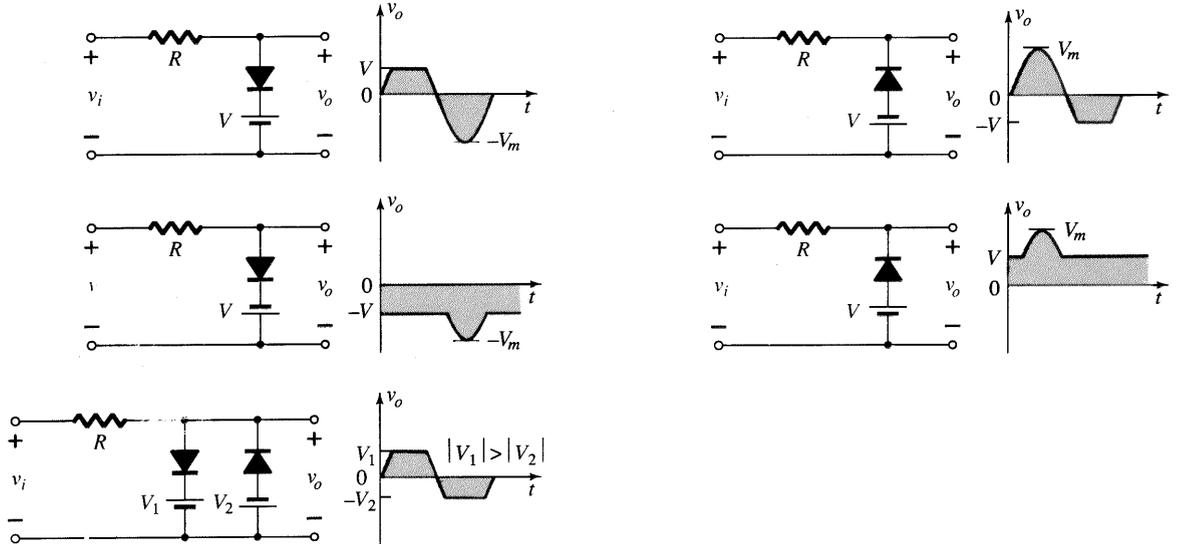


Fig. 2.91 Circuitos ceifadores (cont.).

**2.10 GRAMPEADORES**

O circuito *grampeador* é aquele que “grampeia” o sinal em um nível dc diferente. O circuito deve ter um capacitor, um diodo, e um elemento resistivo, mas pode-se empregar uma fonte de independente para introduzir um deslocamento adicional. O valor de  $R$  e  $C$  deve ser escolhido de maneira que a constante de tempo  $\tau = RC$  seja grande o suficiente para assegurar que a tensão através do capacitor não descarregue significativamente durante o intervalo em que o diodo não está conduzindo. Durante toda a análise, assumiremos que o capacitor se carrega ou descarrega completamente durante cinco constantes de tempo.

O circuito da Fig. 2.92 grampeará o sinal de entrada ao nível zero (para diodos ideais). O resistor  $R$  pode ser o resistor de carga ou uma combinação paralela do resistor de carga e um resistor projetado para fornecer o valor desejado de  $R$ .

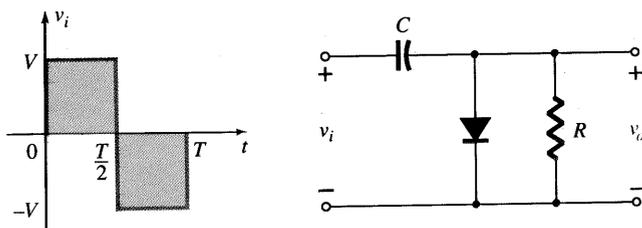


Fig. 2.92 Grampeador.

Durante o intervalo  $0 \rightarrow T/2$ , o circuito comportar-se-á como mostra a Fig. 2.93, com o diodo no estado efetivamente “ligado”, “retirando” o efeito do resistor  $R$ . A constante de tempo  $RC$  resultante é tão pequena ( $R$  determinado pela resistência inerente do circuito) que o capacitor se carregará a  $V$  volts muito rápido. Durante este intervalo, a tensão de saída está diretamente através do curto-circuito e  $v_o = 0$  V.

Quando a entrada chaveia para o estado  $-V$ , o circuito comporta-se como mostra a Fig. 2.94, com o circuito-aberto equivalente para o diodo determinado pelo sinal aplicado e a tensão armazenada através do capacitor — ambos “pressionando” a corrente através do diodo do catodo para o anodo. Agora que  $R$  está de volta ao circuito, a constante de tempo determinada pelo produto  $RC$  é suficientemente grande para estabelecer um período de descarga  $5\tau$  muito maior do que o período  $T/2 \rightarrow T$ , e pode-se assumir que o capacitor mantém sua carga e, portanto, a tensão (já que  $V = Q/C$ ) durante este período.

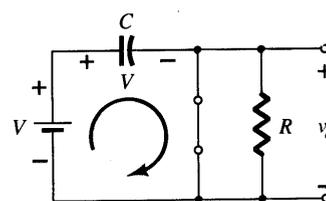


Fig. 2.93 Diodo “ligado” e o capacitor carregando para  $V$  volts.

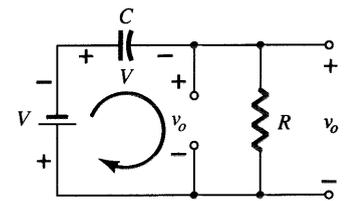


Fig. 2.94 Determinando  $v_o$  com o diodo “desligado”.



Já que  $v_o$  está em paralelo com o diodo e o resistor, pode ser desenhado também na posição alternativa mostrada na Fig. 2.94. A aplicação da lei das tensões de Kirchhoff na malha de entrada resulta em:

$$-V - V - v_o = 0$$

e

$$v_o = -2V$$

O sinal negativo resulta do fato de a polaridade de 2V ser oposta à polaridade definida para  $v_o$ . A forma de onda resultante na saída aparece na Fig. 2.95 com o sinal de entrada. O sinal de saída é grampeado a 0 V para o intervalo de 0 a  $T/2$ , mas mantendo a mesma excursão total (2V), como na entrada.

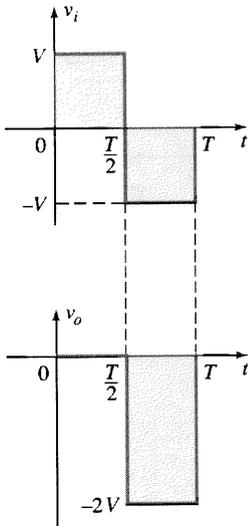


Fig. 2.95 Traçando  $v_o$  para o circuito da Fig. 2.92.

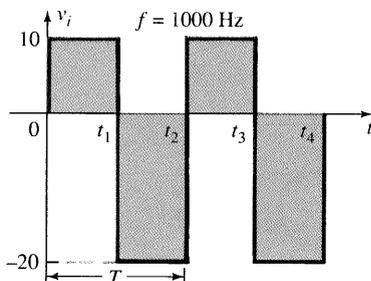
Para um circuito grampeador:

*A excursão total da saída é igual à excursão total do sinal de entrada.*

Este fato é uma excelente ferramenta de verificação para o resultado obtido.

Em geral, os seguintes passos podem ser úteis na análise de circuitos grampeadores.

1. Inicie a análise de circuitos grampeadores, considerando a parte do sinal de entrada que polarizará diretamente o diodo.



A afirmação acima pode exigir que se despreze um intervalo inicial de entrada (como demonstrado no exemplo a seguir), mas a análise não será estendida desnecessariamente por esta razão.

2. Durante o período que o diodo está no estado “ligado”, assumo que o capacitor carrega-se instantaneamente a um nível de tensão determinado pelo circuito.
3. Assumo que, durante o período em que o diodo está no estado “desligado”, o capacitor se mantém em seu nível de tensão estabelecido.
4. Durante toda a análise, possua um conhecimento contínuo da localização e polaridade de referência de  $v_o$  para assegurar que os níveis apropriados para  $v_o$  foram obtidos.
5. Tenha em mente a regra geral que a excursão total da saída deve estar de acordo com a excursão do sinal de entrada.

**EXEMPLO 2.24**

Determine  $v_o$  para o circuito da Fig. 2.96 para a entrada indicada.

**Solução**

Note que a frequência é de 1000 Hz, resultando em um período de 1 ms e um intervalo de 0,5 ms entre os níveis. A análise começará com o período  $t_1 \rightarrow t_2$  do sinal de entrada, já que o diodo está em seu estado de curto-circuito, como recomendado pelo comentário 1. Para este intervalo, o circuito comportar-se-á como mostra a Fig. 2.97. A saída está sobre R, mas está também diretamente sobre a bateria de 5 V se você reparar a conexão direta entre os terminais definidos para  $v_o$  e os terminais da bateria. O resultado é  $v_o = 5 V$  para este intervalo. A aplicação da lei da tensão de Kirchhoff ao longo da malha de entrada resulta em

$$-20 V + V_C - 5 V = 0$$

e

$$V_C = 25 V$$

O capacitor portanto carregará até 25 V, como afirmado no comentário 2. Neste caso, o diodo não provoca um curto-circuito no resistor R, mas um circuito equivalente de Thévenin daquela porção do circuito que inclui a bateria e o resistor, resultando em  $R_{Th} = 0 \Omega$  com  $E_{Th} = V = 5 V$ . Para o período  $t_2 \rightarrow t_3$  o circuito comportar-se-á como mostra a Fig. 2.98.

O circuito-aberto equivalente para o diodo livrará a bateria de 5 V de possuir qualquer efeito sobre  $v_o$ , e a aplicação da lei das

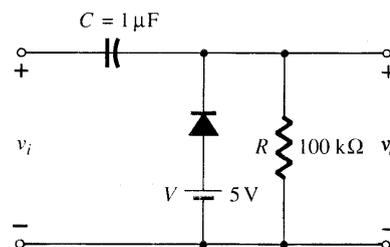


Fig. 2.96 Sinal aplicado e circuito para o Exemplo 2.24.

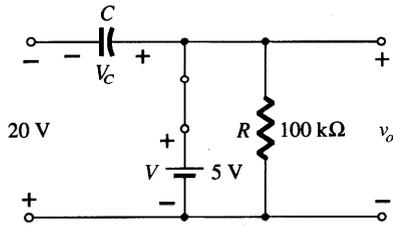


Fig. 2.97 Determinando  $v_o$  e  $v_c$  com o diodo no estado “ligado”.

tensões de Kirchhoff ao longo da malha de saída do circuito resulta em

$$+10\text{ V} + 25\text{ V} - v_o = 0$$

e 
$$v_o = 35\text{ V}$$

A constante de tempo do circuito de descarga da Fig. 2.98 é determinada pelo produto  $RC$  e tem o valor

$$\tau = RC = (100\text{ k}\Omega)(0,1\ \mu\text{F}) = 0,01\text{ s} = 10\text{ ms}$$

O tempo total de descarga é, portanto,  $5\tau = 5(10\text{ ms}) = 50\text{ ms}$ .

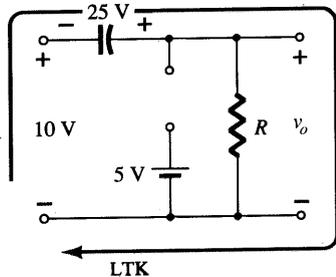


Fig. 2.98 Determinando  $v_o$  com o diodo no estado “desligado”.

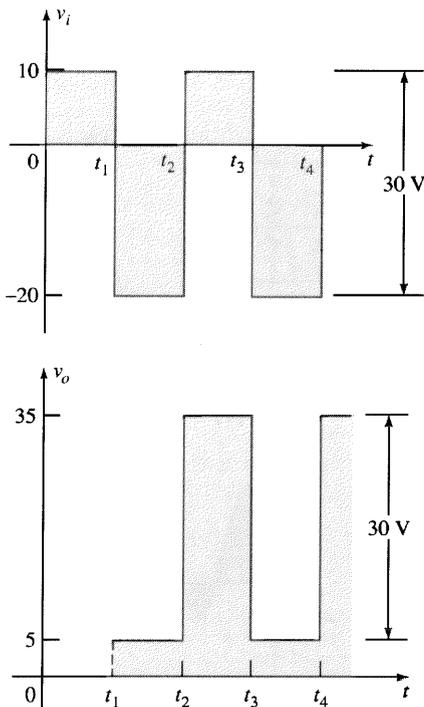


Fig. 2.99  $v_i$  e  $v_o$  para o grameamento da Fig. 2.96.

Uma vez que o intervalo  $t_2 \rightarrow t_3$  durará apenas 0,5 ms, certamente uma boa aproximação é considerar que o capacitor manterá sua tensão durante o período de descarga entre os pulsos do sinal de entrada. A saída resultante aparece na Fig. 2.99 com o sinal de entrada. Note que a excursão do sinal de saída de 30 V está de acordo com a excursão do sinal de entrada, como mencionado na etapa 5.

**EXEMPLO 2.25**

Repita o Exemplo 2.24, utilizando um diodo de silício com  $V_T = 0,7\text{ V}$ .

**Solução**

Para o estado de curto-circuito, o circuito agora fica conforme mostrado na Fig. 2.100, e  $v_o$  pode ser determinado pela lei das tensões de Kirchhoff aplicada à seção de saída.

$$+5\text{ V} - 0,7\text{ V} - v_o = 0$$

e 
$$v_o = 5\text{ V} - 0,7\text{ V} = 4,3\text{ V}$$

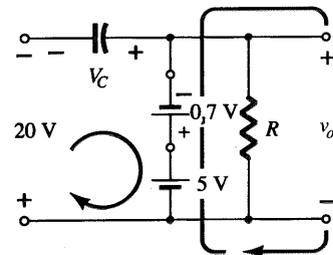


Fig. 2.100 Determinando  $v_o$  e  $V_c$  com o diodo no estado “ligado”.

Para a seção de entrada, a lei das tensões de Kirchhoff resultará em

$$-20\text{ V} + V_C + 0,7\text{ V} - 5\text{ V} = 0$$

e 
$$V_C = 25\text{ V} - 0,7\text{ V} = 24,3\text{ V}$$

Para o período  $t_2 \rightarrow t_3$  o circuito agora aparecerá conforme mostrado na Fig. 2.101, sendo a única modificação a tensão através do capacitor. A aplicação da lei das tensões de Kirchhoff produz

$$+10\text{ V} + 24,3\text{ V} - v_o = 0$$

e 
$$v_o = 34,3\text{ V}$$

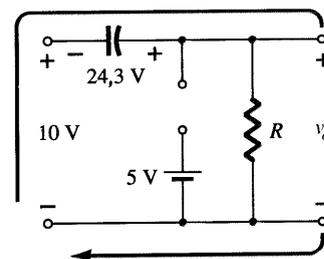


Fig. 2.101 Determinando  $v_o$  com o diodo no estado aberto.



A saída resultante aparece na Fig. 2.102, verificando a afirmativa de que as excursões dos sinais de entrada e saída são iguais.

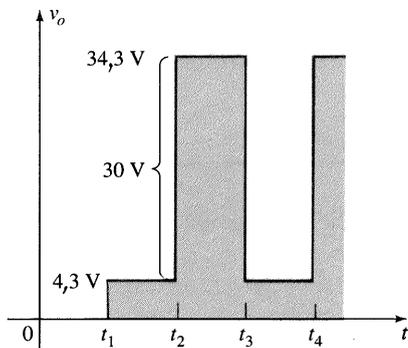


Fig. 2.102 Traçando  $v_o$  para o grampeador da Fig. 2.96 com um diodo de silício.

Alguns circuitos grampeadores e seus efeitos sobre o sinal de entrada são mostrados na Fig. 2.103. Embora todas as formas de onda que aparecem na Fig. 2.103 sejam ondas quadradas, circuitos grampeadores operam igualmente bem para sinais senoidais. Na verdade, uma abordagem para a análise de circuitos grampeadores com entradas senoidais é substituir o sinal senoidal por uma onda quadrada com os mesmos valores de pico. A saída resultante formará, portanto, uma envoltória para a resposta senoidal, como mostra a Fig. 2.104 para um circuito que aparece no canto inferior direito da Fig. 2.103.

## 2.11 DIODOS ZENER

A análise de circuitos empregando diodos Zener é muito semelhante àquela aplicada para diodos semicondutores nas seções anteriores. Inicialmente o estado do diodo deve ser determinado, e em seguida deve haver uma substituição do modelo apropriado e uma determinação das outras variáveis do circuito. Ex-

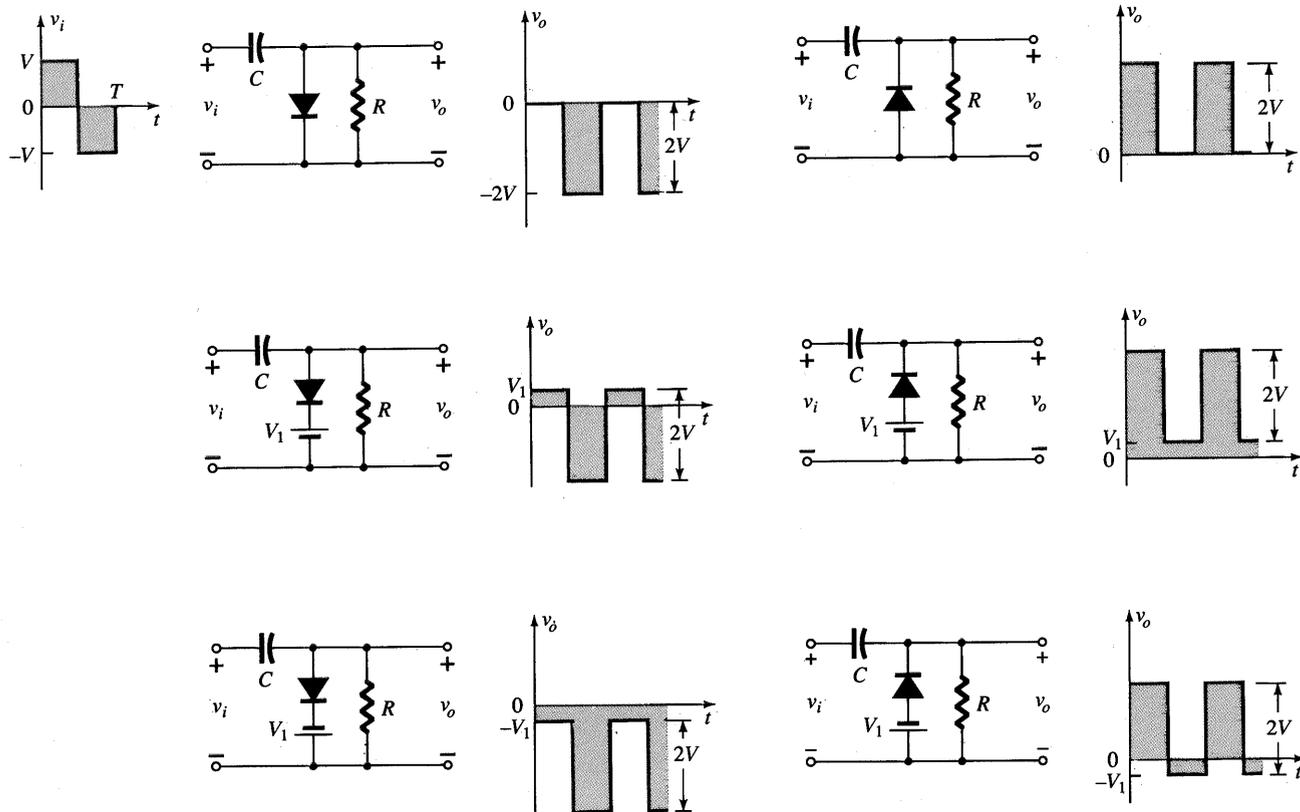


Fig. 2.103 Circuitos grampeadores com diodos ideais ( $5\tau = 5RC \gg T/2$ ).

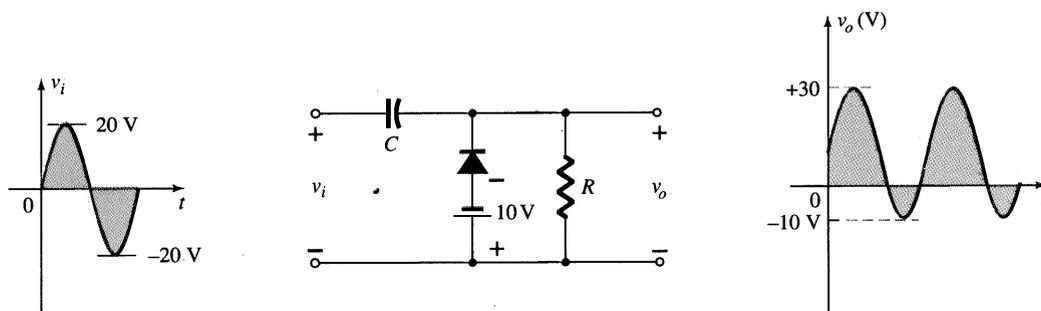


Fig. 2.104 Circuito grampeador com uma entrada senoidal.

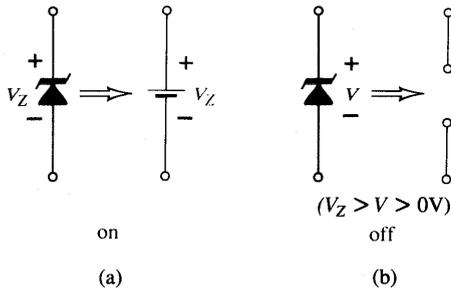


Fig. 2.105 Equivalentes do diodo Zener para os estados (a) ligado (on) e (b) desligado (off).

Se especificado o contrário, o modelo de Zener a ser empregado para o estado “ligado” será como mostra a Fig. 2.105a. Para o estado “desligado”, definido por uma voltagem menor do que  $V_Z$ , mas maior do que 0 V com a polaridade indicada na Fig. 2.105b, o equivalente Zener é o circuito aberto que aparece na mesma figura.

### $V_i$ e $R$ Fixos

O circuito mais simples que utiliza diodo Zener aparece na Fig. 2.106. A tensão dc aplicada é fixa, como o resistor de carga. A análise pode fundamentalmente ser dividida em duas etapas.

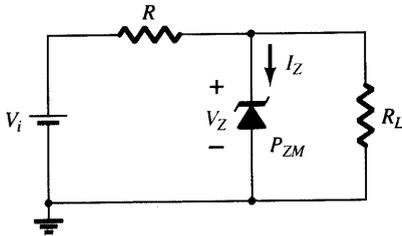


Fig. 2.106 Regulador Zener básico.

1. Determine o estado do diodo Zener, removendo este do circuito e calculando a tensão através do circuito-aberto resultante.

Aplicando a etapa 1 ao circuito da Fig. 2.106, resulta no circuito da Fig. 2.107, onde uma aplicação da regra do divisor de tensão resultará em

$$V = V_L = \frac{R_L V_i}{R + R_L} \quad (2.16)$$

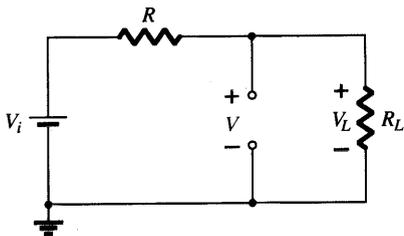


Fig. 2.107 Determinando o estado do diodo Zener.

Se  $V \geq V_Z$ , o diodo Zener está “ligado”, e o modelo equivalente da Fig. 2.105a pode ser substituído. Se  $V < V_Z$ , o diodo está “desligado”, e o circuito-aberto equivalente da Fig. 2.105b é substituído.

2. Substitua o circuito equivalente apropriado, e resolva as variáveis desejadas.

Para o circuito da Fig. 2.106, o estado “ligado” resulta no circuito equivalente da Fig. 2.108. Já que as tensões através de elementos em paralelo devem ser iguais, concluímos que

$$V_L = V_Z \quad (2.17)$$

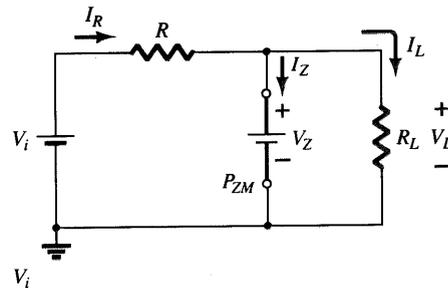


Fig. 2.108 Substituindo o equivalente Zener pela situação “ligado”.

A corrente no diodo Zener deve ser determinada pela aplicação da lei das correntes de Kirchhoff. Ou seja,

$$I_R = I_Z + I_L$$

e 
$$I_Z = I_R - I_L \quad (2.18)$$

onde

$$I_L = \frac{V_L}{R_L} \quad \text{e} \quad I_R = \frac{V_R}{R} = \frac{V_i - V_L}{R}$$

A potência dissipada pelo diodo Zener é determinada por

$$P_Z = V_Z I_Z \quad (2.19)$$

que deve ser menor do que a  $P_{ZM}$  especificada para o dispositivo.

Antes de continuar, é muito importante perceber que a primeira etapa foi empregada para somente determinar o estado do diodo Zener. Se o diodo Zener está no estado “ligado”, a tensão através do diodo não é  $V$  volts. Quando o sistema é ligado, o diodo Zener “ligará” assim que a tensão através do diodo Zener atingir  $V_Z$  volts. Ele irá, portanto, “travar” neste nível, e nunca alcançará o nível mais elevado de  $V$  volts.

Diodos Zener são mais freqüentemente utilizados em circuitos reguladores ou como uma referência de tensão. A Fig. 2.106 é um regulador simples projetado para manter uma tensão fixa através da carga  $R_L$ . Para valores de tensão aplicada maiores do que a exigida para “ligar” o diodo Zener, a tensão através da carga será mantida em  $V_Z$  volts. Se o diodo Zener é empregado como uma tensão de referência, ele fornecerá um nível para a comparação com outras tensões.



**EXEMPLO 2.26**

(a) Para o circuito com diodo Zener da Fig. 2.109, determine  $V_L$ ,  $V_R$ ,  $I_Z$  e  $P_Z$ . (b) Repita a parte (a) com  $R_L = 3\text{ k}\Omega$ .

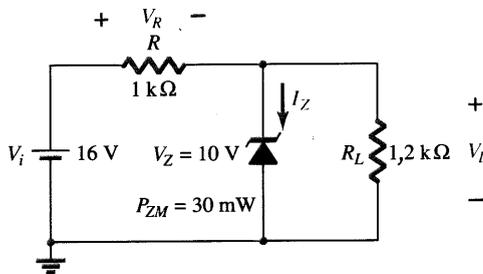


Fig. 2.109 Regulador com diodo Zener para o Exemplo 2.26.

**Solução**

(a) Seguindo o procedimento sugerido, o circuito é redesenhado como mostra a Fig. 2.110. A aplicação da Eq. (2.16) dá

$$V = \frac{R_L V_i}{R + R_L} = \frac{1,2\text{ k}\Omega(16\text{ V})}{1\text{ k}\Omega + 1,2\text{ k}\Omega} = 8,73\text{ V}$$

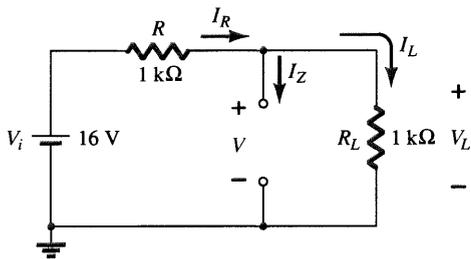


Fig. 2.110 Determinando V para o regulador da Fig. 2.109.

Uma vez que  $V = 8,73\text{ V}$  é menor do que  $V_Z = 10\text{ V}$ , o diodo está no estado “desligado” como mostrado na curva característica da Fig. 2.111. A substituição do circuito-aberto equivalente resultará no mesmo circuito da Fig. 2.110, donde concluímos que

$$V_L = V = \mathbf{8,73\text{ V}}$$

$$V_R = V_i - V_L = 16\text{ V} - 8,73\text{ V} = \mathbf{7,27\text{ V}}$$

$$I_Z = \mathbf{0\text{ A}}$$

e 
$$P_Z = V_Z I_Z = V_Z(0\text{ A}) = \mathbf{0\text{ W}}$$

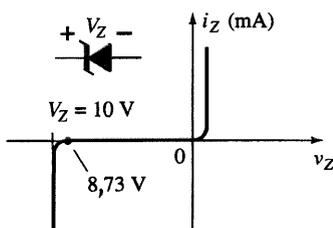


Fig. 2.111 Ponto de operação resultante para o circuito da Fig. 2.109.

(b) A aplicação da Eq. (2.16) resultará agora em

$$V = \frac{R_L V_i}{R + R_L} = \frac{3\text{ k}\Omega(16\text{ V})}{1\text{ k}\Omega + 3\text{ k}\Omega} = 12\text{ V}$$

Já que  $V = 12\text{ V}$  é maior do que  $V_Z = 10\text{ V}$ , o diodo está no estado “ligado”, resultando no circuito da Fig. 2.112. A aplicação da Eq. (2.17) produz

$$V_L = V_Z = \mathbf{10\text{ V}}$$

e 
$$V_R = V_i - V_L = 16\text{ V} - 10\text{ V} = \mathbf{6\text{ V}}$$

com 
$$I_L = \frac{V_L}{R_L} = \frac{10\text{ V}}{3\text{ k}\Omega} = 3,33\text{ mA}$$

e 
$$I_R = \frac{V_R}{R} = \frac{6\text{ V}}{1\text{ k}\Omega} = 6\text{ mA}$$

portanto 
$$I_Z = I_R - I_L \text{ [Eq. (2.18)]}$$
  

$$= 6\text{ mA} - 3,33\text{ mA}$$
  

$$= \mathbf{2,67\text{ mA}}$$

A potência dissipada,

$$P_Z = V_Z I_Z = (10\text{ V})(2,67\text{ mA}) = \mathbf{26,7\text{ mW}}$$

que é menor do que a especificada  $P_{ZM} = 30\text{ mW}$ .

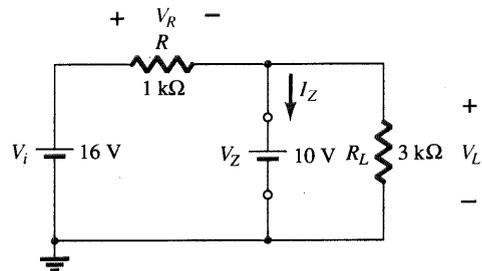


Fig. 2.112 Circuito da Fig. 2.109 no estado “ligado”.

**$V_i$  Fixo,  $R_L$  Variável**

Devido à tensão  $V_Z$ , há uma faixa específica de valores de resistor (e portanto corrente de carga) que garantirá o estado “ligado” do Zener. Uma resistência de carga  $R_L$  muito pequena resultará em uma tensão  $V_L$  através do resistor de carga menor do que  $V_Z$ , e o dispositivo Zener estará no estado “desligado”.

Para determinar a resistência de carga mínima da Fig. 2.106 que ligará o diodo Zener, calcule simplesmente o valor de  $R_L$  que resultará em uma tensão na carga  $V_L = V_Z$ . Ou seja,

$$V_L = V_Z = \frac{R_L V_i}{R_L + R}$$

Solucionando para  $R_L$ , temos

$$\boxed{R_{L_{\min}} = \frac{R V_Z}{V_i - V_Z}} \quad (2.20)$$

Qualquer valor de resistência de carga maior do que o  $R_L$  obtido da Eq. (2.20) assegurará que o diodo Zener está no estado “liga-

do” e que o diodo pode ser substituído por sua fonte  $V_Z$  equivalente.

A condição definida pela Eq. (2.20) estabelece o  $R_L$  mínimo, mas por sua vez especifica o  $I_L$  máximo como

$$I_{L_{\max}} = \frac{V_L}{R_L} = \frac{V_Z}{R_{L_{\min}}} \quad (2.21)$$

Quando o diodo está no estado “ligado”, a tensão através de  $R$  permanece fixa em

$$V_R = V_i - V_Z \quad (2.22)$$

e  $I_R$  permanece fixa em

$$I_R = \frac{V_R}{R} \quad (2.23)$$

A corrente no Zener

$$I_Z = I_R - I_L \quad (2.24)$$

resultando em  $I_Z$  mínimo, quando  $I_L$  é máximo, e um máximo  $I_Z$ , quando  $I_L$  é mínimo, já que  $I_R$  é constante.

Uma vez que  $I_Z$  é limitado ao valor  $I_{ZM}$  fornecido na folha de especificações, ela influencia na faixa de  $R_L$  e, portanto,  $I_L$ . Substituindo  $I_{ZM}$  por  $I_Z$ , estabelece um valor mínimo para  $I_L$  como

$$I_{L_{\min}} = I_R - I_{ZM} \quad (2.25)$$

e a resistência máxima de carga como

$$R_{L_{\max}} = \frac{V_Z}{I_{L_{\min}}} \quad (2.26)$$

**EXEMPLO 2.27**

- (a) Para o circuito da Fig. 2.113, determine a faixa de valores de  $R_L$  e  $I_L$  que manterá  $V_{RL}$  em 10 V.
- (b) Determine a potência nominal máxima do diodo.

**Solução**

- (a) Para determinar o valor de  $R_L$  que ligará o diodo Zener, aplique a Eq. (2.20):

$$R_{L_{\min}} = \frac{RV_Z}{V_i - V_Z} = \frac{(1 \text{ k}\Omega)(10 \text{ V})}{50 \text{ V} - 10 \text{ V}} = \frac{10 \text{ k}\Omega}{40} = 250 \Omega$$

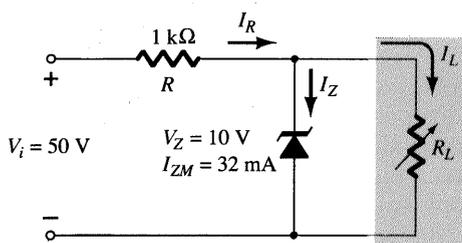


Fig. 2.113 Regulador de tensão do Exemplo 2.27.

A tensão através do resistor  $R$  é, portanto, determinada pela Eq. (2.22):

$$V_R = V_i - V_Z = 50 \text{ V} - 10 \text{ V} = 40 \text{ V}$$

e a Eq. (2.23) fornece o valor de  $I_R$ :

$$I_R = \frac{V_R}{R} = \frac{40 \text{ V}}{1 \text{ k}\Omega} = 40 \text{ mA}$$

O valor mínimo de  $I_L$  é, portanto, determinado pela Eq. (2.25):

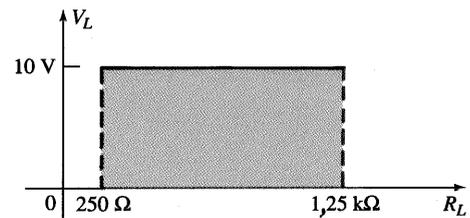
$$I_{L_{\min}} = I_R - I_{ZM} = 40 \text{ mA} - 32 \text{ mA} = 8 \text{ mA}$$

com a Eq. (2.26) determinando o valor máximo de  $R_L$ :

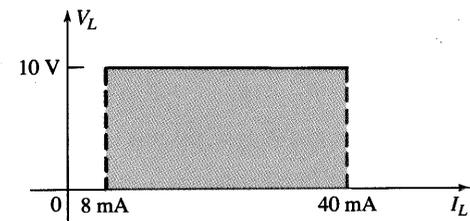
$$R_{L_{\max}} = \frac{V_Z}{I_{L_{\min}}} = \frac{10 \text{ V}}{8 \text{ mA}} = 1,25 \text{ k}\Omega$$

Um gráfico de  $V_L$  versus  $R_L$  aparece na Fig. 2.114a, e para  $V_L$  versus  $I_L$ , na Fig. 2.114b.

(b)  $P_{\max} = V_Z I_{ZM} = (10 \text{ V})(32 \text{ mA}) = 320 \text{ mW}$



(a)



(b)

Fig. 2.114  $V_L$  versus  $R_L$  e  $I_L$  para o regulador da Fig. 2.113.

**$R_L$  Fixo,  $V_i$  Variável**

Para valores fixos de  $R_L$  na Fig. 2.106, a tensão  $V_i$  deve ser suficientemente grande para ligar o diodo Zener. A tensão mínima  $V_i = V_{i_{\min}}$  que liga o diodo é determinada por

$$V_L = V_Z = \frac{R_L V_i}{R_L + R}$$

e

$$V_{i_{\min}} = \frac{(R_L + R)V_Z}{R_L} \quad (2.27)$$



O valor máximo de  $V_i$  é limitado pela corrente de Zener máxima  $I_{ZM}$ . Já que  $I_{ZM} = I_R - I_L$ ,

$$I_{R_{\max}} = I_{ZM} + I_L \quad (2.28)$$

Uma vez que  $I_L$  está fixa em  $V_Z/R_L$  e  $I_{ZM}$  é o valor máximo de  $I_Z$ , a máxima tensão  $V_i$  é definida por

$$V_{i_{\max}} = V_{R_{\max}} + V_Z$$

$$V_{i_{\max}} = I_{R_{\max}} R + V_Z \quad (2.29)$$

**EXEMPLO 2.28**

Determine a faixa de valores de  $V_i$  que manterão o diodo de Zener da Fig. 2.115 no estado “ligado”.

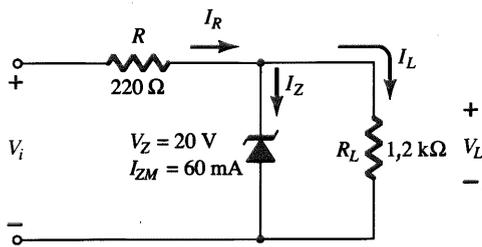


Fig. 2.115 Regulador para o Exemplo 2.28.

**Solução**

Eq. (2.27):  $V_{i_{\min}} = \frac{(R_L + R)V_Z}{R_L}$

$$= \frac{(1200 \Omega + 220 \Omega)(20 \text{ V})}{1200 \Omega} = 23,67 \text{ V}$$

$$I_L = \frac{V_L}{R_L} = \frac{V_Z}{R_L} = \frac{20 \text{ V}}{1,2 \text{ k}\Omega} = 16,67 \text{ mA}$$

Eq. (2.28):  $I_{R_{\max}} = I_{ZM} + I_L = 60 \text{ mA} + 16,67 \text{ mA}$

$$= 76,67 \text{ mA}$$

Eq. (2.29):  $V_{i_{\max}} = I_{R_{\max}} R + V_Z$

$$= (76,67 \text{ mA})(0,22 \text{ k}\Omega) + 20 \text{ V}$$

$$= 16,87 \text{ V} + 20 \text{ V}$$

$$= 36,87 \text{ V}$$

Um gráfico de  $V_L$  versus  $V_i$  é mostrado na Fig. 2.116.

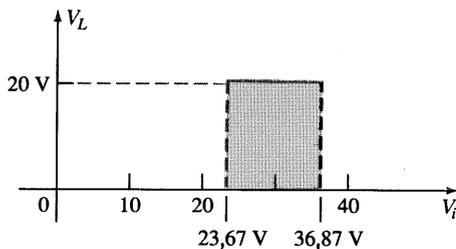


Fig. 2.116  $V_L$  versus  $V_i$  para o regulador da Fig. 2.115.

Os resultados do Exemplo 2.28 revelam que para o circuito da Fig. 2.115 com um  $R_L$  fixo, a tensão de saída permanecerá fixa em 20 V para uma faixa de valores de tensão de entrada que se estende de 23,67 V até 36,87 V.

Na verdade, a entrada poderia ser da forma mostrada na Fig. 2.117, e a saída permaneceria constante em 20 V, conforme Fig. 2.116. A forma de onda que aparece na Fig. 2.117 é obtida pela *filtragem*, de uma saída de meia-onda ou meia-onda-retificada — um processo descrito em detalhes em um capítulo posterior. O efeito na prática, entretanto, é estabelecer uma tensão dc estável (para uma faixa definida de  $V_i$ ) tal como aquela mostrada na Fig. 2.116 de uma fonte senoidal com valor médio nulo.

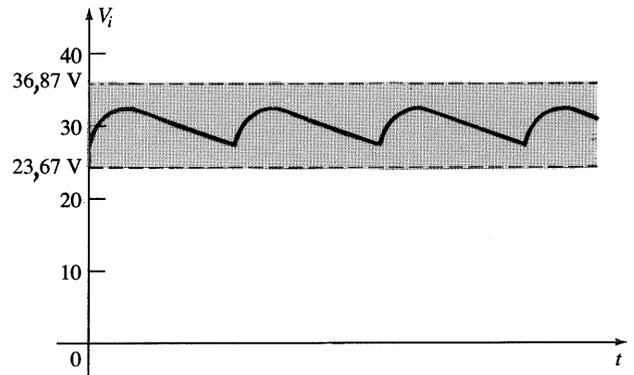


Fig. 2.117 Forma de onda gerada por um sinal retificado filtrado.

Dois ou mais níveis de referência podem ser estabelecidos colocando-se os diodos Zener em série como mostra a Fig. 2.118. Quando  $V_i$  for maior do que a soma de  $V_{Z1}$  e  $V_{Z2}$ , ambos os diodos estarão no estado “ligado”, e as três tensões de referência estarão disponíveis.

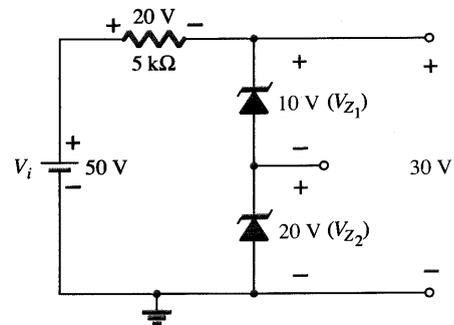


Fig. 2.118 Estabelecendo três níveis de tensão de referência.

Dois Zeners colocados em posição oposta também podem ser utilizados como um regulador ac, como mostra a Fig. 2.119a. Para o sinal senoidal  $v_i$ , o circuito comportar-se-á como mostra a Fig. 2.119b no instante em que  $v_i = 10 \text{ V}$ . A região de operação para cada diodo está indicada na figura adjacente. Note que  $Z_1$  está em uma região de baixa impedância, enquanto que a impedância de  $Z_2$  é muito grande, correspondendo à representação de circuito-aberto. O resul-

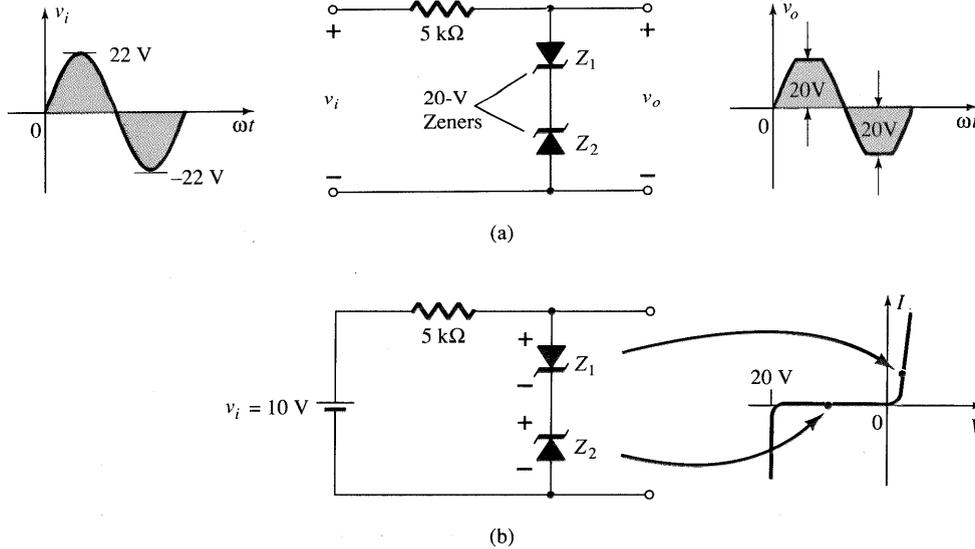


Fig. 2.119 Regulação ac senoidal: (a) Regulador ac senoidal de 40 V pico-a-pico; (b) operação do circuito em  $v_i = 10\text{ V}$ .

tado é que  $v_o = v_i$  quando  $v_i = 10\text{ V}$ . A entrada e saída continuarão a dobrar o seu valor até atingir 20 V.  $Z_2$ , neste momento, “ligar-se-á” (como um diodo Zener) enquanto  $Z_1$  estará em uma região de condução com um valor de resistência suficientemente pequeno comparado ao resistor de 5 kΩ em série, podendo ser considerado um curto-circuito. A saída resultante para a faixa completa de valores de  $v_i$  é fornecida na Fig. 2.119(a). Note que a forma de onda não é puramente senoidal, mas seu valor rms é menor do que aquele associado a um sinal completo com 22 V de pico. O circuito está efetivamente limitando o valor rms da tensão disponível. O circuito da Fig. 2.119a pode ser estendido a um gerador simples de onda quadrada (devido à ação de corte do sinal) se o sinal  $v_i$  for aumentado para, talvez, 50 V de pico com Zeners de 10 V, como mostra a Fig. 2.120 com a forma de onda resultante na saída.

## 2.12 CIRCUITOS MULTIPLICADORES DE TENSÃO

Circuitos multiplicadores de tensão são empregados para manterem uma tensão de pico relativamente pequena no transformador, enquanto multiplica a tensão de pico na saída em duas, três, quatro ou mais vezes da tensão de pico retificada.

### Dobrador de Tensão

O circuito da Fig. 2.121 é um dobrador de tensão de meia-onda. Durante o meio-ciclo de tensão positiva no transformador, o diodo  $D_1$  secundário conduz (e o diodo  $D_2$  está cortado), carregando o capacitor  $C_1$  até a tensão de pico retificada ( $V_m$ ). O diodo  $D_1$  é idealmente um curto durante este meio-ciclo, e a tensão de entrada carrega o capacitor  $C_1$  até  $V_m$  com a polaridade mostrada na Fig. 2.122a. Durante o meio-ciclo negativo da tensão secundária, o diodo  $D_1$  está cortado, e o diodo  $D_2$  continua carregando o capacitor  $C_2$ . Uma vez que o diodo  $D_2$  age como um curto durante o meio-ciclo negativo (e o diodo  $D_1$  está aberto), podemos somar as tensões ao longo da malha de saída (ver Fig. 2.122b):

$$\begin{aligned} -V_{C_2} + V_{C_1} + V_m &= 0 \\ -V_{C_2} + V_m + V_m &= 0 \end{aligned}$$

do qual

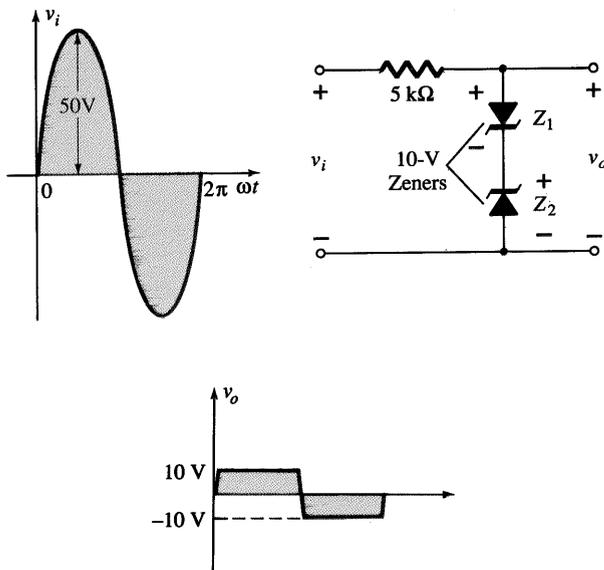


Fig. 2.120 Gerador simples de onda quadrada.

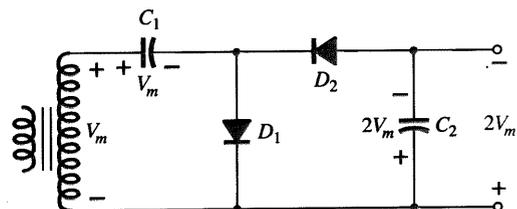


Fig. 2.121 Dobrador de tensão de meia-onda.

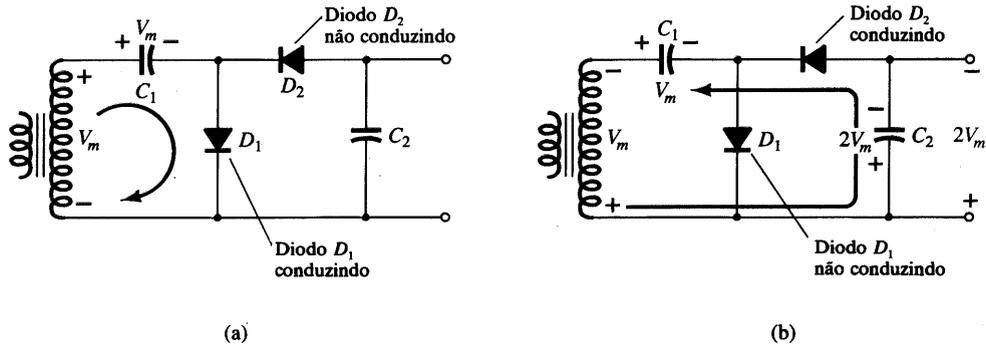


Fig. 2.122 Operação dupla, mostrando cada meio-ciclo da operação: (a) meio-ciclo positivo; (b) meio-ciclo negativo.

No próximo meio-ciclo positivo, o diodo  $D_2$  não está conduzindo, e o capacitor descarregará através da carga. Se não há carga conectada no capacitor  $C_2$ , os capacitores mantêm-se carregados —  $C_1$  em  $V_m$  e  $C_2$  em  $2V_m$ . Se, como seria esperado, há uma carga conectada na saída do dobrador de tensão, a tensão através do capacitor  $C_2$  sofre uma queda durante o meio-ciclo positivo (na entrada), e o capacitor é recarregado até  $2V_m$  durante o meio-ciclo negativo. A forma de onda na saída através do capacitor  $C_2$  é a de um sinal de meia-onda filtrado por um capacitor (que age como filtro). A tensão de pico inversa através de cada diodo é  $2V_m$ .

Outro circuito utilizado é o dobrador de onda completa da Fig. 2.123. Durante o meio-ciclo positivo da tensão secundária do

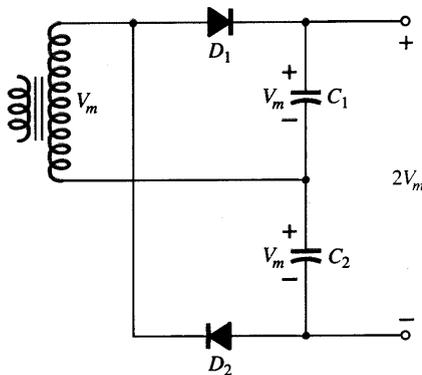


Fig. 2.123 Dobrador de tensão de onda completa.

transformador (ver Fig. 2.124a), o diodo  $D_1$  continua carregando o capacitor  $C_1$  a uma tensão de pico  $V_m$ . O diodo  $D_2$  não está conduzindo neste momento.

Durante o meio-ciclo negativo (ver Fig. 2.124b) o diodo  $D_2$  conduz carregando o capacitor  $C_2$ , enquanto que o diodo  $D_1$  não está conduzindo. Se não há corrente de carga sendo drenada do circuito, a tensão através dos capacitores  $C_1$  e  $C_2$  é  $2V_m$ . Se há corrente de carga sendo drenada do circuito, a tensão através dos capacitores  $C_1$  e  $C_2$  é a mesma verificada quando um capacitor é alimentado por um circuito retificador de onda completa. Uma diferença é que a capacitância efetiva é resultado de  $C_1$  e  $C_2$  em série, que é menor que a capacitância de  $C_1$  ou  $C_2$  somente. Uma capacitância de menor valor produzirá um filtragem mais pobre do que o circuito de filtragem com um capacitor.

A tensão de pico inversa através de cada diodo é de  $2V_m$ , como ocorre para o filtro com capacitor. Em resumo, o dobrador de tensão de meia-onda ou de onda completa produz o dobro da tensão de pico do secundário do transformador, não exigindo a utilização de um transformador center tap, e a TPI nominal máxima para os diodos é de somente  $2V_m$ .

### Triplicador e Quadruplicador de Tensão

A Fig. 2.125 apresenta uma extensão do duplicador de tensão de meia-onda, que produz três e quatro vezes a tensão de pico de entrada. Observando o padrão de conexão do circuito, deve ser óbvio como diodos e capacitores adicionais podem ser conectados

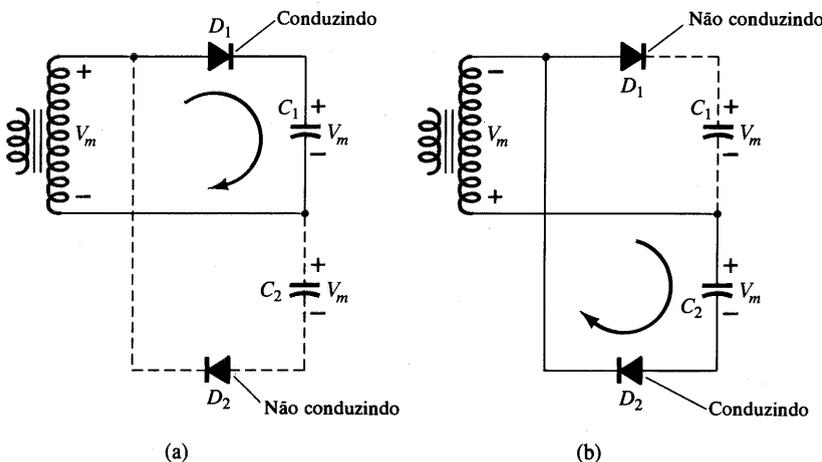


Fig. 2.124 Meios-ciclos alternados de operação para o dobrador de tensão de onda completa.

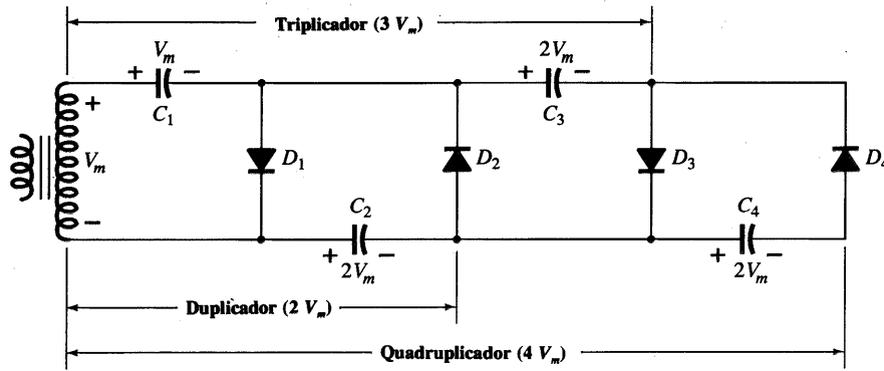


Fig. 2.125 Triplicador e quadruplicador de tensão.

de forma que a tensão de saída possa atingir também cinco, seis, sete, ou mais vezes a tensão de pico básica ( $V_m$ ).

O capacitor  $C_1$  em operação carrega através do diodo  $D_1$  a uma tensão de pico,  $V_m$ , durante o meio-ciclo positivo da tensão do secundário do transformador. O capacitor  $C_2$  carrega até duas vezes a tensão de pico,  $2V_m$ , produzida pela soma das tensões através do capacitor  $C_1$  e do transformador, durante o meio-ciclo negativo da tensão no secundário do transformador.

Durante o meio-ciclo positivo, o diodo  $D_3$  conduz, e a tensão através do capacitor  $C_2$  carrega o capacitor  $C_3$  à mesma tensão de pico  $2V_m$ . No meio-ciclo negativo, os diodos  $D_2$  e  $D_4$  conduzem com o capacitor  $C_3$ , carregando  $C_4$  à  $2V_m$ .

A tensão através do capacitor  $C_2$  é  $2V_m$ , dos  $C_1$  e  $C_3$  é  $3V_m$  e dos  $C_2$  e  $C_4$  é  $4V_m$ . Se outras seções com diodos e capacitores são incluídas, cada capacitor será carregado para  $2V_m$ . Medindo a partir do extremo superior do enrolamento do transformador (Fig. 2.125), obtêm-se múltiplos ímpares de  $V_m$  na saída, enquanto que medindo a partir do extremo inferior, a tensão de saída será múltipla par da tensão de pico,  $V_m$ .

A tensão nominal máxima do transformador é somente  $V_m$ , e cada diodo no circuito deve possuir uma TPI nominal máxima de  $2V_m$ . Se a carga é pequena e os capacitores apresentam pouca fuga, valores de tensão dc extremamente altos podem ser produzidos por este tipo de circuito, utilizando muitas seções para multiplicar a tensão dc.

## 2.13 ANÁLISE POR COMPUTADOR

### PSpice (Versão DOS)

A análise por computador deste capítulo empregará, inicialmente, a versão DOS do PSpice para determinar as incógnitas do circuito da Fig. 2.27 (Exemplo 2.11). A primeira etapa seria redesenhar o circuito como mostra a Fig. 2.126, identificar os nós, e numerá-los em uma ordem lógica. O terra é escolhido como o nível de referência e identificado com o número 0. O diodo de silício está entre os nós 2 e 3. A tensão de saída do Exemplo 2.11 é tomada do nó 3 para a terra. A tensão  $V_1$  é considerada entre os nós 1 e 2, e  $V_2$  entre os nós 3 e 4.

A informação sobre o circuito entra no computador por meio de um arquivo de *entrada* mostrado na forma de bloco na Fig. 2.127. A primeira entrada *deve* ser uma linha contendo o título para identificar a análise a ser realizada. O próximo conjunto de

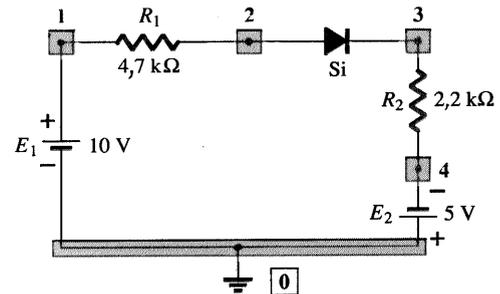


Fig. 2.126 Fig. 2.27 redesenhada para a análise pelo PSpice.

entradas é uma descrição do circuito utilizando os nós escolhidos e o formato específico exigido pelo PSpice para cada elemento. Os Comandos de Análise definem as quantidades a serem determinadas. A última entrada *deve* ser a expressão .END exatamente da forma indicada. Não colocando o ponto, invalidará todo o arquivo de entrada.

O arquivo de entrada para o circuito da Fig. 2.126 é fornecido na Fig. 2.128. A linha de título especifica o “Circuito com diodo da Fig. 2.126” como o circuito a ser analisado. A primeira linha de descrição do circuito especifica a fonte dc 10V. Para todas as fontes dc, a primeira letra da linha deve ser a letra maiúscula V seguida pelo *nome* da fonte. O nome é simplesmente uma escolha de letras e/ou números para identificar a fonte na estrutura do circuito. Posteriormente, o nó com o lado positivo da fonte é

#### Arquivo de entrada

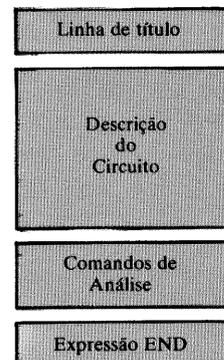


Fig. 2.127 Componente de um arquivo de entrada.



```

Diode circuit for network of Fig. 2.126
VE1 1 0 10V
R1 1 2 4.7K
D1 2 3 DI
R2 3 4 2.2K
VE2 0 4 5V
.MODEL DI D(IS=2E-15)
.DC VE1 10V 10V 1V
.PRINT DC V(3) I(D1) V(1,2) V(3,4) V(2,3)
.OPTIONS NOPAGE
.END

```

Fig. 2.128 Arquivo de entrada para o circuito da Fig. 2.126.

informado, seguido pela polaridade negativa. O valor da fonte entra, portanto, como indicado.

A próxima entrada do arquivo de entrada é um elemento resistivo, que requer a letra maiúscula R para iniciar a linha seguido pelo seu nome (neste caso, simplesmente o número 1 para relacionar ao seu índice no circuito da Fig. 2.126). A “pressão” da fonte de 10 V sugere que a corrente resultante determinará o nó 1 como positivo em relação ao nó 2 — justificando a ordem dos nós no arquivo de entrada. O valor do resistor é especificado como sendo de 4,7 kΩ.

O formato de entrada para o diodo foi introduzido no Cap. 1. Note a entrada na linha 3 da descrição do circuito e a descrição do modelo do diodo na linha 6. Lembre que IS foi especificado como sendo 2E-15 para obter uma queda de 0,7 V (ou mais perto possível deste nível) através dos diodos de silício no estado “ligado”, com valores de corrente típicos para sistemas eletrônicos.

As próximas duas entradas são o segundo resistor e a fonte de tensão. Note que, em cada caso, há uma tentativa de definir os nós positivo e negativo pela ordem de entrada dos nós. Uma suposição incorreta, entretanto, acarretará simplesmente um sinal negativo para a tensão através de um elemento particular.

A entrada .DC especifica uma análise dc com a fonte  $E_1$  em 10 V. A análise .DC pode ser especificada para uma faixa de valores, por isso há a repetição do nível 10V na linha de entrada. Se o nível é repetido, como neste caso, a análise será realizada

apenas no valor indicado. Se o segundo nível fosse diferente, a análise seria realizada do primeiro para o segundo nível, em níveis definidos pelo incremento, cujo valor é informado na próxima entrada da linha. Apesar da nossa análise ser feita em apenas um nível, exige-se uma entrada para o incremento. Neste caso entrou-se com 1 V, valor tipicamente utilizado para este propósito. Desta forma, quando o programa estiver rodando e o computador notar a repetição do valor 10 V, ele realizará a análise em um nível só (10 V) e ignorará o incremento. É desnecessário incluir a segunda fonte dc nesta expressão. A entrada .DC especifica o tipo de análise em um nível de  $E_1 = 10$  V com todos os outros elementos detalhados da forma mostrada na descrição do circuito.

A expressão .PRINT define os parâmetros que serão incluídos nos dados de saída. O parâmetro V (3) é a tensão do nó 3 para a terra — a tensão de saída da Fig. 2.126. A próxima é a corrente através do diodo seguida pelas tensões entre os nós indicados.

A entrada .OPTIONS NOPAGE é um comando para “economizar papel”, limitando os dados fornecidos no *arquivo de saída*, exceto os requisitados especificamente. O arquivo de entrada finaliza necessariamente com a expressão .END.

Uma vez introduzido *apropriadamente* o arquivo de entrada, o programa PSpice pode ser “rodado”, e a informação desejada obtida no formato do arquivo de saída mostrado na Fig. 2.129. Note na figura a localização da linha de título e a repetição de toda a descrição do circuito. Em seguida, os parâmetros do modelo especificados são listados seguidos pelos resultados desejados. VE1 é simplesmente uma repetição do nível de  $E_1$  ( $1.000E+1 = 10$ ) controlado pelo computador para determinar as condições sob as quais os cálculos foram feitos (lembre da expressão .DC). O valor  $V(3) = V_o = -4,455E-01 = -0,4455$  V assemelha-se bastante ao valor  $-0,45$  V obtido no Exemplo 2.11. A corrente do diodo  $I(D1) = I_d = 2,07$  mA está perfeitamente de acordo com o Exemplo 2.11. A tensão  $V(1,2) = V_1 = 9,73$  V bate com 9,73 V do Exemplo 2.11, e  $V(3,4) = V_2 = 4,554$  V bate com 4,55 V do mesmo exemplo. O último elemento do arquivo de saída é a tensão através do diodo, que para o nível de corrente e IS escolhidos foi de 0,715 V, próximos aos 0,7 V empregados

```

Diode circuit for network of Fig. 2.126

****      CIRCUIT DESCRIPTION
*****

VE1 1 0 10V
R1 1 2 4.7K
D1 2 3 DI
R2 3 4 2.2K
VE2 0 4 5V
.MODEL DI D(IS=2E-15)
.DC VE1 10V 10V 1V
.PRINT DC V(3) I(D1) V(1,2) V(3,4) V(2,3)
.OPTIONS NOPAGE
.END

****      Diode MODEL PARAMETERS
          DI
          IS      2.000000E-15

****      DC TRANSFER CURVES          TEMPERATURE = 27.000 DEG C
          VE1      V(3)      I(D1)      V(1,2)      V(3,4)      V(2,3)
          1.000E+01  -4.455E-01  2.070E-03  9.730E+00  4.554E+00  7.155E-01

```

Fig. 2.129 Arquivo de saída para o circuito da Fig. 2.126.

no Exemplo 2.11. Lembre do Cap. 1 em que a tensão do diodo é uma função de vários elementos, como corrente de saturação reversa, nível de corrente, temperatura, e outros, e não pode ser simplesmente especificado como 0,7 V, a menos que se utilize o modelo incluindo tudo.

Analisando-se os resultados, chega-se à conclusão que eles estão perfeitamente de acordo com aqueles obtidos no Exemplo 2.11, como devia ser, já que foi tomado o cuidado *apropriado* em ambos os métodos. A primeira apresentação de qualquer técnica nova, como a análise pelo programa PSpice introduzida nesta seção, deixará naturalmente dúvidas e questões sobre a sua aplicação. Entretanto esteja ciente de que nossa intenção principal neste livro é apenas expor ao leitor os vários métodos por computador, não necessariamente os detalhes exigidos para realizar a análise de uma variedade de configurações. Isto não significa que a descrição acima não seja suficiente para analisar uma boa parte das configurações com diodo, mas para certas dúvidas que podem surgir exige-se um estudo dirigido em sala ou a presença do manual do PSpice. O exemplo acima é uma amostra do tipo de análise pelo PSpice que será utilizado durante todo o livro. Esteja ciente de que o PSpice é um dos programas utilizados com mais frequência na comunidade educacional, e alguns conhecimentos de sua aplicação auxiliarão em qualquer método de análise por computador que você possa eventualmente escolher.

## PSpice para Windows (Windows Design Center Analysis)

A versão PSpice para Windows será agora aplicada também ao circuito da Fig. 2.126, permitindo uma comparação entre os métodos e soluções. Com descrito no Cap. 1, a utilização da versão para Windows possibilita o desenho do circuito em uma tela esquemática. Os próximos parágrafos introduzirão os fundamentos para se desenhar o circuito na tela. Indubitavelmente, você necessitará obter algumas informações (referências) adicionais em manuais quando da análise de outras configurações; contudo, esta descrição deve apresentar os fundamentos sem grandes dificuldades. Talvez você deseje acompanhar a análise do circuito da Fig. 2.130 com um manual de referência.

Em geral, é fácil desenhar o circuito se a grande estiver na tela e se todos os elementos estiverem na grade. Estas medidas também asseguram que as conexões entre os elementos serão realizadas. A tela pode ser estabelecida clicando-se, inicialmente, **Options** na barra de menu seguido de **Display Options**. A caixa de diálogo **Display Options** permitirá fazer todas as seleções necessárias relativas ao tipo de display desejado. No nosso caso, escolheremos **Grid On**, **Stay on Grid**, e um **Grid Size** de **0,1"**. As outras opções disponíveis são deixadas para você investigar. Uma vez realizadas as especificações com pequenos x nas caixas apropriadas, clicando-se **OK** o display será ajustado com as opções desejadas.

### R

Inicialmente colocamos o resistor  $R_1$  na posição apropriada clicando-se **Draw** na barra de menu, seguido de **Get New Part** e **Browse**. A caixa de diálogo **Get Part** irá aparecer e se rolarmos a lista de bibliotecas até surgir **analog.slb**, podemos clicá-la, disponibilizando uma lista de opções sob o cabeçalho **Part**. Rolando até a visualização de **R**, podemos clicá-lo e então clicar em **OK**; um resistor aparecerá na tela. Toda a seqüência pode ser

reduzida clicando-se simplesmente em **R** na caixa de diálogo **Add Part** e depois em **OK**; entretanto, a seqüência acima permite um primeiro contato com uma importante lista de bibliotecas e opções. O resistor aparecerá na horizontal, o que é perfeito para  $R_1$ . Mova o resistor para uma posição adequada e clique o botão esquerdo do mouse — o resistor  $R_1$  está no lugar. Observe a maneira como ele se ajusta à estrutura de grade.

Agora nós temos que introduzir  $R_2$ , mas  $R_2$  está na vertical na Fig. 2.126. Pressionando **Ctrl** e **R** simultaneamente, você consegue girar o resistor 90°, o que permite colocá-lo na posição vertical apropriada. Como não há mais resistores no diagrama, basta clicar no botão direito do mouse e o processo estará completo. As designações  $R_1$  e  $R_2$  estão corretas, mas os valores correspondentes precisam ser definidos.

Para alterar um valor, dê um duplo click no valor que está na tela (primeiro  $R_1$ ) e a caixa de diálogo **Set Attribute Value** irá aparecer. Digite o valor 4,7k e o introduza no diagrama, movendo a pequena caixa para a posição desejada com o botão do mouse pressionado. Solte o botão para fixar o valor 4,7k no diagrama. Uma vez posicionado, um clique adicional em qualquer lugar da tela irá remover as caixas e finalizar o processo. Se, posteriormente, você desejar alterar o valor 4,7k, basta clicar uma vez no valor e as caixas irão reaparecer. Repita o procedimento acima para o valor do resistor  $R_2$ .

### E

As fontes de tensão são ajustadas acessando a biblioteca **source.slb** de **Get Part** e escolhendo **VSRC**. Clicar **OK** produz um símbolo de fonte na tela que pode ser colocado onde se deseja. Após clicá-lo em uma posição, a designação  $V_1$  irá aparecer. Para modificá-lo para  $E_1$ , basta clicar duas vezes em **V1** e a caixa de diálogo **Edit Reference Designator** ficará disponível. Altere a designação para **E1**, clique **OK** e  $E_1$  irá aparecer na tela dentro de uma caixa. A caixa pode ser removida seguindo o mesmo procedimento realizado para os resistores. Ao escolher a posição correta, basta clicar o mouse mais uma vez e  $E_1$  estará no lugar.

Para definir o valor de  $E_1$ , clique o símbolo duas vezes para que a caixa de diálogo **E1 PartName:VSRC** apareça. Selecione **DC=** e coloque o valor **10 V**. Antes de deixar a caixa de diálogo, lembre de acionar **Save Attr**. Clique **OK** e  $E_1$  é ajustado para 10 V, embora este valor não apareça no circuito. Para inserir a designação 10 V no circuito, selecione **Draw** na barra de menu seguido de **Text**. Digite **10V** e clique **OK**; uma caixa vazia irá aparecer, podendo ser movida para a posição desejada. Quando clicado no lugar, 10V irá aparecer na tela. Clique o botão direito do mouse para terminar a tarefa e então clique no botão esquerdo para remover a caixa. O procedimento será o mesmo para  $E_2$ , mas lembre-se de incluir o sinal de menos.

### DIODO

O diodo é encontrado na biblioteca **eval.slb** da caixa de diálogo **Get Part**. Clicando no diodo **D1N4148** e em **OK**, o símbolo do diodo será colocado na tela. Mova o diodo para a posição correta e clique uma vez. As designações  $D_1$  e **D1N4148** irão aparecer próximo ao diodo. Clique o botão direito do mouse para finalizar a manobra de posicionamento do diodo. Na Fig. 2.126 aparece a designação  $S_1$ , em vez de  $D_1$ . Um clique duplo em **D1** disponibilizará o **Edit Reference Designator** para a alteração para  $S_1$ . Se a designação  $D_1$  não desaparecer completamente, utilize o comando **Ctrl L** para redesenhar o circuito e remover



qualquer linha remanescente. Se você deseja alterar as características do diodo, clique no seu símbolo uma vez e depois siga a seqüência **Edit-Model-Edit Instance Model**. O **Model Editor** irá aparecer e permitirá que se alterem alguns dos itens do diodo. Para esta análise **Is** foi modificada para  $2E-15$ , em vez do valor default de 1 pA.

### MEDIDOR DE CORRENTE (IPROBE)

A corrente de um circuito pode ser mostrada inserindo-se uma **IPROBE** em série com os elementos do circuito. A **IPROBE** é encontrada na biblioteca **special.slb** e é representada na tela pela face frontal de um medidor. A **IPROBE** irá fornecer uma resposta positiva se a corrente entrar pela extremidade inferior, com a escala sendo representada por um arco. Como desejamos uma resposta positiva nesta análise, a **IPROBE** deve ser instalada como mostrado na Fig. 2.130. Neste exemplo, quando o símbolo surge na tela, ele está defasado em  $180^\circ$  em relação à corrente desejada. Portanto, é necessário clicar a seqüência **Ctrl R** duas vezes para girar o símbolo, antes de colocá-lo no lugar. Estando na posição correta, um clique irá completar o processo. Um clique no botão direito do mouse irá finalizar a inserção da **IPROBE**.

### LINHA (LINE)

Os elementos agora precisam ser conectados selecionando-se **Draw** e depois **Wire**. O lápis que aparece na tela pode desenhar as linhas desejadas da seguinte maneira. Mova o lápis para o início da linha e clique o botão esquerdo do mouse. Desenhe então a linha e clique novamente o botão esquerdo no fim da linha. Se for necessário desenhar somente uma linha, o processo pode ser terminado clicando-se o botão direito do mouse. Se forem necessárias linhas adicionais, basta teclar a barra de espaço após terminar uma linha e desenhar a próxima.

### EGND

O circuito deve ter um terra para servir como um ponto de referência para os nós. O terra (*Earth Ground-EGND*) faz parte da biblioteca **port.slb** e pode ser introduzido no circuito da mesma maneira que os outros elementos.

### PONTO DE MEDIDA (VIEWPOINT)

As tensões dos nós podem ser mostradas no diagrama após a simulação utilizando-se **VIEWPOINTS** encontrados na biblioteca **special.slb** da caixa de diálogo **Get Part**. Basta colocar a seta do símbolo **VIEWPOINT** no ponto onde se deseja obter a tensão com relação ao terra. Se necessário, um **VIEWPOINT** pode ser colocado para cada nó do circuito. O circuito agora está completo como mostrado na Fig. 2.130.

### IDENTIFICAÇÃO DOS NÓS

Quando os elementos são introduzidos da maneira descrita acima, nada assegura que os nós associados a cada elemento estejam de acordo com a designação utilizada na Fig. 2.126. Entretanto, é possível alterar a identificação dos nós clicando-se **Examine Netlist** sob o cabeçalho **Analysis**. O resultado é uma

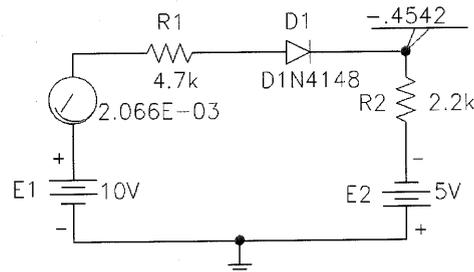


Fig. 2.130 Resposta Windows para o circuito da Fig. 2.126.

lista dos elementos do circuito e o número associado a cada nó. O conteúdo desta lista pode ser alterado para ficar de acordo com a Fig. 2.126, por uma simples seqüência de insert/delete para cada nó do circuito. Para esta análise, a identificação dos nós foi modificada de acordo com a Fig. 2.126.

```

**** CIRCUIT DESCRIPTION
*****
* Schematics Netlist *
R_R1 $N_0002 $N_0001 4.7k
R_R2 $N_0004 $N_0003 2.2k
V_E1 $N_0005 0 DC 10V
V_E2 $N_0004 0 DC -5V
D_D1 $N_0001 $N_0003 D1N4148-X
v_V6 $N_0005 $N_0002 0

**** Diode MODEL PARAMETERS
*****
D1N4148-X
IS 2.000000E-15
BV 100
IBV 100.000000E-15
RS 16
TT 12.000000E-09
CJO 2.000000E-12

**** SMALL SIGNAL BIAS SOLUTION TEMPERATURE = 27.000 DEG C
*****
NODE VOLTAGE NODE VOLTAGE NODE VOLTAGE NODE
VOLTAGE
($N_0001) .2925 ($N_0002) 10.0000
($N_0003) -.4561 ($N_0004) -5.0000
($N_0005) 10.0000

VOLTAGE SOURCE CURRENTS
NAME CURRENT
V_E1 -2.065E-03
V_E2 2.065E-03
v_V6 2.065E-03

TOTAL POWER DISSIPATION 3.10E-02 WATTS

**** OPERATING POINT INFORMATION TEMPERATURE = 27.000 DEG C
*****

**** DIODES
NAME D_D1
MODEL D1N4148-X
ID 2.07E-03
VD 7.49E-01
REQ 1.25E+01
CAP 9.62E-10

```

Fig. 2.131 Arquivo de saída para a análise do circuito da Fig. 2.126 pelo PSpice (Windows).

ANÁLISE

O circuito está pronto para a análise. Para iniciá-la, clique em **Analysis** e escolha **Probe Setup**. Selecione **Do not Auto-Run Probe**, já que **Probe** não é apropriado para esta análise. É uma opção que será introduzida em um capítulo posterior, quando estivermos lidando com parâmetros que variam com o tempo, frequência ou outra variável importante. prossiga com **OK-Analysis-Simulate** para realizar a análise. Se tudo correu bem, uma caixa de diálogo do **PSpice** irá aparecer indicando que a análise dc foi completada. Saia da caixa e então serão apresentadas a corrente e a tensão do nó para o diagrama, como mostra a Fig. 2.130. A corrente do circuito de 2,07 mA é igual à obtida em DOS, e a tensão do nó de -0,46 V está muito próxima a -0,45 V obtida na solução em DOS.

O arquivo de saída pode ser apresentado com a seqüência **Analysis-Examine Output**. Vários trechos importantes do arquivo de saída aparecem na Fig. 2.131. Observe que a identificação dos nós na **Schematics Netlist** está de acordo com a Fig. 2.126. Os parâmetros do diodo são repetidos na lista **Diode MODEL PARAMETERS**. Em **SMALL SIGNAL BIAS SOLUTION** são incluídas todas as tensões dos nós, com as correntes listadas abaixo em **VOLTAGE SOURCE CURRENTS**. **OPERATING POINT INFORMATION** revela que  $I_D$  é 2,07 mA e a tensão através do diodo é 0,749 V, em vez de 0,7 V utilizada na análise sem computador — uma possível explicação para a pequena diferença obtida na tensão do nó.

A análise está agora completa usando a versão para Windows do PSpice. Inicialmente pode parecer que há muito para se configurar na análise realizada em Windows. Porém, dê uma oportunidade para o programa demonstrar sua versatilidade quando examinarmos outras de suas características. Obviamente, o usuário tem um aproveitamento muito maior construindo o circuito, e, é claro, o resultado é um circuito desenhado com todas as ten-

sões dos nós importantes e correntes desejadas impressas corretamente no diagrama.

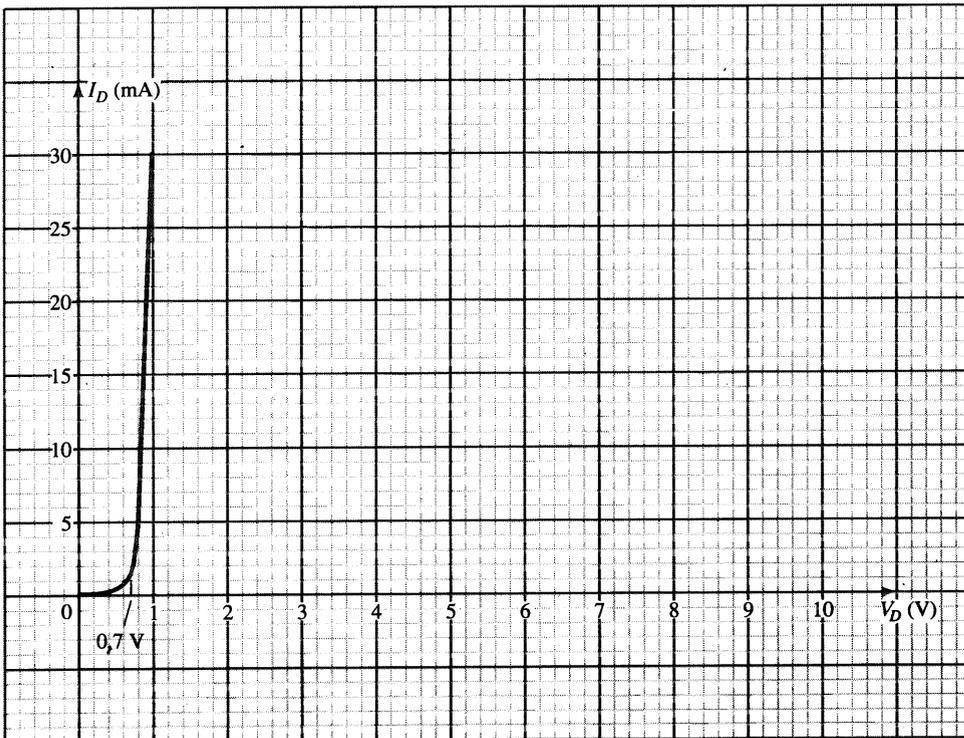
PROBLEMAS

§ 2.2 Análise por Reta de Carga

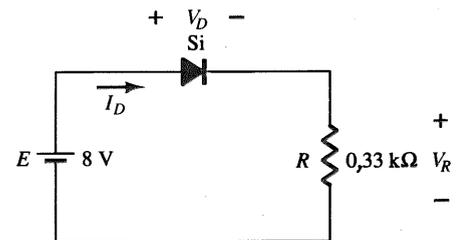
1. (a) Utilizando a curva característica da Fig. 2.130b, determine  $I_D$ ,  $V_D$  e  $V_R$  para o circuito da Fig. 2.130a.
  - (b) Repita a letra (a), utilizando o modelo aproximado do diodo e compare os resultados.
  - (c) Repita a letra (a), utilizando o modelo ideal do diodo e compare os resultados.
2. (a) Utilizando as características da Fig. 2.130b, determine  $I_D$  e  $V_D$  para o circuito da Fig. 2.131.
  - (b) Repita a letra (a) com  $R = 0,47 \text{ k}\Omega$ .
  - (c) Repita a letra (a) com  $R = 0,18 \text{ k}\Omega$ .
  - (d) Os níveis de  $V_D$  é relativamente próximo a 0,7 V em cada caso? Os valores de  $I_D$  são próximos? Comente.
3. Determine o valor de  $R$  para o circuito da Fig. 2.131 que resulta em uma corrente no diodo de 10 mA com  $E = 7 \text{ V}$ . Utilize a curva característica da Fig. 2.130b para o diodo.
4. (a) Utilizando as características aproximadas do diodo de Si, determine o valor de  $V_D$ ,  $I_D$  e  $V_R$  para o circuito da Fig. 2.132.
  - (b) Faça a mesma análise da letra (a), utilizando o modelo ideal do diodo.
  - (c) Os resultados obtidos nas letras (a) e (b) sugerem que o modelo ideal pode fornecer uma boa aproximação para a resposta real sob certas condições?

§ 2.4 Configurações Série de Diodos com Entradas DC

5. Determine a corrente  $I$  para cada uma das configurações da Fig. 2.133, utilizando o modelo equivalente aproximado do diodo.



(b)



(a)

Fig. 2.132 Problemas 1 e 2.

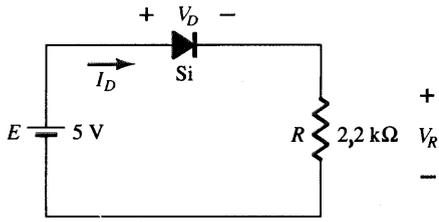


Fig. 2.133 Problemas 2, 3.

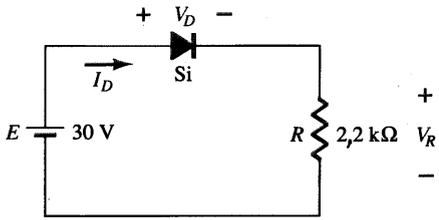
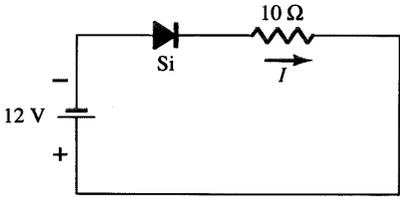
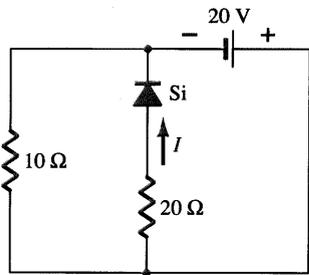


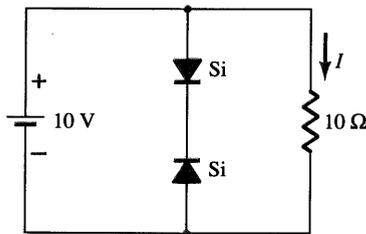
Fig. 2.134 Problema 4.



(a)



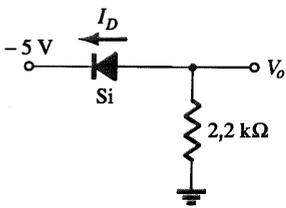
(b)



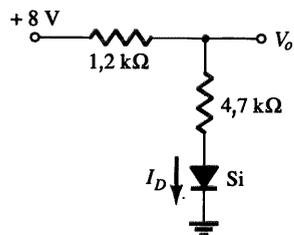
(c)

Fig. 2.135 Problema 5.

6. Determine  $V_o$  e  $I_o$  para os circuitos da Fig. 2.136.



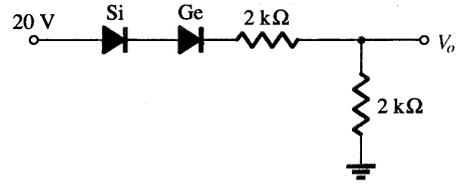
(a)



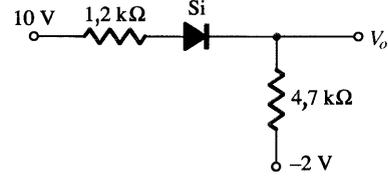
(b)

Fig. 2.136 Problemas 6, 52.

\* 7. Determine o valor de  $V_o$  para cada circuito da Fig. 2.137.



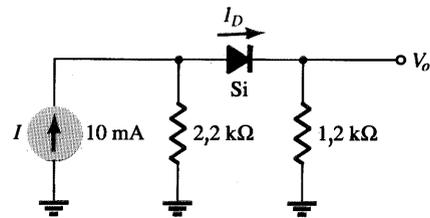
(a)



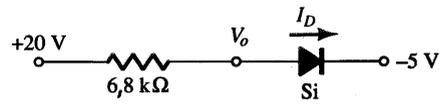
(b)

Fig. 2.137 Problema 7, 51.

\* 8. Determine  $V_o$  e  $I_o$  para os circuitos da Fig. 2.138.



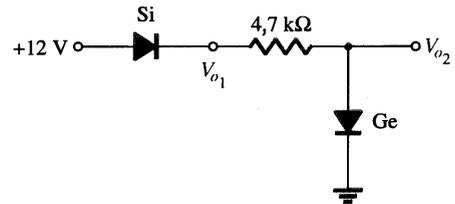
(a)



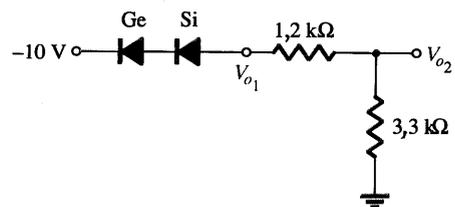
(b)

Fig. 2.138 Problema 8.

\* 9. Determine  $V_{o1}$  e  $V_{o2}$  para os circuitos da Fig. 2.139.



(a)



(b)

Fig. 2.139 Problema 9.

§ 2.5 Configurações Paralela e Série-Paralela

10. Determine  $V_o$  e  $I_D$  para os circuitos da Fig. 2.140.

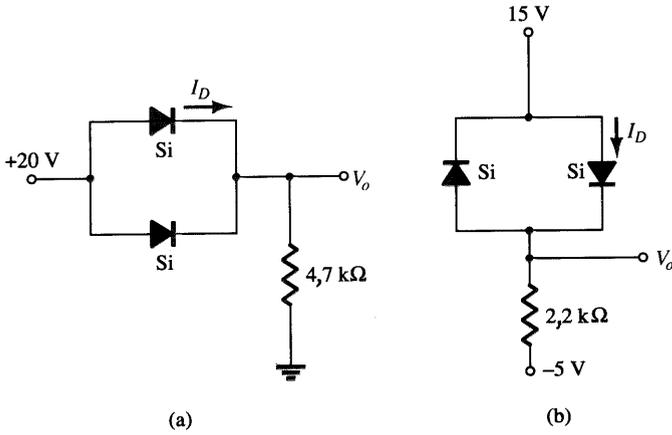


Fig. 2.140 Problemas 10, 53.

\*11. Determine  $V_o$  e  $I$  para os circuitos da Fig. 2.141.

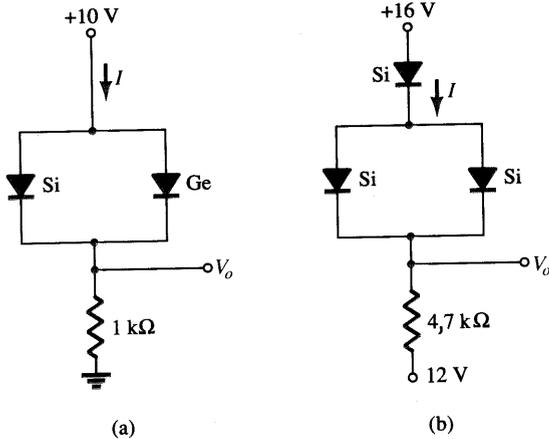


Fig. 2.141 Problema 11.

12. Determine  $V_{o1}$ ,  $V_{o2}$  e  $I$  para o circuito da Fig. 2.142.

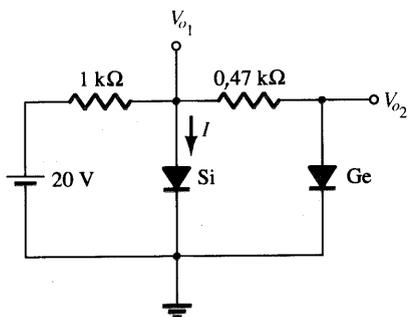


Fig. 2.142 Problema 12.

\*13. Determine  $V_o$  e  $I_D$  para o circuito da Fig. 2.143.

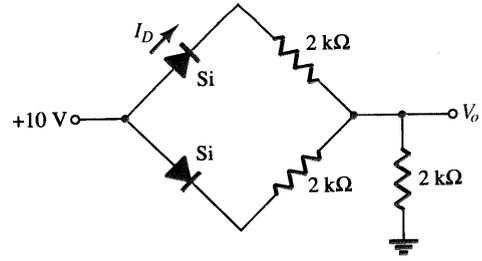


Fig. 2.143 Problemas 13, 54.

§ 2.6 Portas E/OU

- 14. Determine  $V_o$  para o circuito da Fig. 2.38 com 0 V em ambas as entradas.
- 15. Determine  $V_o$  para o circuito da Fig. 2.38 com 10 V em ambas as entradas.
- 16. Determine  $V_o$  para o circuito da Fig. 2.41 com 0 V em ambas as entradas.
- 17. Determine  $V_o$  para o circuito da Fig. 2.41 com 10 V em ambas as entradas.
- 18. Determine  $V_o$  para porta OU de lógica negativa da Fig. 2.144.
- 19. Determine  $V_o$  para a porta E de lógica negativa da Fig. 2.145.
- 20. Determine o valor de  $V_o$  para a porta da Fig. 2.146.
- 21. Determine  $V_o$  para configuração da Fig. 2.147.

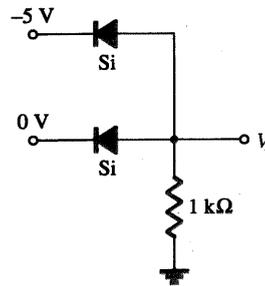


Fig. 2.144 Problema 18.

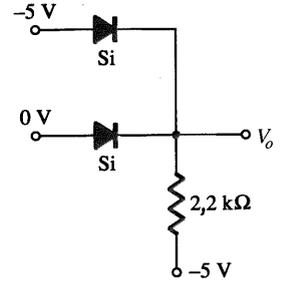


Fig. 2.145 Problema 19.

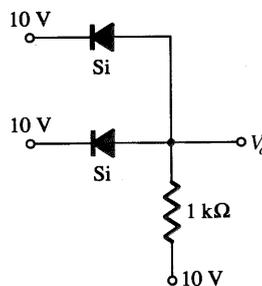


Fig. 2.146 Problema 20.

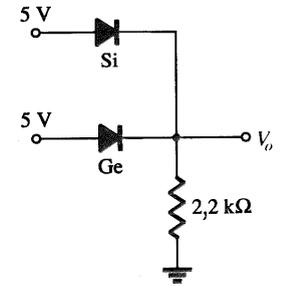


Fig. 2.147 Problema 21.

§ 2.7 Entradas Senoidais: Retificação de Meia-Onda

- 22. Considerando o diodo ideal, esboce  $v_r$ ,  $v_d$  e  $i_d$  para o retificador de meia-onda da Fig. 2.148. A entrada é uma forma de onda senoidal com uma frequência de 60 Hz.
- \*23. Repita o Problema 22 com um diodo de silício ( $V_r = 0,7$  V).
- \*24. Repita o Problema 22 com uma carga de  $6,8$  kΩ aplicada como mostra a Fig. 2.149. Esboce  $v_L$  e  $i_L$ .
- 25. Para o circuito da Fig. 2.150, esboce  $v_o$  e determine  $V_{dc}$ .

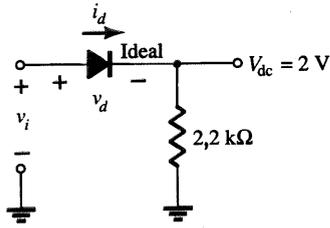


Fig. 2.148 Problemas 22, 23.

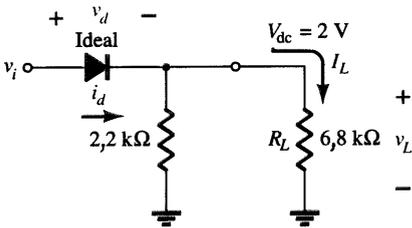


Fig. 2.149 Problema 24.

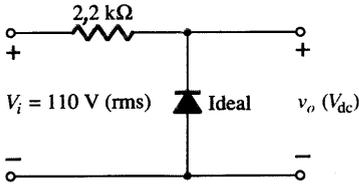


Fig. 2.150 Problema 25.

\*26. Para o circuito da Fig. 2.151, esboce  $v_o$  e  $i_R$ .

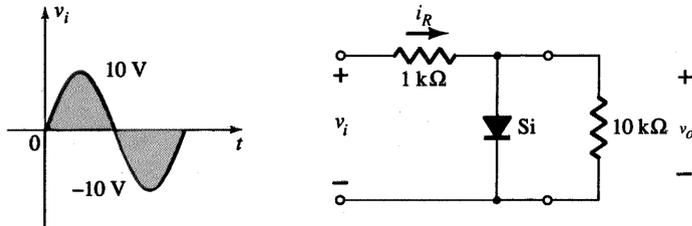


Fig. 2.151 Problema 26.

\*27. (a) Dado  $P_{\text{máx}} = 14 \text{ mW}$  para cada diodo da Fig. 2.152, determine a corrente máxima nominal de cada diodo.

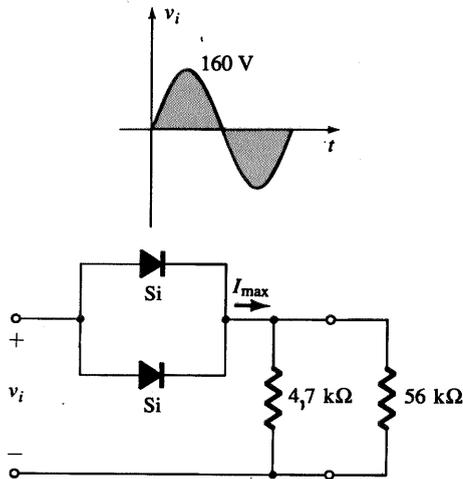


Fig. 2.152 Problema 27.

- (b) Determine  $I_{\text{máx}}$  para  $V_{\text{máx}} = 160 \text{ V}$ .
- (c) Determine a corrente através de cada diodo para  $V_m = 160 \text{ V}$ .
- (d) A corrente determinada na letra (c) é menor do que o valor máximo determinado na letra (a)?
- (e) Se somente um diodo estivesse presente, determine a corrente do diodo e compare com o valor máximo nominal da letra (a).

### § 2.8 Retificação de Onda Completa

28. Um retificador em ponte de onda completa com uma entrada senoidal de 120 V rms possui um resistor de carga de 1 kΩ.
- (a) Se diodos de silício são empregados, qual é a tensão dc disponível na carga?
  - (b) Determine a TPI nominal de cada diodo.
  - (c) Ache a corrente máxima através de cada diodo durante a condução.
  - (d) Qual é a potência nominal exigida para cada diodo?
29. Determine  $v_o$  e a TPI nominal exigida para cada diodo na configuração da Fig. 2.153.

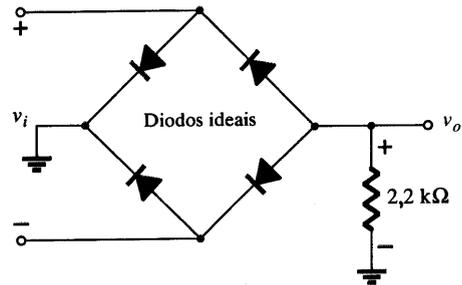
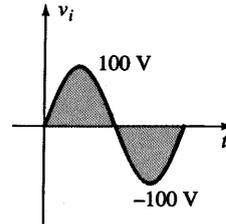


Fig. 2.153 Problema 29.

\*30. Esboce  $v_o$  para o circuito da Fig. 2.154 e determine a tensão dc disponível.

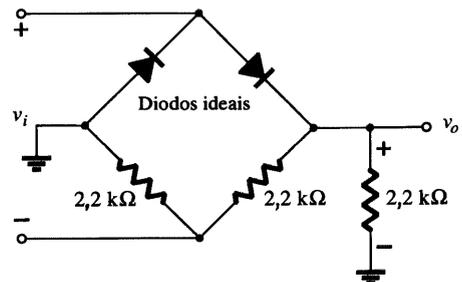
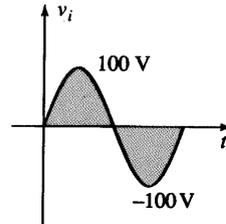


Fig. 2.154 Problema 30.



\*31. Esboce  $v_o$  para o circuito da Fig. 2.155 e determine a tensão dc disponível.

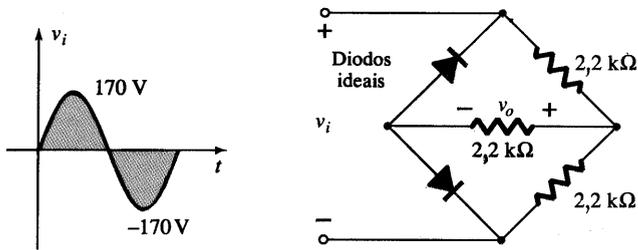
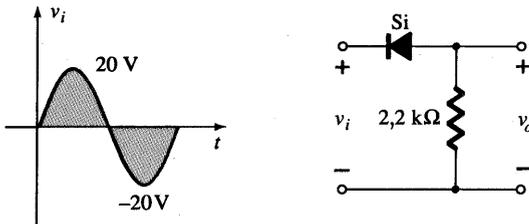


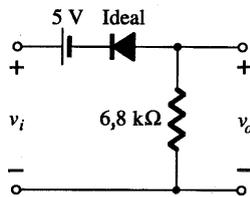
Fig. 2.155 Problema 31.

§ 2.9 Ceifadores

32. Determine  $v_o$  de cada circuito da Fig. 2.156 para o sinal de entrada mostrado abaixo.



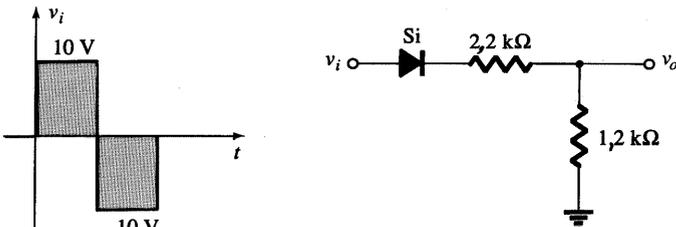
(a)



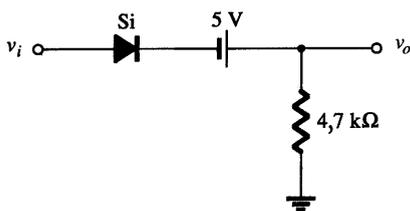
(b)

Fig. 2.156 Problema 32.

33. Determine  $v_o$  de cada circuito da Fig. 2.157 para o sinal de entrada mostrado abaixo.



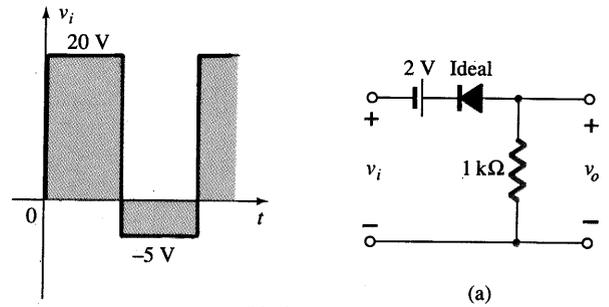
(a)



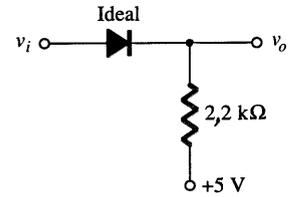
(b)

Fig. 2.157 Problema 33.

\*34. Determine  $v_o$  de cada circuito da Fig. 2.158 para o sinal de entrada mostrado abaixo.



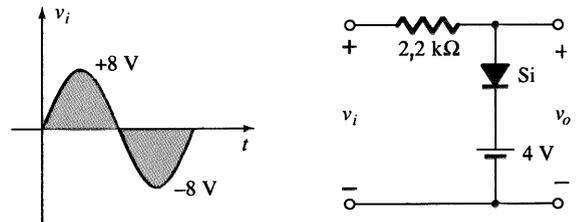
(a)



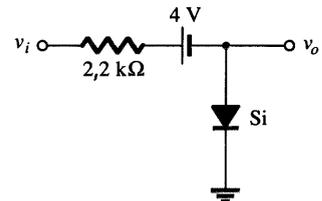
(b)

Fig. 2.158 Problema 34.

\*35. Determine  $v_o$  de cada circuito da Fig. 2.159 para o sinal de entrada mostrado abaixo.



(a)



(b)

Fig. 2.159 Problema 35.

36. Esboce  $i_R$  e  $v_o$  do circuito da Fig. 2.160 para o sinal de entrada mostrado abaixo.

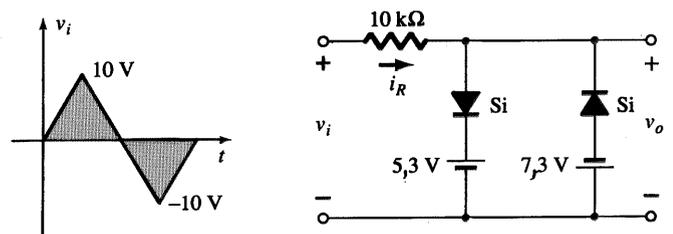


Fig. 2.160 Problema 36.



§ 2.10 Grampeadores

37. Esboce  $v_o$  de cada circuito da Fig. 2.161 para o sinal de entrada mostrado abaixo.

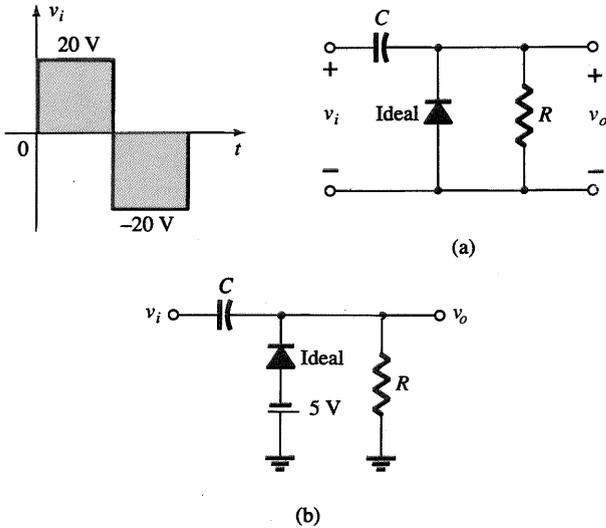


Fig. 2.161 Problema 37.

38. Esboce  $v_o$  de cada circuito da Fig. 2.162 para o sinal de entrada mostrado abaixo. Seria uma boa aproximação considerar o diodo como sendo ideal em ambas as configurações? Por quê?

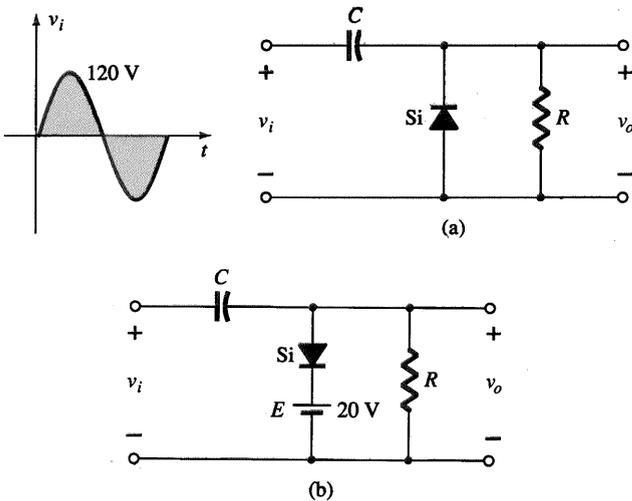


Fig. 2.162 Problema 38.

\*39. Para o circuito da Fig. 2.163:

- (a) Calcule  $5\tau$ .
- (b) Compare  $5\tau$  à metade do ciclo do sinal aplicado.
- (c) Esboce  $v_o$ .

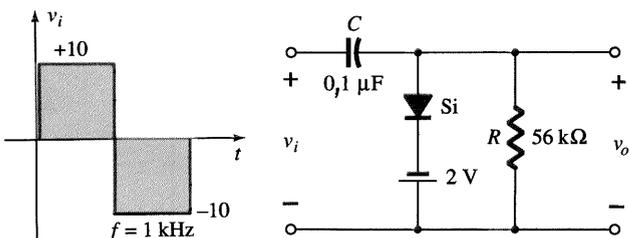


Fig. 2.163 Problema 39.

\*40. Projete um circuito grampeador para realizar a função indicada na Fig. 2.164.

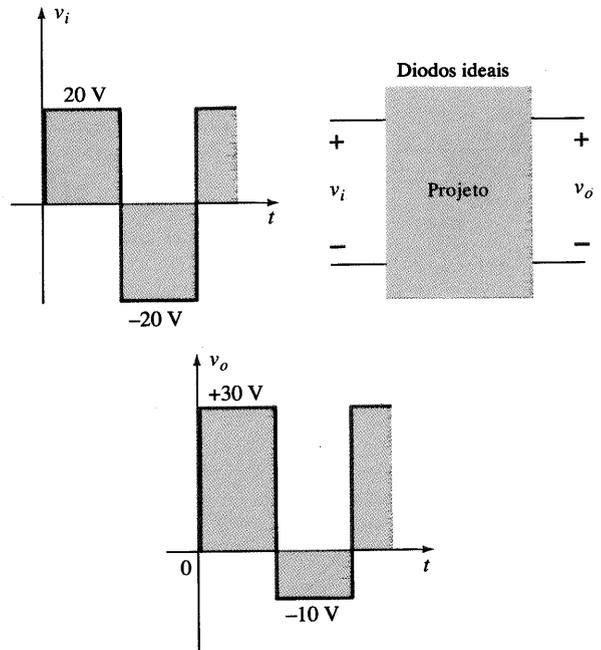


Fig. 2.164 Problema 40.

\*41. Projete um circuito grampeador para realizar a função indicada na Fig. 2.165.

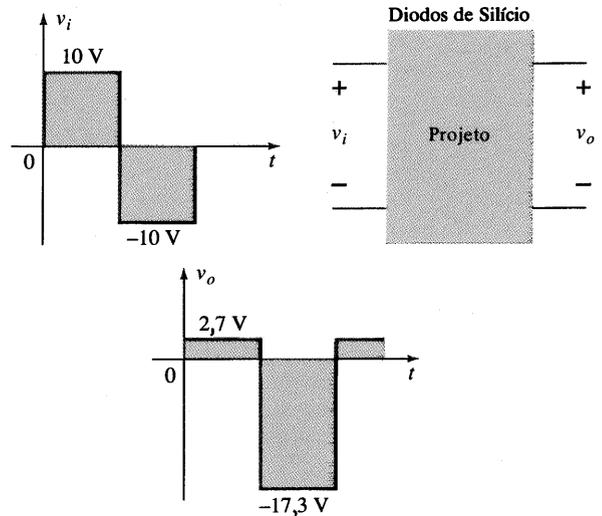


Fig. 2.165 Problema 41.

§ 2.11 Diodos Zener

- \*42. (a) Determine  $V_L$ ,  $I_L$ ,  $I_Z$  e  $I_R$  para o circuito da Fig. 2.166 se  $R_L = 180 \Omega$ .
- (b) Repita a letra (a) se  $R_L = 470 \Omega$ .
- (c) Determine o valor de  $R_L$  que estabelece as condições de máxima potência para o diodo Zener.
- (d) Determine o valor mínimo de  $R_L$  que assegura que o diodo Zener está no estado "ligado".
- \*43. (a) Projete o circuito da Fig. 2.167 para manter  $V_L$  em 12 V para uma variação na carga ( $I_L$ ) de 0 até 200 mA. Ou seja, determine  $R_S$  e  $V_Z$ .

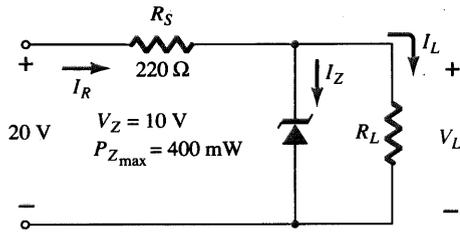


Fig. 2.166 Problema 42.

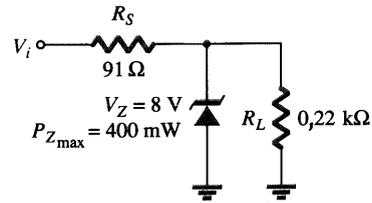


Fig. 2.168 Problemas 44, 55.

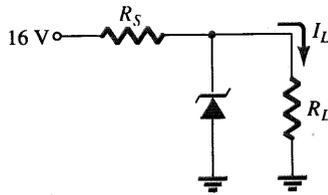


Fig. 2.167 Problema 43.

(b) Determine  $P_{Z_{max}}$  do diodo Zener da letra (a).

- \*44. Para o circuito da Fig. 2.168, determine a faixa de  $V_i$  que manterá  $V_L$  em 8 V e não excederá a potência máxima nominal do diodo Zener.
45. Projete um regulador de tensão que mantenha uma tensão de saída de 20 V através de uma carga de 1 k $\Omega$ , com uma entrada que varia entre 30 e 50 V. Ou seja, determine o valor apropriado de  $R_S$  e a corrente máxima  $I_{ZM}$ .
46. Esboce a saída do circuito da Fig. 2.120, se a entrada for uma onda quadrada de 50 V. Repita para uma onda quadrada de 5 V.

## § 2.12 Circuitos Multiplicadores de Tensão

47. Determine a tensão disponível de um dobrador de tensão da Fig. 2.121, se a tensão no secundário do transformador é de 120 V (rms).
48. Determine o TPI nominal exigido para os diodos da Fig. 2.121 em termos de tensão de pico no secundário  $V_m$ .

## § 2.13 Análise por Computador

49. Escreva um arquivo de entrada do PSpice (DOS) para determinar as correntes  $I_1$ ,  $I_2$ , e  $I_{D_1}$  da Fig. 2.36 (Exemplo 2.15).
50. Utilizando o PSpice (DOS), escreva um arquivo de entrada para determinar  $V_o$  para o circuito da Fig. 2.38.
51. Escreva um arquivo de entrada do PSpice (DOS) para determinar  $V_o$  do circuito da Fig. 2.137b.
52. Realize uma análise do circuito da Fig. 2.136b utilizando PSpice (Windows).
53. Realize uma análise do circuito da Fig. 2.140b utilizando PSpice (Windows).
54. Realize uma análise do circuito da Fig. 2.143 utilizando PSpice (Windows).
55. Realize uma análise geral para o circuito com Zener da Fig. 2.168 utilizando o PSpice (Windows).
56. Repita o problema 49 utilizando BASIC.
57. Repita o problema 50 utilizando BASIC.