



CAPITULO 3

Aula 7

Filtros para Retificadores

PSI 2223 – Introdução à Eletrônica

Programação para a Primeira Prova

Aula	Matéria	Capítulo/ página (em inglês)
1ª 02/08	Introdução, características do diodo ideal, características do diodo real.	Sedra, Cap. 3, p. 88-96 (p.139 – 153)
2ª 05-06/08	Características do diodo real, equação de corrente do diodo, exercícios, Referência ao experimento 3, Dispositivos Ativos, de Práticas I (PSI2211)	Sedra, Cap. 3 p. 88-96 (p. 139 - 153)
3ª 09/08	Análise gráfica (reta de carga), modelos simplificados de diodos, exercícios	Sedra, Cap. 3 p. 96-99 (p. -153 – 159)
4ª 12-13/08	Modelo para pequenos sinais, modelos de circuitos equivalentes para pequenas variações (próximas do ponto quiescente), exercícios (exemplos 3.6 e 3.7)	Sedra, Cap. 3 p. 100-103 (p. 159 – 166)
5ª 16/08	Operação na região de ruptura reversa, diodo zener, Projeto de um regulador Zener, exercícios (exemplo 3.8)	Sedra, Cap. 3 p. 104-106 (p. 167 – 171)
6ª 19-20/08	Diagrama de blocos de uma fonte de alimentação c.c., circuito retificador de meia onda, circuito retificador de onda completa com enrolamento secundário com tomada central. exercícios: 3.22.	Sedra, Cap. 3 p. 106-111 (p. 171 – 179)
7ª 23/08	Circuito retificador em ponte Circuito retificador de meia onda com o capacitor de filtro. Retificador de onda completa com capacitor de filtro, superdiodo. Exercícios (exemplo 3.9).	Sedra, Cap. 3 p. 112-116 (p. 179 – 187)
8ª 26-27/08	Circuitos limitadores, circuitos grampeadores, dobrador de tensão, exercícios: 3.27, 3.28.	Sedra, Cap. 3 p. 116-117 (p. 187 – 190)
9ª 30/08	Aula de exercícios ou Aula Prática Preparação para a prova P1	
Semana da Pátria (02/09 – 06/09)		
1ª Semana de provas (09/09 – 13/09)		
1ª Prova (5ª feira, 10h00, 12/09)		

7ª Aula:

O Retificador de Onda Completa

- Finalizar a matéria e exercícios.

Ao final desta aula você deverá estar apto a:

- Explicar o funcionamento do filtro capacitivo para circuitos reguladores
- Determinar os valores de pico da tensão de saída (na carga) e da corrente reversa nos diodos em retificadores meia onda e onda completa
- Explicar o funcionamento de circuitos limitadores e grampeadores
- Determinar a forma de onda de saída em circuitos limitadores

Diagrama de Blocos de Circuitos Retificadores

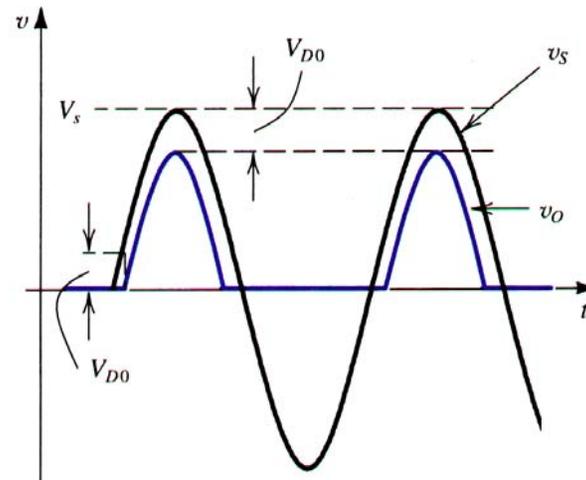
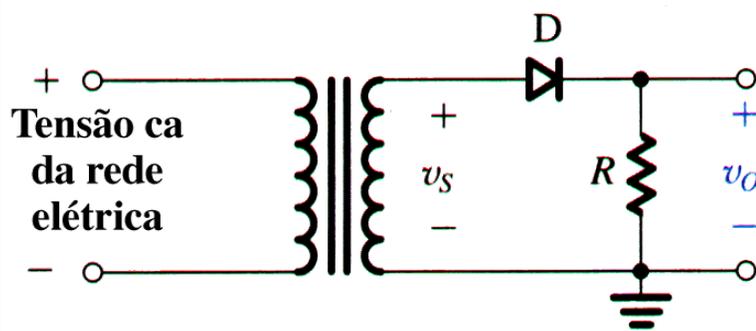
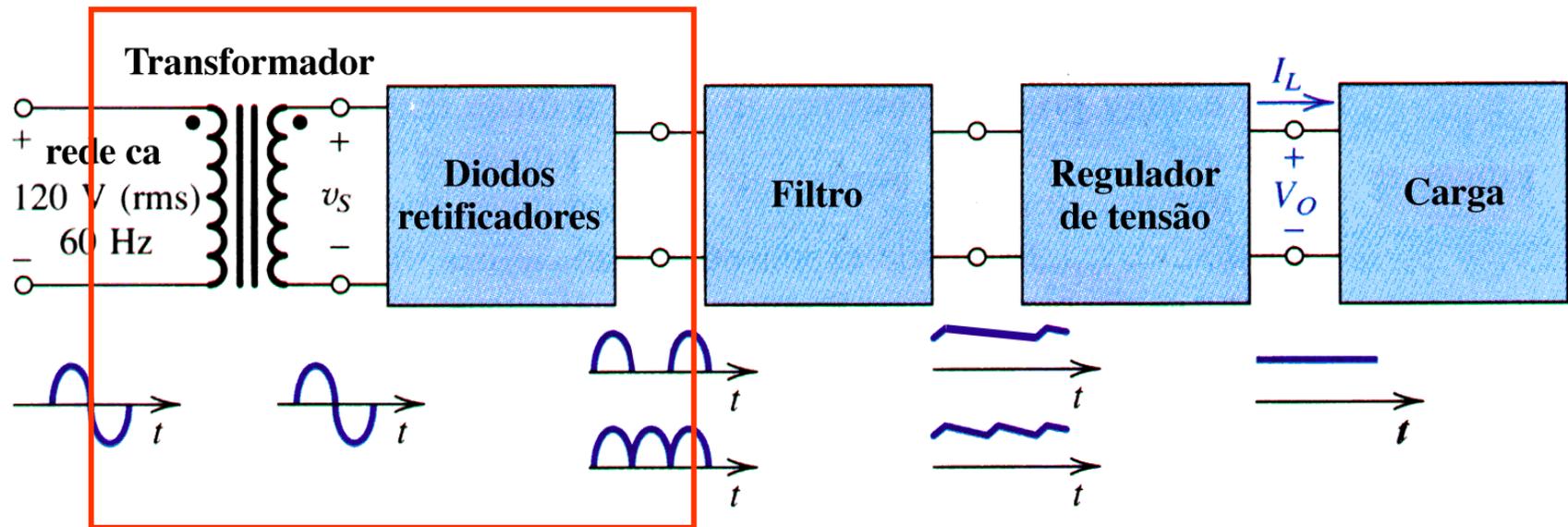


Diagrama de Blocos de Circuitos Retificadores

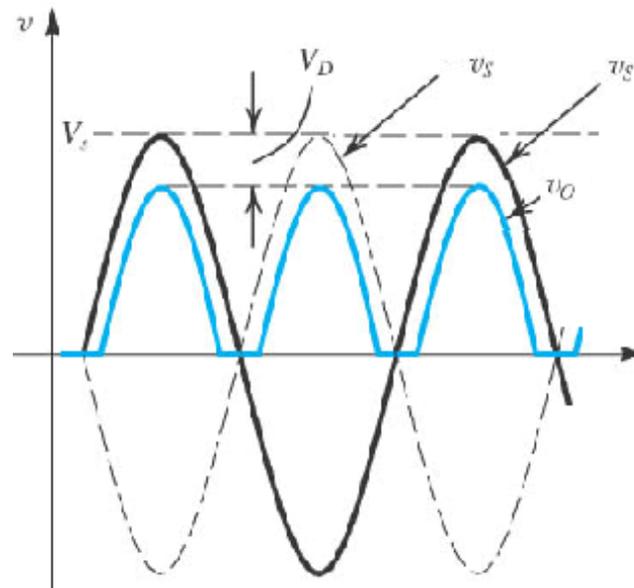
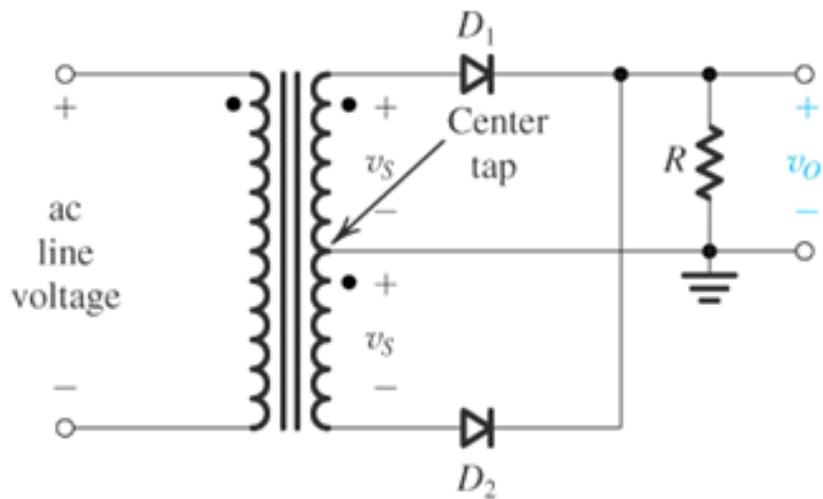
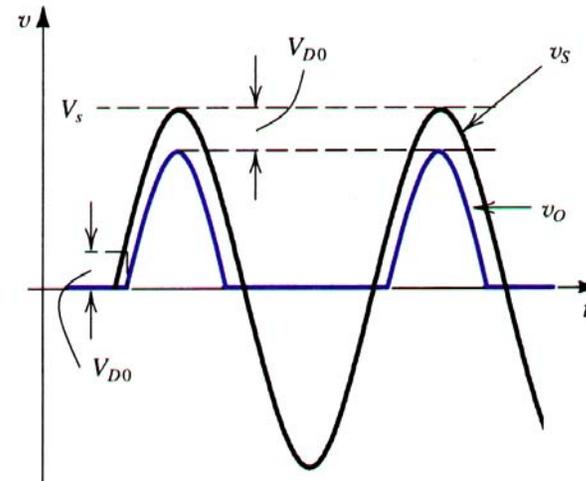
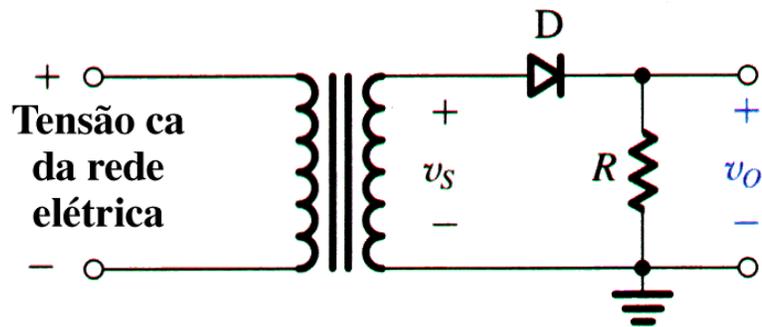


Diagrama de Blocos de Circuitos Retificadores

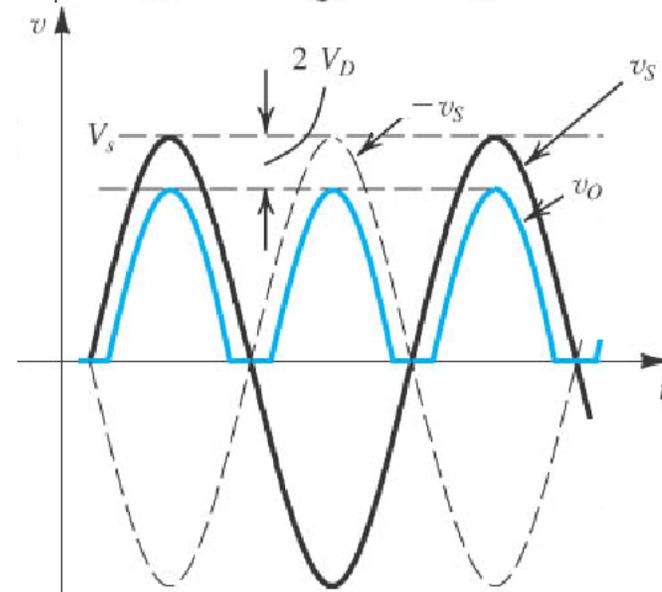
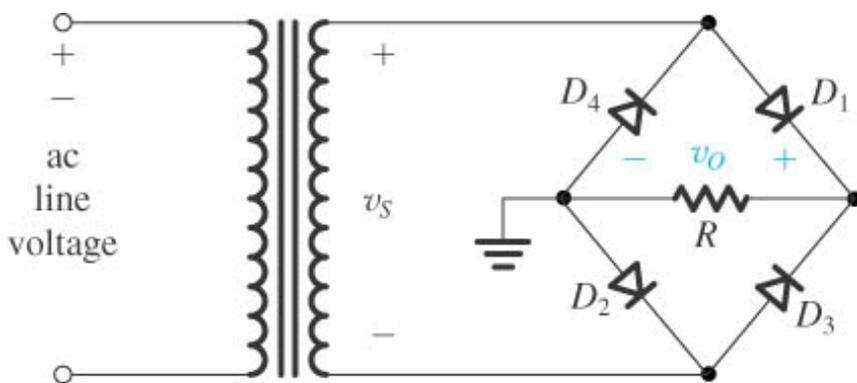
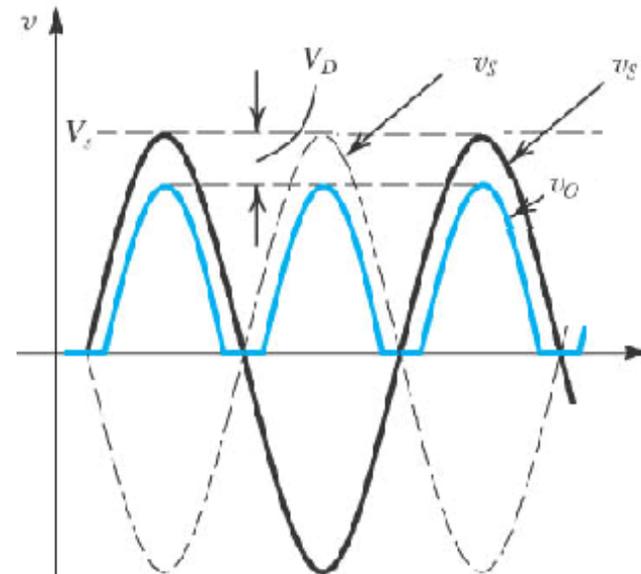
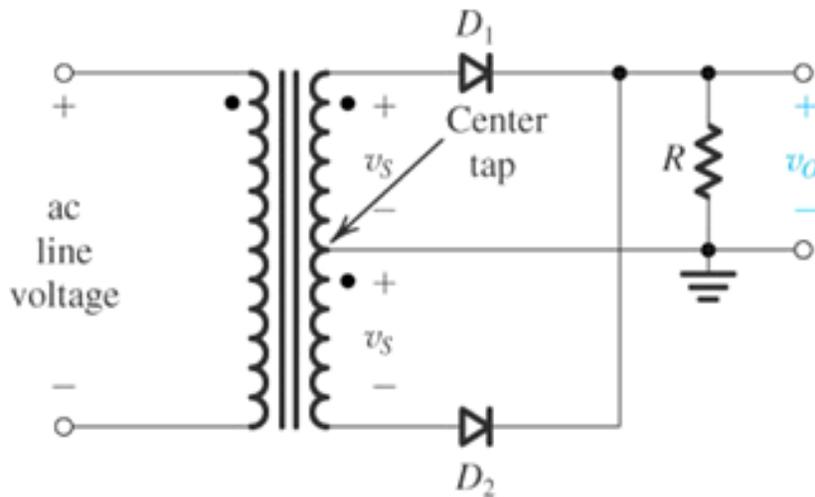
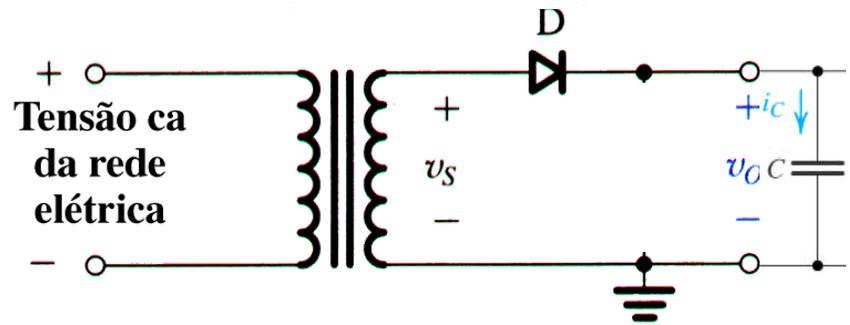
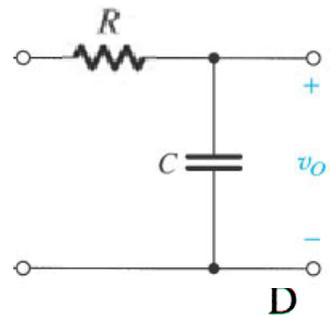
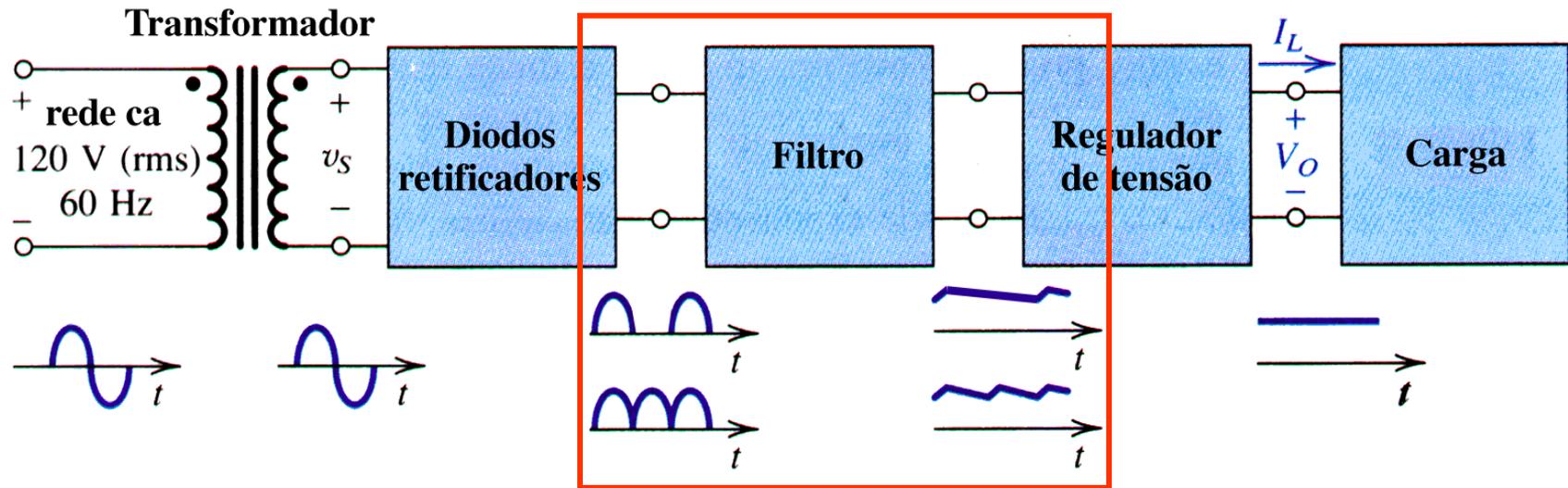
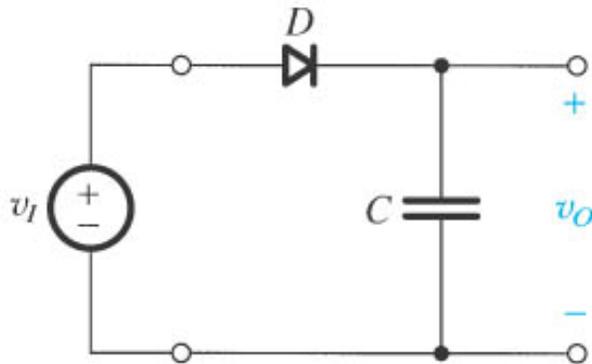


Diagrama de Blocos de Circuitos Retificadores

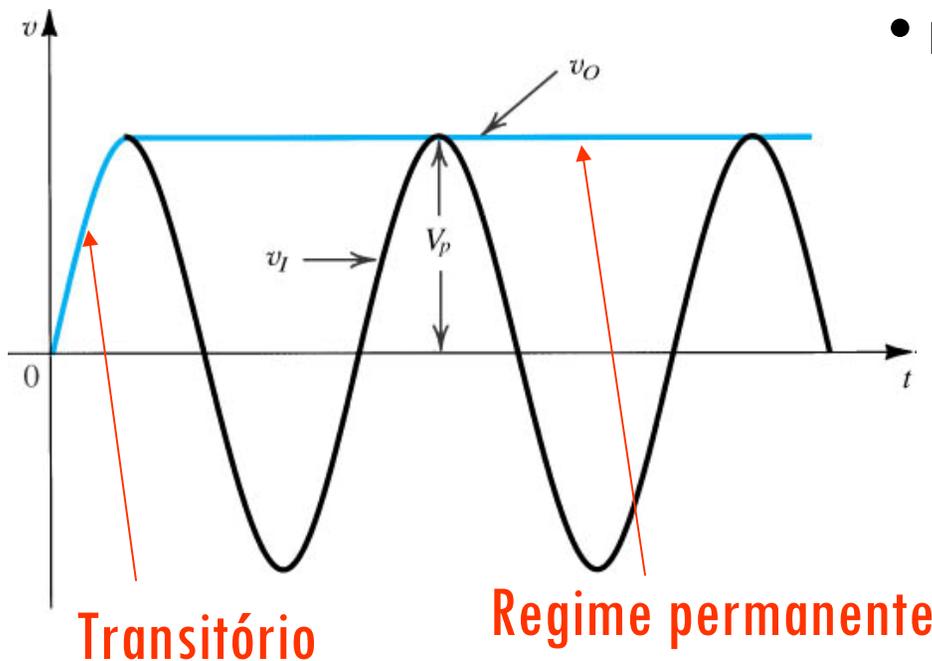


O Retificador com Bloco de Filtro

(Retificador Meia Onda com Filtro com Capacitor — Retificador de Pico)



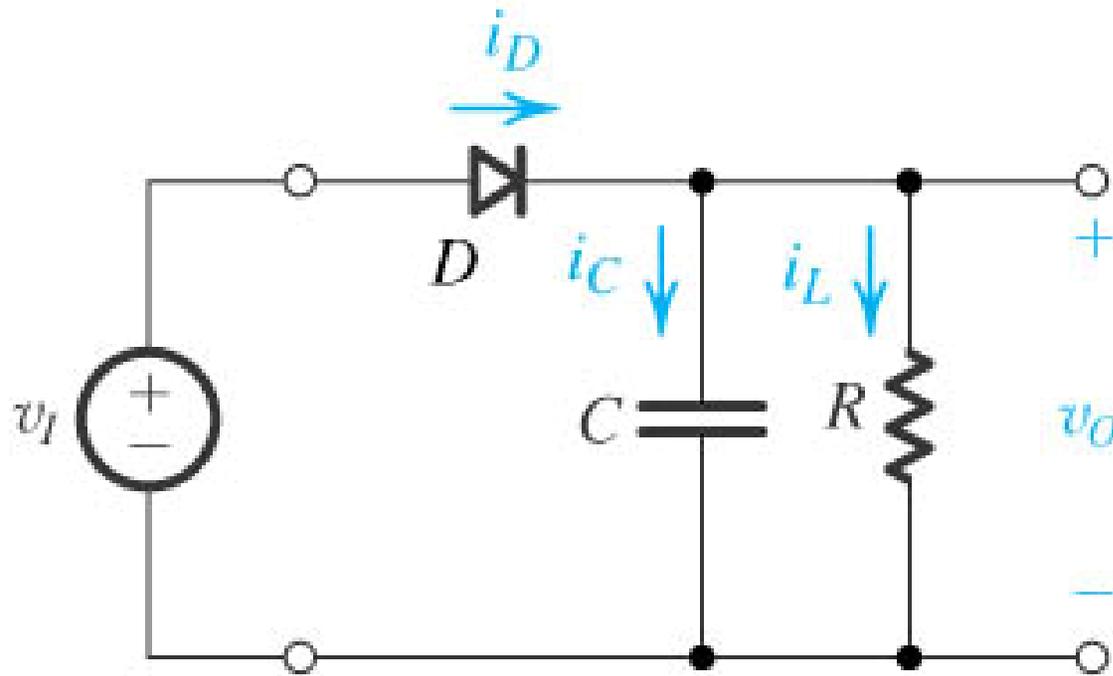
- Sinal (comportamento) variável no tempo
- Que modelo utilizar para o diodo?
 - pequenos sinais?
 - qual modelo CC?
 - modelo DIODO IDEAL inicial//



O Retificador com Bloco de Filtro

(Retificador Meia Onda com Filtro com Capacitor — Retificador de Pico)

E com carga?



Atenção:

$$i_D = i_C + i_L$$

$$v_O = \frac{1}{C} \int_0^T i_C dt$$

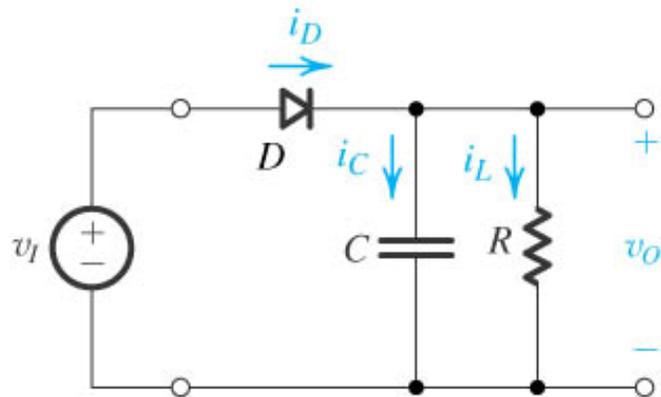
$$v_O = R_L i_L$$

Quando o diodo conduz: $v_O(t) = v_I(t)$

O Retificador com Bloco de Filtro

(Retificador Meia Onda com Filtro com Capacitor – Retificador de Pico)

Quando o diodo conduz: $v_o(t) = v_i(t)$



$$i_D = i_C + i_L$$

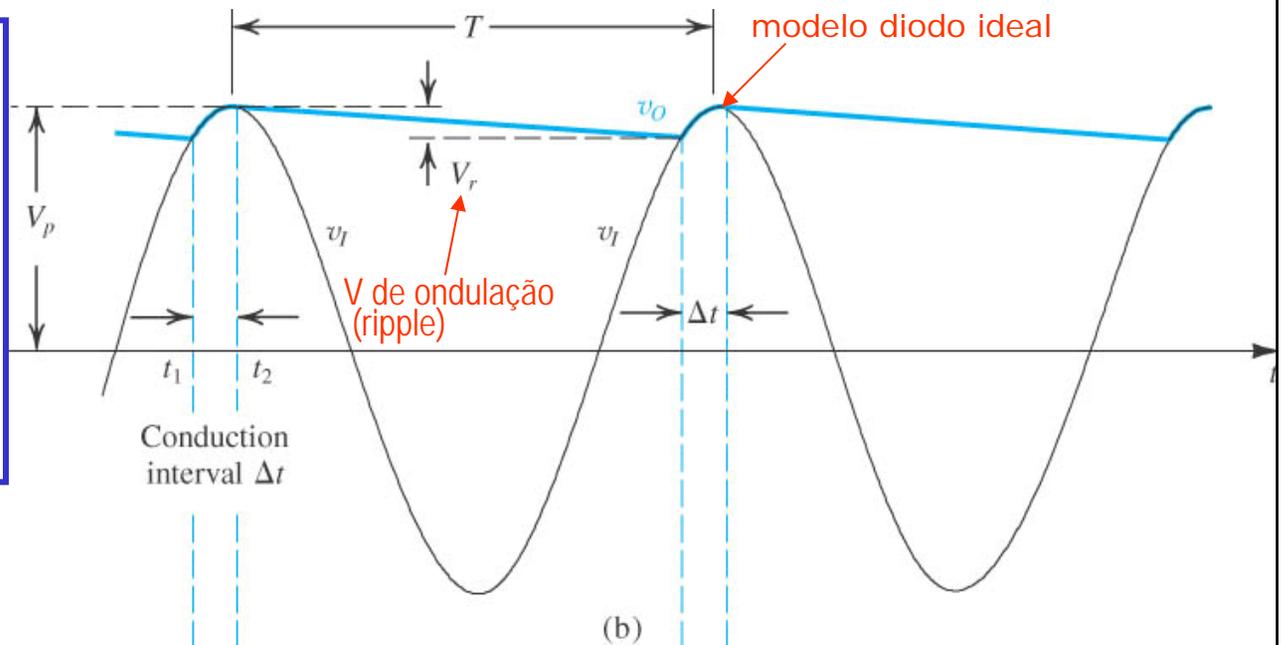
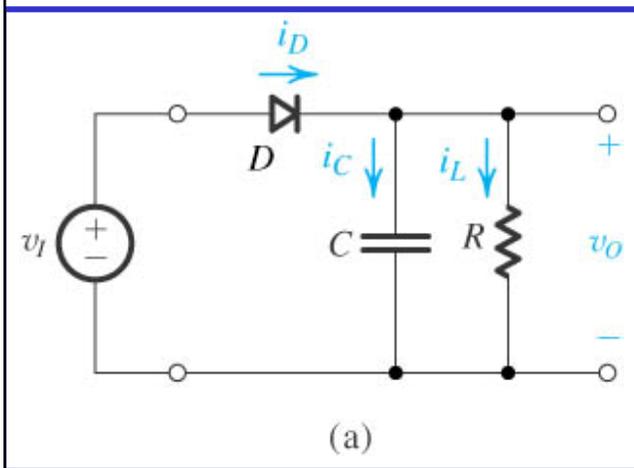
$$v_O = v_I = \frac{1}{C} \int_0^T i_C dt \Rightarrow i_C = C \frac{dv_I}{dt}$$

$$i_D = C \frac{dv_I}{dt} + i_L$$

$$v_O = R_L i_L \Rightarrow i_L = \frac{v_O}{R_L}$$

O Retificador com Bloco de Filtro

(Retificador Meia Onda com Filtro com Capacitor – Retificador de Pico)

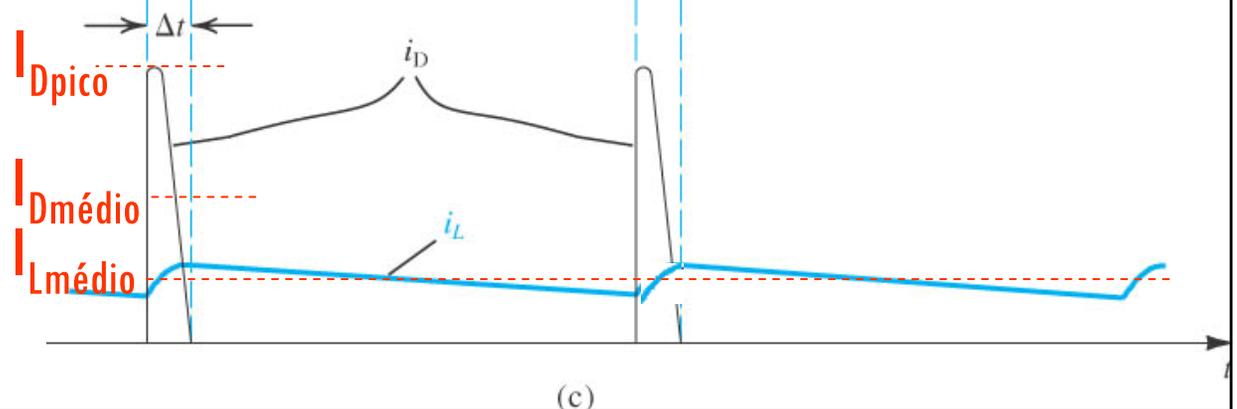


$$i_L = v_O / R_L$$

Quando D está conduzindo:

$$i_D = i_C + i_L$$

$$i_D = C \frac{dv_I}{dt} + i_L$$



Determinando V_o (valor médio) e V_r

$$V_{O(médio)} = V_p - \frac{1}{2} V_r$$

Quando $CR \gg T$ (V_r pequeno):

$$i_{L(médio)} = \frac{V_p}{R}$$

Para $CR \gg T$:

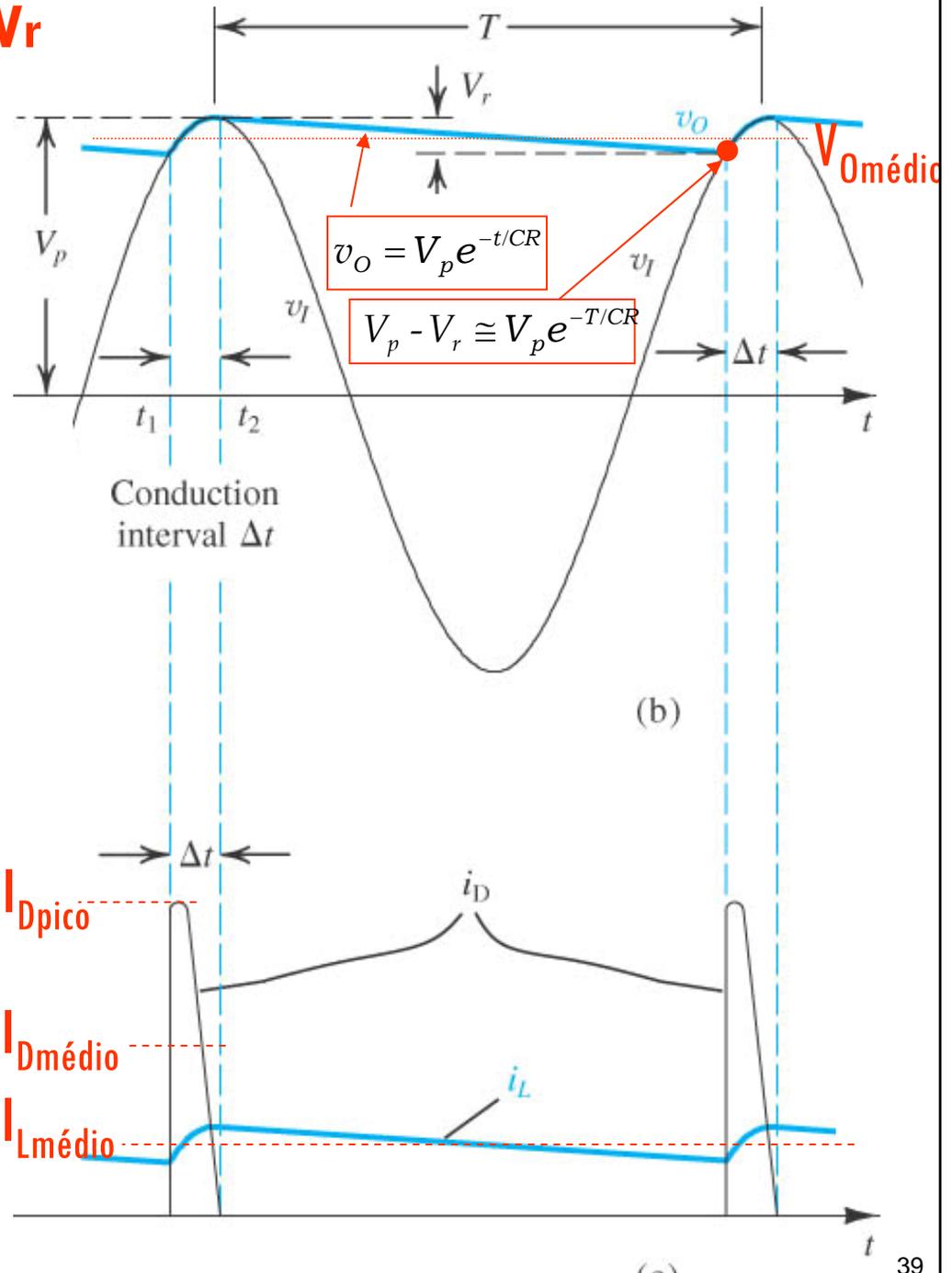
$$e^{-T/CR} \cong 1 - T/CR$$

$$V_p - V_r \cong V_p(1 - T/CR)$$

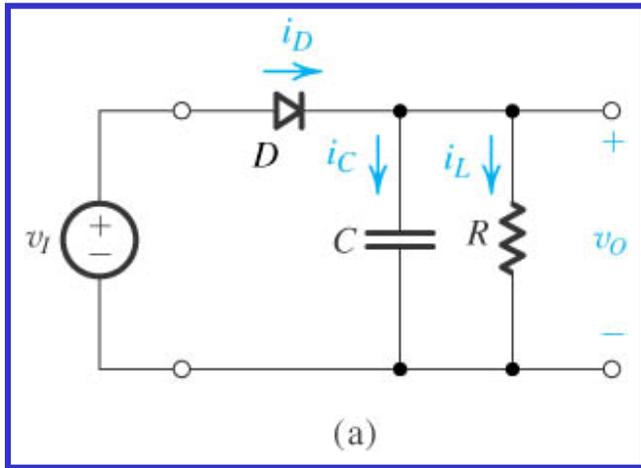
e portanto:

$$V_r \cong V_p \frac{T}{CR} = \frac{V_p}{fRC}$$

$$\text{ou } V_r = \frac{I_L}{fC}$$



Determinando $I_{D\text{médio}}$



$$Q_{\text{fornecido pela fonte}} = Q_{\text{entregue à carga}}$$

$$Q_f = I_{C\text{medio}} \times \Delta t$$

$$i_{C\text{medio}} = I_{D\text{medio}} - I_L$$

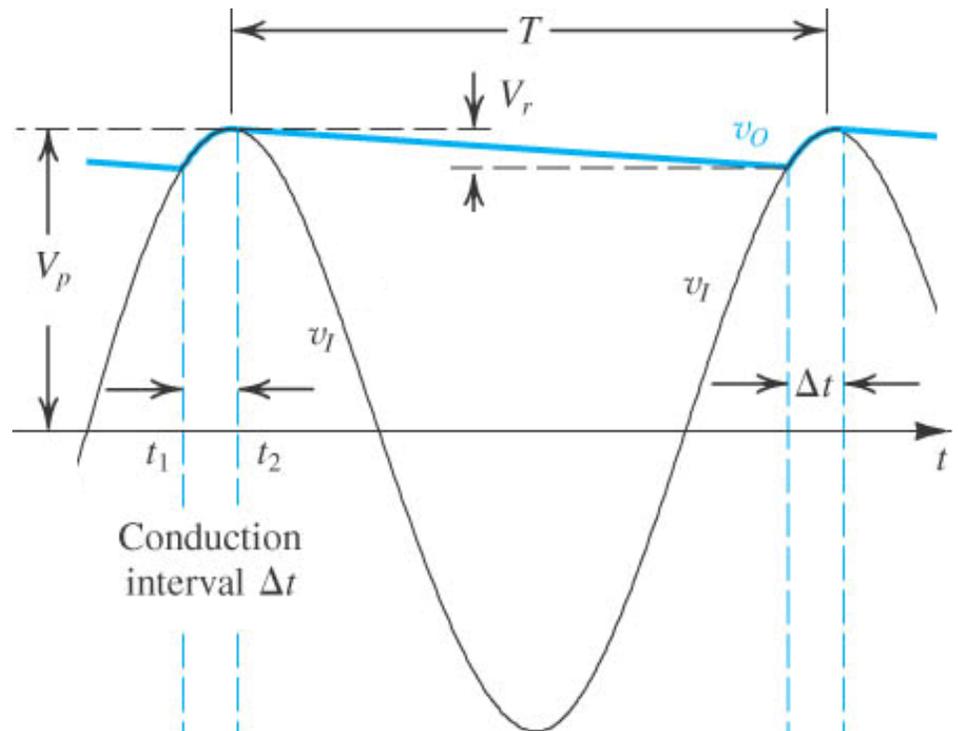
$$Q_f = (I_{D\text{medio}} - I_L) \times \Delta t$$

$$Q_e = C \times \Delta V_C = CV_r$$

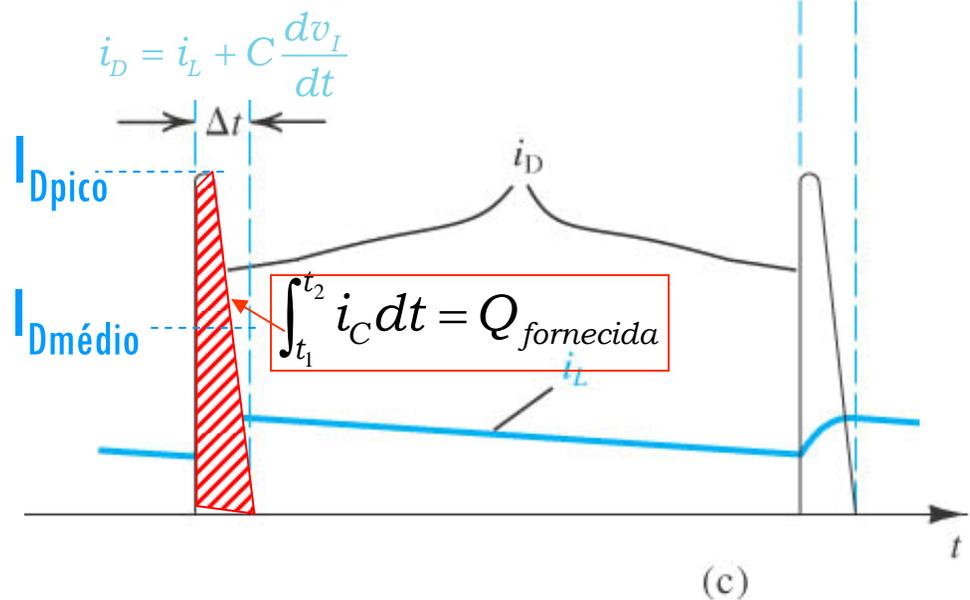
\therefore

$$(I_{D\text{medio}} - I_L) \times \Delta t = CV_r$$

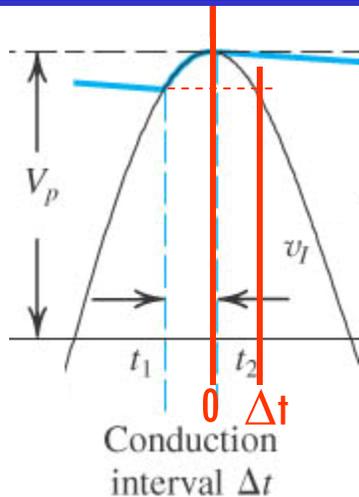
$$I_{D\text{medio}} = I_L + \frac{CV_r}{\Delta t} = I_L \left(1 + \frac{1}{f \times \Delta t} \right)$$



e portanto: (b)



Determinando $I_{Dmédio}$



$$I_{Dmédio} = I_L \left(1 + \frac{1}{f \times \Delta t} \right)$$

$$V_p \cos(\omega \Delta t) = V_p - V_r$$

Como $\omega \Delta t$ é um pequeno ângulo :

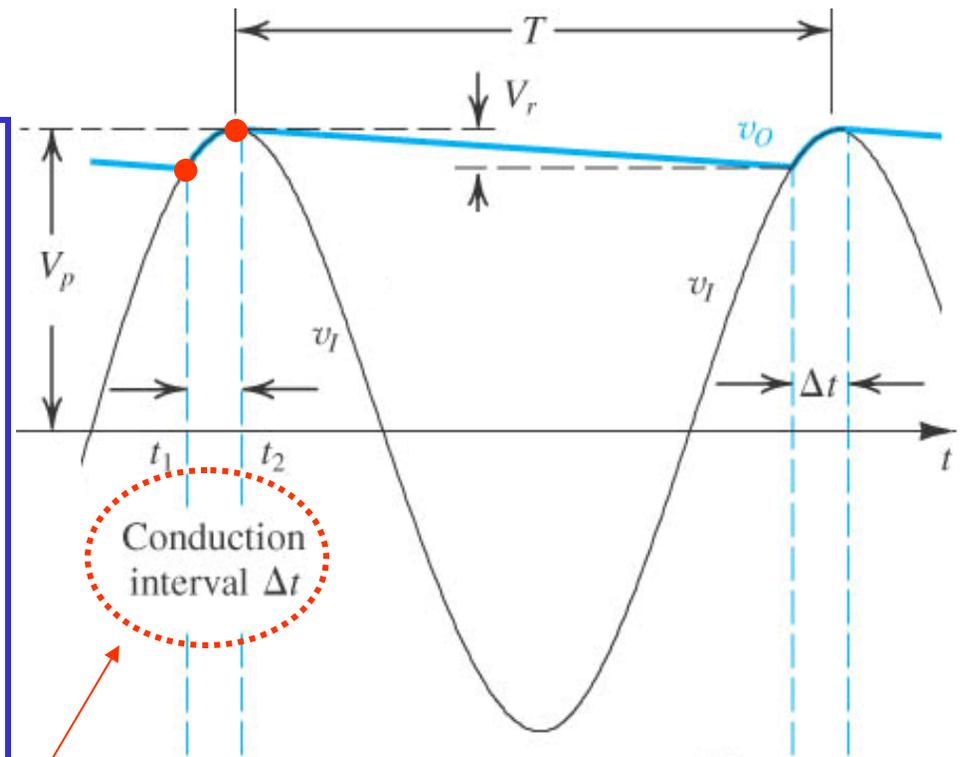
$$\cos(\omega \Delta t) \cong 1 - \frac{1}{2} (\omega \Delta t)^2$$

e portanto :

$$V_p \left[1 - \frac{1}{2} (\omega \Delta t)^2 \right] = V_p - V_r$$

ou

$$\omega \Delta t \cong \sqrt{2V_r / V_p} \text{ ou } \Delta t \cong \frac{\sqrt{2V_r / V_p}}{2\pi f}$$



$$I_{Dmédio} = I_L \left(1 + \frac{1}{f \times \Delta t} \right) = I_L \left(1 + \frac{1}{f \times \frac{\sqrt{2V_r / V_p}}{2\pi f}} \right)$$

$$I_{Dmédio} = I_L \left(1 + \frac{2\pi}{\sqrt{2} \sqrt{V_r / V_p}} \right)$$

$$= I_L \left(1 + \frac{\pi \sqrt{2}}{\sqrt{V_r / V_p}} \right)$$

$$\bar{I}_{Dmédio} = I_L \left(1 + \pi \sqrt{2V_p / V_r} \right)$$

(Retificador Meia Onda com Filtro com Capacitor)

Determinando I_{Dpico}

$$i_D(t) = C \frac{dv_I(t)}{dt} + i_L(t) \quad (\text{enquanto } D \text{ conduzir})$$

$$i_D(t = t_1) = i_{Dpico} = C \frac{dv_I(t_1)}{dt} + i_L(t_1)$$

$$i_{Dpico} = C \frac{dv_I(t_1)}{dt} + (\sim) i_{Lm\u00e9dio} = C \frac{dV_p \cos(\omega t)}{dt} \Big|_{t=t_1} + i_{Lm\u00e9dio}$$

$\omega \Delta t$ pequeno:

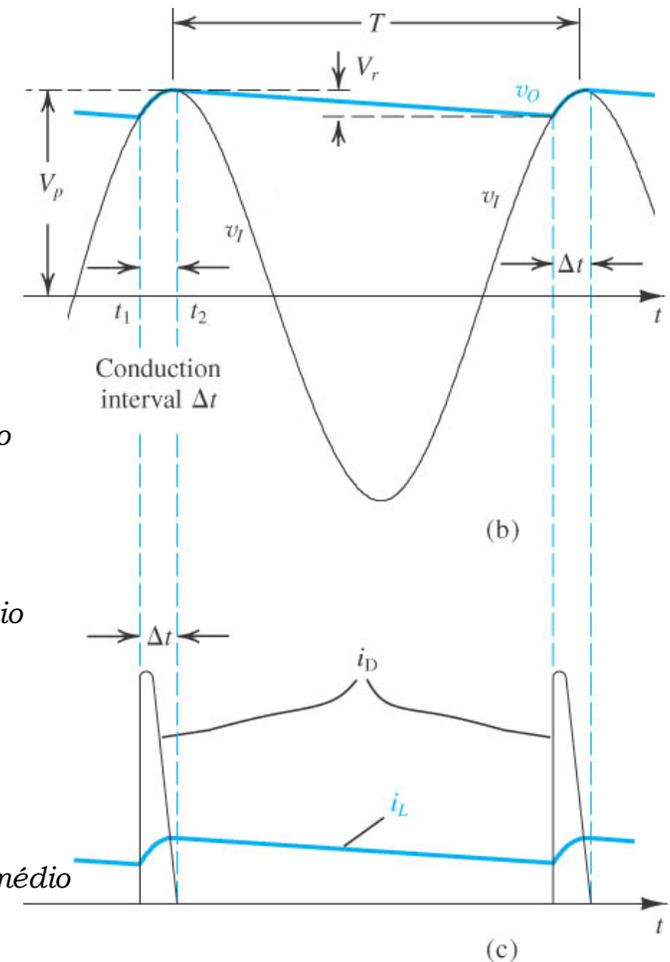
$$\cos(\omega \Delta t) \cong 1 - \frac{1}{2}(\omega \Delta t)^2 \quad i_{Dpico} = CV_p \frac{d[1 - \frac{1}{2}(\omega t)^2]}{dt} \Big|_{t=t_1} + i_{Lm\u00e9dio}$$

$$\frac{d[1 - \frac{1}{2}(\omega t)^2]}{dt} \Big|_{t=t_1} = -\omega^2 t_1 = -\omega^2(-\Delta t) = \omega^2 \Delta t$$

$$i_{Dpico} = CV_p (\omega^2 \Delta t) + i_{Lm\u00e9dio} = \left(\frac{i_{Lm\u00e9dio}}{fV_r} \right) \left(\omega^2 \frac{\sqrt{2V_r / V_p}}{\omega} \right) + i_{Lm\u00e9dio}$$

$$i_{Dpico} = i_{Lm\u00e9dio} \frac{V_p}{V_r} \frac{\omega^2}{f\omega} \sqrt{2V_r / V_p} + i_{Lm\u00e9dio}$$

$$i_{Dpico} = i_{Lm\u00e9dio} \left(1 + \frac{\omega^2}{f\omega} \sqrt{2 \frac{V_p^2}{V_r^2} V_r / V_p} \right) \Rightarrow i_{Dpico} = i_{Lm\u00e9dio} \left(1 + 2\pi \sqrt{2V_p / V_r} \right)$$



(Retificador Meia Onda com Filtro com Capacitor)

Resumindo

$$V_{O(m\u00e9dio)} = V_p - \frac{1}{2} V_r$$

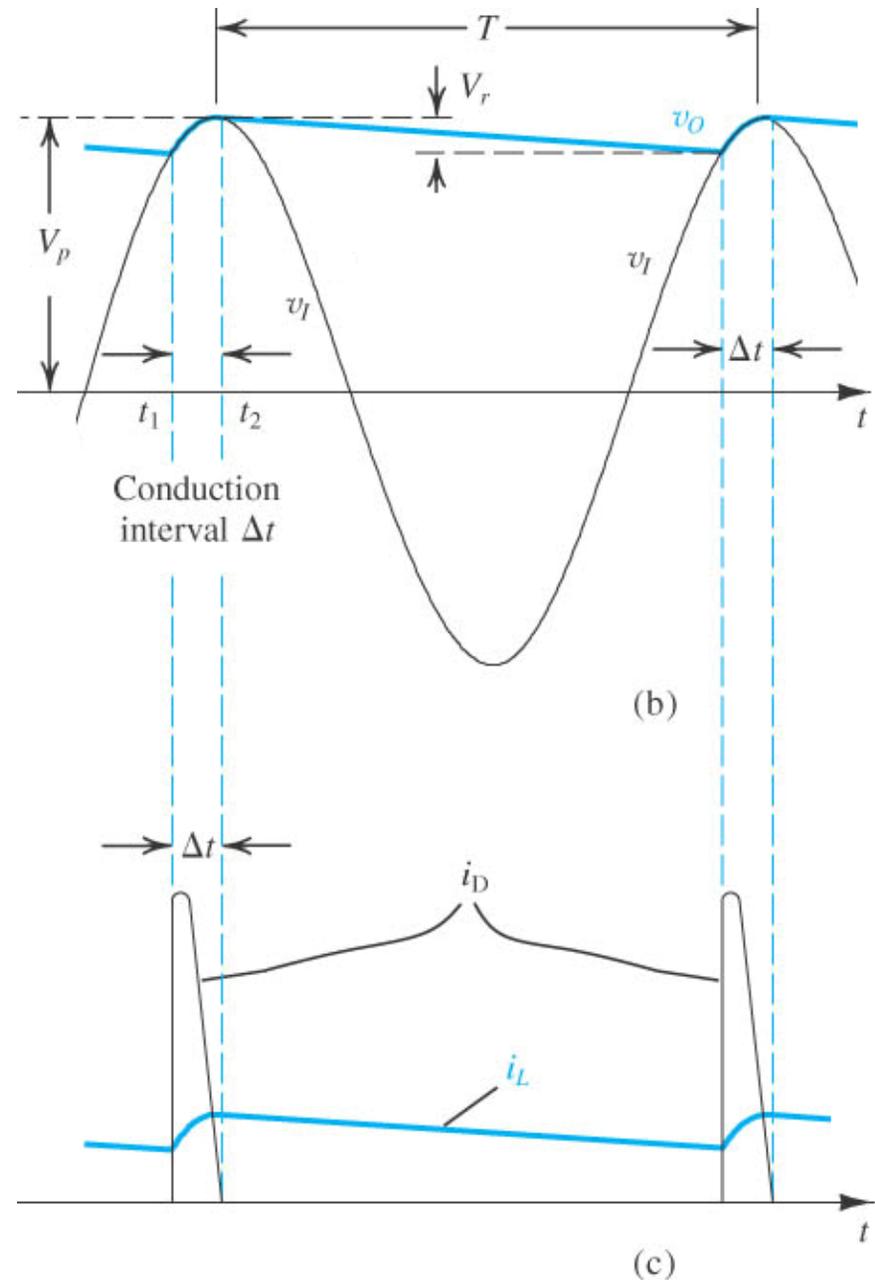
$$i_{L(m\u00e9dio)} = I_L = \frac{V_p}{R}$$

$$V_r = \frac{I_L}{fC}$$

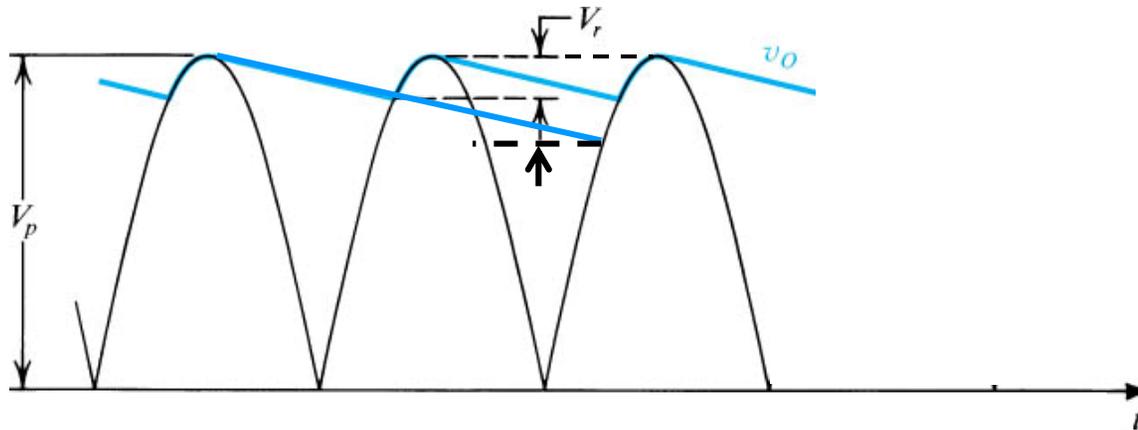
$$\Delta t \cong \frac{\sqrt{2V_r / V_p}}{2\pi f}$$

$$I_{Dm\u00e9dio} = I_L (1 + \pi \sqrt{2V_p / V_r})$$

$$i_{Dpico} = i_{Lm\u00e9dio} (1 + 2\pi \sqrt{2V_p / V_r})$$



(No Retificador **Onda Completa** com Filtro com Capacitor)



~~meia onda~~ **onda completa**

$$V_r \cong \frac{V_p}{2fRC}$$

$$i_{D\text{medio}} = I_L (1 + \pi \sqrt{2V_p / 2V_r}) = I_L (1 + \pi \sqrt{V_p / 2V_r})$$

$$i_{D\text{pico}} = I_L (1 + 2\pi \sqrt{2V_p / V_r})$$

EXEMPLO 3.10 Considere um retificador de pico alimentado por uma senóide de 60 Hz tendo um valor de pico de $V_p = 100$ V. Suponha uma resistência de carga $R = 10$ k Ω . Calcule o valor da capacitância C que resultará numa ondulação de pico-a-pico de 2 V. Calcule também a fração do ciclo durante a qual o diodo conduz, além do valor médio e de pico da corrente no diodo.

Formulário (1/2 onda)

$$V_{O(\text{médio})} = V_p - \frac{1}{2} V_r$$

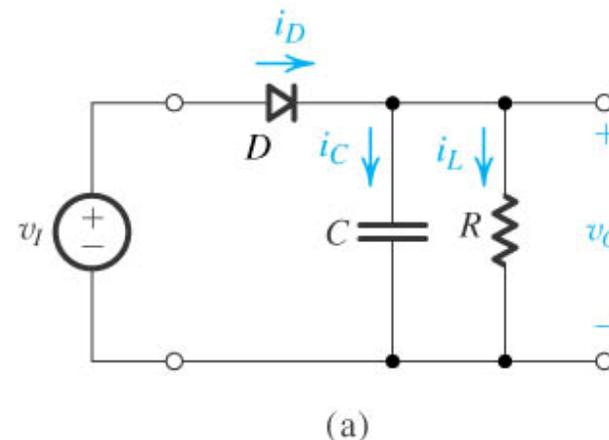
$$i_{L(\text{médio})} = I_L = \frac{V_p}{R}$$

$$V_r = \frac{I_L}{fC}$$

$$\Delta t \cong \frac{\sqrt{2V_r / V_p}}{2\pi f}$$

$$I_{D\text{médio}} = I_L (1 + \pi \sqrt{2V_p / V_r})$$

$$i_{D\text{pico}} = i_{L\text{médio}} (1 + 2\pi \sqrt{2V_p / V_r})$$



EXEMPLO 3.10 Considere um retificador de pico alimentado por uma senóide de 60 Hz tendo um valor de pico de $V_p = 100$ V. Suponha uma resistência de carga $R = 10$ k Ω . Calcule o valor da capacitância C que resultará numa ondulação de pico-a-pico de 2 V. Calcule também a fração do ciclo durante a qual o diodo conduz, além do valor médio e de pico da corrente no diodo.

SOLUÇÃO

Obtemos o valor de C como

$$C = \frac{V_p}{V_r f R} = \frac{100}{2 \times 60 \times 10 \times 10^3} = 83,3 \mu\text{F}$$

O ângulo de condução $\omega\Delta t$ é $\omega \Delta t = \sqrt{2 \times 2/100} = 0,2$ rad

Logo, o diodo conduz por $(0,2/2\pi) \times 100 = 3,18\%$ do ciclo.

Como $I_L = 100/10 = 10$ mA, as correntes média e de pico no diodo são:

$$i_{D\text{med}} = 10(1 + \pi\sqrt{2 \times 100/2}) = 324 \text{ mA}$$

$$i_{D\text{max}} = 10(1 + 2\pi\sqrt{2 \times 100/2}) = 638 \text{ mA}$$

Formulário (1/2 onda)

$$V_{O(\text{médio})} = V_p - \frac{1}{2} V_r$$

$$i_{L(\text{médio})} = I_L = \frac{V_p}{R}$$

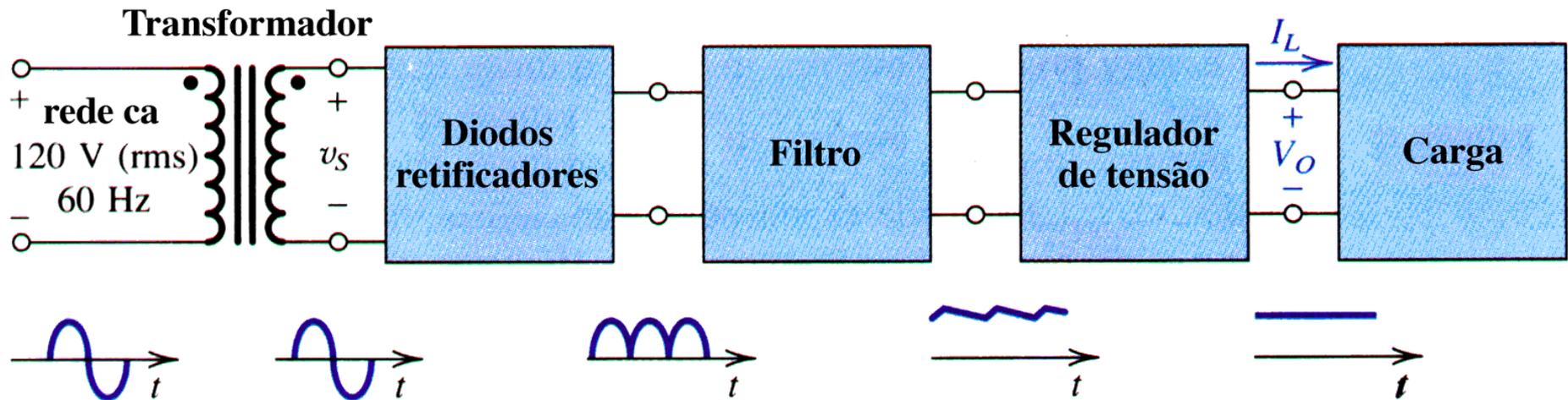
$$V_r = \frac{I_L}{fC}$$

$$\Delta t \cong \frac{\sqrt{2V_r / V_p}}{2\pi f}$$

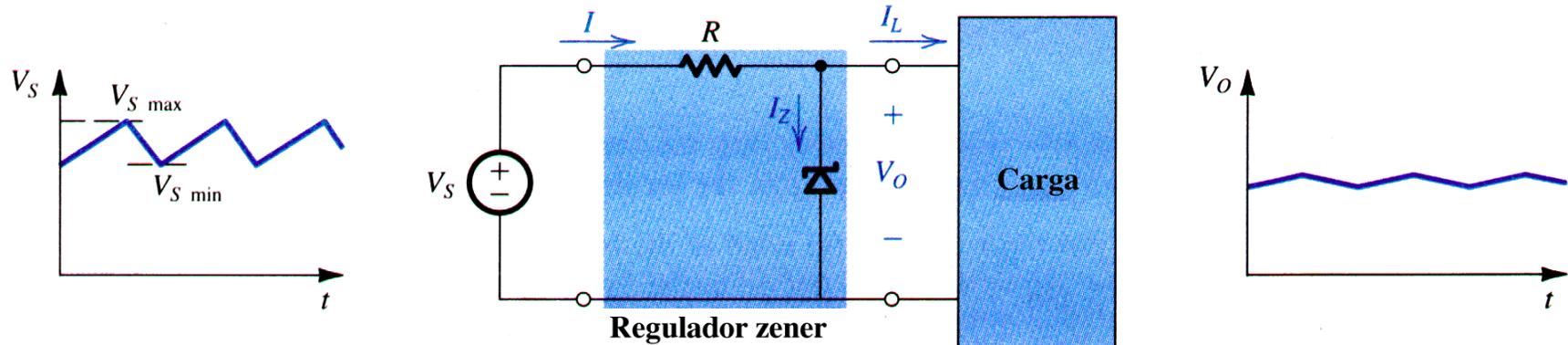
$$I_{D\text{medio}} = I_L(1 + \pi\sqrt{2V_p / V_r})$$

$$i_{D\text{pico}} = i_{L\text{médio}}(1 + 2\pi\sqrt{2V_p / V_r})$$

Diagrama de Blocos de Circuitos Retificadores



Desempenho de um Regulador com Zener



$$\text{Regulação de Linha} \equiv \frac{\Delta V_O}{\Delta V_S} \quad (\text{p.ex.} = 1\text{V})$$

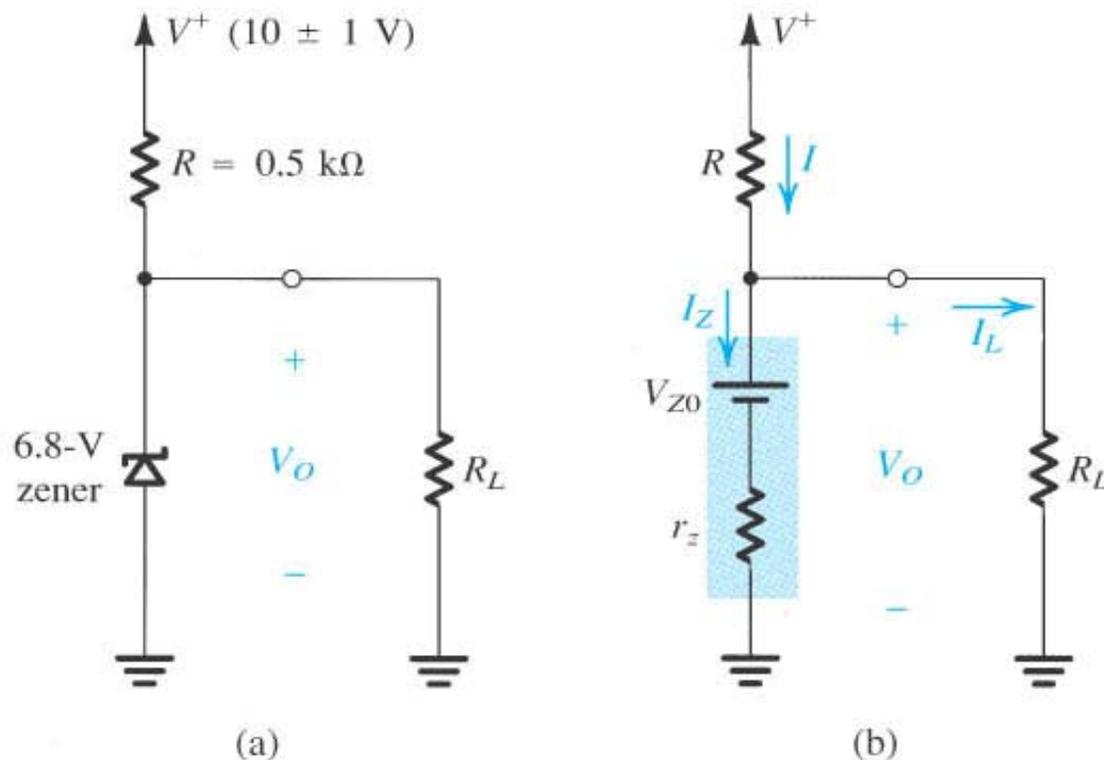
(máxima corrente pior carga)

$$\text{Regulação de Carga} \equiv \frac{\Delta V_O}{\Delta I_L} \quad (\text{p.ex.} = 1\text{mA})$$

(V_S médio)

Exemplo 3.8: O diodo zener do circuito abaixo é especificado para $6,8V@5mA$, $r_z = 20\Omega$ e $I_{zk} = 0,2mA$. Veja que V^+ tem uma variação.

- (a) Determine a tensão de saída sem carga;
- (b) Determine a regulação de linha para a variação de $\pm 1V$ na entrada;
- (c) Qual a variação na tensão de saída quando se coloca uma carga que drena $1mA$? Isso é chamado Regulação de Carga.
- (d) Qual a variação na tensão de saída para uma carga de $2k\Omega$;
- (e) Qual a variação na tensão de saída para uma carga de $0,5k\Omega$;
- (f) Qual o valor mínimo de carga para o circuito operar corretamente?

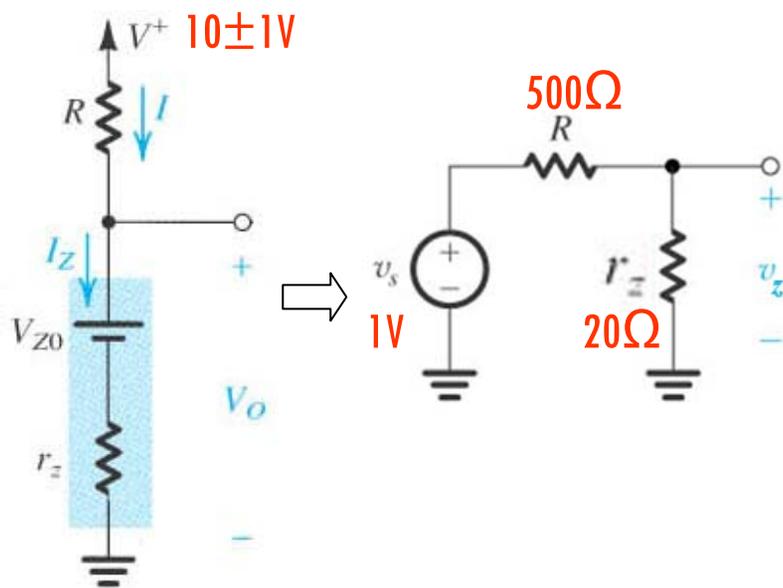


Exemplo 3.8: O diodo zener do circuito abaixo é especificado para $6,8V@5mA$, $r_z = 20\Omega$ e $I_{zk} = 0,2mA$. Veja que V^+ tem uma variação.

(b) Variação em V_o para uma variação de $\pm 1V$ na entrada;

$$\text{Regulação de Linha} \equiv \frac{\Delta V_o}{\Delta V_s} \quad (\text{p.ex.} = 1V)$$

(máxima corrente pior carga)



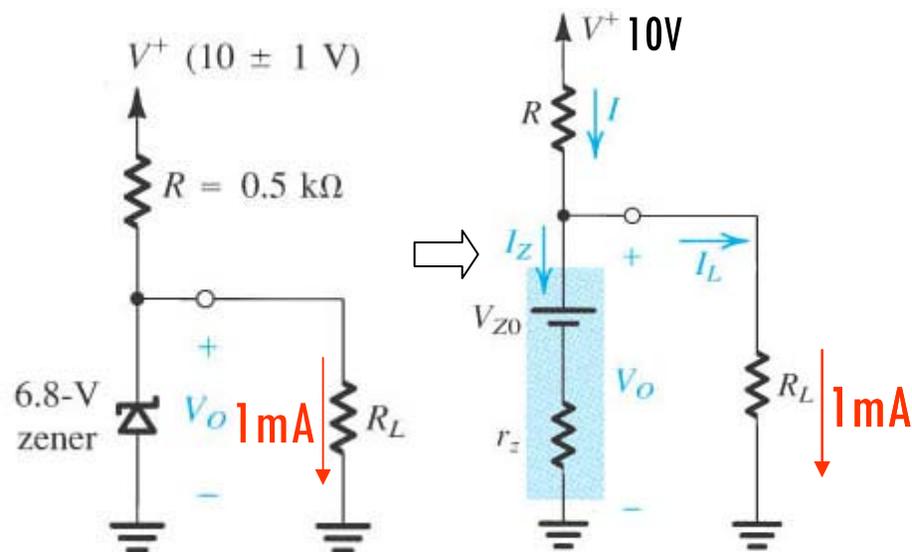
$$v_z = 1V \frac{20}{500 + 20} = 38,5mV$$

$$\frac{\Delta V_o}{\Delta V_s} = \frac{\pm 38,5mV}{\pm 1V} = 3,8\%$$

Exemplo 3.8: O diodo zener do circuito abaixo é especificado para $6,8V@5mA$, $r_z = 20\Omega$ e $I_{zk} = 0,2mA$. Veja que V^+ tem uma variação.

(c) Qual a variação na tensão de saída quando se coloca uma carga que drena $1mA$?

$$\text{Regulação de Carga} \equiv \frac{\Delta V_O}{\Delta I_L} \quad (\text{Vs médio}) \quad (\text{p.ex.} = 1mA)$$



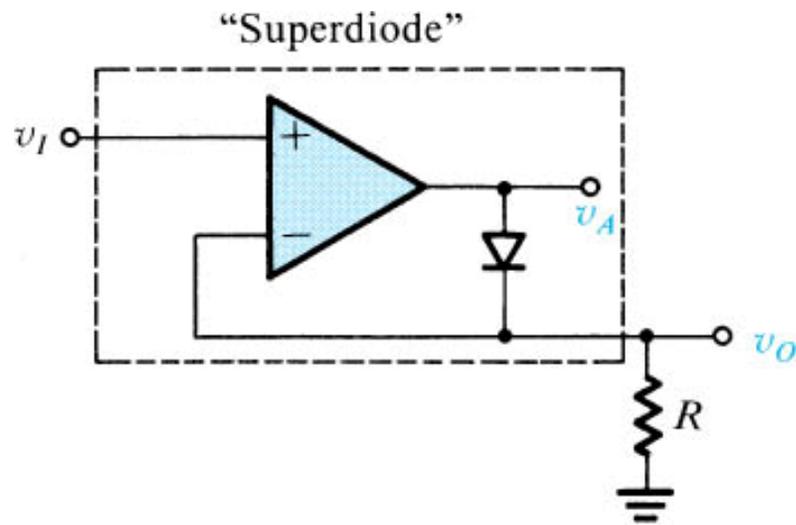
$$I_Z = I_R - I_L = (6,3 - 1,0)mA = 5,3mA$$

$$V_{Zc/carga} = 6,7 + 20 \cdot 5,3m = 6,806V$$

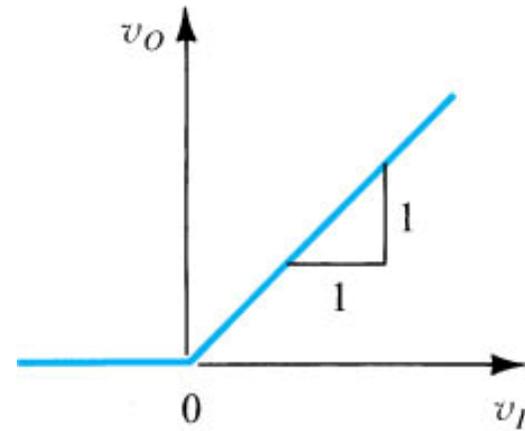
$$\Delta V_Z = V_{Zc/carga} - V_{Zs/carga} = 6,806 - 6,827$$

$$\Delta V_Z = \Delta V_O = -21mV$$

$$\frac{\Delta V_O}{\Delta I_L} = \frac{-21mV}{1mA}$$



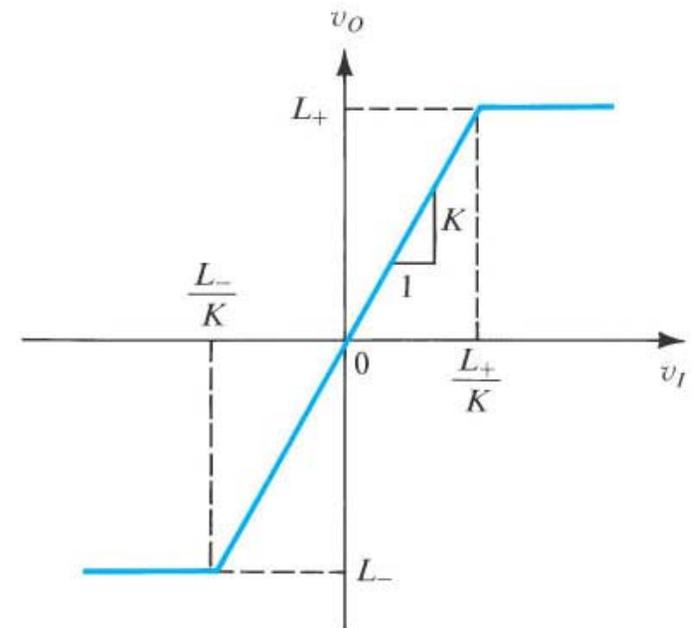
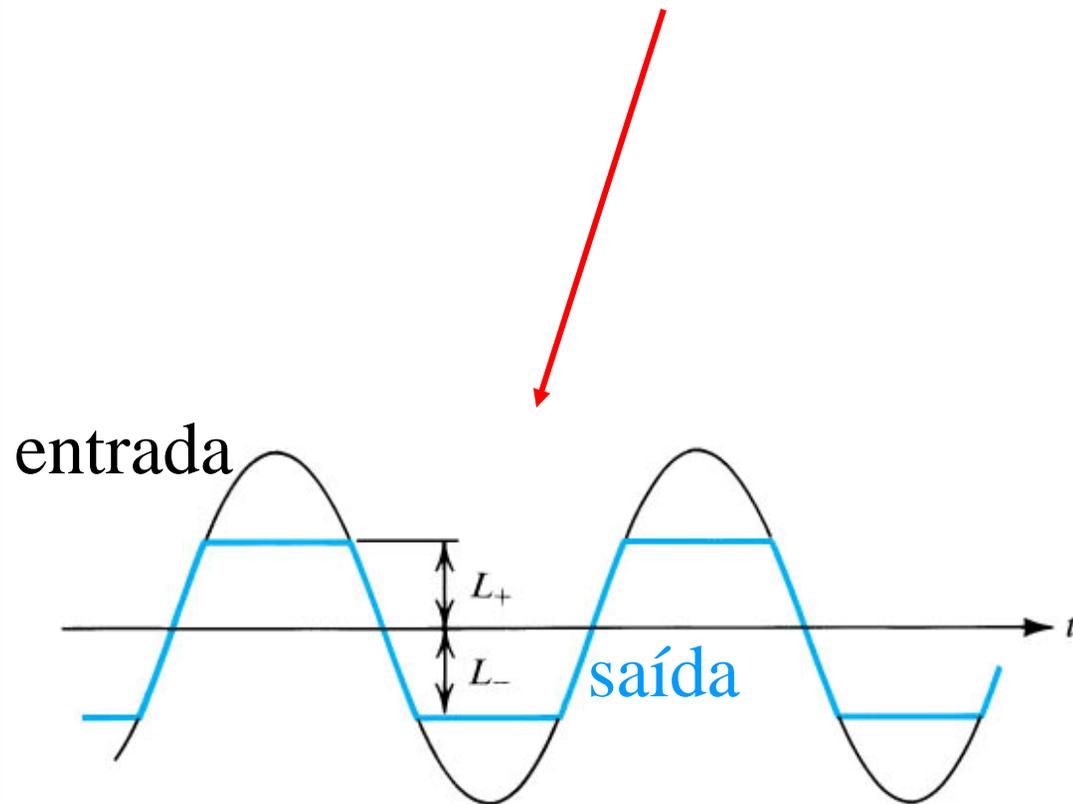
(a)

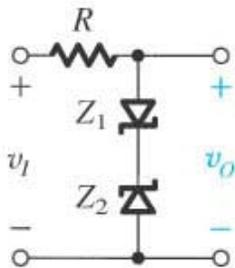
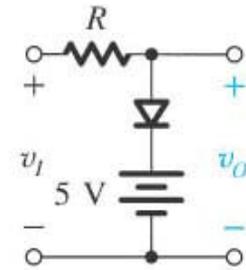
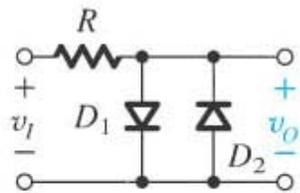
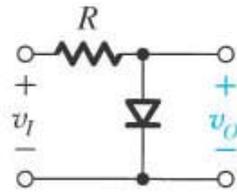
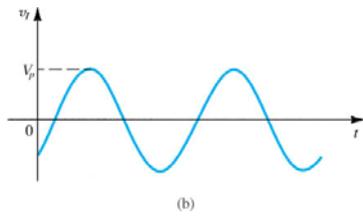


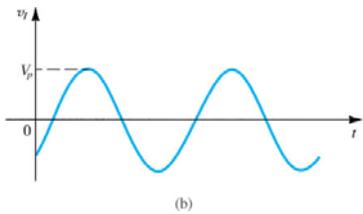
(b)

Figura 3.31 The “superdiode” precision half-wave rectifier and its almost-ideal transfer characteristic. Note that when $v_I > 0$ and the diode conducts, the op amp supplies the load current, and the source is conveniently buffered, an added advantage. Not shown are the op-amp power supplies.

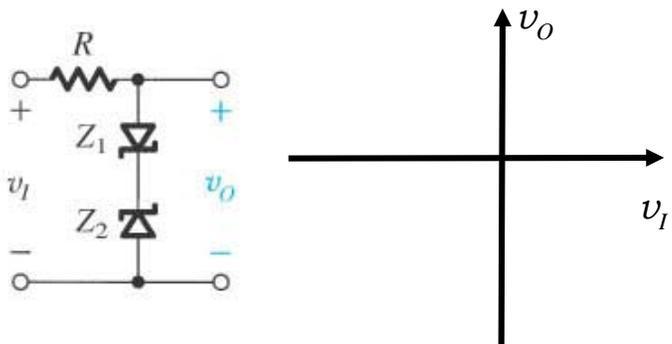
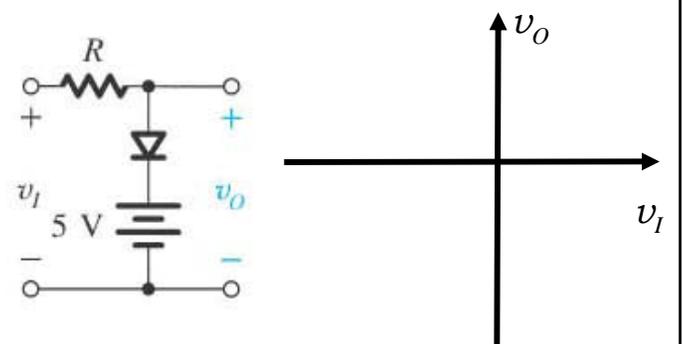
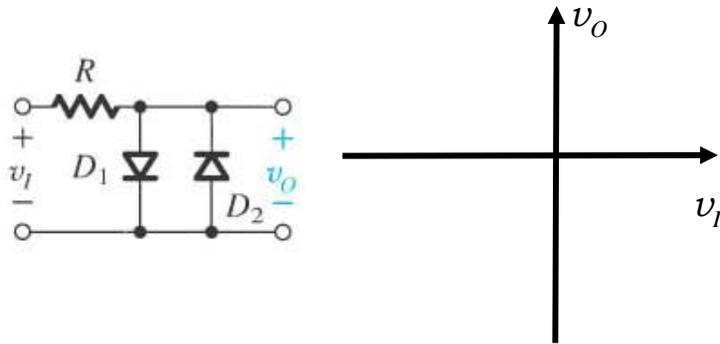
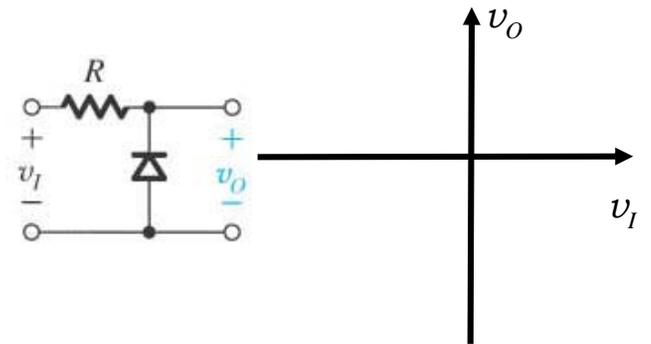
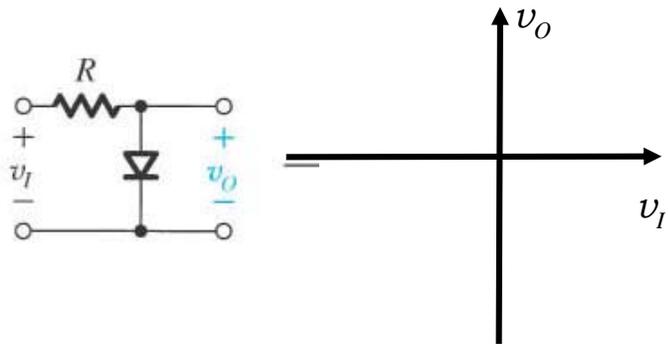
Circuitos Limitadores e Grampeadores

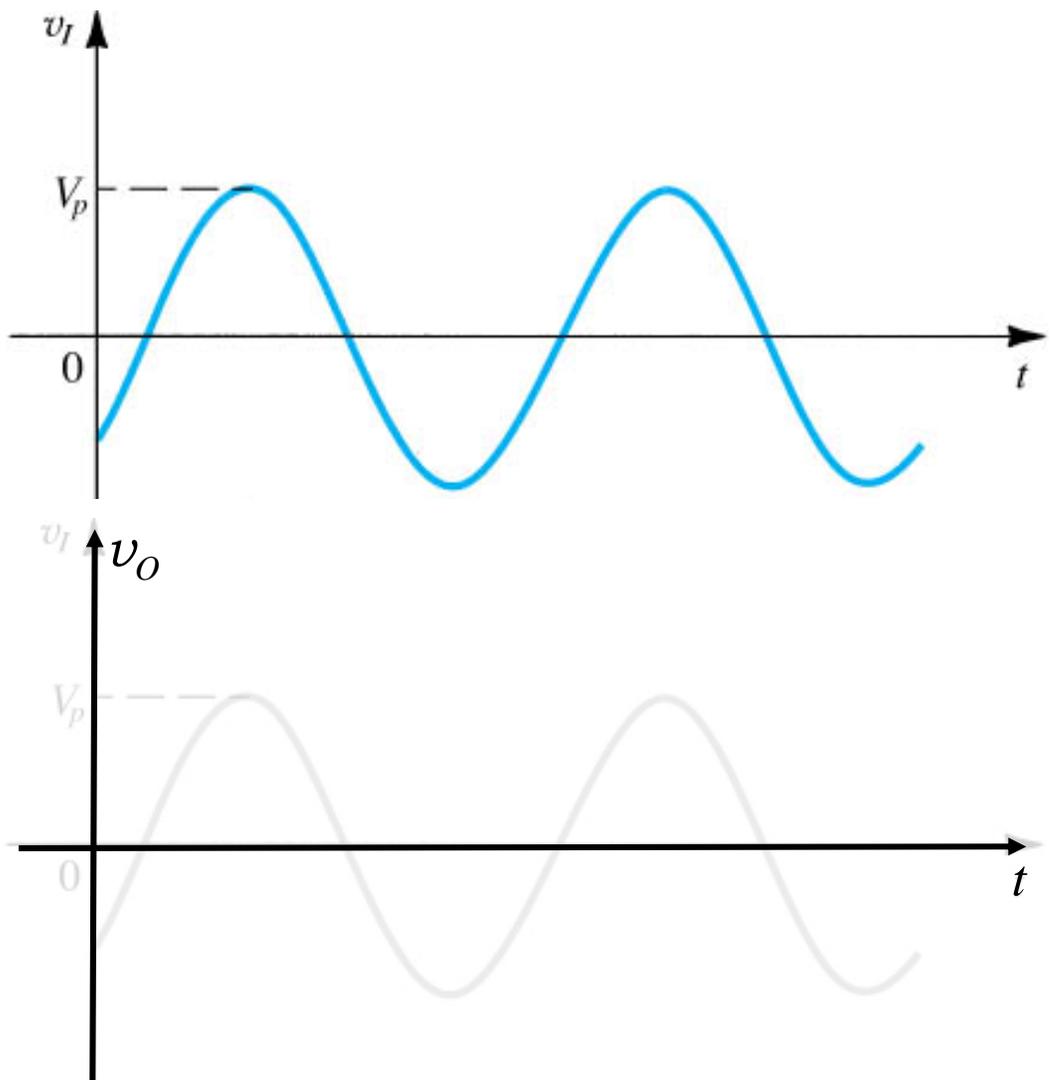
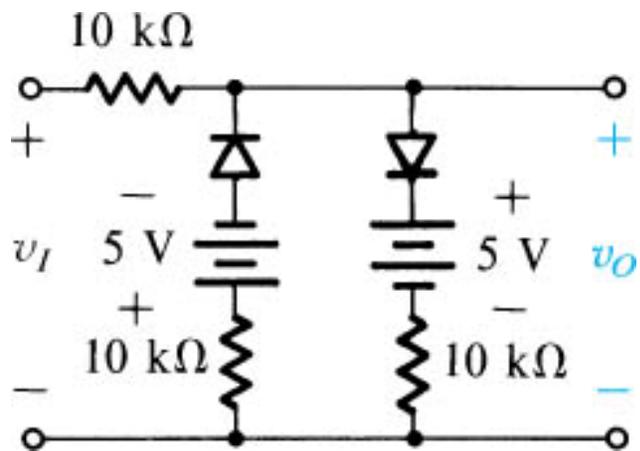




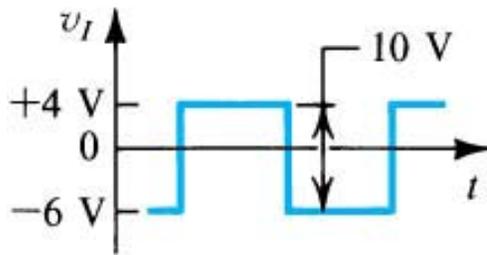


(b)

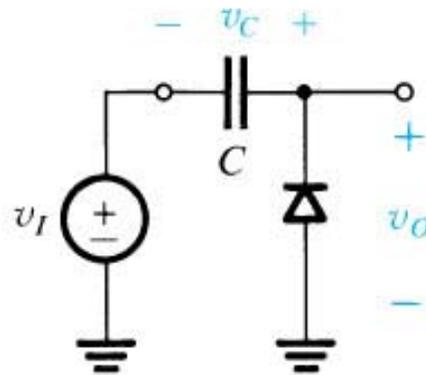




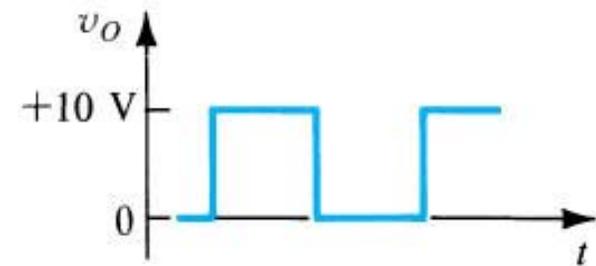
Circuito Grampeador



(a)



(b)



(c)

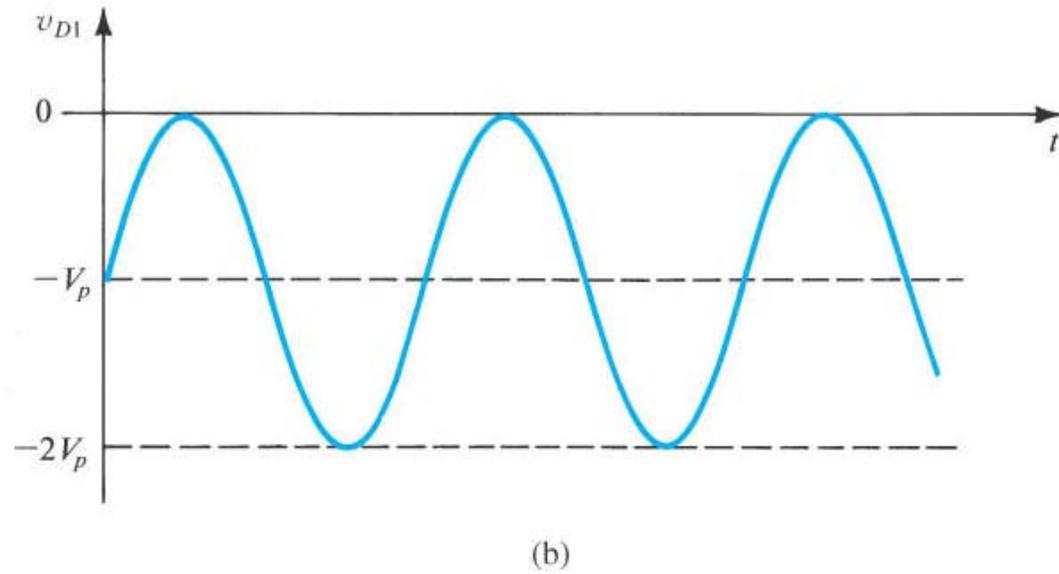
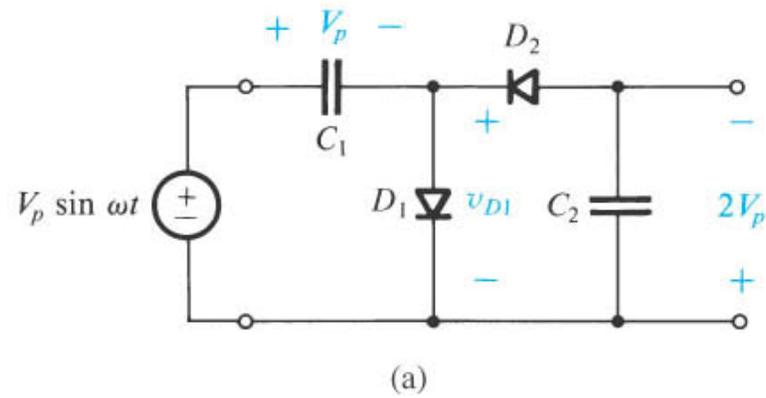


Figura 3.38 Voltage doubler: (a) circuit; (b) waveform of the voltage across D_1 .

Triplicador de Tensão

