

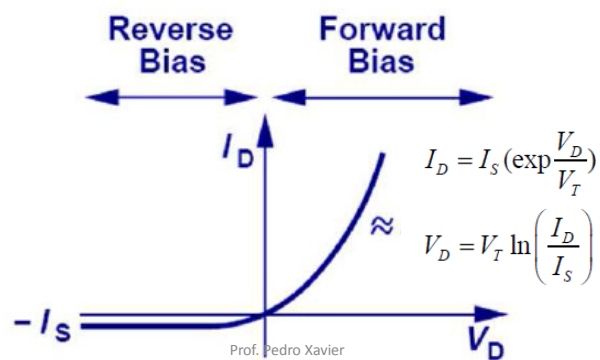
# EE 530 Eletrônica Básica I

## Modelos de Diodo

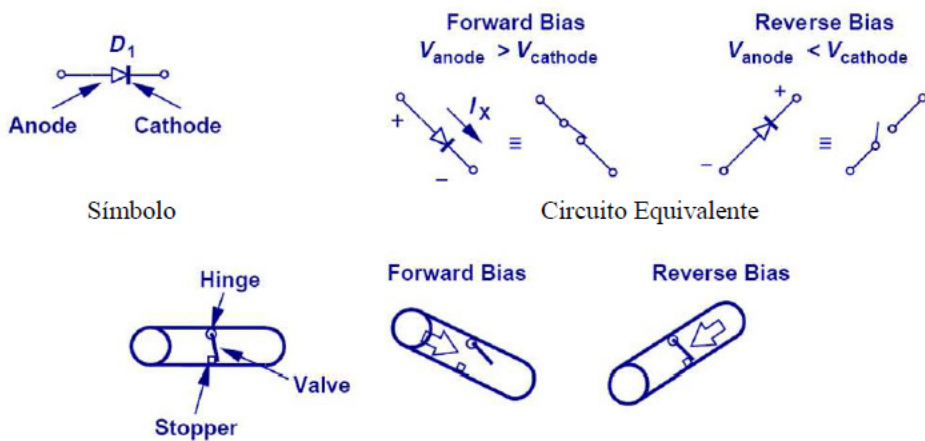
Prof. Pedro Xavier

### Equação da junção ou característica $I$ versus $V$

$$I_D = I_S \left( \exp \frac{V_D}{V_T} - 1 \right)$$

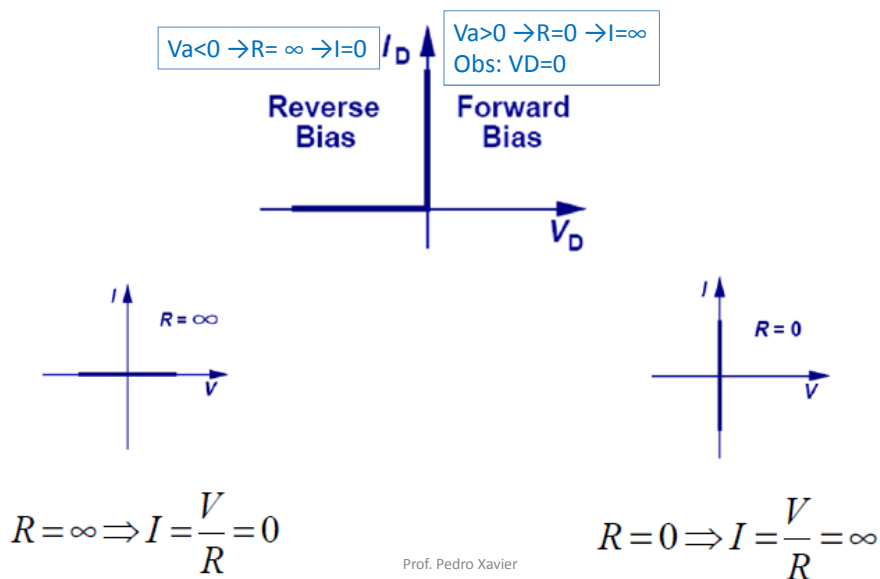


# Diodo Ideal



Obs: válido somente quando há passagem de corrente (direta ou reversa) no diodo real.  
 Quando não ocorre passagem de corrente, substituir o diodo por uma resistência altíssima.

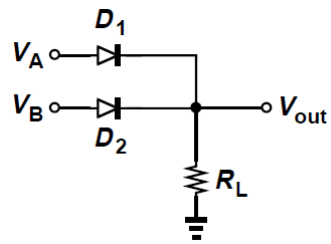
## Característica $I$ versus $V$ de um diodo ideal



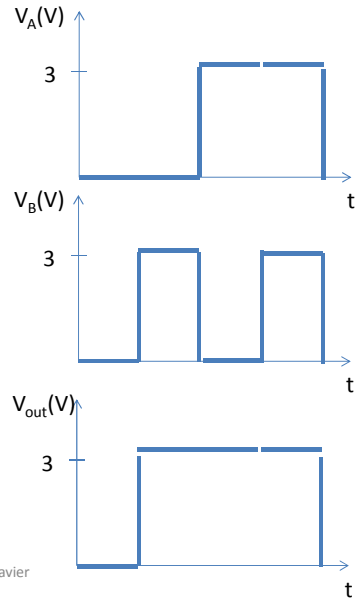
Prof. Pedro Xavier

### Exercício

- Determine  $V_{out}$

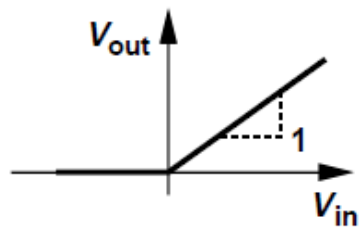
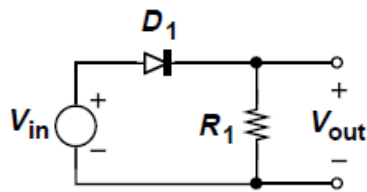


PORTA OR



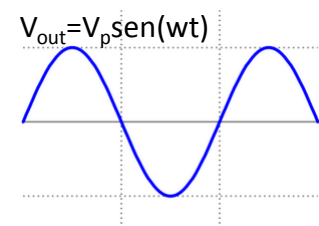
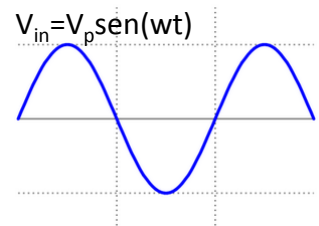
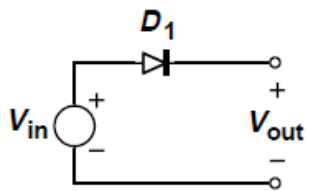
Prof. Pedro Xavier

### Característica entrada/saída



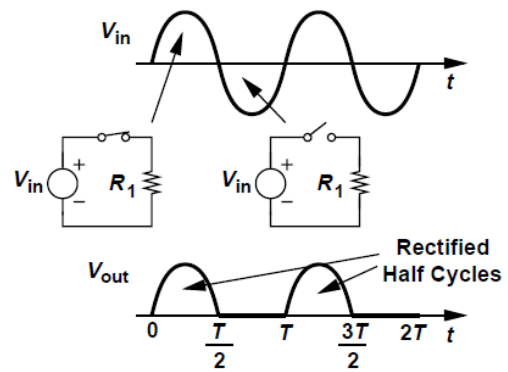
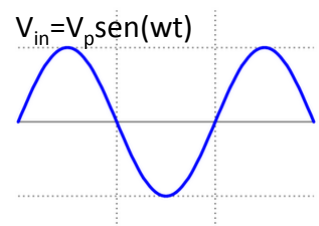
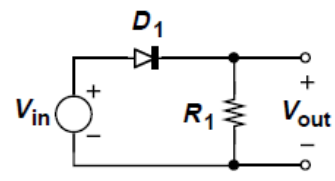
Prof. Pedro Xavier

## Diodo como retificador



Prof. Pedro Xavier

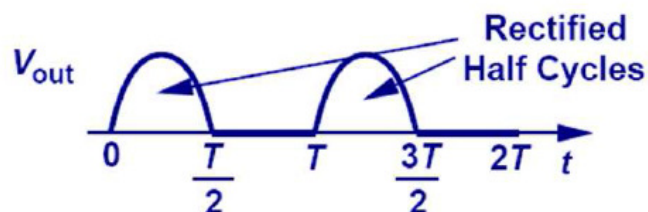
## Diodo como retificador



$V_{out} = V_p \text{sen}(wt), V_{in} > 0$   
 $V_{out} = 0, V_{in} < 0$

Prof. Pedro Xavier

## Cálculo do valor médio da onda retificada

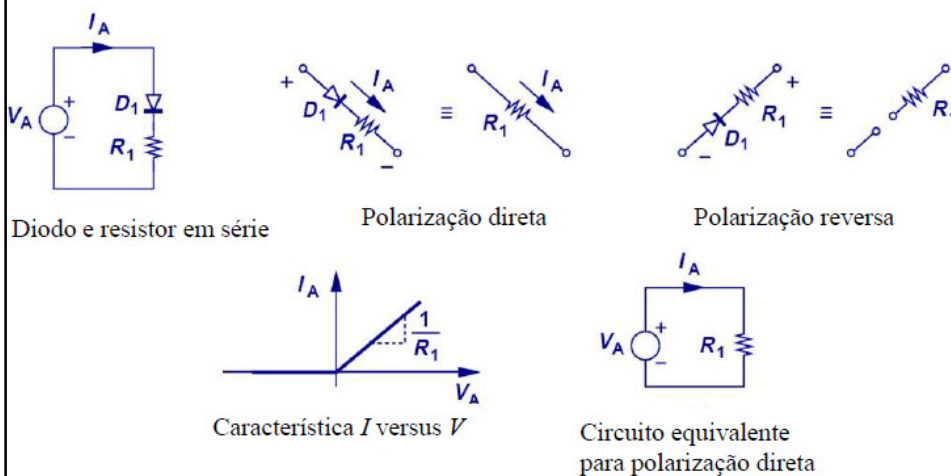


$$V_{out,med} = \frac{1}{T} \int_0^T V_{out}(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} V_p \sin \omega t dt$$

$$= \frac{1}{T} \frac{V_p}{\omega} [-\cos \omega t]_0^{T/2} = \frac{V_p}{\pi}$$

Prof. Pedro Xavier

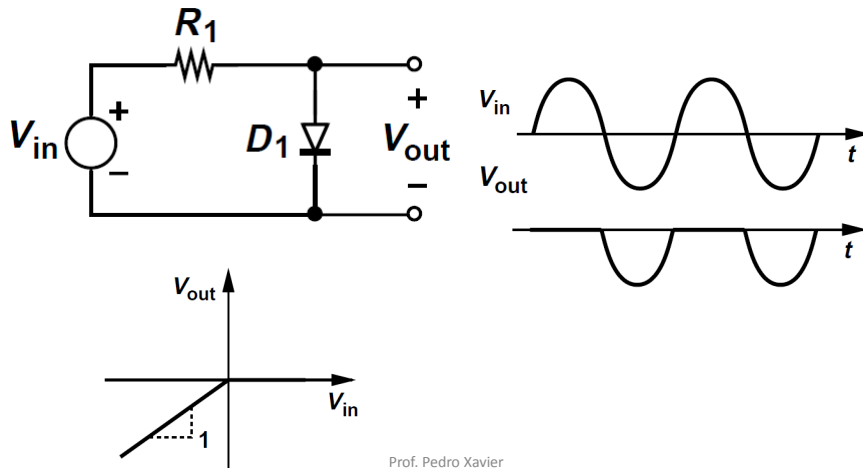
## Circuito diodo-resistor série



Prof. Pedro Xavier

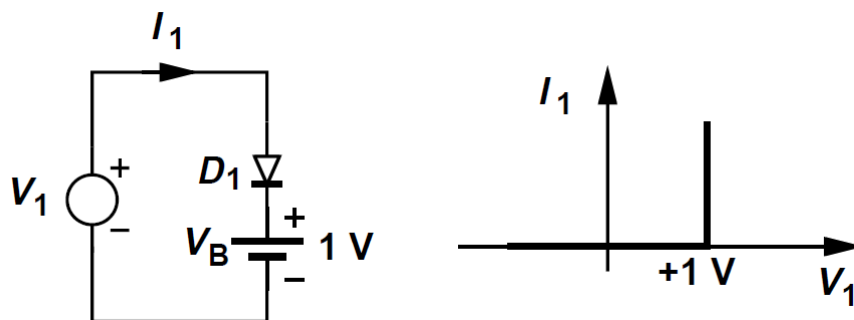
## Exercício

- Determine  $V_{out}$  e a relação entrada-saída



Prof. Pedro Xavier

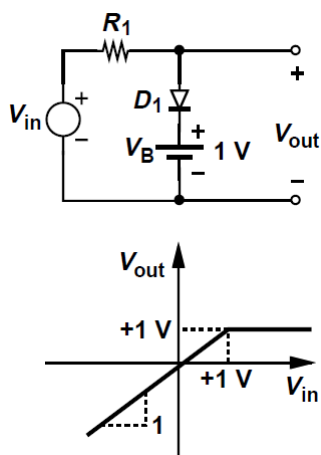
## Circuito diodo-bateria (limitador)



Prof. Pedro Xavier

## Exercício

- Determine  $V_{out}$  e a relação entrada-saída



Prof. Pedro Xavier

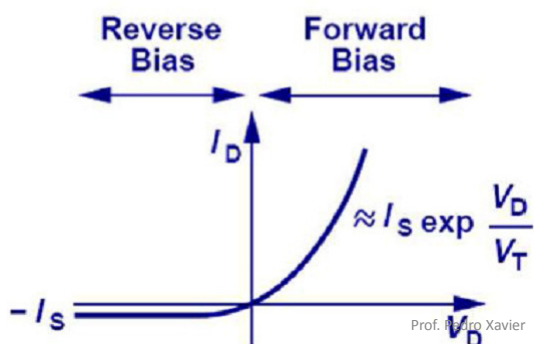
## Modelos de diodo

- Modelo exponencial

$$I_D = I_S \left( \exp \frac{V_D}{V_T} - 1 \right)$$

$$I_D = I_S \left( \exp \frac{V_D}{V_T} \right)$$

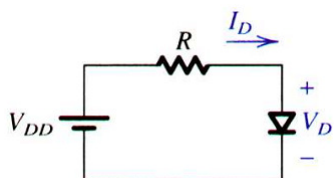
$$V_D = V_T \ln \left( \frac{I_D}{I_S} \right)$$



Prof. Pedro Xavier

## Modelos de diodo

- Modelo exponencial



$I_D$   $V_D$  ?

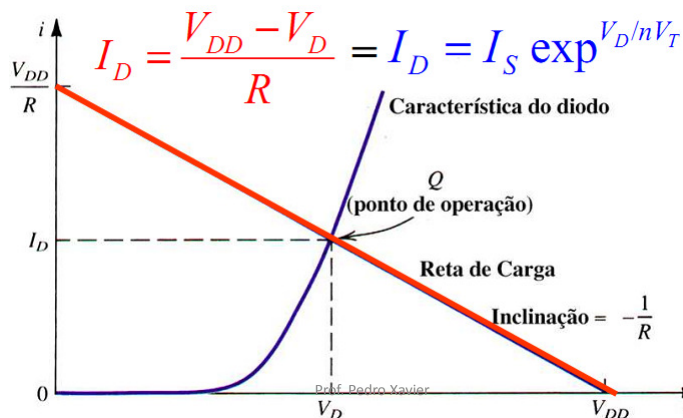
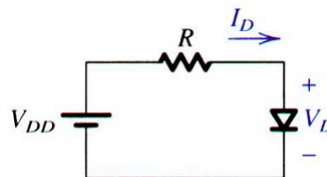
$$I_D = I_S \exp^{V_D/V_T}$$

$$I_D = \frac{V_{DD} - V_D}{R}$$

Prof. Pedro Xavier

## Modelos de diodo

- Modelo exponencial
  - Resolução por método gráfico

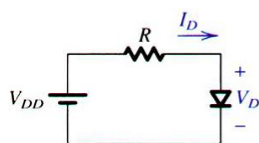




## Modelos de diodo

- Modelo exponencial: Análise iterativa

Determine os valores da corrente  $I_D$  e da tensão  $V_D$  para o circuito com  $V_{DD} = 5 \text{ V}$  e  $R = 1 \text{ k}\Omega$ . Suponha que a corrente do diodo é 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 na corrente.

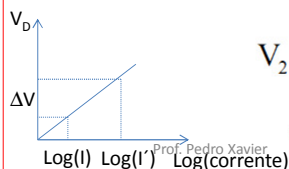


$$\Delta V = 0,1(\log I' - \log I)$$

$$\Delta V = 0,1 \log \frac{I'}{I}$$

$$V_D' = V_D + \Delta V$$

$$V_D' = V_D + 0,1 \log \frac{I'}{I}$$



$$I_D = \frac{V_{DD} - V_D}{R}$$

$$= \frac{5 - 0,7}{1 \text{ k}} = 4,3 \text{ mA}$$

$$V_2 = V_1 + 0,1 \log \frac{I_2}{I_1}$$

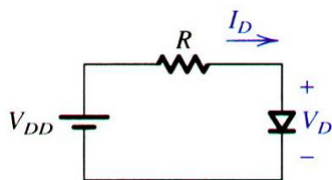
$$V_2 = 0,7 + 0,1 \log \left[ \frac{4,3}{1} \right]$$

$$= 0,763 \text{ V}$$

## Modelos de diodo

- Modelo exponencial

– Resolução por método numérico



$$I_D = \frac{V_{DD} - V_D}{R} = I_D = I_S \exp^{V_D/nV_T}$$

$$\frac{V_{DD} - V_D}{R} - I_S \exp^{V_D/nV_T} = 0$$

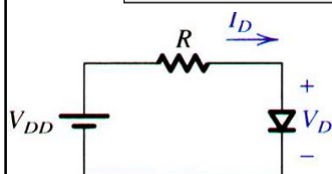
Prof. Pedro Xavier

## Modelos de diodo

### Análise rápida (por inspeção)

A análise rápida usa modelos simplistas para o diodo

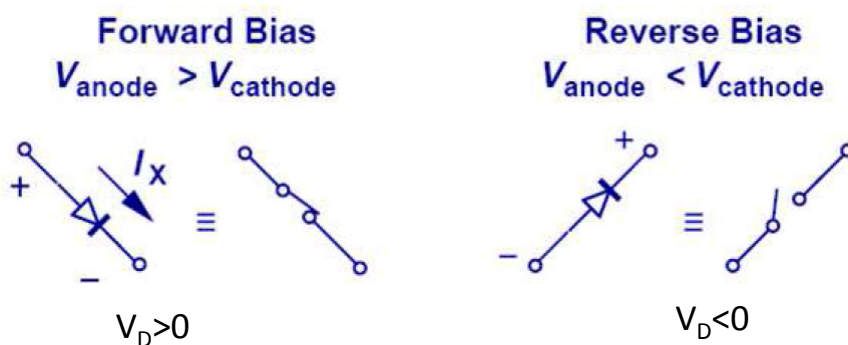
Existe uma hierarquia de modelos de diodos, sendo a escolha do modelo apropriado ditada pela aplicação.



Prof. Pedro Xavier

## Modelos de diodo

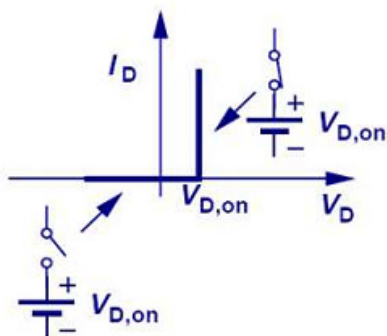
- Modelo ideal



Obs: válido somente quando há passagem de corrente (direta ou reversa) no diodo real.  
 Quando não ocorre passagem de corrente, substituir o diodo por uma resistência altíssima.

## Modelos de diodo

- Modelo com queda de tensão constante



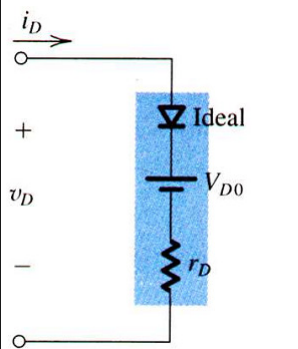
$$R = \infty \Rightarrow I = \frac{V}{R} = 0, V_D < V_{D,on}$$

$$R = 0 \Rightarrow I = \frac{V}{R} = \infty, V_D > V_{D,on}$$

Prof. Pedro Xavier

## Modelos de diodo

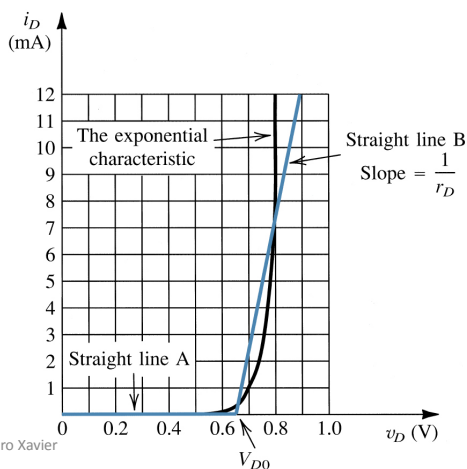
- Modelo de segmentos lineares (fonte resistência)



$$i_D = 0, v_D \leq V_{D0}$$

$$i_D = (v_D - V_{D0})/r_D, v_D \geq V_{D0}$$

Prof. Pedro Xavier



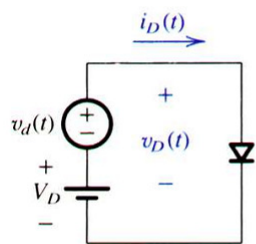
# Afinal, qual modelo utilizar



*A questão sobre a escolha do modelo numa aplicação particular é algo que o projetista enfrenta repetidamente, não somente com diodos mas com qualquer elemento de circuito. O problema está em encontrar um compromisso adequado entre exatidão e complexidade. A capacidade de escolher o modelo apropriado para um dispositivo aumenta com a prática e com a experiência.*

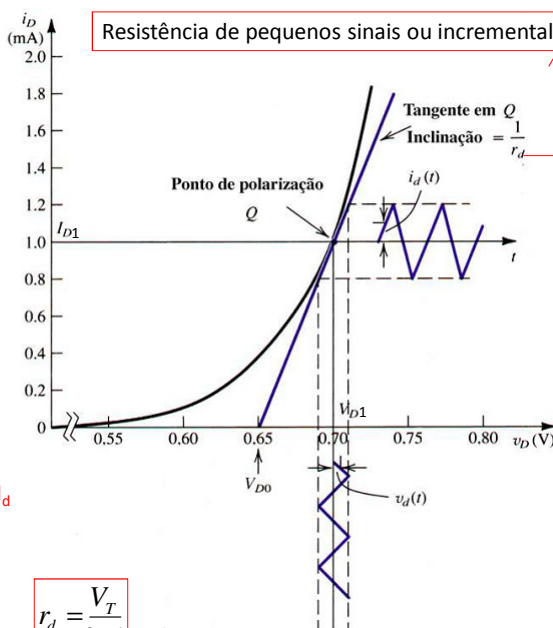
## Modelo para pequenos sinais

$$(v_d(t) \ll V_T)$$

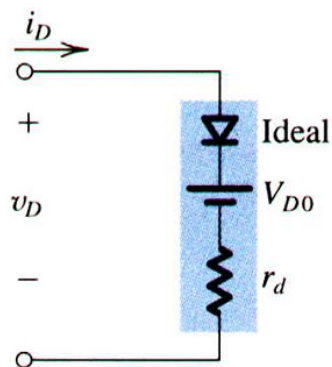


$$\frac{1}{r_d} = \frac{dI_D}{dV_D} \Big|_{V_D=V_{D1}} = \frac{I_S}{V_T} \exp \frac{V_{D1}}{V_T}$$

$$\frac{1}{r_d} = \frac{I_d}{V_T} \Rightarrow r_d = \frac{V_T}{I_d}$$



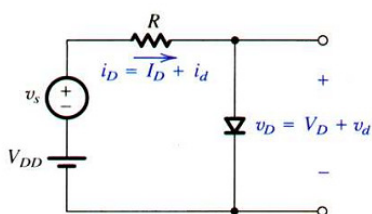
### Modelo do diodo para pequenas variações próximas do ponto de polarização $Q$ .



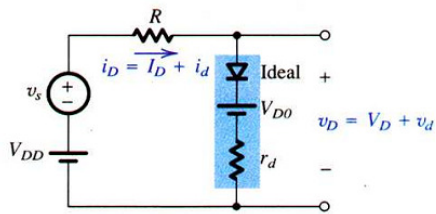
$$\begin{aligned}
 v_D &= V_{D0} + i_D r_d \\
 &= V_{D0} + (I_D + i_d) r_d \\
 &= (V_{D0} + I_D r_d) + i_d r_d \\
 &= V_D + i_d r_d
 \end{aligned}$$

$V_{D0}$  é determinado pelo ponto de polarização e pela resistência incremental

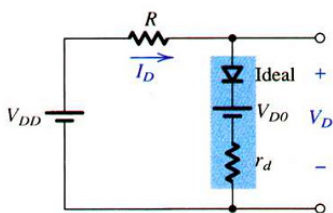
### Formas de análise



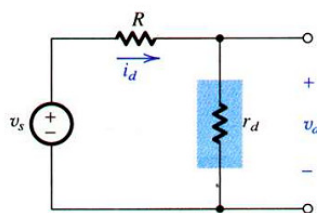
Circuito com valores cc e de sinal



Substituição do diodo pelo modelo



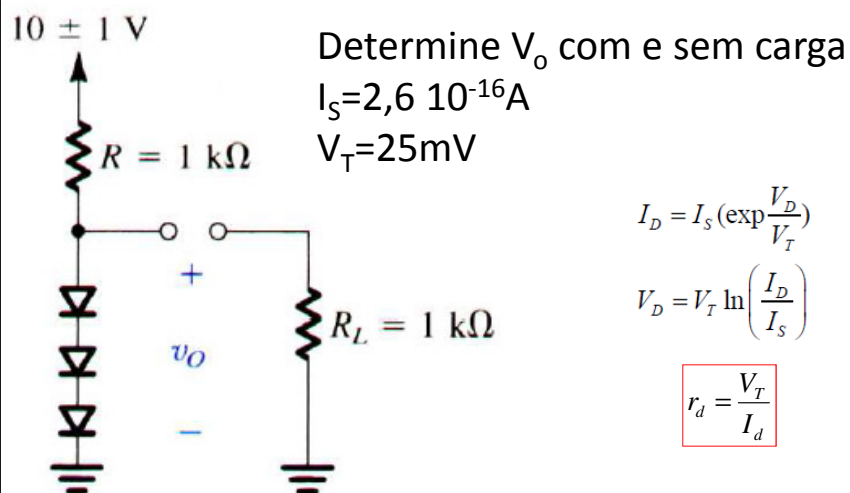
Análise cc



Análise de sinal

Prof. Pedro Xavier

## Regulador de tensão a diodo

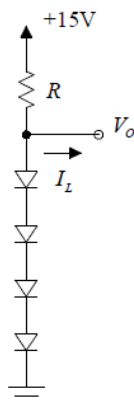


Prof. Pedro Xavier

### Exercício:

Dimensione os componentes do circuito de modo que  $V_o = 3 \text{ V}$  quando  $I_L = 0$ .  $V_o$  varia em  $40 \text{ mV}$  por  $1 \text{ mA}$  de variação na corrente de carga.

Calcule o valor de  $R$  e a seção da junção de cada diodo (suponha diodos idênticos) em relação a um diodo com queda de tensão de  $0,7 \text{ V}$  para  $1 \text{ mA}$  de corrente.



$$I_D = I_S \exp^{V_D/V_T}$$

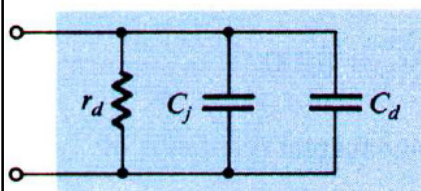
$$r_d = \frac{V_T}{I_d}$$

$$V_T = 25 \text{ mV}$$

Prof. Pedro Xavier

## Modelo do Diodo em Altas Frequências para Pequenos Sinais \*

Ponto de polarização:  $I_D, V_D$



$$r_d = V_T / I_D$$

$$C_d = (\tau_T / V_T) I_D, \text{ para } V_D > 0$$

$$C_j = C_{j0} / \left( 1 - \frac{V_D}{V_0} \right)^m \text{ para } V_D < 0$$

$$C_j \cong 2C_{j0}, \text{ para } V_D > 0$$

Prof. Pedro Xavier

## Fontes de figuras da aula

- Aula do prof. Fabiano Fruett
- Introdução à física dos semicondutores (H.A. Mello)
- Fundamentos da microeletrônica (Razavi)
- Microeletrônica (Sedra)

Prof. Pedro Xavier

## Sugestão de estudo

- Razavi, Cap. 3 até seção 3.4
- Sedra/Smith Cap. 3 até seção 3.4
  - Exercícios e problemas correspondentes

Prof. Pedro Xavier