

# CAPÍTULO 3

## Aula 11

### Retificador em Ponte e Meia Onda com Filtro

Prof. Sedra  
PSI3321

### Eletrônica I – PSI3321

#### Programação para a Segunda Prova

11 <sup>a</sup> 05/04	Circuito retificador em ponte. Circuito retificador de meia onda com o capacitor de filtro.	Sedra, Cap. 3 p. 109-111
12 <sup>a</sup> 08/04	Retificador de onda completa com capacitor de filtro, superdiodo. Exercícios (exemplo 3.9).	Sedra, Cap. 3 p. 112-115
13 <sup>a</sup> 12/04	Circuitos limitadores, circuitos grampeadores, dobrador de tensão, exercícios: 3.27, 3.28.	Sedra, Cap. 3 p. 115-118
14 <sup>a</sup> 15/04	Conceitos básicos de dispositivos semicondutores: silício dopado, mecanismos de condução (difusão e deriva), exercícios.	Aula avulsa + Sedra, Cap. 3 p. 117-121
15 <sup>a</sup> 26/04	Modelos de cargas, junção pn na condição de circuito aberto, potencial interno da junção, junção pn polarizada, exercícios.	Aula avulsa + Sedra, Cap. 3 p. 121-126
16 <sup>a</sup> 29/04	Distribuição de portadores minoritários na junção pn diretamente polarizada. Dedução elementar da equação de corrente na junção pn, exercícios.	Aula avulsa + Sedra, Cap. 3 p. 127-128
17 <sup>a</sup> 03/05	Capacitância de difusão, largura da região de depleção da junção pn polarizada, capacitância de depleção, a junção pn na região de ruptura (efeito zener e efeito avalanche), exercícios.	Sedra, Cap. 3 p. 124-125 e p. 128-129
18 <sup>a</sup> 06/05	Aula de Exercícios	

2<sup>a</sup>. Semana de Provas (09/05 a 13/05/2016)

Data: 11/05/2016 (quarta feira) – Horário: 13:10h às 15:10h

PSI3321

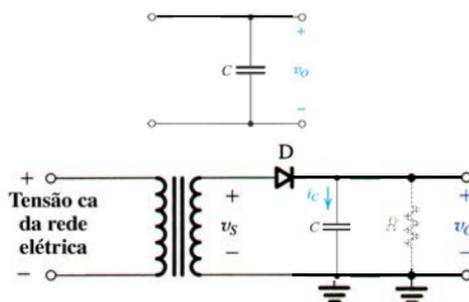
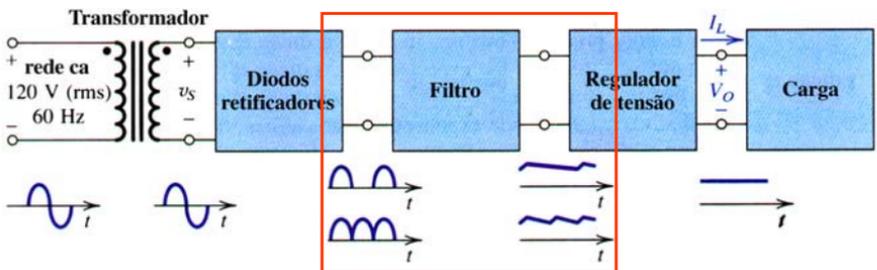
# 11ª Aula:

## Circuito Retificador em Ponte e Meia Onda com Filtro

Ao final desta aula você deverá estar apto a:

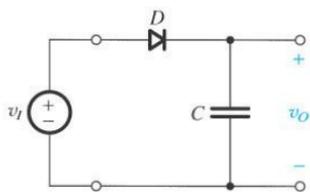
- Explicar o funcionamento do filtro capacitivo para circuitos reguladores
- Determinar os valores de pico da tensão de saída (na carga) e da corrente reversa nos diodos em retificadores meia onda e onda completa

### Diagrama de Blocos de Circuitos Retificadores

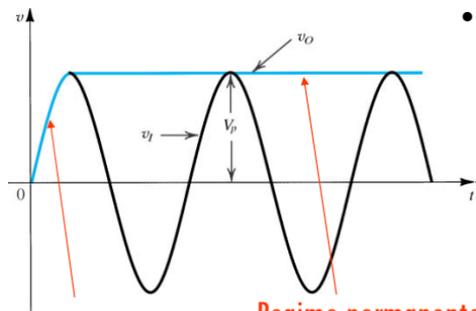


## O Retificador com Bloco de Filtro

(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//



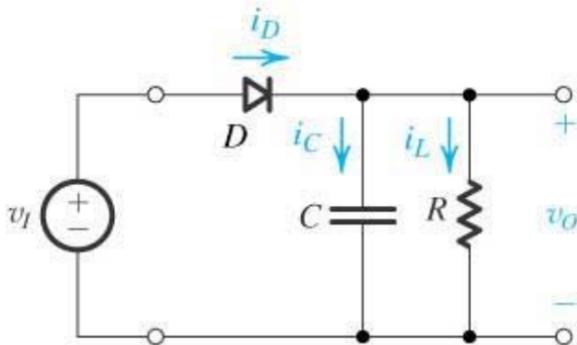
Prof. Sander PS/DIUSP

256

## O Retificador com Bloco de Filtro

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

E com carga?



Atenção:

$$i_D = i_C + i_L$$

$$v_O = R_L i_L$$

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

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

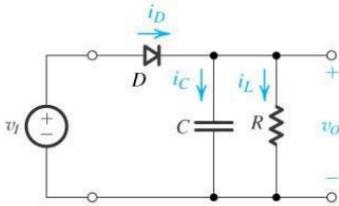
Prof. Sander PS/DIUSP

257

## O Retificador com Bloco de Filtro

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

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



$$i_D = i_C + i_L$$

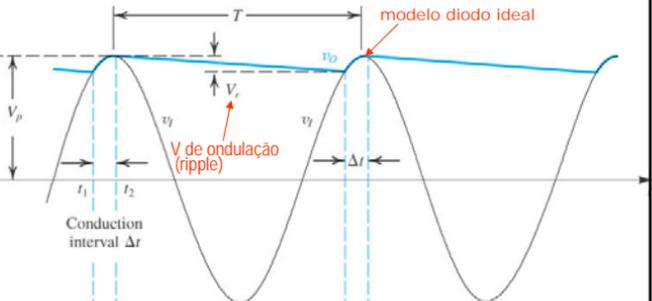
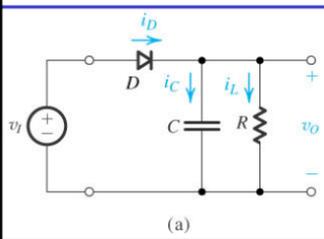
$$v_o = v_I = \frac{1}{C} \int_0^T i_C dt \Rightarrow i_C = C \frac{dv_I}{dt}$$

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

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

## 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):

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

Para  $CR \gg T$ :

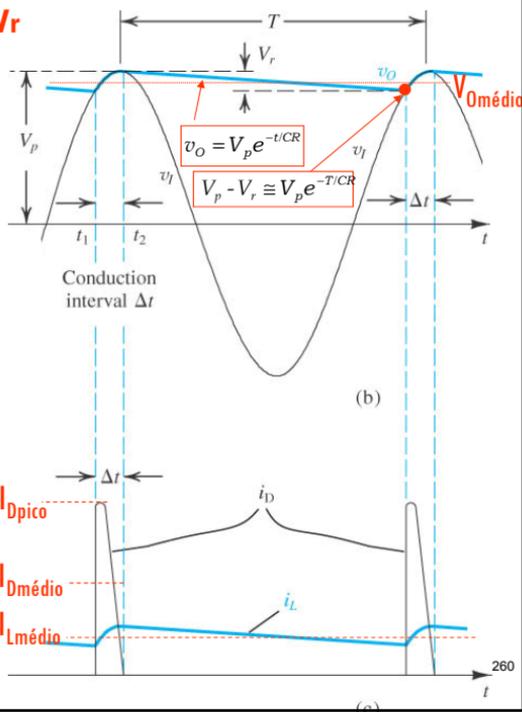
$$e^{-T/CR} \cong 1 - T/CR$$

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

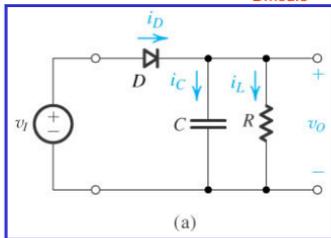
e portanto:

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

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



## Determinando $I_{D(médio)}$



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

$$Q_f = I_{C(médio)} \times \Delta t$$

$$i_{C(médio)} = I_{D(médio)} - I_L$$

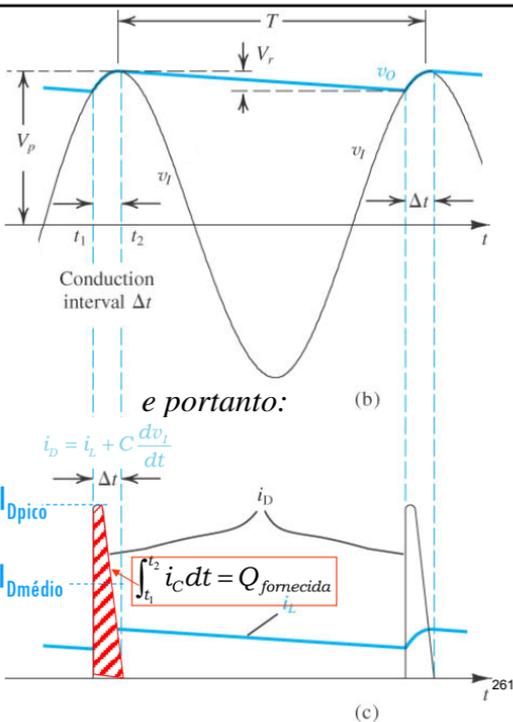
$$Q_f = (I_{D(médio)} - I_L) \times \Delta t$$

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

∴

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

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



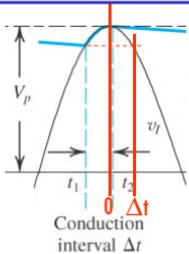
e portanto:

$$i_D = I_L + C \frac{dv_o}{dt}$$

$$\Delta t$$

$$\int_{t_1}^{t_2} i_C dt = Q_{fornecida}$$

## Determinando $I_{D\text{médio}}$



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

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

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

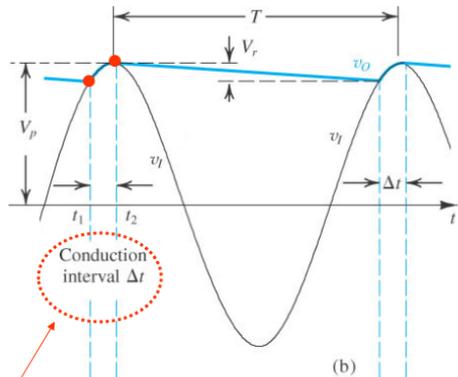
$$\cos(\omega \Delta t) \cong 1 - \frac{1}{2}(\omega \Delta t)^2$$

e portanto :

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

ou

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



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

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

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

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

## (Retificador Meia Onda com Filtro com Capacitor)

### Determinando $I_{D\text{pico}}$

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

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

$$i_{D\text{pico}} = C \frac{dv_I(t_1)}{dt} + (\sim) i_{L\text{médio}} = C \frac{dV_p \cos(\omega t)}{dt} \Big|_{t=t_1} + i_{L\text{médio}}$$

$\omega \Delta t$  pequeno :

$$\cos(\omega \Delta t) \cong 1 - \frac{1}{2}(\omega \Delta t)^2 \quad i_{D\text{pico}} = CV_p \frac{d \left[ 1 - \frac{1}{2}(\omega t)^2 \right]}{dt} \Big|_{t=t_1} + i_{L\text{médio}}$$

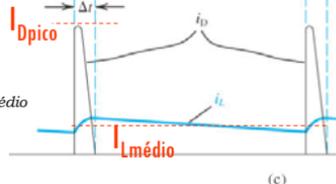
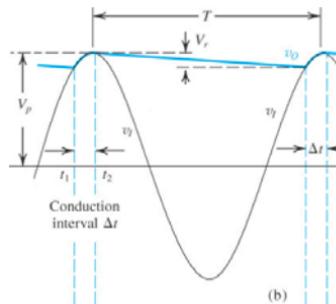
$$\frac{d \left[ 1 - \frac{1}{2}(\omega t)^2 \right]}{dt} \Big|_{t=t_1} = -\omega^2 t_1 = -\omega^2 (-\Delta t) = \omega^2 \Delta t$$

$$i_{D\text{pico}} = CV_p (\omega^2 \Delta t) + i_{L\text{médio}} = \left( \frac{i_{L\text{médio}}}{f V_r} \right) (\omega^2 \frac{\sqrt{2V_r / V_p}}{\omega}) + i_{L\text{médio}}$$

$$i_{D\text{pico}} = i_{L\text{médio}} \frac{V_p}{V_r} \frac{\omega^2}{f \omega} \sqrt{2V_r / V_p} + i_{L\text{médio}}$$

$$i_{D\text{pico}} = i_{L\text{médio}} \left( 1 + \frac{\omega^2}{f \omega} \sqrt{2 \frac{V_p^2}{V_r^2} V_r / V_p} \right) \Rightarrow$$

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



## (Retificador Meia Onda com Filtro com Capacitor)

### Resumindo

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

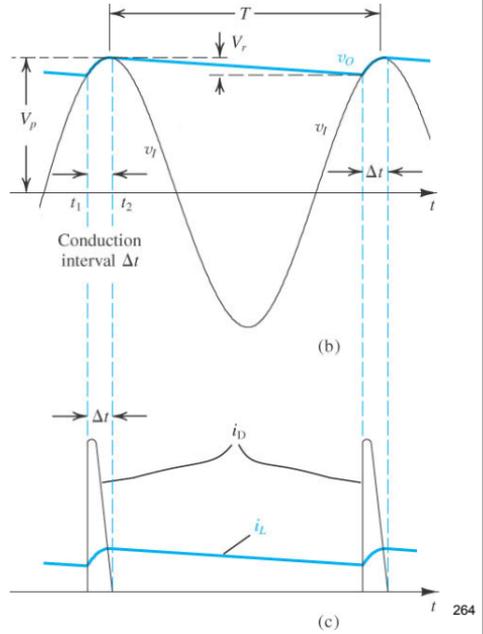
$$i_{L(\text{médio})} = I_L = \frac{V_p}{R}$$

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

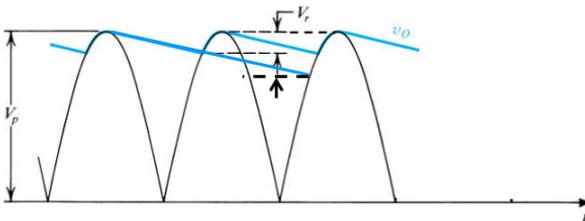
$$\Delta t \cong \frac{\sqrt{2V_r / V_p}}{2\pi f}$$

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

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



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



*meia onda completa*

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

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

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

**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 $\Omega$ . 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)

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

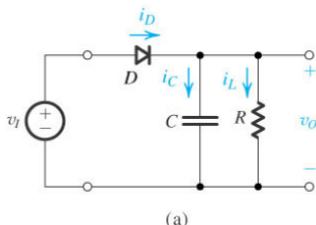
$$i_{L(\text{médio})} = I_L = \frac{V_p}{R}$$

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

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

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

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



Prof. Sander PS/UNEP

269

**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 $\Omega$ . 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)

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

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

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

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

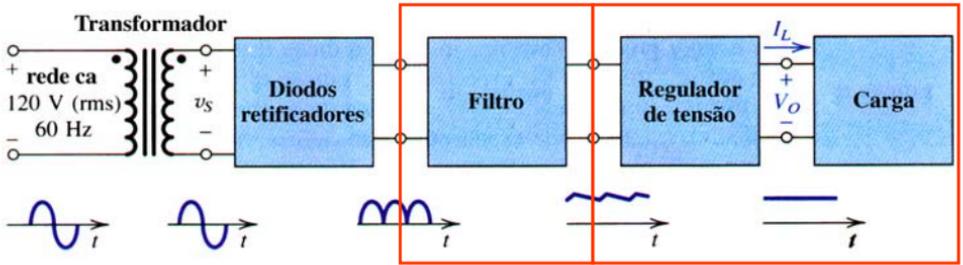
$$I_{D\text{médio}} = I_L (1 + \pi \sqrt{2V_p / V_r})$$

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

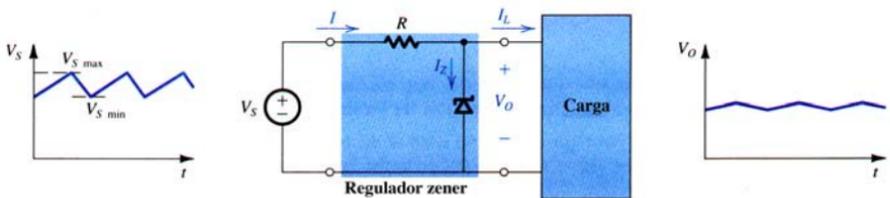
Prof. Sander PS/UNEP

270

# Diagrama de Blocos de Circuitos Retificadores



## Desempenho de um Regulador com Zener



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

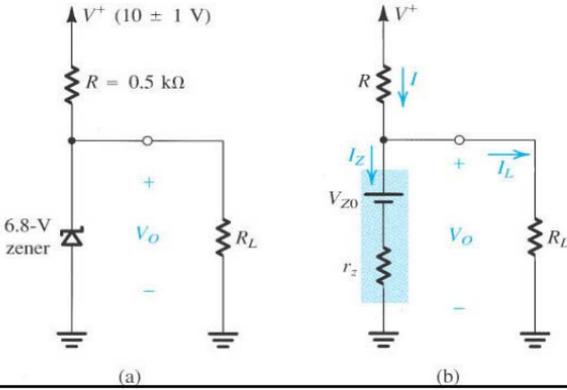
(máxima corrente pior carga)

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

( $V_s$  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.

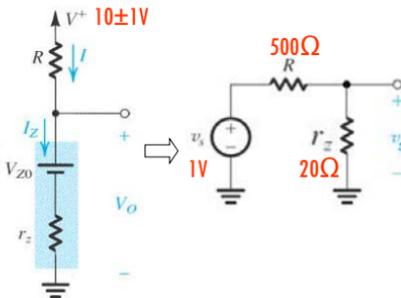
- (a) Determine a tensão de saída sem carga;
- (b) Determine a regulação de linha para a variação de  $\pm 1V$  na entrada;
- (c) Qual a variação na tensão de saída quando se coloca uma carga que drena  $1mA$ ? Isso é chamado Regulação de Carga.
- (d) Qual a variação na tensão de saída para uma carga 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)



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

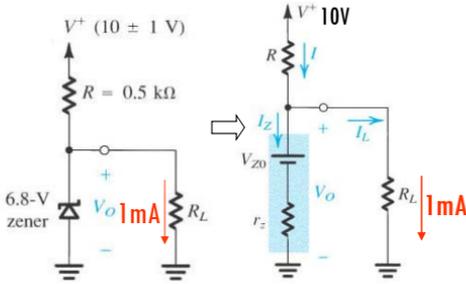
$$\frac{\Delta V_o}{\Delta V_s} = \frac{\pm 38,5mV}{\pm 1V} = 3,8\%$$

**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  $1mA$ ?

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

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



$$I_Z = I_R - I_L = (6,3 - 1,0)\text{mA} = 5,3\text{mA}$$

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

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

$$\Delta V_Z = \Delta V_O = -21\text{mV}$$