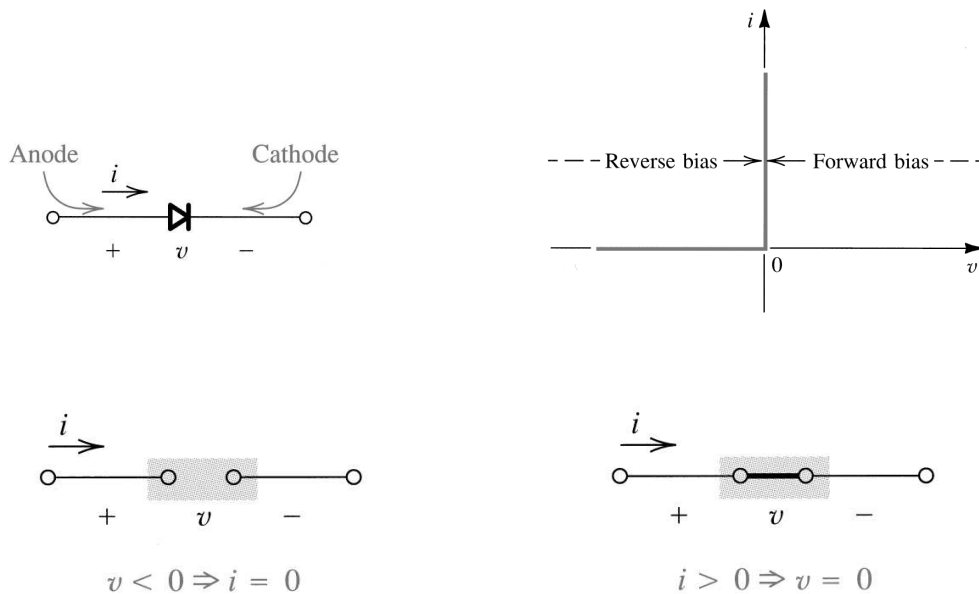


## INTRODUÇÃO

- O diodo é o elemento de circuito não linear mais simples.
- Já foi implementado em válvulas de efeito termo-iônico, mas hoje é feito de junções PN semicondutoras.
- A aplicação mais comum é em circuitos retificadores, mas pode ser usado de diversas formas, inclusive em circuitos lógicos.

### 3.1. O DIODO IDEAL

- DIODO IDEAL: dispositivo não-linear de dois terminais
- Descrição do dispositivo
  - Simbologia e nomenclatura.
  - Característica  $i \times v$  e regiões de operação.
  - Circuito equivalente para a polarização reversa.
  - Circuito equivalente para a polarização direta.

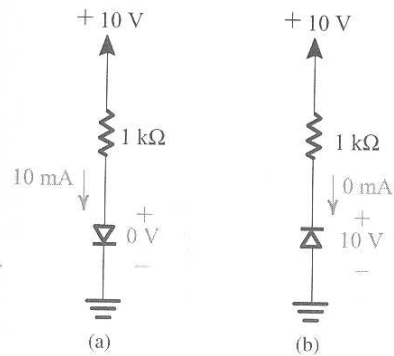


[Figura 3.1 - página 116]

- Um circuito externo deve limitar a corrente de condução direta e a tensão reversa do diodo.

## DIODOS

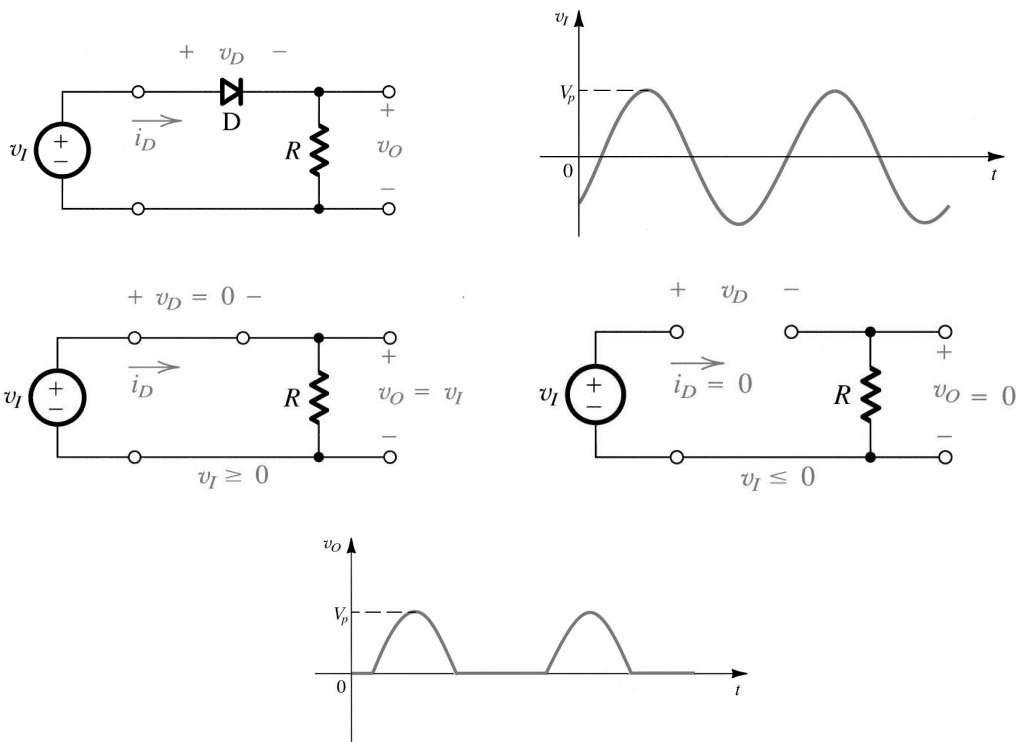
**Exemplo** Determine a condição de operação para os diodos das figuras 3.2 (a) e (b).



[Figura 3.2 -página 117]

### Uma aplicação simples: O Retificador

- Descrição do funcionamento:
  - Circuito retificador elementar.
  - Forma de onda da entrada do circuito retificador.
  - Circuito equivalente ao retificador para  $v_I \geq 0V$ .
  - Circuito equivalente ao retificador para  $v_I \leq 0V$
  - Forma de onda de saída do circuito retificador.



[Figura 3.3 – página 118]

## DIODOS

- O circuito **retifica** o sinal, e por isso é chamado **retificador**.
- Enquanto  $v_1$  alterna a polaridade e tem um valor médio zero,  $v_0$  é unidirecional e possui um valor médio não nulo, isto é, possui uma **componente cc**.
- Observação: em particular, o circuito é chamado retificador de meia onda.

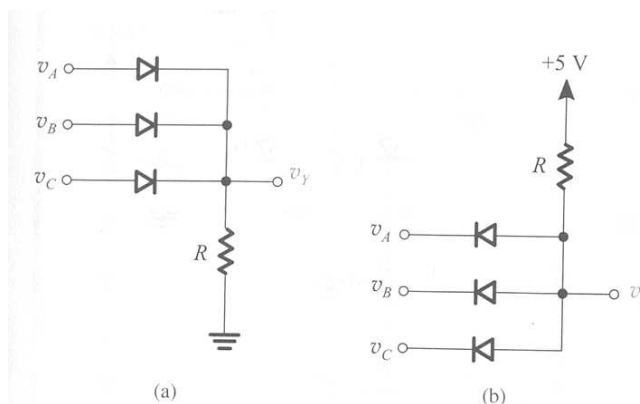
**Treinamento: exercícios 3.1 e 3.2, e exemplo 3.1.**

### Outra aplicação: Portas lógicas com diodos

- Diodos juntamente com resistores podem ser usados para implementar funções lógicas digitais.
- Sistema de lógica positiva:

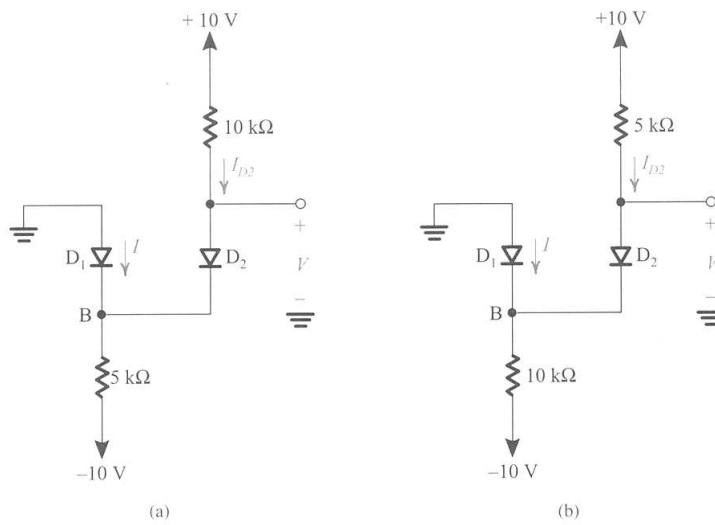
Nível lógico da variável	Nível de tensão elétrica
0 / falso	0V
1 / verdadeiro	5V

- Nos circuitos abaixo:
  - Circuito (a):  $Y = A + B + C$
  - Circuito (b):  $Y = A.B.C$



[Figura 3.5 – página 121]

**Exemplo 3.2** Supondo os diodos ideais, calcule os valores de  $I$  e  $V$  nos circuitos da figura 3.6.

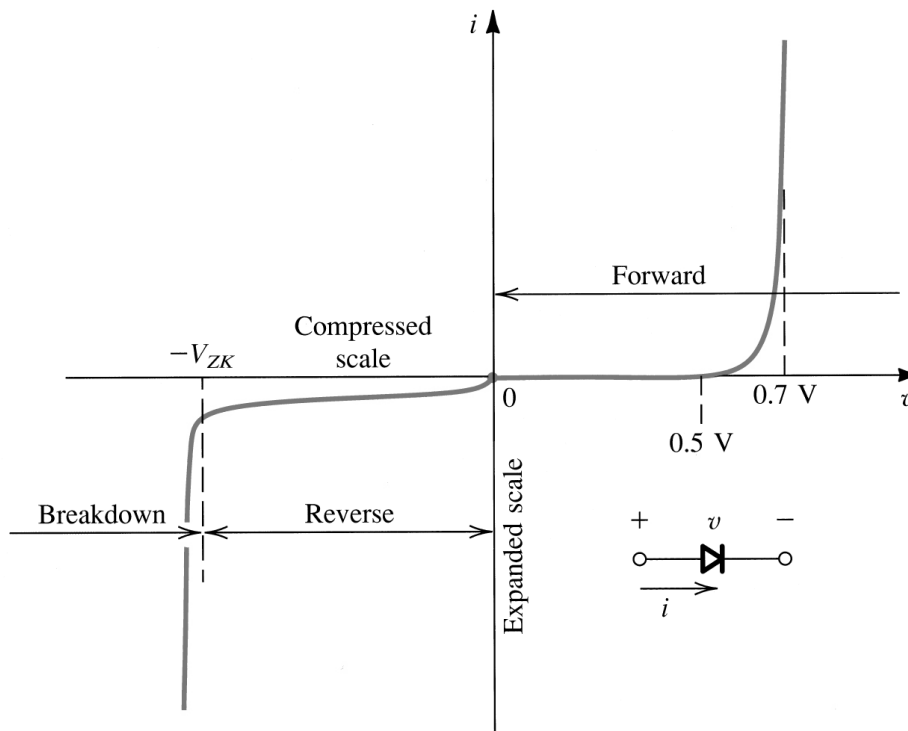


[Figura 3.6 (a) e (b) – página 122]

Treinamento: exercícios 3.4 e 3.5.

### 3.2 – CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DOS DIODOS DE JUNÇÃO

DIODOS REAIS: Diodos de junção feitos de silício, "diodos de junção".



[Figura 3.8 – página 125]

## DIODOS

---

- A curva característica do diodo semiconductor de silício consiste em três regiões distintas:
  - Região de polarização direta ( $v > 0$ ).
  - Região de polarização reversa ( $-V_{ZK} < v < 0$ ).
  - Região de ruptura (*breakdown*) ( $v < -V_{ZK}$ ).

### A Região de Polarização Direta

- Relação  $i$  x  $v$  aproximada por  $i = I_S \left( e^{\frac{v}{nV_T}} - 1 \right)$ .
- $I_S$  é a **corrente de saturação** ou **corrente de escala**.
  - $I_S$  é diretamente proporcional à área de seção transversal do diodo.
  - Para diodos de pequeno sinal e de baixa potência,  $I_S$  é da ordem de  $10^{-15}$  A
  - $I_S$  dobra a cada  $5^\circ\text{C}$  de aumento da temperatura
- $V_T$  é a **tensão térmica** dada por  $V_T = \frac{kT}{q}$ 
  - $k$  é a constante de Boltzmann ( $1,38 \times 10^{-23}$  J/K)
  - $T$  é a temperatura absoluta (K)
  - $q$  é a carga do elétron ( $1,60 \times 10^{-19}$  C)
  - Da ordem de 25mV na temperatura ambiente de  $25^\circ\text{C}$
- Em diodos de circuitos integrados, a constante  $n$  é igual 1 e, em diodos de circuitos discretos,  $n = 2$ .
- Para  $i \gg I_S$ , a relação  $v$  x  $i$  do diodo pode ser aproximada por  $i = I_S e^{\frac{v}{nV_T}}$ .
- Dados dois pontos da região direta onde é válida a expressão acima, digam-se  $(I_1, V_1)$  e  $(I_2, V_2)$  deduz-se que  $V_2 - V_1 = 2,3 \cdot n \cdot \log\left(\frac{I_2}{I_1}\right)$ .
- Para cada década de corrente, a queda de tensão é de aproximadamente 60mV para  $n=1$  e 120mV para  $n=2$ .
- A corrente  $i$  no diodo é desprezivelmente pequena para  $v < 0,5\text{V}$  (**tensão de corte**)
- Na condução plena, a queda de tensão no diodo se restringe a uma pequena faixa que varia aproximadamente de 0,6V a 0,8V (0,7V na média).

**Exemplo 3.3** Um diodo de silício, feito para operar com 1mA, apresenta uma queda de tensão direta de 0,7V para uma corrente de 1mA. Avalie o valor de  $I_S$  nos casos em que  $n=1$  e que  $n=2$ . Que constantes de escalonamento são aplicáveis para um diodo de 1A do mesmo fabricante que conduz uma corrente de 1A para uma queda de 0,7V?

### Varição com a temperatura

- Para uma dada corrente constante, a queda de tensão diminui aproximadamente 2mV para cada  $1^\circ\text{C}$  de aumento de temperatura.
- Utilizado no projeto de termômetros eletrônicos.

## DIODOS

---

### A Região de Polarização Reversa

- A relação exponencial continua valendo, mas pelo fato do termo exponencial tornar-se muito pequeno, pode-se aproximar  $i \approx -I_S$ .
- Diodos reais exibem correntes reversas, embora de valor pequeno, muito maiores que  $I_S$ , da ordem de nA, por causa de correntes de fuga.
- A corrente reversa aumenta com o aumento da tensão reversa.
- $I_S$  dobra a cada 5°C de aumento de temperatura e a corrente reversa dobra a cada 10°C de aumento de temperatura.

### A Região de Ruptura

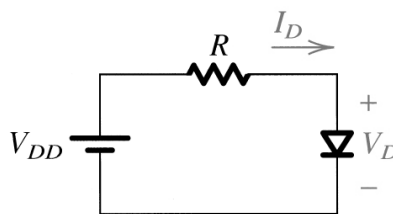
- A região de ruptura é obtida quando a tensão reversa excede a um valor de limiar específico denominado **tensão de ruptura**, designado  $V_{ZK}$  (ZK = *Zener Knee*).
- A ruptura no diodo não é destrutiva se a potência for limitada a um valor seguro, especificado pela fabricante, por intermédio um circuito externo.
- O fato da característica  $i \times v$  ser quase vertical permite que o diodo seja usado como regulador de tensão.

## 3.3. OPERAÇÃO FÍSICA DOS DIODOS

Visto de acordo com o capítulo 2 de Malvino (1986).

## 3.4. ANÁLISE DE CIRCUITOS COM DIODOS

- Análise do diodo real na região de polarização direta.

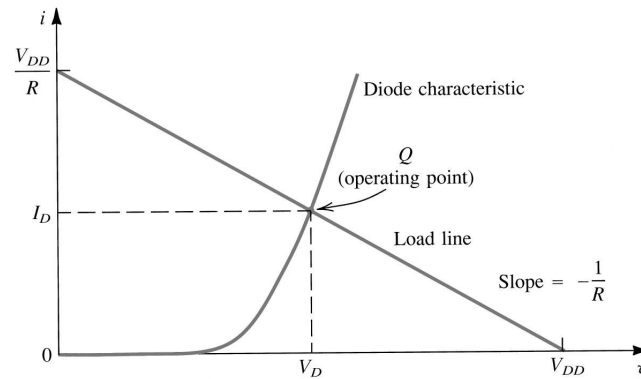


[Figura 3.18 – página 150]

- Característica  $i \times v$  do diodo:  $i = I_S e^{\frac{v}{nV_T}}$ .
- Lei de Kirchhoff das tensões:  $I_D = \frac{V_{DD} - V_D}{R}$ .

## DIODOS

### Análise Gráfica



[Figura 3.19 – página 150]

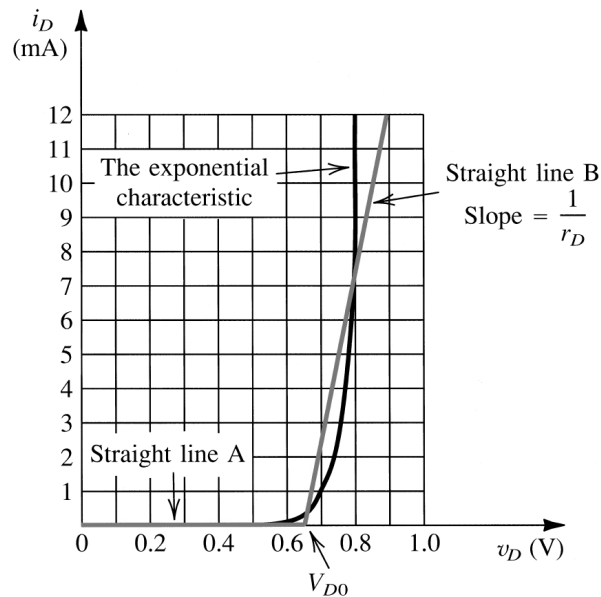
- Obtém-se  $V_D$  e  $I_D$  pela interseção entre a característica do diodo e a **reta de carga** determinada pela LKT.
- O ponto  $Q = (V_D, I_D)$  é denominado **ponto de operação**.

### Análise Iterativa

- Solução de um sistema de equações não lineares.

**Exemplo 3.4** Determine os valores da corrente  $I_D$  e da tensão  $V_D$  para o circuito da figura 3.18 com  $V_{DD}=5\text{V}$ ,  $R = 1\text{k}\Omega$ . Suponha que a corrente do diodo seja de  $1\text{mA}$  para uma tensão de  $0,7\text{V}$  e que a queda de tensão varia de  $0,1\text{V}$  para cada década de variação de corrente.

### Modelo de Segmentos Lineares (“Bateria e Resistência”)



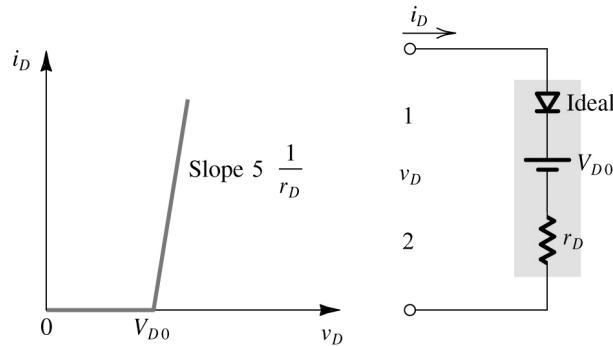
[Figura 3.20 – página 152]

## DIODOS

- A curva exponencial é aproximada por duas linhas retas, a reta A com inclinação zero e a reta B com inclinação  $1/r_D$ .
- O modelo de duas retas é então descrito pelas equações:

$$i_D = \begin{cases} 0, & v_D \leq V_{D0} \\ \frac{v_D - V_{D0}}{r_D}, & v_D \geq V_{D0} \end{cases}$$

- O modelo de segmentos lineares é representado pelo circuito equivalente abaixo.

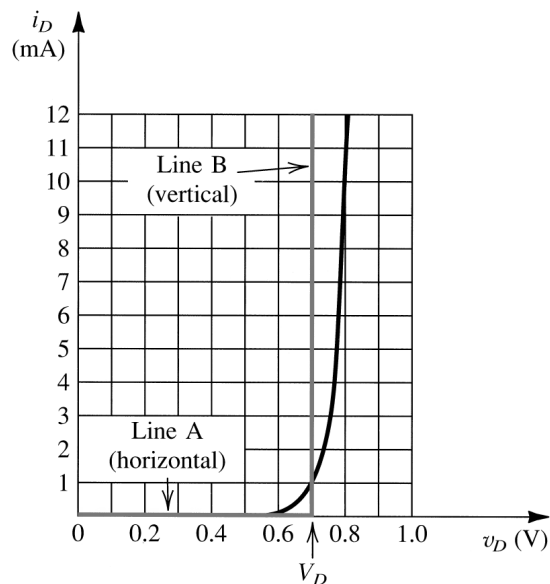


[Figura 3.21 – página 153]

**Exemplo** Determine  $V_{D0}$  e  $r_D$  para a aproximação da figura 3.20.

**Exemplo 3.5** Repita o problema do exemplo 3.4 utilizando o modelo de segmentos lineares cujos parâmetros são dados pela figura 3.20.

### Modelo da Queda de Tensão Constante



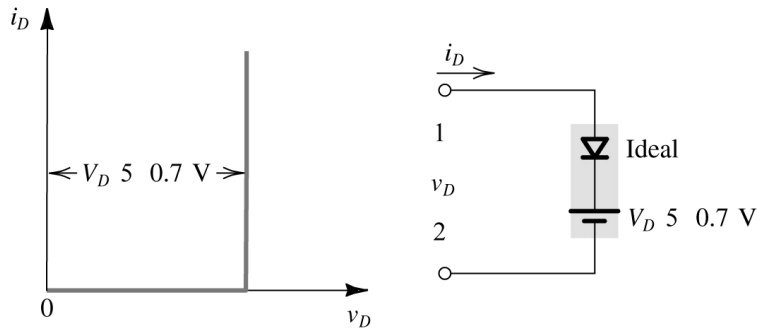
[Figura 3.23 – página 154]



## DIODOS

---

- Utiliza-se uma reta vertical para aproximação da parte da exponencial que aumenta rapidamente.
- O diodo na condução direta exibe apenas uma queda de tensão  $V_D$  constante (usualmente 0,7V para diodo de Silício).
- Modelo utilizado em fases iniciais do projeto de um circuito.
- Modelo representado pelo circuito equivalente da figura abaixo.



[Figura 3.24 – página 155]

**Exemplo 3.5(a)** Repita o problema do exemplo 3.4 utilizando o modelo da queda de tensão constante onde  $V_D$  é 0,7V.

### Modelo do Diodo Ideal

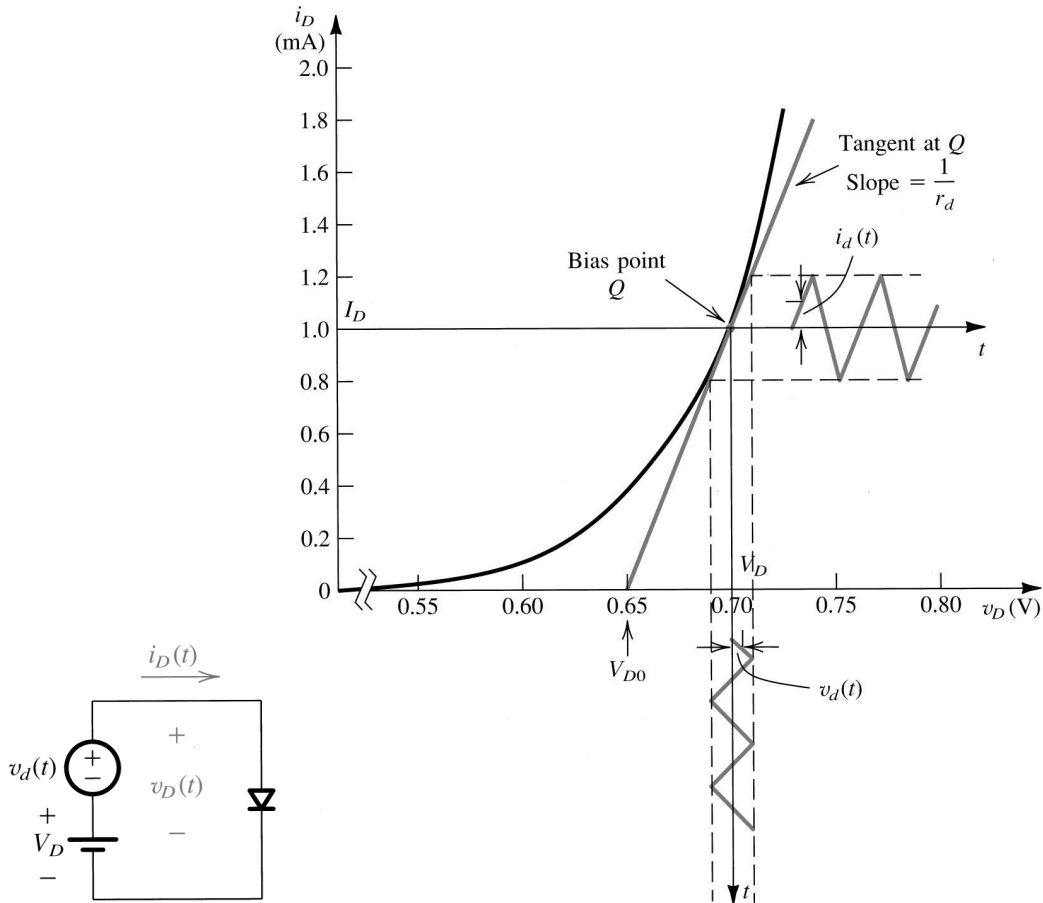
- Usado em aplicações envolvendo tensões muito maiores que a queda de tensão no diodo (0,6V a 0,8V).
- Para este caso, pode-se desprezar a queda de tensão no diodo sem inserir muitos erros nos cálculos.

**Exemplo 3.5(a)** Repita o problema do exemplo 3.4 utilizando o modelo do diodo ideal.

**Treinamento: exercícios 3.16, 3.17, 3.18 e 3.19.**

### 3.5. O MODELO PARA PEQUENOS SINAIS E SUAS APLICAÇÕES

- Há aplicações em que o diodo é polarizado para operar em um ponto de operação sobre a característica direta  $i \times v$  e um pequeno sinal  $ca$  é sobreposto aos valores  $cc$ .



[Figura 3.25 – página 157]

- Sinal aplicado  $v_D = V_D + v_d(t)$ .
- Na ausência do sinal de tensão  $v_d(t)$  a corrente no diodo é  $I_D = I_S \cdot e^{\frac{V_D}{n \cdot V_T}}$ .
- Na presença da tensão  $v_d(t)$ , a corrente no diodo é
 
$$i_D(t) = I_S \cdot e^{\frac{V_D + v_d(t)}{n \cdot V_T}} = I_S \cdot e^{\frac{V_D}{n \cdot V_T}} \cdot e^{\frac{v_d(t)}{n \cdot V_T}}$$

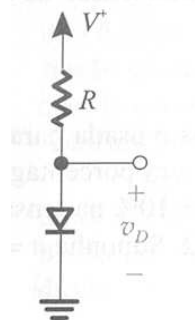
## DIODOS

- Para um sinal  $v_d(t)$  de pequena amplitude, onde se possa considerar  $\frac{v_d(t)}{n \cdot V_T} \ll 1$ , tem-se

$$e^{\frac{V_D}{n \cdot V_T}} \approx \left( 1 + \frac{v_d(t)}{n \cdot V_T} \right).$$

- A corrente total no diodo é então aproximada por  $i_D(t) = I_D + i_d(t)$ .
- Define-se a corrente incremental no diodo por  $i_d(t) = \frac{I_D}{n \cdot V_T} \cdot v_d(t) = \frac{v_d(t)}{r_D}$ .
- Define-se a **resistência do diodo para pequenos sinais** ou **resistência incremental** do diodo por  $r_D = \frac{n \cdot V_T}{I_D}$  [ $\Omega$ ].
- A aproximação para pequenos sinais é equivalente supor que a amplitude do sinal é pequena o suficiente para que a excursão ao longo da curva  $i \times v$  seja limitada a um pequeno segmento linear, isto é,  $i_D = \frac{1}{r_D} (v_D - V_{D0})$ .
- A inclinação do segmento é igual à inclinação da curva  $i \times v$  no ponto de operação  $Q$  e determinado pela condutância para pequenos sinais  $1/r_D$ .
- O ponto por onde a tangente cruza o eixo  $v_D$  determina o valor de  $V_{D0}$ .
- Pelo teorema da superposição, a análise para pequenos sinais pode ser realizada pelos seguintes passos:
  - Realização da análise *cc* para determinar o ponto de operação  $Q = (V_D, I_D)$ .
  - Determinação da resistência incremental  $r_D$ .
  - Análise para pequenos sinais, substituindo-se o diodo pela resistência incremental  $r_D$  e anulando-se todas as fontes *cc*.

**Exemplo 3.6** Considere o circuito abaixo para o caso de  $R=10k\Omega$ . A fonte de alimentação  $V^+$  tem um valor *cc* de 10V, o qual tem sobreposto uma senóide de 60Hz com amplitude de 1V de pico, isto é, há uma **ondulação (ripple) na fonte de alimentação**. Calcule os valores da tensão *cc* e do sinal senoidal sobre o diodo. Suponha que o diodo tem 0,7V de queda a 1mA de corrente e  $n = 2$ .



[Figura 3.28 – página 161]

## **DIODOS**

---

### **Uso da Queda de Tensão Direta no Diodo para Regulação de Tensão**

Como a queda de tensão direta no diodo permanece quase constante em 0,7V, pode-se usar um ou mais diodos em série para obter as tensões reguladas múltiplas de 0,7V.

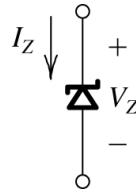
### **O Modelo do Diodo para Altas Frequências**

- Em altas frequências, o diodo pode ser modelado para pequenos sinais por uma resistência de valor  $r_D$  e duas capacitâncias em paralelo com a resistência:
  - $C_j$  é a capacitância da camada de depleção, e
  - $C_d$  é a capacitância de difusão.
- Em aplicações de chaveamento, como os circuitos digitais, são empregadas adaptações de  $C_j$  e  $C_d$  para grandes sinais.

**Treinamento: exemplo 3.7, e exercícios 3.20, 3.21, 3.22 e 3.23.**

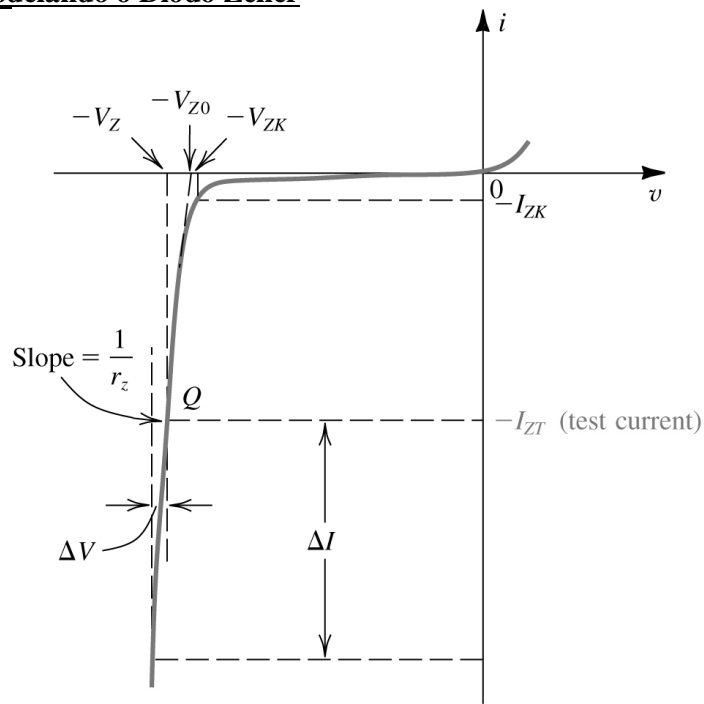
### 3.6. DIODO ZENER

- DIODOS ZENER: diodos especiais projetados especificamente para trabalhar na região de ruptura.
- Denominação: **diodos Zener** ou **diodos de ruptura**.



[Figura 3.30 – página 165]

#### Especificando e Modelando o Diodo Zener



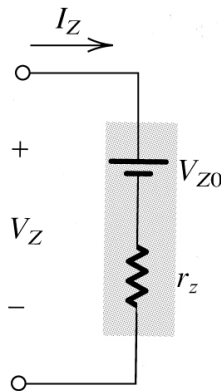
$$\Delta V = \Delta I r_z$$

[Figura 3.31 – página 165]

- Para valores de corrente acima da corrente de joelho  $I_{ZK}$ , a característica  $i \times v$  é quase uma reta.
- O fabricante normalmente especifica o valor de tensão no diodo  $V_Z$  para uma determinada corrente de teste  $I_{ZT}$  (ponto Q na curva). Exemplo: um diodo Zener de 6,8V a 10mA.
- A variação de corrente  $\Delta I$  corresponde a uma variação da tensão Zener  $\Delta V$  dada por  $\Delta V = r_z \cdot \Delta I$ , onde  $r_z$  é o inverso da inclinação da linha quase reta da curva  $i \times v$  no ponto Q.
- A resistência  $r_z$  é a **resistência incremental** ou **resistência dinâmica** do diodo Zener.

## DIODOS

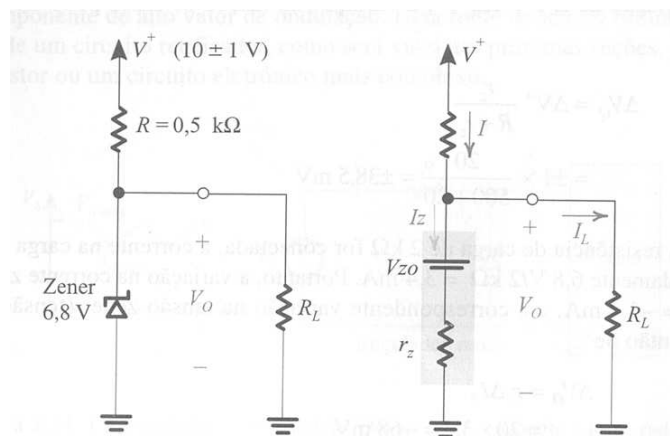
- O valor de  $r_z$  permanece baixo e quase constante sobre uma extensa faixa de corrente, aumentando consideravelmente, contudo, nas vizinhanças do joelho.
- O fabricante também especifica a potência máxima que o dispositivo pode dissipar com segurança.
- Exemplo: um diodo Zener de 0,5W e 6,8V pode operar seguramente até uma corrente de 70mA.
- A característica quase linear  $i \times v$  do diodo Zener sugere que o dispositivo pode ser modelado por uma reta de inclinação  $1/r_z$  e que intercepta o eixo de tensão no ponto  $V_{Z0}$ .
- $V_{Z0}$  é ligeiramente diferente de  $V_{ZK}$  (correspondente à corrente de joelho).
- O modelo equivalente do diodo Zener para  $I_Z > I_{ZK}$  e  $V_Z > V_{Z0}$  é dado na figura abaixo e descrito analiticamente pela equação  $V_Z = V_{Z0} + r_z \cdot I_Z$ .



[Figura 3.32 – página 166]

**Exemplo 3.8** O diodo Zener de 6,8V no circuito da figura 3.33 (a) é especificado para ter  $V_Z = 6,8V$  com  $I_Z = 5mA$ ,  $r_z = 20\Omega$  e  $I_{ZK} = 0,2mA$ . A fonte de alimentação  $V^+$  é de 10V nominal, mas pode variar em  $\pm 1V$ . Pede-se:

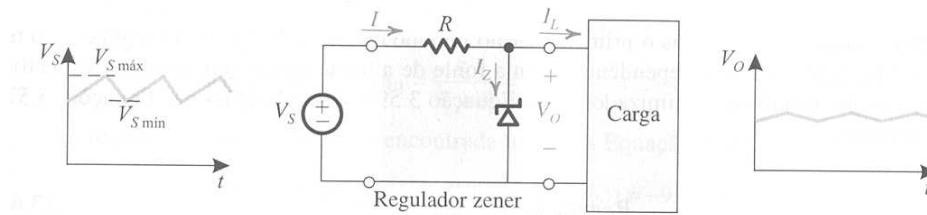
- Calcule o valor de  $V_O$  sem carga e com o valor de  $V^+$  nominal.
- Calcule a variação em  $V_O$  resultante da variação de  $\pm 1V$  em  $V^+$ .
- Calcule a variação em  $V_O$  resultante da conexão de uma carga  $R_L = 2k\Omega$ .
- Calcule a variação em  $V_O$  quando  $R_L = 0,5k\Omega$ .
- Qual o valor mínimo de  $R_L$  com o qual o diodo continua operando na região de ruptura?



[Figura 3.33 – página 167]

## DIODOS

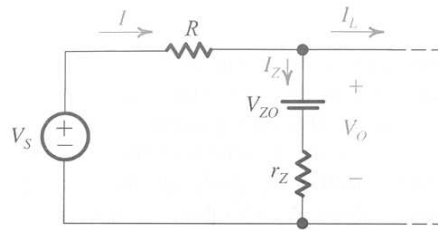
### Projeto do Regulador Zener Paralelo (Shunt)



[Figura 3.34 – página 169]

- A função de um circuito regulador é fornecer uma tensão de saída  $V_O$  que seja mais constante possível, apesar das ondulações em  $V_S$  e variações em  $I_L$  da carga.
- Obtenção do valor de  $V_O$  em função de  $V_S$ ,  $V_{Z0}$  e  $I_L$

$$V_O = \frac{R}{R + r_Z} \cdot V_{Z0} + \frac{r_Z}{R + r_Z} \cdot V_S + \frac{R \cdot r_Z}{R + r_Z} \cdot I_L$$



[Figura 3.35 – página 170]

- Regulação de linha – variação em  $V_O$  correspondente à variação de 1V em  $V_S$ .
  - Expresso em mV/V.

$$\frac{\Delta V_O}{\Delta V_S} = \frac{r_Z}{R + r_Z}$$

- Regulação de carga – variação de  $V_O$  correspondente à variação de 1mA em  $I_L$ .
  - Expresso em mV/mA.

$$\frac{\Delta V_O}{\Delta I_L} = -\frac{R \cdot r_Z}{R + r_Z}$$

- A regulação de carga é determinada por  $r_Z$ .
- Selecionar um Zener com baixa resistência incremental reduz a regulação de carga.
- Selecionar um valor alto de  $R$  é desejável.

- Valor limite de  $R = \frac{V_{S,\text{mín}} - V_{Z0} - r_Z \cdot I_{Z,\text{mín}}}{I_{Z,\text{mín}} + I_{L,\text{máx}}}$

- Condição: Zener opera próximo à região de joelho.
- $V_S$  no seu valor mínimo ( $V_{S,\text{mín}}$ )
- $I_Z$  no seu valor mínimo ( $I_{Z,\text{mín}}$ )
- $I_L$  no seu valor máximo ( $I_{L,\text{máx}}$ )

## DIODOS

**Exemplo 3.9** É preciso projetar um regulador Zener paralelo que proporcione uma tensão de saída de 7,5V aproximadamente. A fonte de alimentação rudimentar varia entre 15 e 25 V e a corrente na carga varia em uma faixa de 0 a 15mA. O diodo Zener disponível é de  $V_Z = 7,5V$  com uma corrente de 20mA e  $r_Z = 10 \text{ Ohm}$ . Calcule o valor necessário para R e determine as regulações de linha e de carga. Determine também, em porcentagem, a variação em  $V_O$  correspondente à variação máxima em  $V_S$  e  $I_L$ .

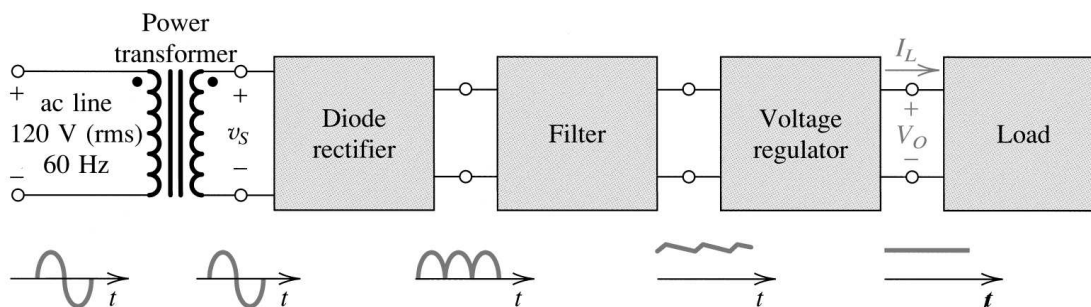
### O Efeito da Temperatura

- A dependência da tensão Zener  $V_Z$  com a temperatura é especificada pelo coeficiente de temperatura do diodo Zener, **TC** ou **temco** expresso em  $mV/^\circ C$ .
- Diodos com tensão Zener de menos de 5V apresentam TC negativo e diodos com tensão Zener maior apresentam TC positivo.

**Treino:** exercícios 3.24, 3.25 e 3.26.

## 3.7. CIRCUITOS RETIFICADORES

- Circuitos retificadores a diodo são usados em fontes de alimentação *cc* para alimentar um equipamento eletrônico.



[Figura 3.36 – página 172]

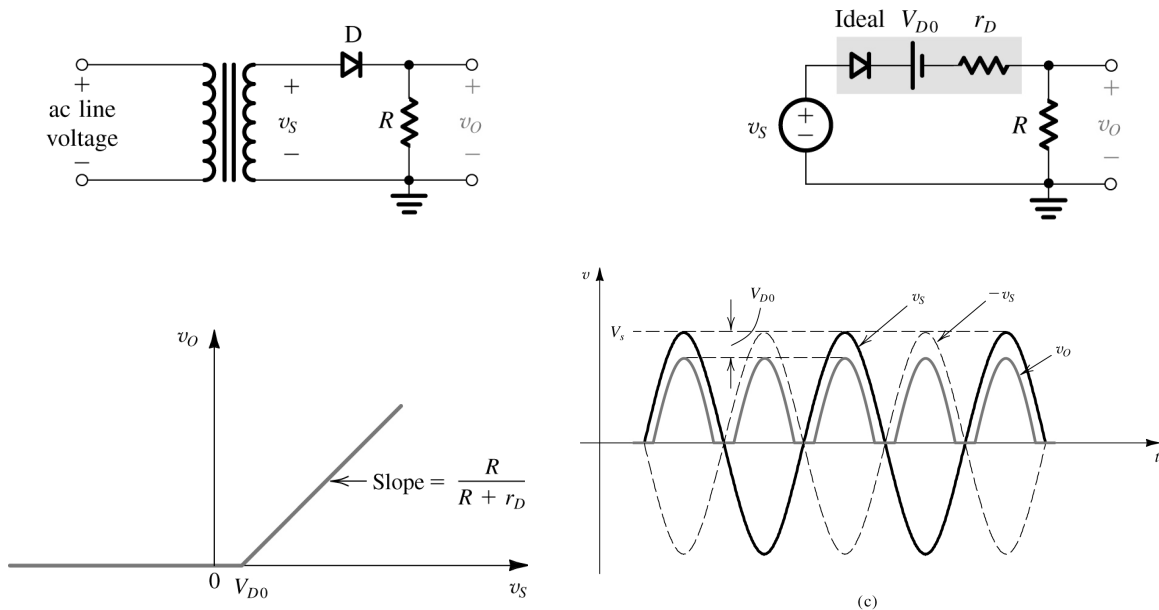
- A fonte é alimentada por uma rede elétrica *ca* de 60Hz com 120V (eficaz ou rms).
- O retificador entrega uma tensão *cc*  $V_O$  para um circuito eletrônico, representado pelo bloco “carga”.
- O **transformador de potência** consiste em duas bobinas enroladas separadamente em um núcleo de ferro que acopla magneticamente os dois enrolamentos.
- O **enrolamento primário**, com número de espiras  $N_1$ , é conectado à fonte de alimentação.
- O **enrolamento secundário**, com número de espiras  $N_2$ , é conectado ao circuito da fonte de alimentação *cc*.
- Pela escolha adequada da razão  $N_1/N_2$  o projetista promove um **abaixamento** da tensão da linha até um valor conveniente para produzir uma determinada tensão *cc* pela fonte.
- O transformador de linha também promove um **isolamento elétrico** entre o equipamento eletrônico e o circuito de potência da linha.
- Os **diodos retificadores** convertem a senóide de entrada  $v_s$  em uma saída unipolar.



## DIODOS

- A saída dos diodos retificadores possui valor médio diferente de zero e corresponde a uma forma de onda **pulsante**.
- As variações na saída do retificador são reduzidas pelo bloco “**filtro**”.
- A saída do filtro ainda contém **ondulação**.
- Para reduzir a ondulação e estabilizar a tensão de saída *cc* da fonte contra variações causadas pela variação da corrente na carga, emprega-se um **regulador de tensão**.

### O Retificador de Meia Onda



[Figura 3.37 – página 174]

- A tensão de saída do retificador é:

$$v_O = \begin{cases} 0, & v_S < V_{D0} \\ \frac{R}{R + r_D} \cdot (v_S - V_{D0}), & v_S \geq V_{D0} \end{cases}$$

- Para  $r_D \ll R$  tem-se:

$$v_O = \begin{cases} 0, & v_S < V_{D0} \\ v_S - V_{D0}, & v_S \geq V_{D0} \end{cases}$$

- Dois parâmetros de projeto: capacidade de condução de corrente exigida pelo diodo e a tensão de pico inversa (PIV).
- A capacidade de corrente de condução exigida ao diodo é determinada pelo maior valor de corrente que o diodo pode conduzir.
- A PIV é determinada pelo maior valor de tensão inversa o diodo deve suportar sem atingir a região de ruptura.
- É prudente escolher um diodo com tensão de ruptura reversa pelo menos 50% maior do que a PIV especificada.

## DIODOS

**Exercício 3.27** Para o circuito retificador de meia onda, desprezando o efeito de  $r_D$ , mostre que:

(a) A condução começa no ângulo  $\theta = \arcsen\left(\frac{V_{D0}}{V_S}\right)$  e termina em  $\pi - \theta$ , com ângulo total de condução  $\pi - 2\theta$ .

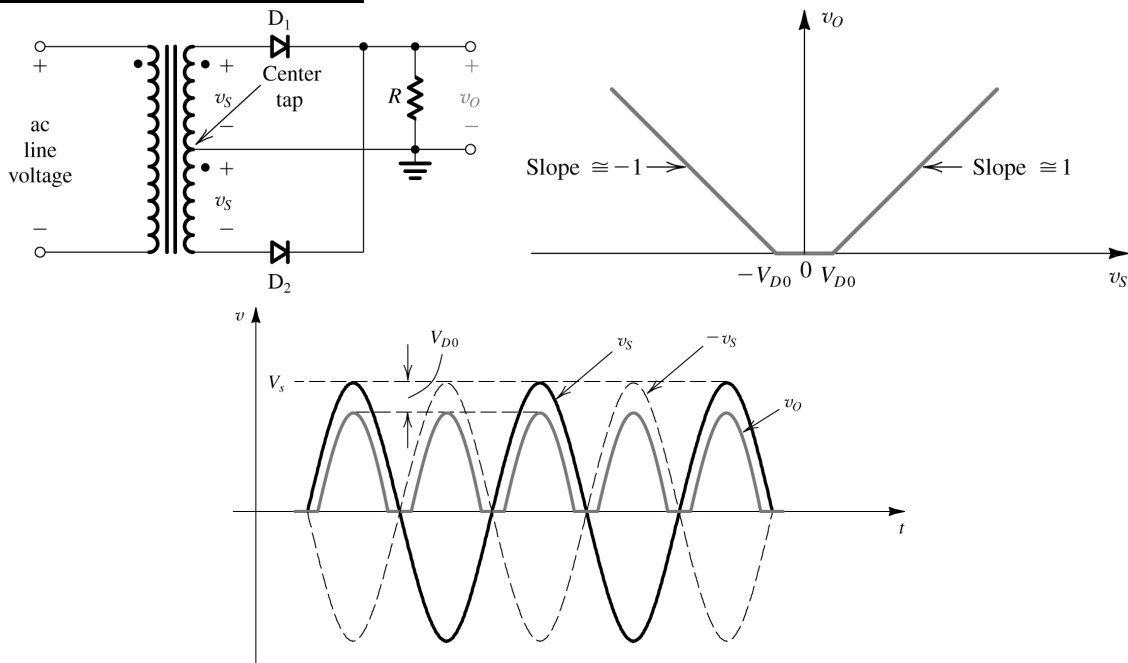
(b) O valor médio (componente cc) de  $v_O$  é  $V_O \approx \frac{V_S}{\pi} - \frac{V_{D0}}{2}$ .

(c) A corrente de pico no diodo é  $\frac{V_S - V_{D0}}{R}$ .

(d)  $PIV = V_S$ .

(e) Determine os valores numéricos das grandezas acima para uma entrada senoidal de 12V (rms),  $V_{D0} = 0,7V$  e  $R = 100\Omega$ .

### Retificador de Onda Completa



[Figura 3.38 – página 176]

- O enrolamento do transformador é dividido ao meio para proporcionar duas tensões iguais  $v_S$  em cada uma das metades do enrolamento secundário, com polaridades indicadas.
- Quando a tensão da linha é positiva, ambos os sinais  $v_S$  serão positivos, D1 conduz e D2 está reversamente polarizado.
- Quando a tensão da linha é negativa, as tensões  $v_S$  serão negativas, D1 está reversamente polarizado e D2 conduz.
- A corrente através de R sempre circula no mesmo sentido, e  $v_O$  é unipolar.

## DIODOS

**Exercício 3.28** Para o circuito retificador de onda completa, desprezando o efeito de  $r_D$ , mostre que:

(a) A saída é zero para um ângulo  $\theta = 2 \cdot \arcsen\left(\frac{V_{D0}}{V_S}\right)$  centralizado em torno do ponto de cruzamento por zero da senóide de entrada.

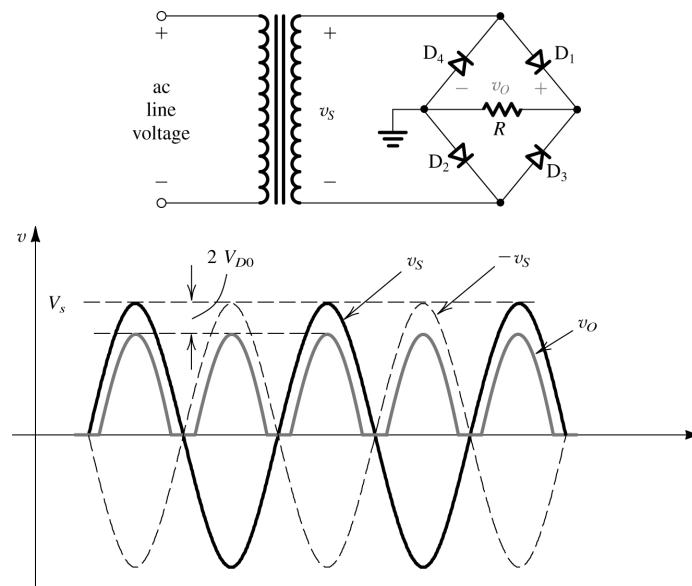
(b) O valor médio (componente cc) de  $v_O$  é  $V_O \approx \frac{2}{\pi} \cdot V_S - V_{D0}$ .

(c) A corrente de pico no diodo é  $\frac{V_S - V_{D0}}{R}$ .

(d)  $PIV = 2 \cdot V_S - V_{D0}$ .

(e) Determine os valores numéricos das grandezas acima para uma entrada senoidal de 12V (rms),  $V_{D0} = 0,7V$  e  $R = 100\Omega$ .

### O Retificador em Ponte



[Figura 3.39 – página 177]

- Circuito alternativo para implementar o retificador de onda completa, que não exige transformador com tomada central e que é baseado numa configuração em ponte.
- Durante o semiciclo positivo da tensão de entrada  $v_S$ , a corrente é conduzida pelo diodo  $D_1$ , resistor  $R$  e diodo  $D_2$ . Os diodos  $D_3$  e  $D_4$  estão reversamente polarizados.
- Durante o semiciclo negativo da tensão de entrada  $v_S$ , a corrente é conduzida pelo diodo  $D_3$ , resistor  $R$  e diodo  $D_4$ . Os diodos  $D_1$  e  $D_2$  estão reversamente polarizados.
- Durante ambos os semiciclos a corrente circula por  $R$  no mesmo sentido, conseqüentemente  $v_O$  é unipolar e positiva.
- Possui vantagens práticas em relação ao retificador em ponte simples apresentado anteriormente.

## DIODOS

**Exercício 3.29** Para o circuito retificador em ponte, desprezando o efeito de  $r_D$ , mostre que:

(a) A saída é zero para um ângulo  $\theta = 2 \cdot \arcsen \left( \frac{V_{D0}}{V_S} \right)$  centralizado em torno do ponto de cruzamento por zero da senóide de entrada.  
cruzamento por zero da senóide de entrada.

(b) O valor médio (componente cc) de  $v_O$  é  $V_O \approx \frac{2}{\pi} \cdot V_S - 2 \cdot V_{D0}$ .

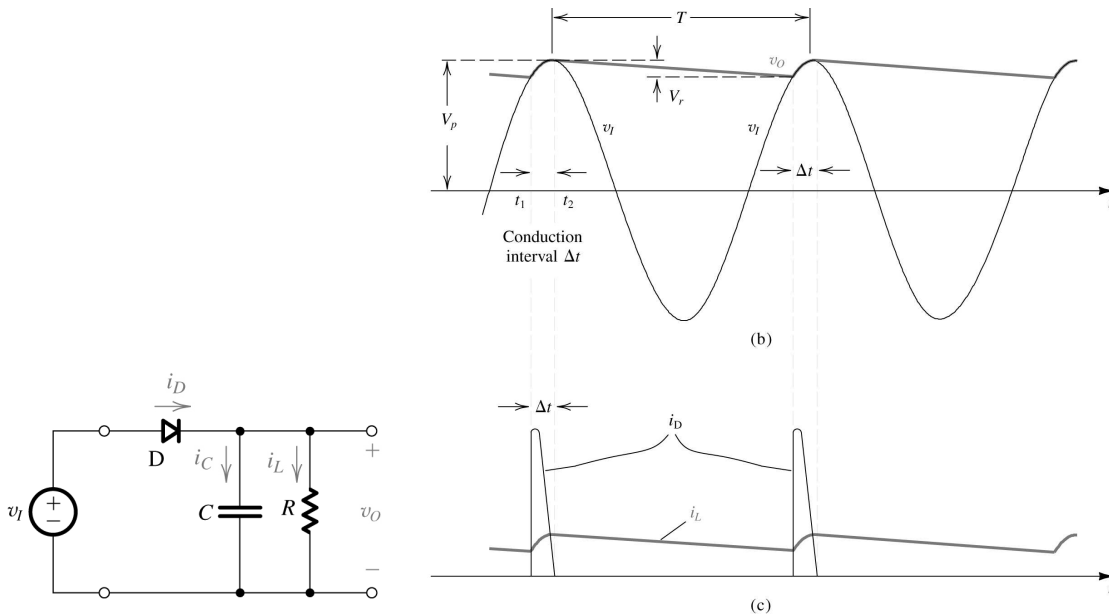
(c) A corrente de pico no diodo é  $\frac{V_S - 2 \cdot V_{D0}}{R}$ .

(d)  $PIV = V_S - V_{D0}$ .

(e) Determine os valores numéricos das grandezas acima para uma entrada senoidal de 12V (rms),  $V_{D0} = 0,7V$  e  $R = 100\Omega$ .

### O Retificador com Capacitor de Filtro

- A natureza pulsante da forma de onda de um retificador é indesejável para alimentar um circuito eletrônico.
- O regulador apenas não é suficiente, pois a ondulação é grande.
- Inserção de um capacitor de filtro após o retificador.



[Figura 3.41 – página 180]

- O diodo fica reversamente polarizado enquanto  $V_S < V_O$ :
  - A corrente no diodo é nula.
  - O capacitor descarrega no resistor.
  - $i_D = 0$
  - $i_C = -i_L$

## DIODOS

---

- $i_L = \frac{v_O}{R}$
- $\frac{dv_O}{dt} + \frac{1}{RC}v_O = 0$
- O diodo conduz enquanto  $v_s \geq v_O$ :
  - A tensão no capacitor acompanha a tensão de entrada.
  - O capacitor se carrega novamente.
  - $i_D = i_C + i_L$
  - $i_C = C \cdot \frac{dv_O}{dt}$
  - $i_L = \frac{v_O}{R}$
  - $v_O = v_I$
- Definições:
  - $V_r$  é a tensão pico a pico da ondulação.
  - $V_P$  é a amplitude da senóide de entrada.
  - $f$  é a frequência da senóide de entrada.
  - $\omega\Delta t = 2\pi f\Delta t$  é o ângulo de condução.
  - $I_L = \frac{V_P}{R}$  é a corrente de pico na carga.
- Podem-se deduzir as seguintes expressões aproximadas para o retificador de meia onda com filtro:
  - $V_r = \frac{V_P}{f \cdot C \cdot R}$
  - $\omega\Delta t = \sqrt{\frac{2 \cdot V_r}{V_P}}$
  - $i_{D,méd} = I_L \cdot \left( 1 + \pi \sqrt{\frac{2 \cdot V_P}{V_r}} \right)$
  - $i_{D,máx} = I_L \cdot \left( 1 + 2 \cdot \pi \sqrt{\frac{2 \cdot V_P}{V_r}} \right)$
- O circuito é conhecido como **retificador de pico** de meia onda.

**Exemplo 3.10** Considere um retificador de pico alimentado por uma senóide de 60Hz tendo um valor de pico  $V_P = 100V$ . Suponha uma resistência de carga  $R = 10k\Omega$ . Calcule o valor da capacitância  $C$  que resulta uma ondulação pico a pico de 2V. Calcule também a fração do ciclo durante a qual o diodo conduz, o valor médio e de pico da corrente do diodo.

- Modificações para o retificador de onda completa:

## DIODOS

---

$$\begin{aligned} \circ V_r &= \frac{V_P}{2 \cdot f \cdot C \cdot R} \\ \circ i_{D,méd} &= I_L \cdot \left( 1 + \pi \sqrt{\frac{V_P}{2 \cdot V_r}} \right) \\ \circ i_{D,máx} &= I_L \cdot \left( 1 + 2 \cdot \pi \sqrt{\frac{V_P}{2 \cdot V_r}} \right) \end{aligned}$$

- A corrente em cada diodo é praticamente a metade da que circula no diodo do retificador de meia onda.
- É necessário um capacitor com a metade do valor para o retificador de meia onda.

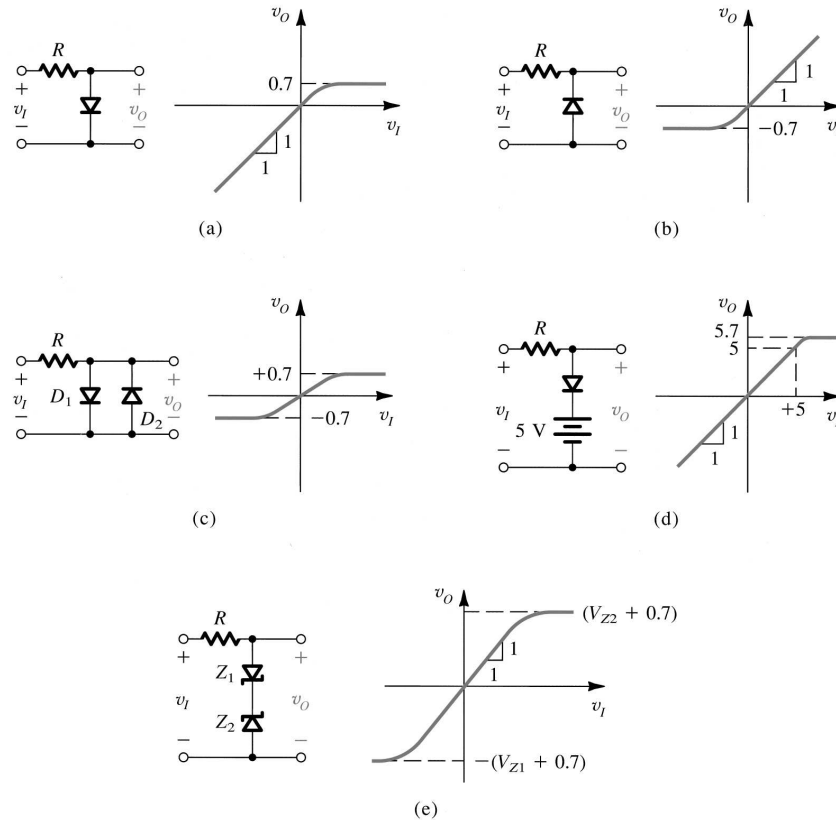
### Detectores de Pico

- Os circuitos retificadores de pico encontram aplicação nos circuitos de processamento de sinal quando é necessário detectar o pico de um sinal de entrada.
- O circuito é então denominado **detector de pico**.
- Aplicação na demodulação AM.

**Exercício 3.30** Considere um circuito retificador em ponte com um capacitor de filtro C ligado em paralelo com o resistor de carga R, para o caso em que o secundário do transformador fornece uma senóide de 12V (rms) e 60Hz de frequência, supondo  $V_{DO} = 0,8V$ , e uma resistência de carga  $R = 100\Omega$ . Calcule o valor de C que resulta uma tensão de ondulação máxima de 1V pico a pico. Qual a tensão cc na saída? Calcule a corrente na carga. Encontre o ângulo de condução do diodo. Qual a corrente média de cada diodo? Qual a tensão de pico inversa em cada diodo? Especifique o diodo em termos de sua tensão de pico e de sua PIV.

### 3.8. CIRCUITOS LIMITADORES E GRAMPEADORES

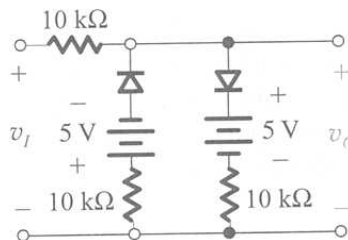
#### Circuitos Limitadores



[Figura 3.46 – página 186]

- Ilustração de limitadores simples na figura 3.46 (a) e (b) e de um limitador duplo na figura 3.46 (c).
- O nível de limiar de saturação pode ser modificado por inserção de mais diodos ou de uma bateria (figura 3.46 (d)) ou por emprego de diodos Zener (figura 3.46 (d)).

**Exercício 3.31** Supondo os diodos ideais, descreva a característica de transferência do circuito da figura abaixo.



[Figura 3.31 – página 187]

## **DIODOS**

---

### **Circuito Grampeador ou Restaurador de CC**

- A forma de saída é idêntica a de entrada, exceto que deslocada para cima por um valor de  $v_c$  volts.
- O pico da onda mais baixo fica grampeado em 0V.
- Quando um resistor de carga é conectado em paralelo com um circuito grampeador a forma de onda fica ligeiramente diferente.

### **O Dobrador de Tensão**

- Circuito formado por duas seções em cascata, um grampeador formado por C1 e D1 e um retificador formado por C2 e D2.

## **3.9. TIPOS ESPECIAIS DE DIODOS**

### **Diodo de Barreira Schottky (SBD)**

- É formado colocando-se um metal em contato com um material semiconductor tipo n moderadamente dopado. A junção comporta-se como um diodo (anodo = metal e catodo = semiconductor).
- Neste tipo de diodo, a corrente é conduzida por portadores majoritários (elétrons) e assim não exibe os efeitos de armazenamento de carga de portadores minoritários encontrados na junção pn diretamente polarizada, fazendo com que a comutação seja muito mais rápida do que em diodos pn.
- A queda de tensão direta de um diodo Schottky é menor que um diodo de junção pn (0,3 a 0,5V).
- Podem ser feitos também com arseneto de gálio (GaAs), que exibem tensão direta de 0,7V.
- São muito usados em circuitos lógicos rápidos, conhecidos como Schottky-TTL, junto com transistores bipolares.

### **Varactor**

- Junções pn polarizadas reversamente exibem um efeito de armazenamento de cargas que é modelado pela capacitância da camada de depleção  $C_j$ .
- Varactores são diodos especialmente fabricados para funcionarem como capacitores variáveis com a tensão reversa.

### **Fotodiodos**

- Se uma junção pn reversamente polarizada é iluminada, o impacto de fótons causa quebra de ligações covalentes e, portanto, há a geração de elétrons-lacunas na camada de depleção causando um aumento da corrente reversa.
- Fotodiodos são fabricados com um semiconductor composto como o arseneto de gálio.
- Sem polarização reversa, os fotodiodos funcionam como células solares.



## DIODOS

---

### Diodos Emissores de Luz

- Quando os portadores minoritários em difusão recombinam-se com os portadores majoritários, tal recombinação pode ser feita de modo a liberar energia em forma de luz.
- Um material muito usado para isso é o arseneto de gálio.
- A luz emitida é proporcional ao número de recombinações e, portanto, à corrente direta no diodo.
- Podem ter luz visível, infravermelha ou coerente (diodos laser), usados em *drivers* de CDROM.
- Combinado um LED e um fotodiodo temos um acoplador ótico, usado para transmitir sinais com isolamento elétrico.

## 3.10. EXEMPLOS DE SIMULAÇÃO

Exemplo 3.11 e exercício 3.12.

## PROBLEMAS PROPOSTOS

Diodo Ideal: 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5

Características Elétricas: 3.7 3.8 3.9 3.10 3.11

Análise: 3.19 3.20 3.21 3.22 3.23 3.25

Pequenos sinais: 3.26 3.27 3.28

Regulador Zener: 3.29 3.30

Retificadores: 3.31 3.32 3.33 3.34 3.35 3.36 3.37

Limitadores e Grampeadores: 3.38 3.39

## REFERÊNCIAS

Sedra, Adel S. e Smith, Kenneth S. Capítulo 3 – Diodos, em Microeletrônica. 4a. Edição. Makron Books Ltda, São Paulo, 1998.

Malvino, Albert Paul. Eletrônica Volume 1. McGraw-Hill, São Paulo, 1986.