

CAPITULO 3

Os Modelos CA para Pequenos Sinais de Entrada Aula 7

Eletrônica I – PSI3321

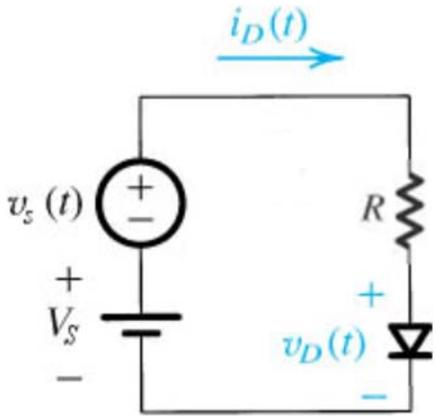
Aula	Matéria	Cap./pág.	Testes agendados
1ª 22/03	Introdução, O primeiro Amp Op Comercial. Encapsulamento do Amp Op, O Amp Op ideal, Análise de circuitos com Amp Ops ideais. Exemplo 2.2	Cap. 2 p. 38-46	
2ª 25/03	Somador, Configuração não inversora, seguidor, amplificador de diferenças. Exercício 2.15	Sedra, Cap. 2 p. 46-53	
3ª 29/03	Amplificador de instrumentação, Funcionamento dos Amp Ops Não-Ideais. Exemplo 2.3 e 2.4	Sedra, Cap. 2 p. 53-59	Teste 01 9h20-9h40
4ª 01/04	Operação dos Amp Ops em grande excursão de sinal, imperfeições cc, circuitos integrador e diferenciador. Exemplo 2.6.	Sedra, Cap. 2 p. 59-73	
5ª 05/04	Diodo ideal, características do diodo real, equação de corrente do diodo, exercícios.	Sedra, Cap. 3 p. 89-96	Teste 02 9h20-9h40
6ª 08/04	Análise gráfica (reta de carga), modelos simplificados de diodos, exercícios	Sedra, Cap. 3 p. 96-99	
Semana Santa (11/04 a 16/04/2022)			
7ª 19/04	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	Teste 03 9h20-9h40
8ª 26/04	Operação na região de ruptura reversa, diodo zener, Projeto de um regulador Zener, exercícios (exemplo 3.8)	Sedra, Cap. 3 p. 104-106	Teste 04 9h20-9h40
9ª 29/04	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. 106-109	
10ª 03/05	Circuito retificador em ponte. Circuito retificador de meia onda com o capacitor de filtro.	Sedra, Cap. 3 p. 109-111	Teste 05 9h20-9h40
11ª 06/05	Retificador de onda completa com capacitor de filtro, superdiodo. Exercícios (exemplo 3.9).	Sedra, Cap. 3 p. 112-115	
12ª 10/05	Circuitos limitadores, circuitos grampeadores, dobrador de tensão, exercícios: 3.27, 3.28.	Sedra, Cap. 3 p. 115-118	Teste 06 9h20-9h40
13ª 13/05	Conceitos básicos de dispositivos semicondutores: silício dopado, mecanismos de condução (difusão e deriva), exercícios.	Aula avulsa + Sedra, Cap. 3 p. 117-121	
1ª. Semana de Provas (16/05 a 20/05/2022) Data: xx/xx/2022 (xxxx-feira) – Horário: xx:xxh			

4ª Aula: O Modelo CA para Pequenos Sinais

Ao final desta aula você deverá estar apto a:

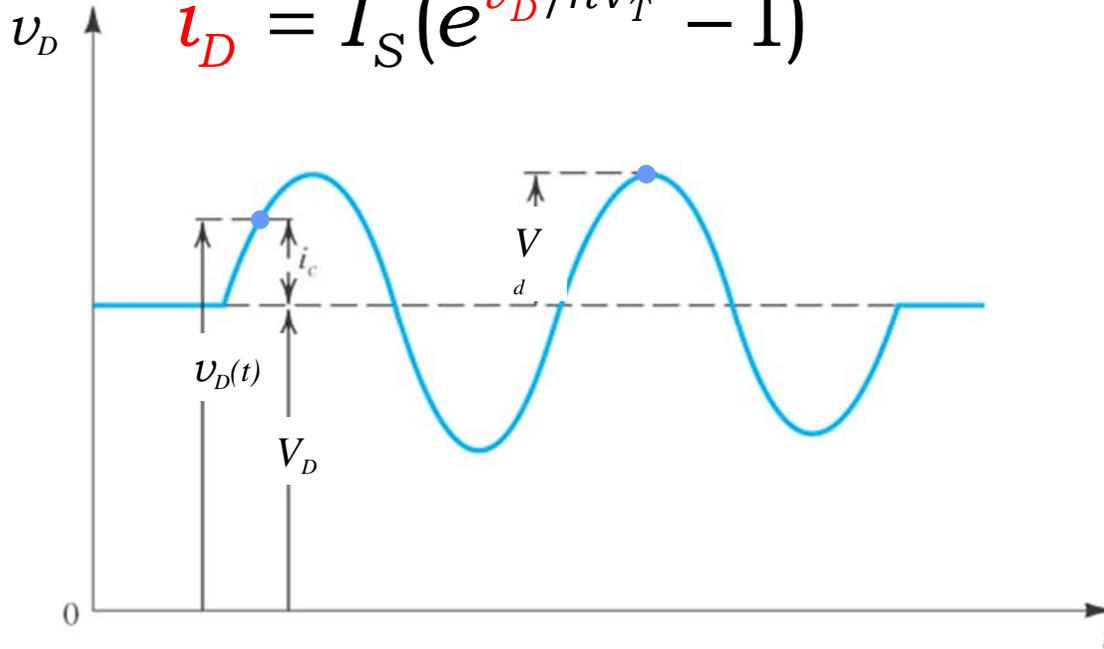
- Explicar e utilizar a notação empregada em eletrônica para diferenciar sinais constantes e sinais variáveis no tempo.
- Descrever o procedimento para cálculo de grandezas CC e CA em circuitos com diodos
- Diferenciar resistências reais, resistências para modelagem em CC e resistências para modelagem em CA (incrementais)
- Selecionar modelos CC ou CA para realizar análises em circuitos com diodos em função do tipo de problema
- Calcular resistências e outros parâmetros para modelagem CC e para modelagem CA
- Calcular tensões e correntes tanto CC como CA em circuitos com diodos

Vamos inserir uma Variação CA na Entrada (um Pequeno Sinal)



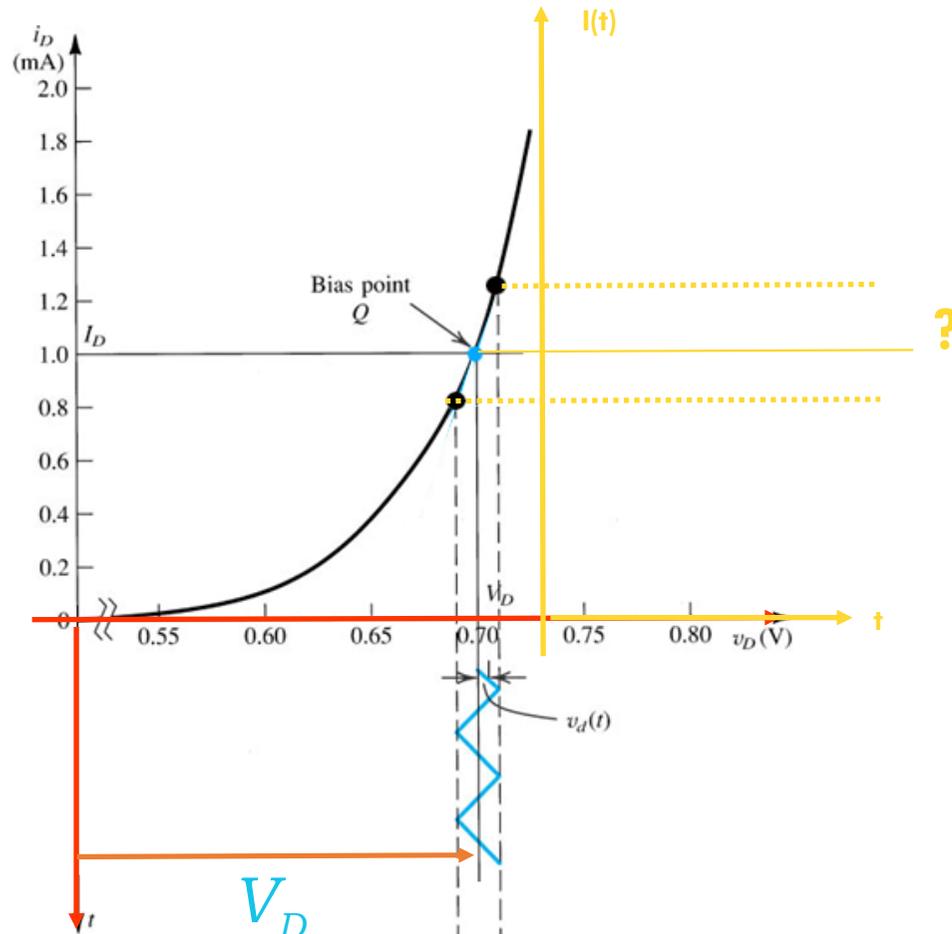
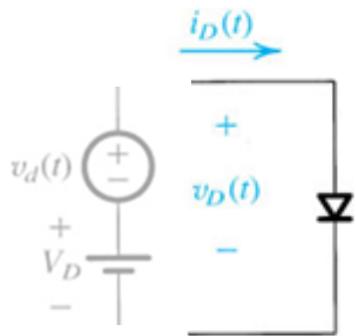
$$I_D = I_S (e^{V_D/nV_T} - 1)$$

$$i_D = I_S (e^{v_D/nV_T} - 1)$$



Vamos inserir um Pequeno Sinal na entrada

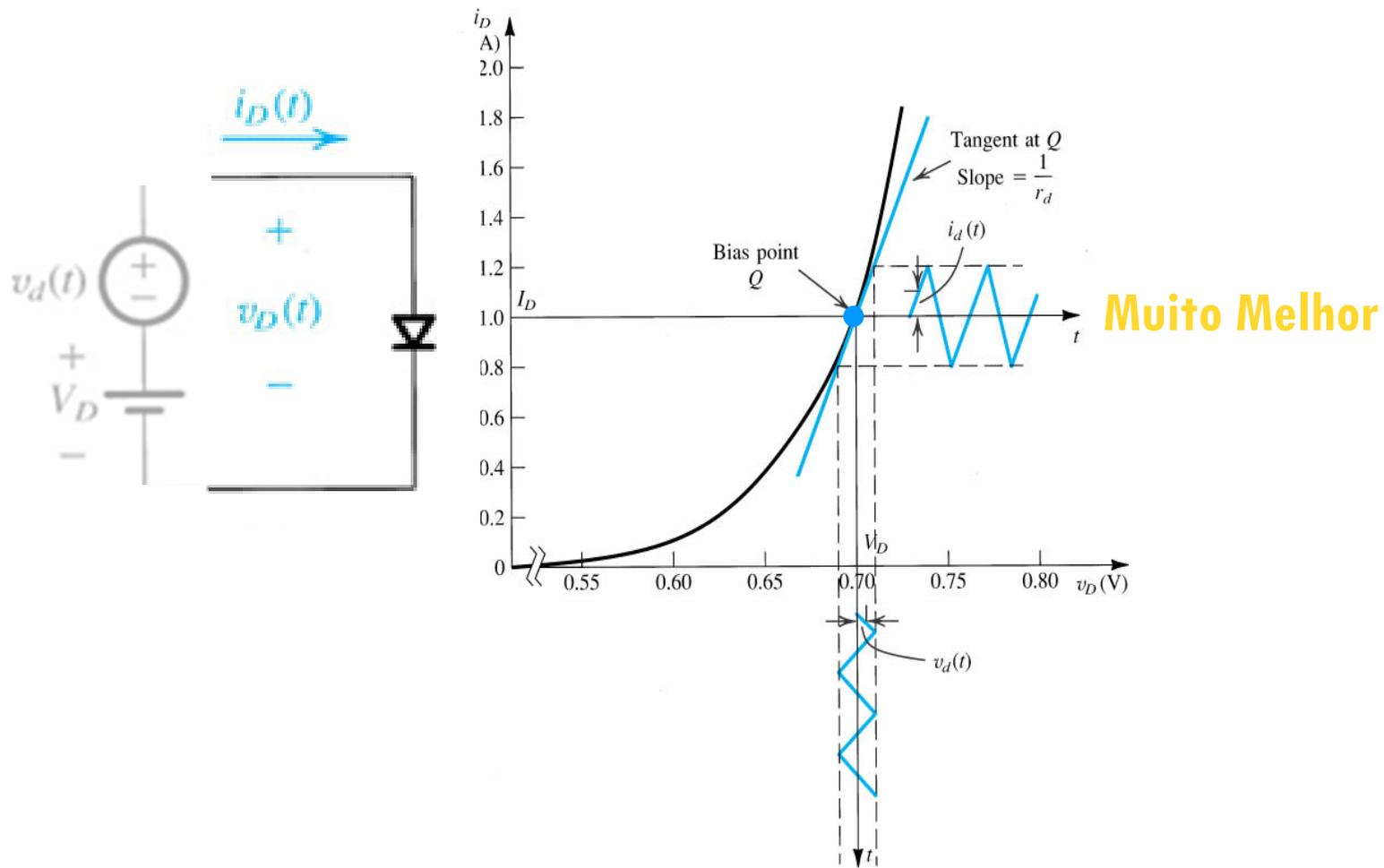
$$v_D(t) = V_D + v_d(t)$$



(b)

Pequenos sinais (CA)

O ideal é a tangente ao ponto!!!



(b)

Pequenos sinais (CA)

A tangente ao ponto: uma análise matemática

Qual a tangente à expressão (em relação à $v_d(t)$)?

- Reorganizando a expressão:

$$I_D = I_S (e^{V_D/nV_T} - 1) \Rightarrow i_D(t) = I_S e^{v_D(t)/nV_T}$$

$$v_D(t) = V_D + v_d(t)$$

$$i_D(t) = I_S e^{[V_D + v_d(t)]/nV_T} \Rightarrow i_D(t) = I_S e^{V_D/nV_T} e^{v_d(t)/nV_T}$$

$$i_D(t) = I_D e^{v_d(t)/nV_T}$$

Pequenos sinais (CA)

A tangente ao ponto: uma análise matemática

Qual a tangente (primeira derivada) da expressão?

$$i_D(t) = I_D e^{v_d(t)/nV_T}$$

Primeiramente, podemos representar a expressão de $e^{v_d(t)/nV_T}$ por uma soma infinita de termos calculados em um determinado ponto (Série de Taylor):

$$e^{x/a} = 1 + \frac{x}{a} + \frac{x^2}{2a^2} + \frac{x^3}{6a^3} + \dots$$

onde $a = nV_T$ e $x = v_d$

Pequenos sinais (CA)

A tangente ao ponto: uma análise matemática

Como: $e^{x/a} = 1 + \frac{x}{a} + \frac{x^2}{2a^2} + \frac{x^3}{6a^3} + \dots$ com $a = nV_T$ e $x = v_d$

$$i_D(t) = I_D e^{v_d(t)/nV_T} = I_D \cdot \left\{ 1 + \frac{1}{1} \frac{v_d}{nV_T} + \frac{1}{2} \left(\frac{v_d}{nV_T} \right)^2 + \frac{1}{6} \left(\frac{v_d}{nV_T} \right)^3 + \dots \right\}$$

Se $\frac{v_d}{2nV_T} \ll 1$ podemos fazer uma boa aproximação considerando apenas os dois primeiros termos:

$$i_D(t) = I_D e^{v_d(t)/nV_T} \cong I_D + \frac{I_D}{nV_T} v_d(t)$$

Pequenos sinais (CA)

A tangente ao ponto: uma análise matemática

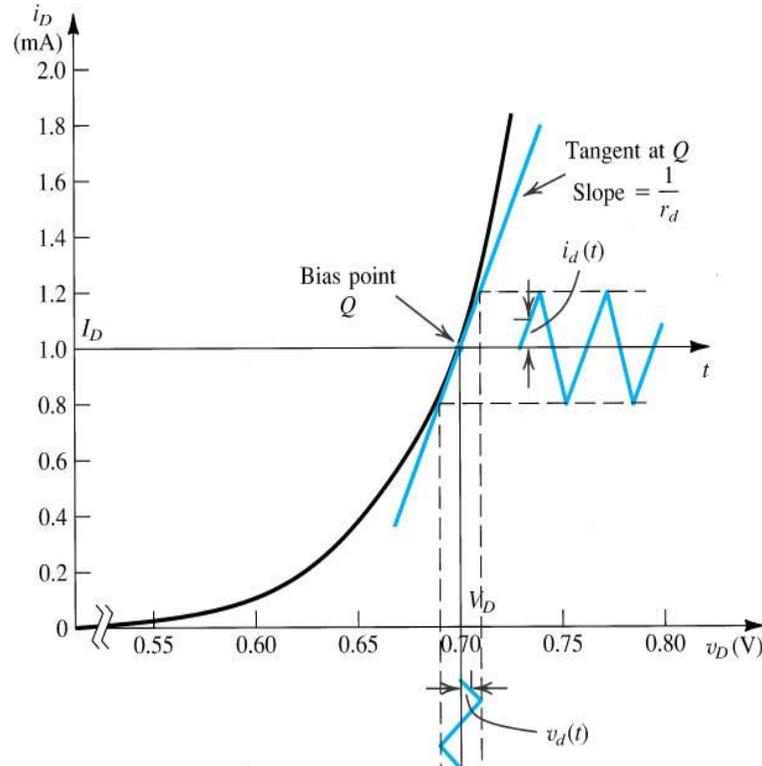
$$i_D(t) = I_D e^{v_d(t)/nV_T} \cong I_D + \frac{I_D}{nV_T} v_d(t) \quad \left\{ \frac{v_d}{2nV_T} \ll 1 \right\}$$

Como $i_D(t) = I_D + i_d(t)$, por inspeção:

$$i_d(t) = \frac{I_D}{nV_T} v_d(t)$$

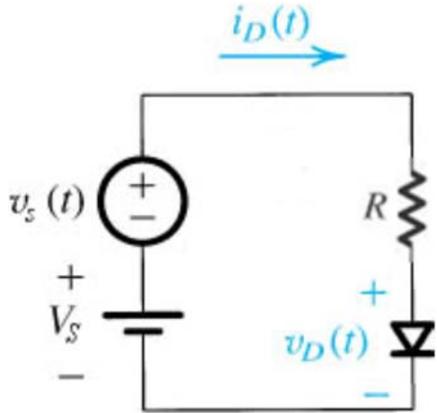
$\xrightarrow{\text{red arrow}} \frac{1}{r_d}$

$$r_d = \frac{nV_T}{I_D}$$



Pequenos sinais (CA)

A tangente ao ponto: uma análise matemática



$$i_D(t) = I_D e^{v_d(t)/nV_T} \cong I_D + \frac{I_D}{nV_T} v_d(t)$$

$\frac{1}{r_d}$

$\left\{ \frac{v_d}{2nV_T} \ll 1 \right\}$, ou, $v_d \ll 50\text{mV}$

$$i_d(t) = \frac{1}{r_d} v_d(t) \Leftrightarrow v_d(t) = r_d i_d(t)$$

$$V_S + v_s(t) = R \times i_D(t) + v_D(t)$$

$$\begin{aligned} V_S + v_s(t) &= R \times \{I_D + i_d(t)\} + \{V_D + v_d(t)\} \\ &= RI_D + V_D + Ri_d(t) + v_d(t) \end{aligned}$$

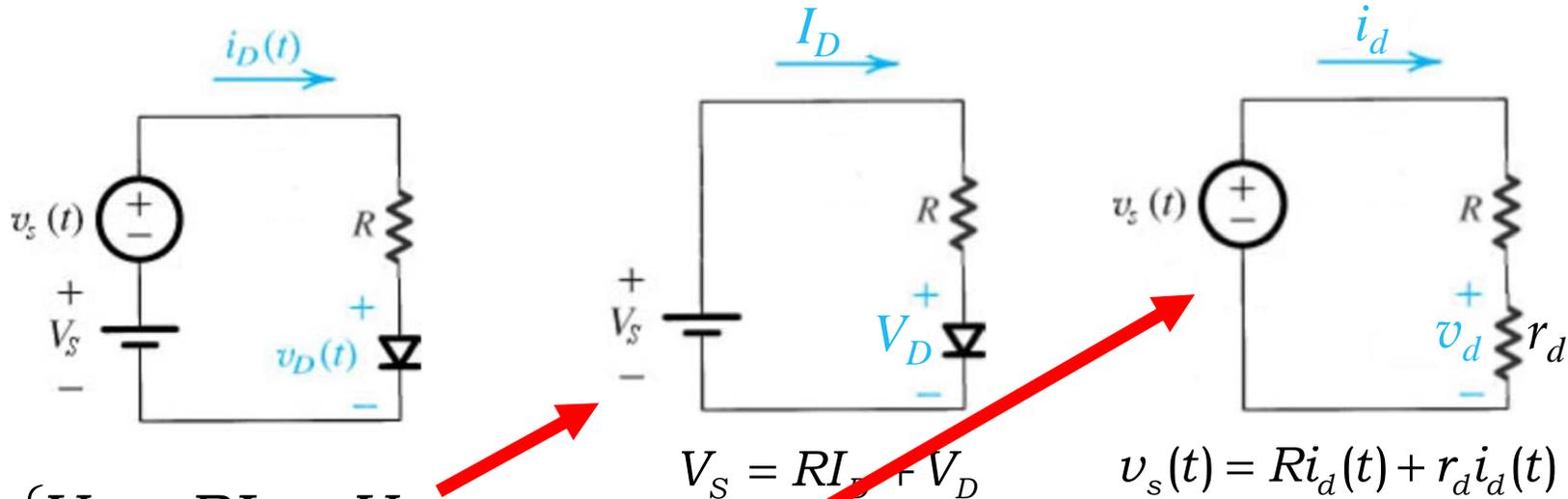
$$\begin{cases} V_S = RI_D + V_D \\ v_s(t) = Ri_d(t) + v_d(t) \end{cases}$$

$$v_s(t) = Ri_d(t) + r_d i_d(t)$$

$$\frac{I_D}{nV_T}$$

Pequenos sinais (CA)

A tangente ao ponto: uma análise matemática

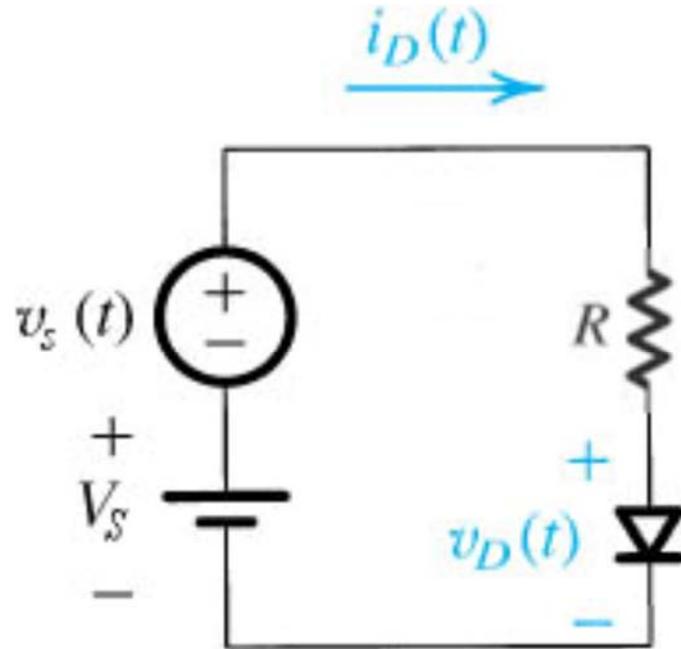
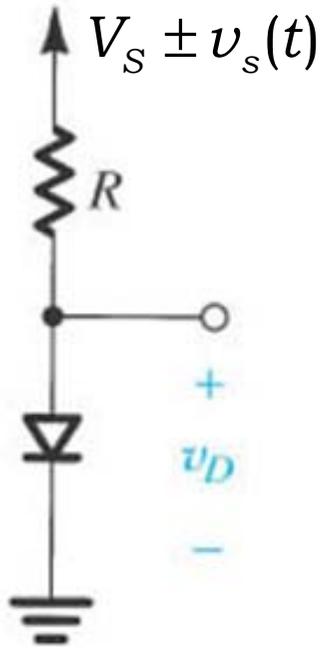


$$\begin{cases} V_S = RI_D + V_D \\ v_s(t) = Ri_d(t) + r_d i_d(t) \end{cases}$$

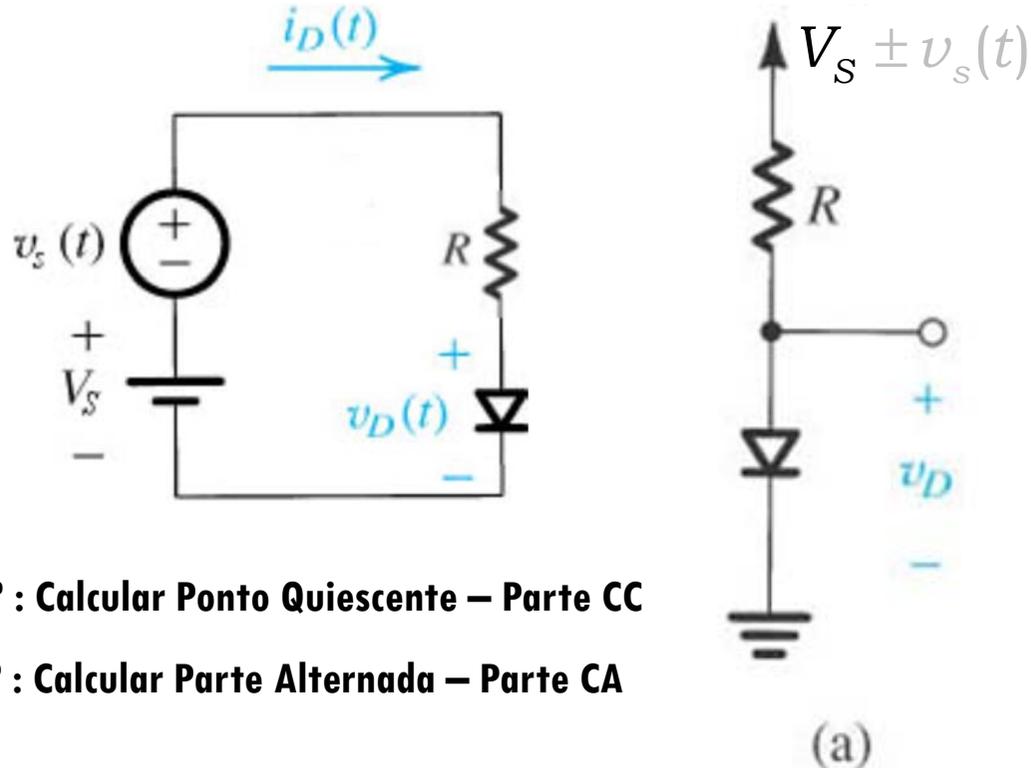
- 1º : Calcular Ponto Quiescente – Parte CC
- 2º : Calcular Parte Alternada – Parte CA
- 3º : Verificação – válido se $\left\{ \frac{v_d}{2nV_T} \ll 1 \right\}$, ou, $v_d \ll 50mV$

ATIVIDADE

Exemplo 3.6: Considere o circuito abaixo, alimentado por uma fonte V^+ constituída por um sinal CC de 10V sobre o qual aplica-se um sinal senoidal de 60Hz com $1V_p$ de amplitude. Calcule a tensão CC sobre o diodo e a amplitude do sinal senoidal sobre ele. Assuma que o diodo tem uma queda de tensão de 0,7V em 1mA e $n=2$.

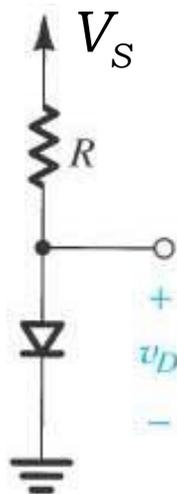
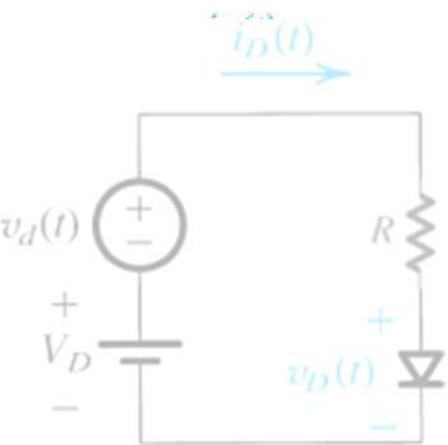


Exemplo 3.6: Considere o circuito abaixo, alimentado por uma fonte V^+ constituída por um sinal CC de 10V sobre o qual aplica-se um sinal senoidal de 60Hz com $1V_p$ de amplitude. Calcule a tensão CC sobre o diodo e a amplitude do sinal senoidal sobre ele. Assuma que o diodo tem uma queda de tensão de 0,7V em 1mA e $n=2$.

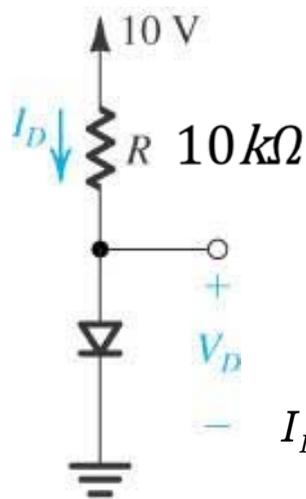


- 1º : Calcular Ponto Quiescente – Parte CC
- 2º : Calcular Parte Alternada – Parte CA

Exemplo 3.6: Considere o circuito abaixo, alimentado por uma fonte V^+ constituída por um sinal CC de 10V sobre o qual aplica-se um sinal senoidal de 60Hz com $1V_p$ de amplitude. Calcule a tensão CC sobre o diodo e a amplitude do sinal senoidal sobre ele. Assuma que o diodo tem uma queda de tensão de 0,7V em 1mA e $n=2$.



Análise CC



Resolver a parte CC

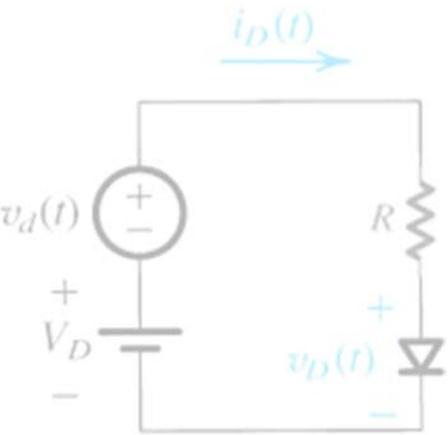
- Modelo diodo ideal (aberto/fechado)
- Modelo bateria
- Modelo bateria + r_D

Modelo bateria

$$I_D = \frac{(10 - 0,7)}{10k} = 0,93mA$$

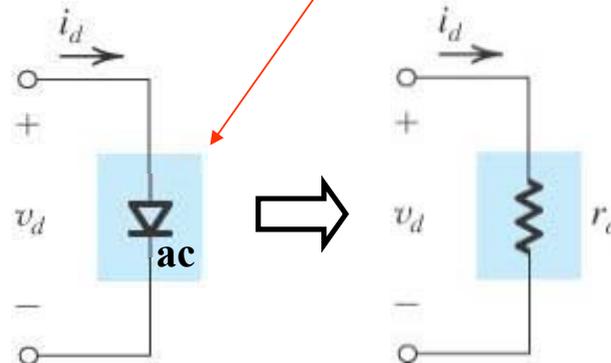
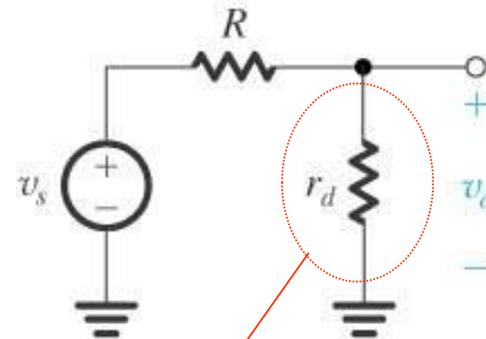
$$V_D = 0,7V \quad (\text{modelo bateria})$$

Exemplo 3.6: Considere o circuito abaixo, alimentado por uma fonte V^+ constituída por um sinal CC de 10V sobre o qual aplica-se um sinal senoidal de 60Hz com $1V_p$ de amplitude. Calcule a tensão CC sobre o diodo e a amplitude do sinal senoidal sobre ele. Assuma que o diodo tem uma queda de tensão de 0,7V em 1mA e $n=2$.



$$\begin{cases} V_S = RI_D + V_D \\ v_s(t) = Ri_d(t) + v_d(t) \\ v_s(t) = Ri_d(t) + r_d i_d(t) \end{cases}$$

Análise AC

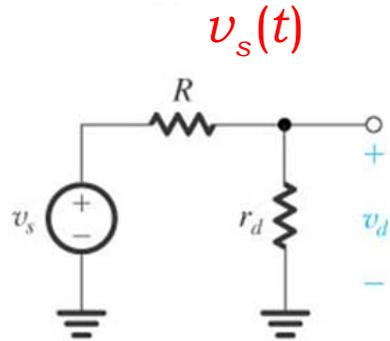
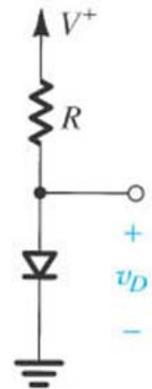


Modelo do diodo em AC para pequenos sinais:

Portanto Exemplo 3.6:

Resolver a parte CA

-Modelo para pequenos sinais



$$r_d = \frac{nV_T}{I_D} = \frac{2 \times 25mV}{0,93mA} = 53,8\Omega$$

$$v_d = v_s \frac{r_d}{R + r_d} = 1 \frac{54}{10k + 54} = \pm 5,35mV$$

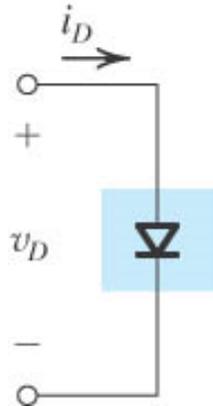
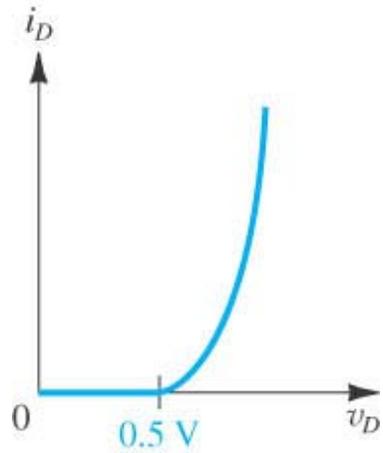
$$i_d = \pm \frac{5,35m}{53,8} = \pm 0,10mA$$

$$v_D = V_D + v_d = 0,7V \pm 5,35mV$$

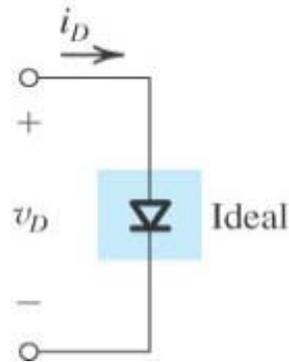
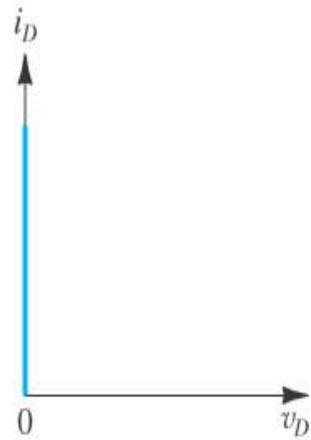
$$i_D = I_D + i_d = 0,93mA \pm 0,10mA$$

Resumo de Modelos

Lei do Diodo (Exponencial)

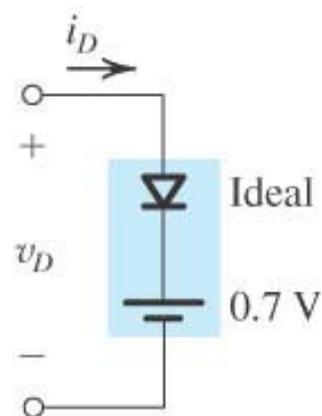
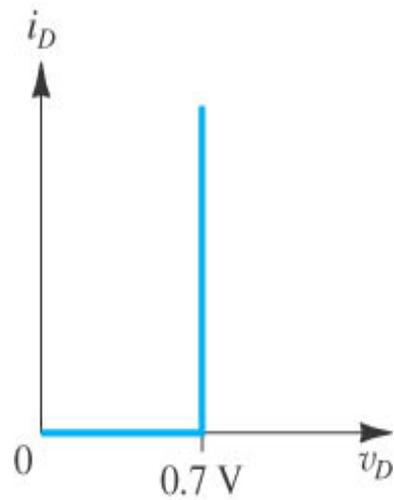


Ideal

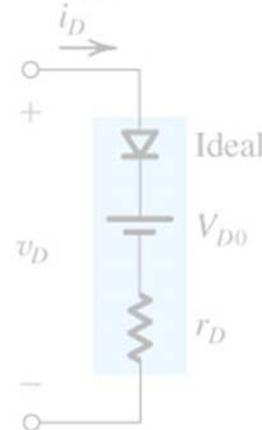
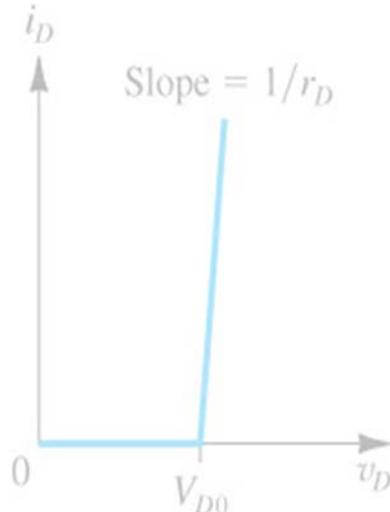


MODELOS CC

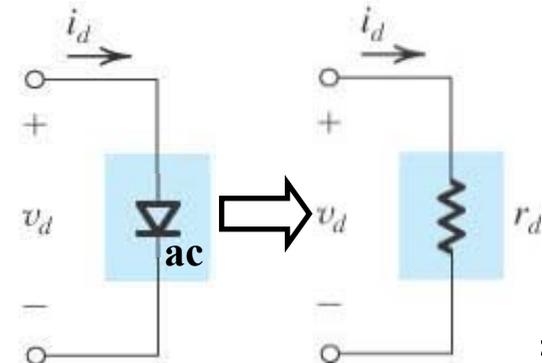
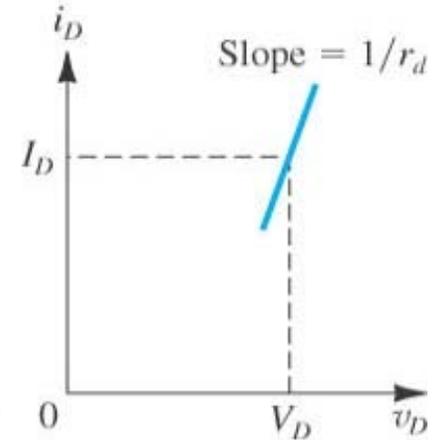
Bateria



Bat+Res



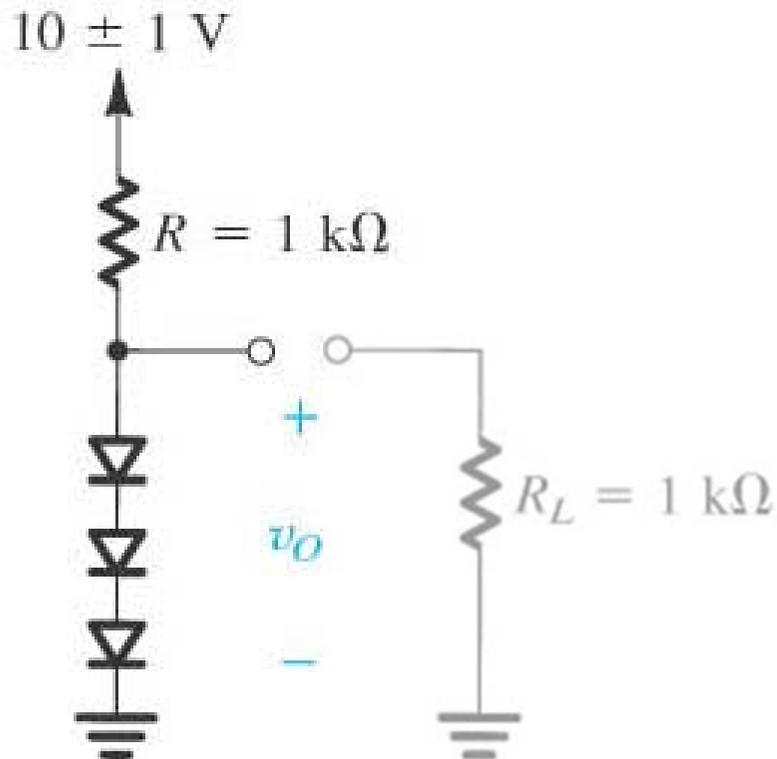
MODELO CA p/ Pequenos Sinais



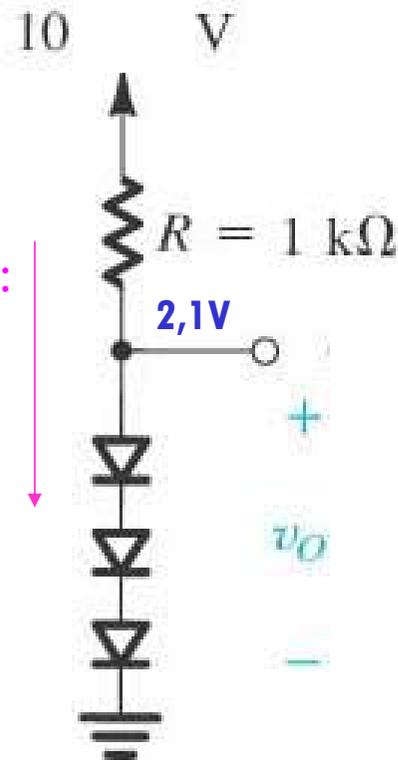
ATIVIDADE

Exemplo 3.7: No circuito abaixo temos cerca de 2,1V na saída ($n=2$). Queremos saber qual a variação percentual de tensão na saída quando temos:

- (a) 10% de variação na tensão de entrada
- (b) Quando acoplamos uma carga na saída (mantendo a tensão de entrada em 10V fixos)



(a) Sem Carga:



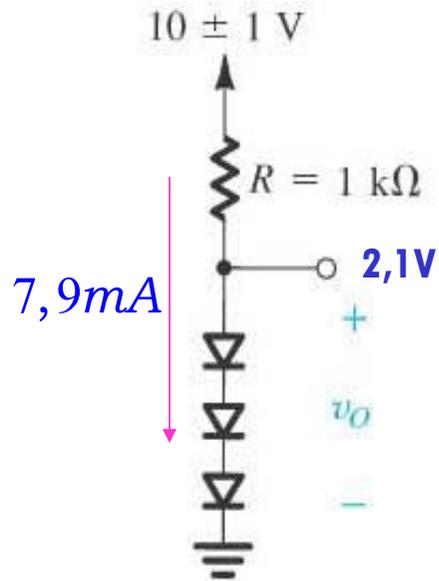
Sem carga:

$$I_R = I_D = \frac{(10 - 2,1)}{1k} = 7,9 \text{ mA}$$

Exemplo 3.7:

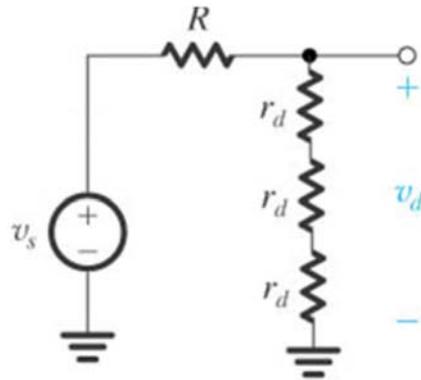
(a) 10% de variação na tensão de entrada

(a) Sem Carga:



• **Parte CC:** $V_0 = 2,1V$ e $I_D = 7,9mA$

• **Parte CA:**

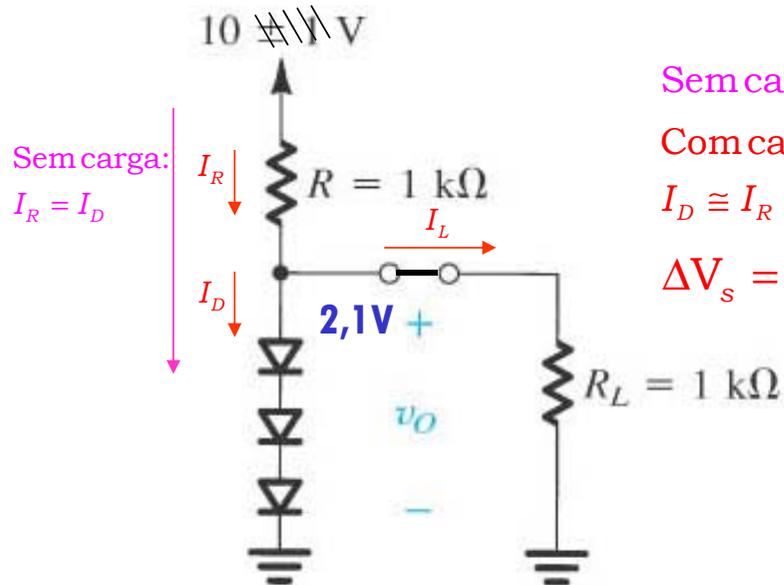


$$r_d = \frac{nV_T}{I_D} = \frac{2 \times 25mV}{7,9mA} = 6,3\Omega$$

$$v_d = v_s \frac{3r_d}{R + 3r_d} \\ = \pm 1V \cdot \frac{19}{1k + 19} = \pm 18,6mV$$

Exemplo 3.7:

(b) Quando acoplamos uma carga na saída (mantendo a tensão de entrada em 10V fixos)



$$\text{Sem carga: } I_R = I_D \cong \frac{(10 - 2,1)}{1k} = 7,9mA$$

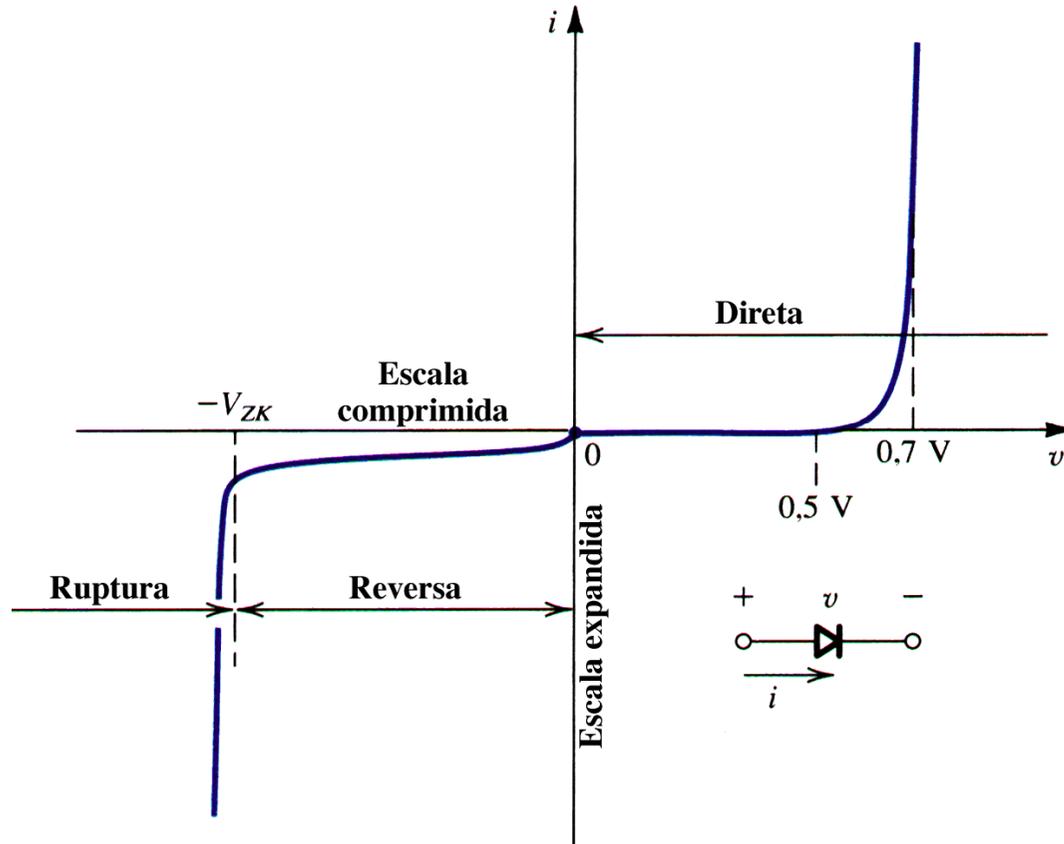
Com carga: Se $I_R = cte$

$$I_D \cong I_R - I_L = 7,9mA - 2,1V/1k\Omega = (7,9 - 2,1)mA = 5,8mA$$

$$\Delta V_s = 3r_d(I_{DcomL} - I_{DsemL}) = 19 \cdot (5,8 - 7,9) = -40mV$$

Diodo Real

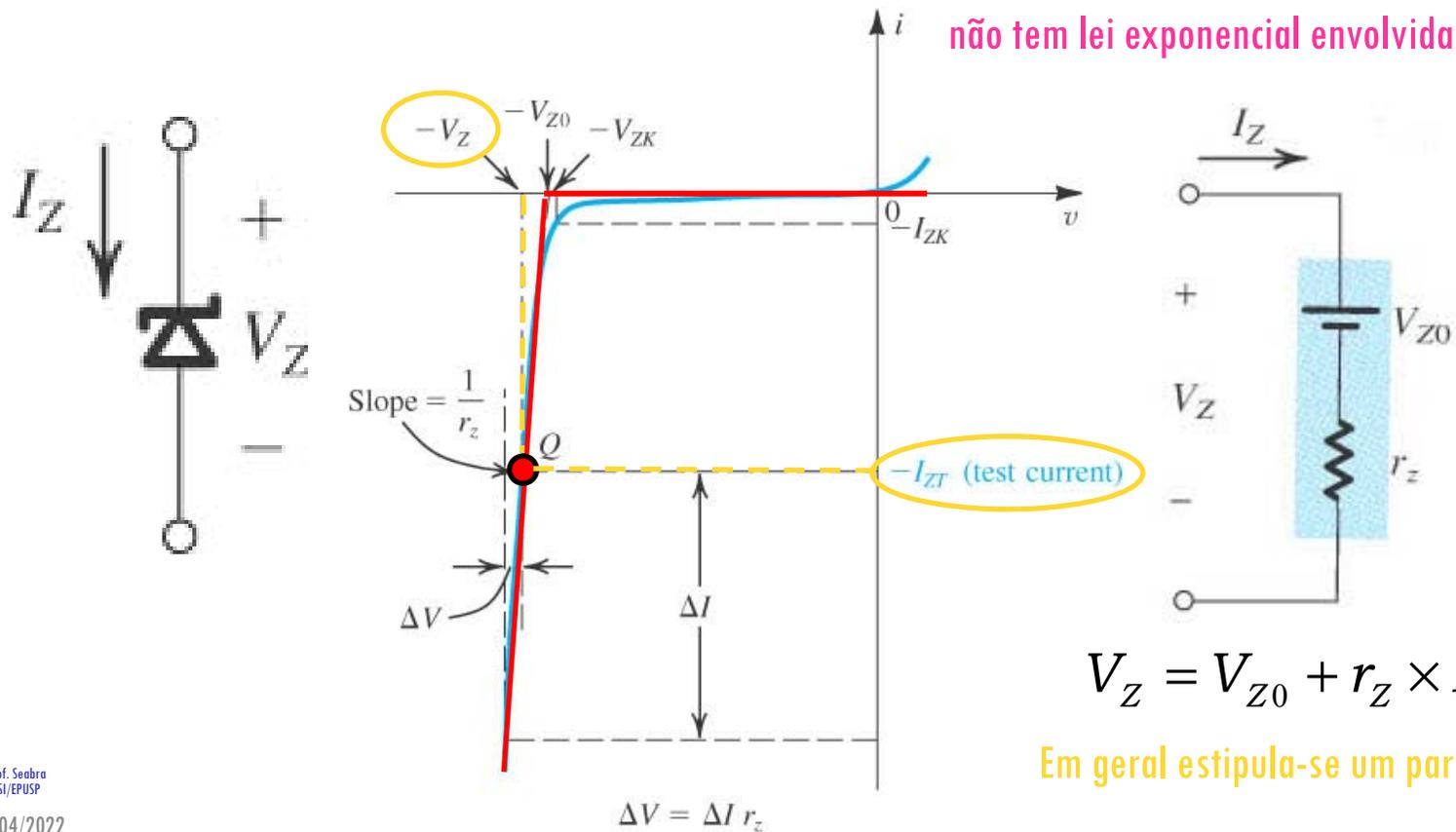
A Região de Ruptura Reversa



A região de Ruptura Reversa

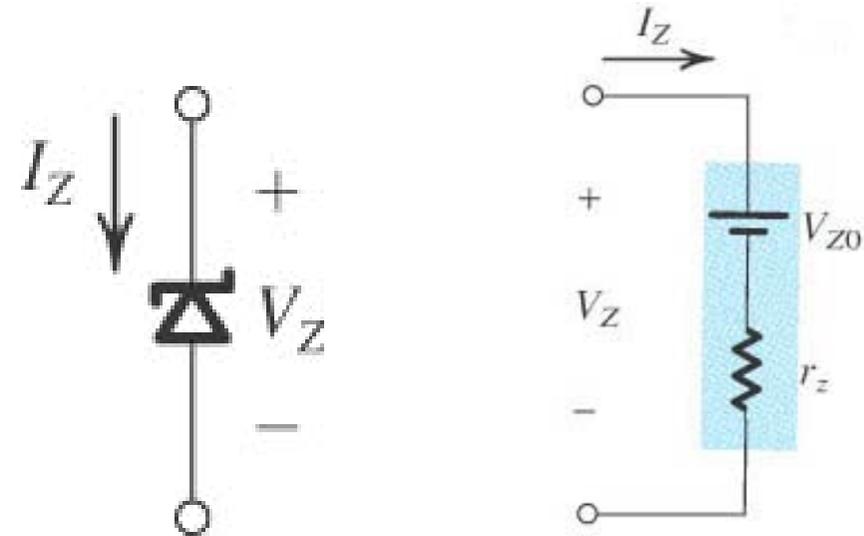
Construindo um modelo

No caso do Zener este é um modelo CC e AC!
(para grandes e pequenos sinais,
não tem lei exponencial envolvida!)



A região de Ruptura Reversa

Construindo um modelo para o Diodo Zener



$$V_Z = V_{Z0} + R_Z \times I_Z$$

Em geral estipula-se um par $V_Z, I_{Z\text{teste}}$

No caso do Zener este é um modelo CC e AC!

(para grandes e pequenos sinais, não tem lei exponencial envolvida!)

A região de Ruptura Reversa

Uma Família de Diodos Zener Reais



Zeners 1N4728A - 1N4752A

Absolute Maximum Ratings*

$T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Value	Units
P_D	Power Dissipation	1.0	W
	Derate above 50°C	6.67	mW/ $^\circ\text{C}$
T_{STG}	Storage Temperature Range	-65 to +200	$^\circ\text{C}$
T_J	Operating Junction Temperature	+ 200	$^\circ\text{C}$
$R_{\theta JL}$	Thermal resistance Junction to Lead	53.5	$^\circ\text{C}/\text{W}$
$R_{\theta JA}$	Thermal resistance Junction to Ambient	100	$^\circ\text{C}/\text{W}$
	Lead Temperature (1/16" from case for 10 seconds)	+ 230	$^\circ\text{C}$
	Surge Power**	10	W

*These ratings are limiting values above which the serviceability of the diode may be impaired.

**Non-recurrent square wave PW = 8.3 ms, $T_A = 55$ degrees C.

NOTES:

- 1) These ratings are based on a maximum junction temperature of 200 degrees C.
- 2) These are steady state limits. The factory should be consulted on applications involving pulsed or low duty cycle operations.

Tolerance: A = 5%



A região de Ruptura Reversa

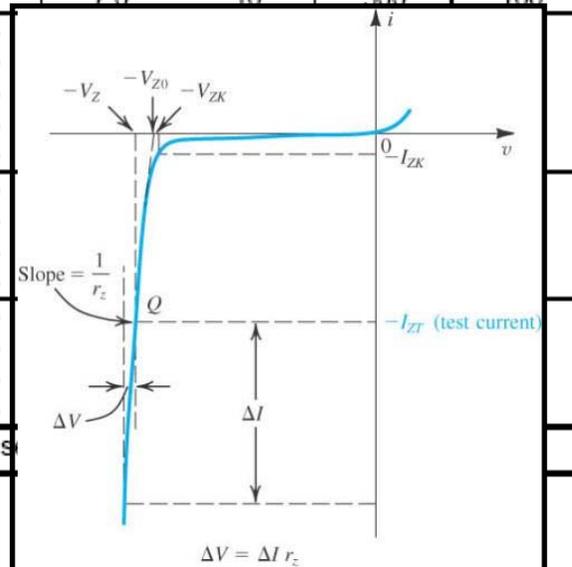
Uma Família de Diodos Zener Reais

Electrical Characteristics

$T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted

Device	V_Z (V)	Z_Z @ (Ω)	I_{ZT} (mA)	Z_{ZK} @ (Ω)	I_{ZK} (mA)	V_R @ (V)	I_R (μA)	I_{SURGE} (mA)	I_{ZM} (mA)
1N4728A	3.3	10	76	400	1.0	1.0	100	1380	276
1N4729A	3.6	10	69	400	1.0	1.0	100	1260	252
1N4730A	3.9	9.0	64	400	1.0	1.0	50	1190	234
1N4731A	4.3	9.0	58	400	1.0	1.0	10	1070	217
1N4732A	4.7	8.0	53	500	1.0	1.0	10	970	193
1N4733A	5.1	7.0	49	550	1.0	1.0	10	890	178
1N4734A	5.6	5.0	45	600	1.0	2.0	10	810	162
1N4735A	6.2	2.0	41	700	1.0	3.0	10	730	146
1N4736A	6.8	3.5	37	700	1.0	4.0	10	660	133
1N4737A	7.5	4.0	34	700	0.5	5.0	10	605	121
1N4738A	8.2	4.5	31	700	0.5	6.0	10	550	110
1N4739A	9.1	5.0	28	700	0.5	7.0	10	500	100
1N4740A	10	7.0	25	700	0.25				
1N4741A	11	8.0	23	700	0.25				
1N4742A	12	9.0	21	700	0.25				
1N4743A	13	10	19	700	0.25				
1N4744A	15	14	17	700	0.25				
1N4745A	16	16	15.5	700	0.25				
1N4746A	18	20	14	750	0.25				
1N4747A	20	22	12.5	750	0.25				
1N4748A	22	23	11.5	750	0.25				
1N4749A	24	25	10.5	750	0.25				
1N4750A	27	35	9.5	750	0.25				
1N4751A	30	40	8.5	1000	0.25				
1N4752A	33	45	7.5	1000	0.25				

V_F Forward Voltage = 1.2 V Maximum @ $I_F = 200$ mA for all 1N4700 s



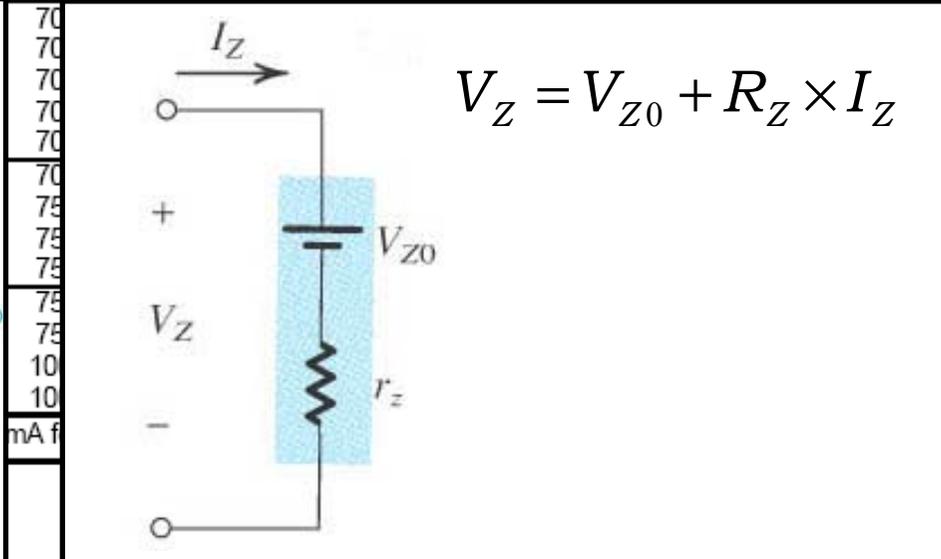
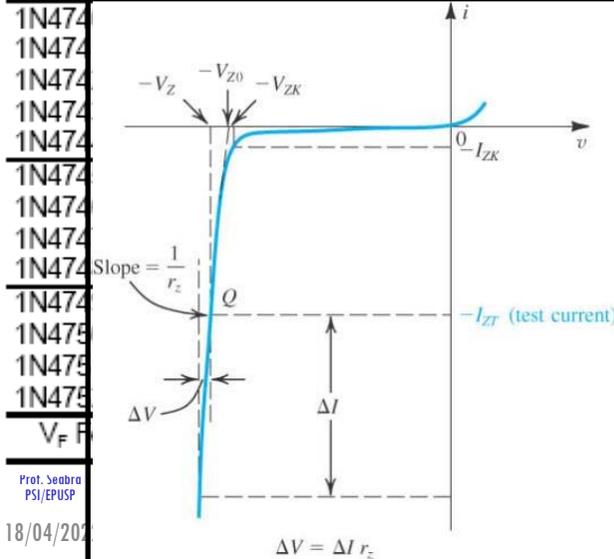
Atividade

Uma Família de Diodos Zener Reais

Electrical Characteristics

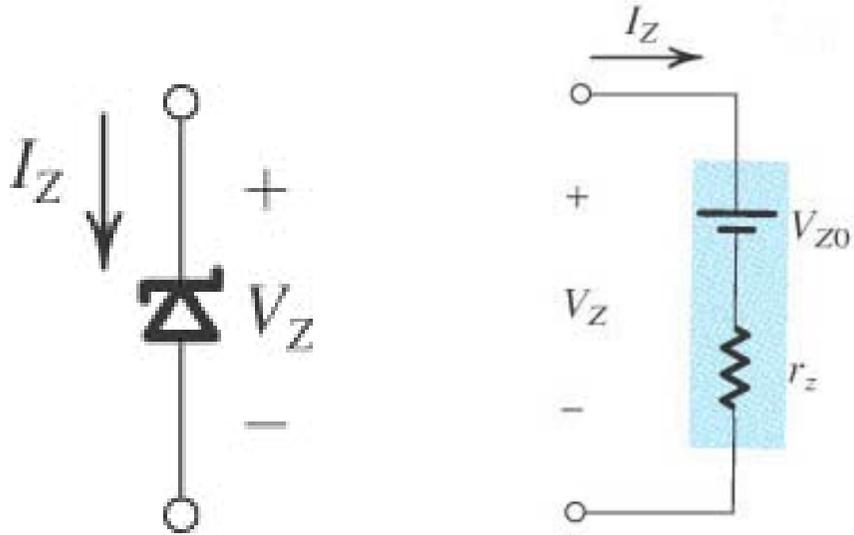
$T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted

Device	V_Z (V)	Z_Z @ (Ω)	I_{ZT} (mA)	Z_{ZK} @ (Ω)	I_{ZK} (mA)	V_R @ (V)	I_R (μA)	I_{SURGE} (mA)	I_{ZM} (mA)
1N4728A	3.3	10	76	400	1.0	1.0	100	1380	276
1N4729A	3.6	10	69	400	1.0	1.0	100	1260	252
1N4730A	3.9	9.0	64	400	1.0	1.0	50	1190	234
1N4731A	4.3	9.0	58	400	1.0	1.0	10	1070	217
1N4732A	4.7	8.0	53	500	1.0	1.0	10	970	193
1N4733A	5.1	7.0	49	550	1.0	1.0	10	890	178
1N4734A	5.6	5.0	45	600	1.0	2.0	10	810	162
1N4735A	6.2	2.0	41	700	1.0	3.0	10	730	146
1N4736A	6.8	3.5	37	700	1.0	4.0	10	660	133
1N4737A	7.5	4.0	34	700	0.5	5.0	10	605	121
1N4738A	8.2	4.5	31	700	0.5	6.0	10	550	110
1N4739A	9.1	5.0	28	700	0.5	7.0	10	500	100



A região de Ruptura Reversa

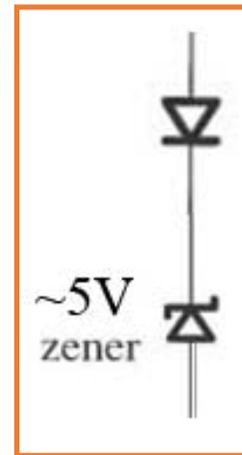
Construindo um modelo para o Diodo Zener



$$V_Z = V_{Z0} + R_Z \times I_Z$$

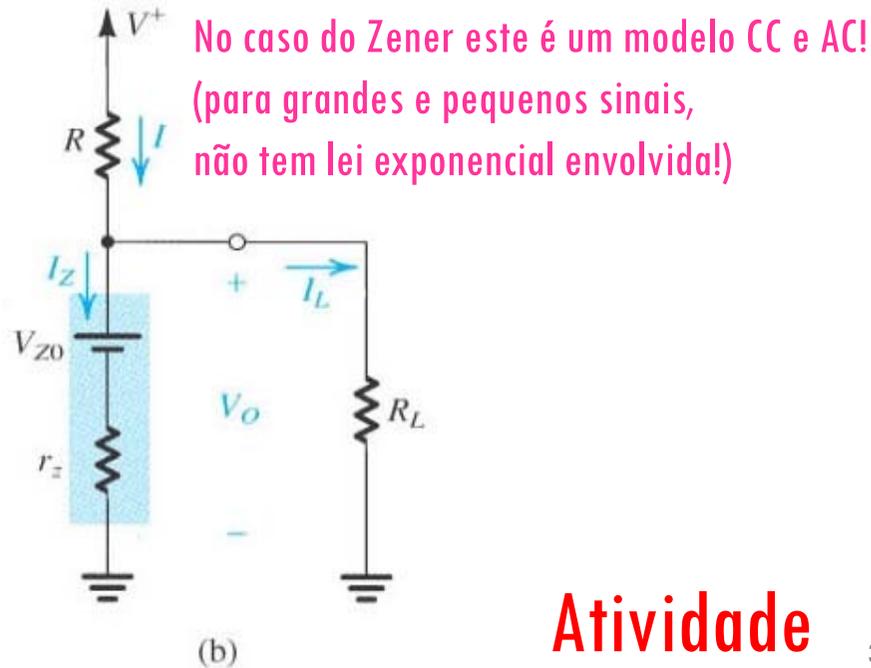
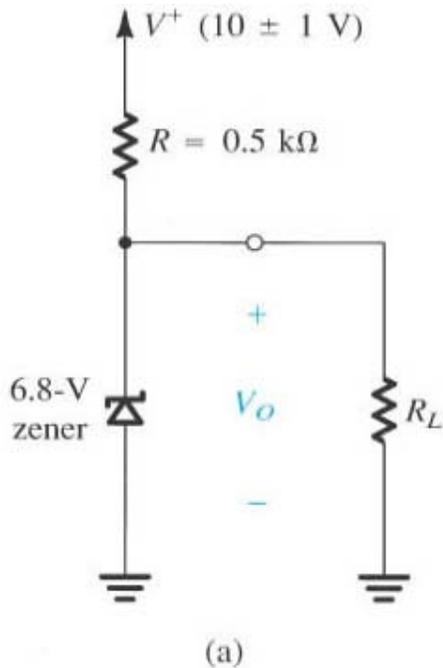
O efeito da temperatura:

- $V_Z < 5V$ o coeficiente de temperatura é negativo
- $V_Z > 5V$ o coeficiente de temperatura é positivo



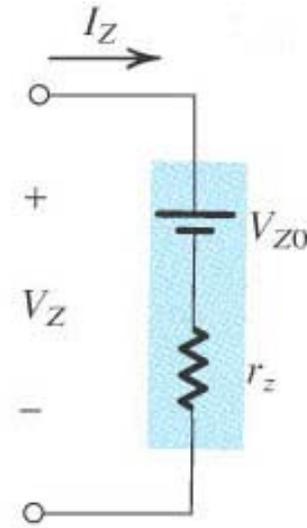
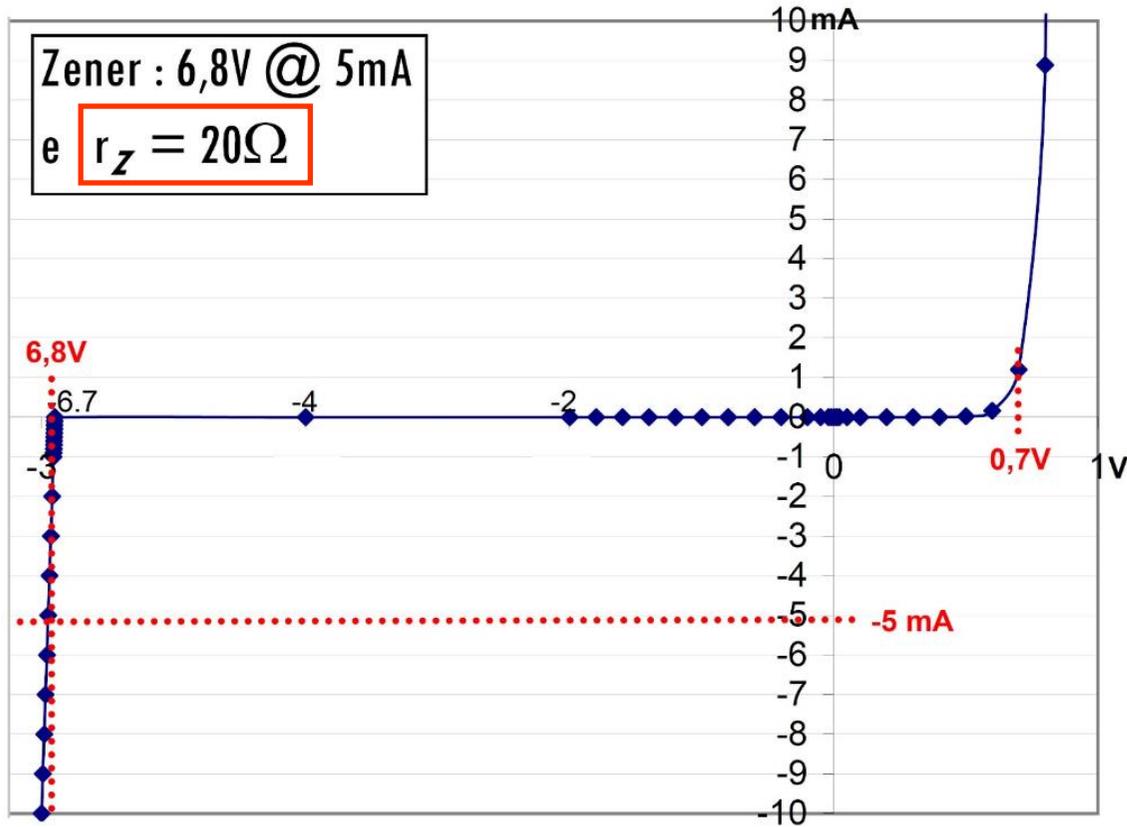
Exemplo 3.8: O diodo zener do circuito abaixo é especificado para $6,8V@5mA$, $r_z = 20\Omega$ e $I_{zk} = 0,2mA$. Veja que V^+ tem uma variação.

- (a) Determine a tensão de saída sem carga;
- (b) Determine a variação na saída para uma variação de $\pm 1V$ na entrada;
- (c) Qual a variação na tensão de saída quando se coloca uma carga que drena $1mA$?
- (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?



Atividade

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.



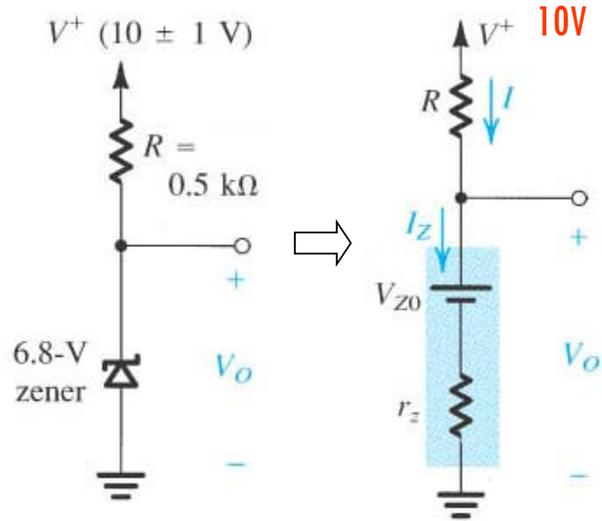
$$V_Z = V_{Z0} + r_z I_Z$$

$$6,8 = V_{Z0} + 20 \cdot 5mA$$

$$V_{Z0} = 6,7V$$

Exemplo 3.8: $6,8V@5mA$, $r_z=20\Omega$ e $I_{ZK} = 0,2mA$.

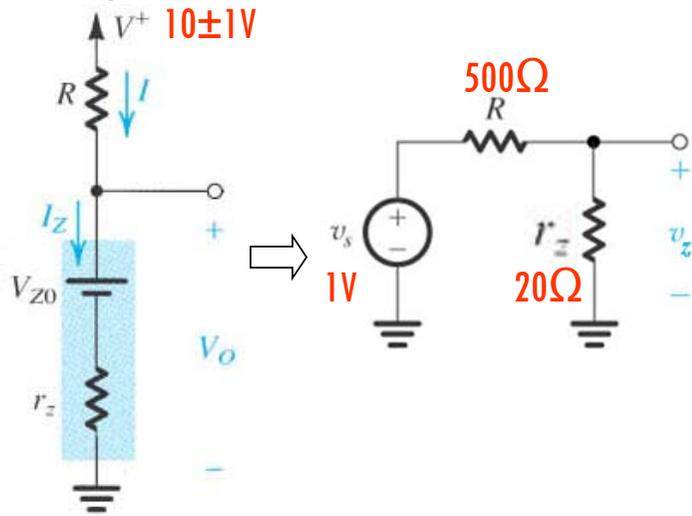
(a) V_0 ? (sem carga)



$$I_Z = \frac{(10V - 6,7V)}{R + r_z (= 500 + 20)} = 6,3mA$$

$$V_O = V_Z = 6,7 + 20 \cdot 6,3m = 6,827V$$

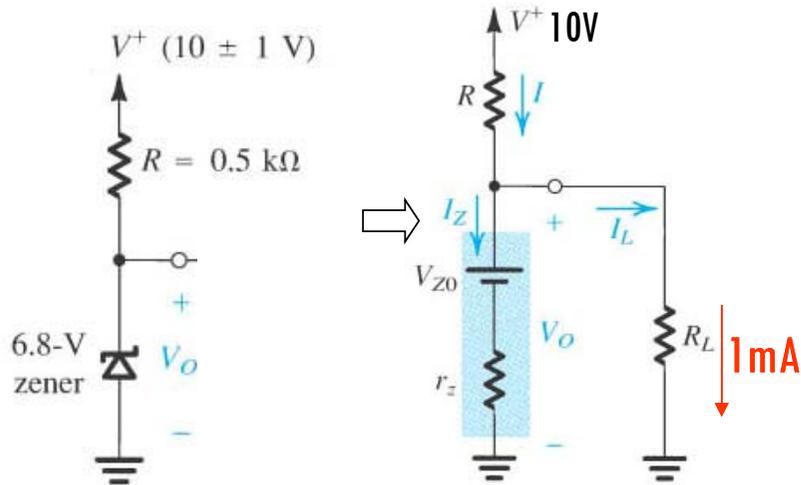
(b) Variação em V_0 para uma variação de $\pm 1V$ na entrada;



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

Exemplo 3.8: $6,8V @ 5mA$, $r_z = 20\Omega$ e $I_{ZK} = 0,2mA$.

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



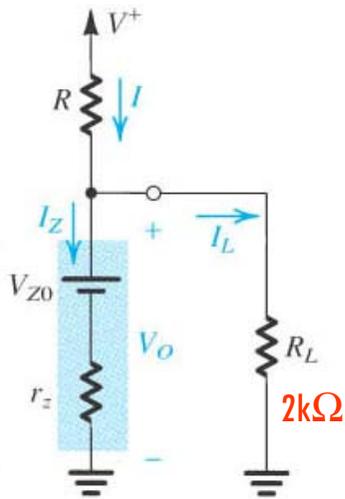
$$I_Z = I_R - I_L = (6,3 - 1,0)mA = 5,3mA$$

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

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

$$\Delta V_Z = -21mV$$

(d) Qual a variação na tensão de saída para uma carga de $2k\Omega$; **Considere inicialmente que V_Z não varia.**



$$R_L = 2k\Omega \Rightarrow I_L = 6,827 / 2k = 3,41mA$$

$$I_Z = I_R - I_L = (6,3 - 3,4)mA = 2,9mA$$

$$V_{Zc/carga} = 6,7 + 20 \cdot 2,9m = 6,758V$$

$$\Delta V_Z = V_{Zc/carga} - V_{Zs/carga} = 6,758 - 6,827$$

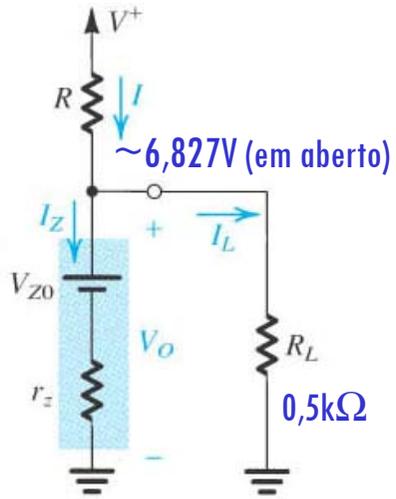
$$\Delta V_Z = -69mV$$

$$V_{Zc/carga} = 6,758V$$

$$\Rightarrow I_L = \frac{6,758}{2k} = 3,38mA$$

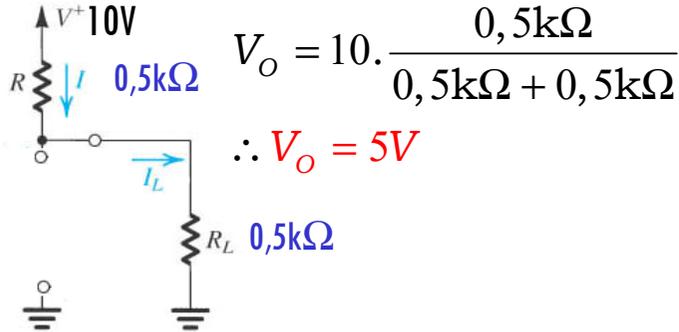
Exemplo 3.8: $6,8V @ 5mA$, $r_z = 20\Omega$ e $I_{ZK} = 0,2mA$.

(e) Qual a variação na tensão de saída para uma carga de $0,5k\Omega$; Considere $V_+ = 10V$.



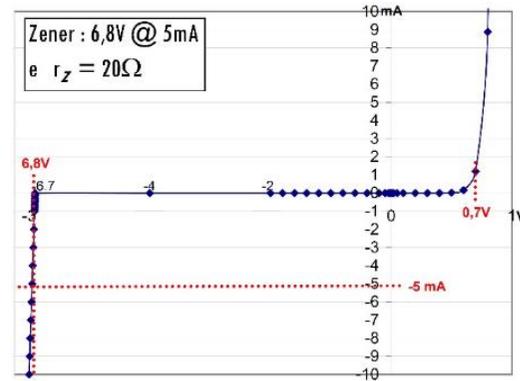
$$R_L = 0,5k\Omega \Rightarrow I_L = 6,827 / 0,5k = 13,65mA$$

$$I_Z = I_R - I_L = (6,3 - 13,65)mA = -7,35mA \text{ (zener em aberto!!!)}$$

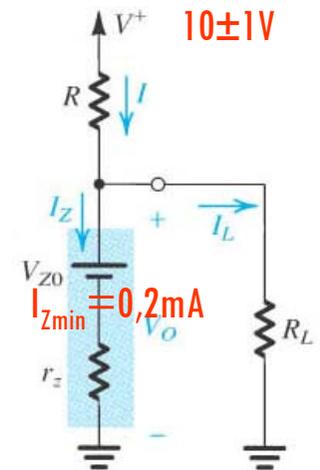


$$V_O = 10 \cdot \frac{0,5k\Omega}{0,5k\Omega + 0,5k\Omega}$$

$$\therefore V_O = 5V$$



(f) Qual o valor mínimo de carga para o circuito operar corretamente? Considere $V_+ = 10 \pm 1V$.



Para $V_+ = 10V$:

$$I_{Lmax} = I_R - I_{Zmin} = 6,3 - 0,2 = 6,1mA$$

$$R_{min} = \frac{V_Z}{I_{Lmax}} = \frac{6,827}{6,1m} = 1120\Omega$$

Pior caso $V_+ = 10V - 1V = 9V$

e $V_Z = V_{Zmin} = V_{ZO} = 6,7V$:

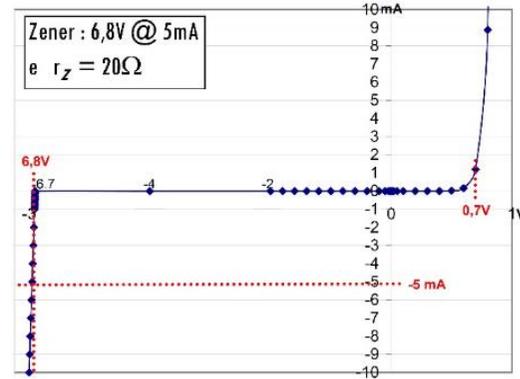
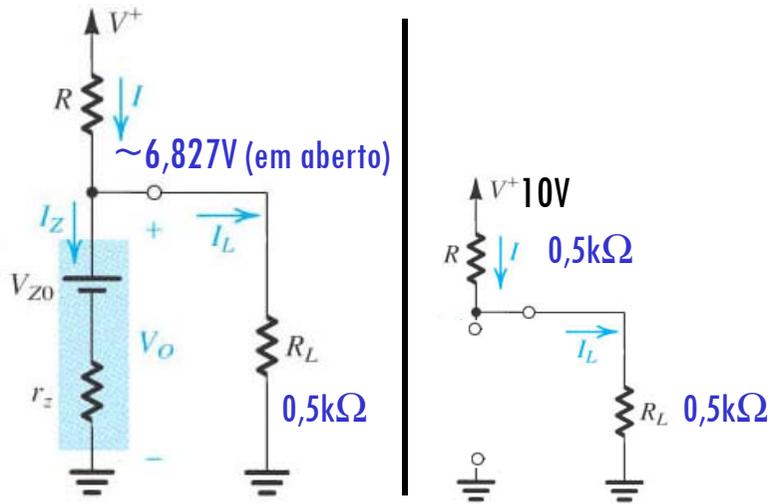
$$I_R = (9V - 6,7) / 0,5k = 4,6mA$$

$$I_{Lmax} = I_R - I_{Zmin} = 4,6 - 0,2 = 4,4mA$$

$$R_{min} = \frac{V_Z}{I_{Lmax}} = \frac{6,7}{4,4m} = 1520\Omega$$

Exemplo 3.8: $6,8V @ 5mA$, $r_z = 20\Omega$ e $I_{ZK} = 0,2mA$.

(e) Qual a variação na tensão de saída para uma carga de $0,5k\Omega$; Considere $V^+ = 10V$.



(f) Qual o valor mínimo de carga para o circuito operar corretamente? Considere $V^+ = 10 \pm 1V$.

