EL5410 - Eletronica I

Livro texto: Microeletrônica
Sedra / Smith

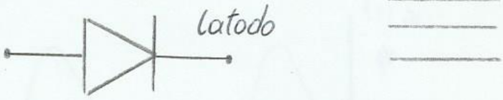
Aula 1 (p. 88 a 93)

Característica do diodo ideal (Funcionamento como chave)

- Elemento não linear (pois a variação da tensão e corrente não é linear)
- Possui dois terminais
- Símbolo

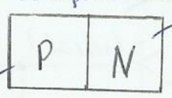
(+ ou P)
Anodo

(- ou N)
Catodo



("K" → catodo)

Junção PN

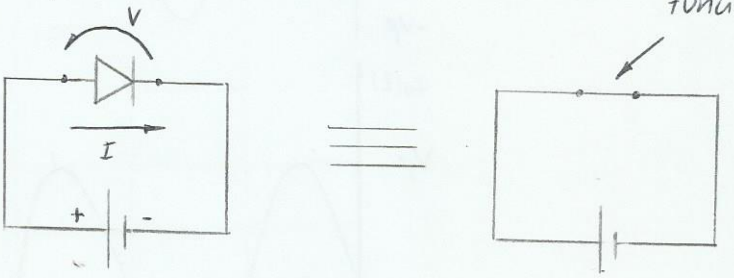


Material tipo N
(Catodo)

Material tipo P
(Anodo)

- Polarização

Direta

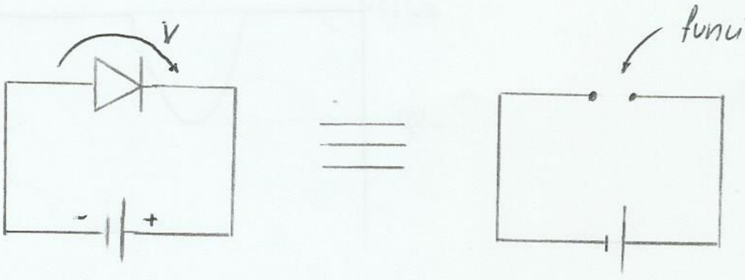


funcionamento como chave fechada ("curto")

(I ≠ ∅)

(Fig. 3.1)

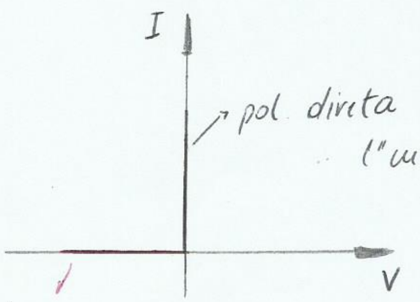
Reversa



funcionamento como chave aberta

(I = ∅)

- Curva característica (Fig. 3.1)



pol. direta (R=0Ω)
("curto")

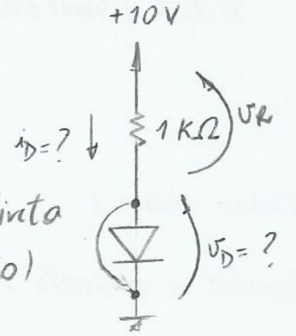
pol. reversa
(R= ∞ Ω) ∴ I=0A

Obs.

- Quando a diferença entre o anodo e catodo for maior que ∅, é direta, caso contrário é reversa

Exemplos: Determine v_D e i_D para os circuitos abaixo. (Fig. 3.2)

a)



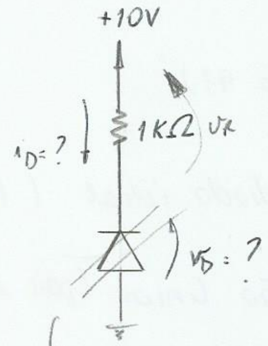
pol. direta
(curto)

$\underline{v_D = 0V}$

$i_D = \frac{v_R}{R} = \frac{10-0}{1K}$

$\underline{i_D = 10 mA}$

b)



pol. reversa
(aberto)

$\underline{i_D = 0 A}$

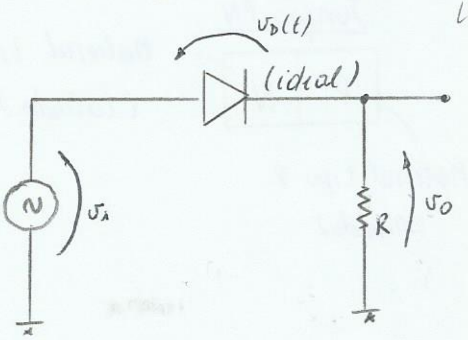
$v_D + v_R = 10$

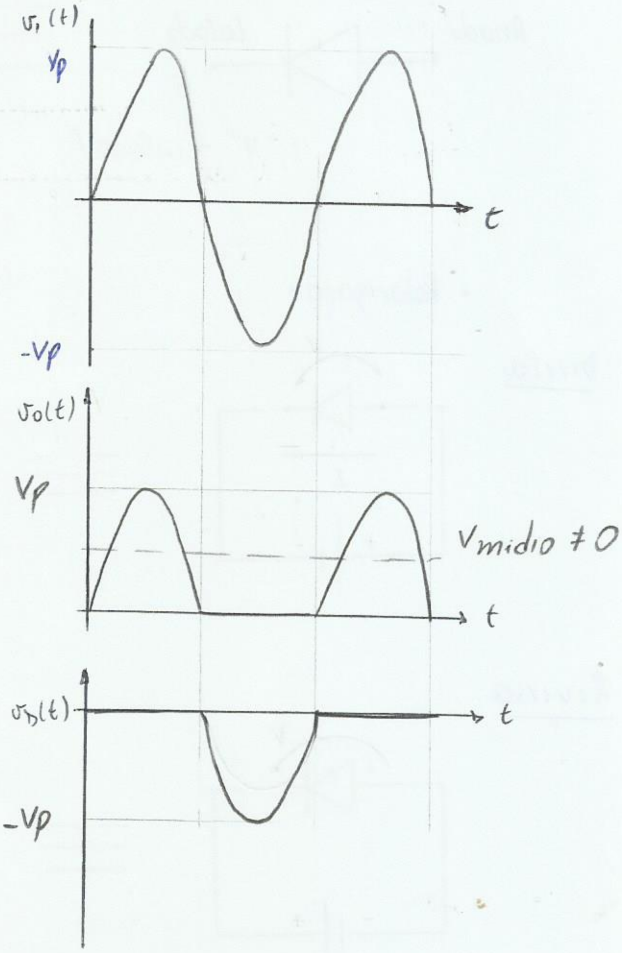
x como $i_D = 0 \rightarrow v_R = 0$

$\underline{v_D = 10 V}$

• Uma aplicação simples: Retificação

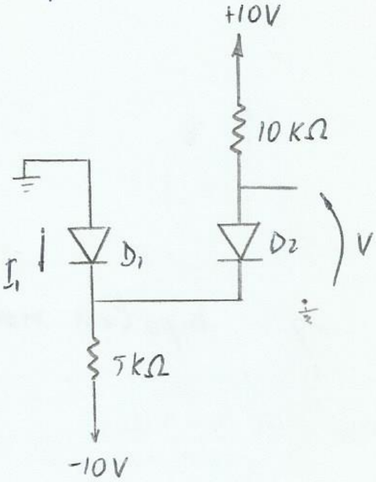
↳ "criar um valor médio diferente de Ø"





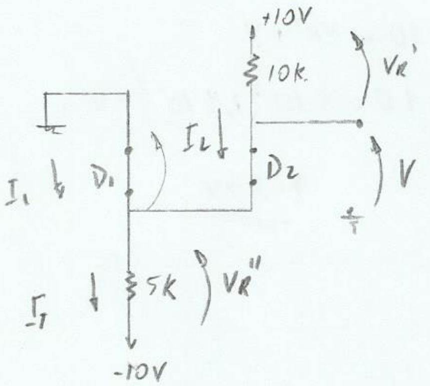
Exemplo 3.2   Supondo os diodos ideais, calcule os valores de I_1 e V

a)



Solução

1ª hipótese $\begin{cases} D_1 : \text{conduzindo} \\ D_2 : \text{conduzindo} \end{cases}$



$V = 0V$

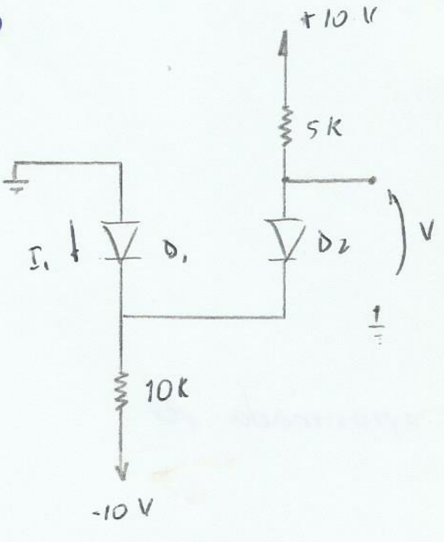
$$I_2 = \frac{V_R'}{10K} = \frac{10-0}{10K}$$

$\therefore$ $I_2 = 1\,mA$

$$I_T = \frac{V_R''}{5K} = \frac{0-(-10)}{5k} = 2mA$$

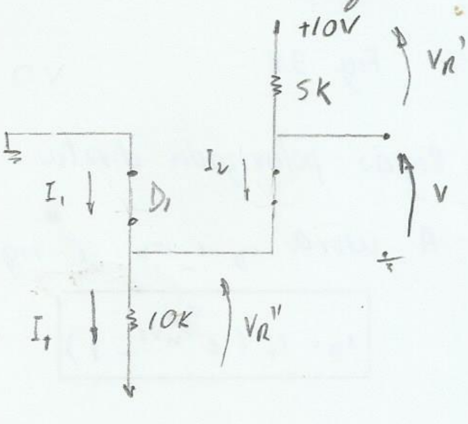
$I_1 = I_T - I_2$ $I_1 = 1mA$

b)



Solução

1º hipótese $\begin{cases} D_1 = \text{conduzindo} \\ D_2 = \text{conduzindo} \end{cases}$



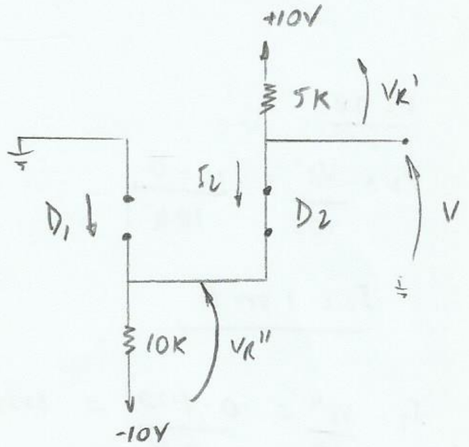
$V = 0\,V$

$$I_2 = \frac{V_R'}{5k} = \frac{10-0}{5k} = 2\,mA$$

$$I_T = \frac{V_R''}{10k} = \frac{0-(-10)}{10K} = 1\,mA$$

$I_1 = I_T - I_2 \therefore I_1 = -1\,mA$? hipótese não válida

2ª hipótese $\begin{cases} D_1 = \text{cortado} \\ D_2 = \text{conduzindo} \end{cases}$



$I_1 = 0\,A \therefore I_2 = I_T$

$$I_T = \frac{10-(-10)}{5k+10K} = 1{,}33\,mA$$

$10 = V_R' + V$

$10 = 5 \cdot 10^3 \cdot 1{,}3 \cdot 10^{-3} + V$

$V = 3{,}3\,V$

Aula 2 (p. 93 a 96)

Características Elétricas do dado de junção

Diodos Reais

Fig 3.7

Fig. 3.8

- Região polarizada direta

A curva i_D e v_D é rigorosamente aproximada por:

$$\boxed{i_D = I_S \left(e^{v_D/nV_T} - 1\right)} \qquad (3.1)$$

Onde:

I_S: corrente de sobrecarga reversa
- $\rightarrow \cong 10^{-15}$ A
- $\rightarrow$ Muito influenciada pela temperatura
- $\rightarrow$ dobra a cada 5°C de aumento da temperatura

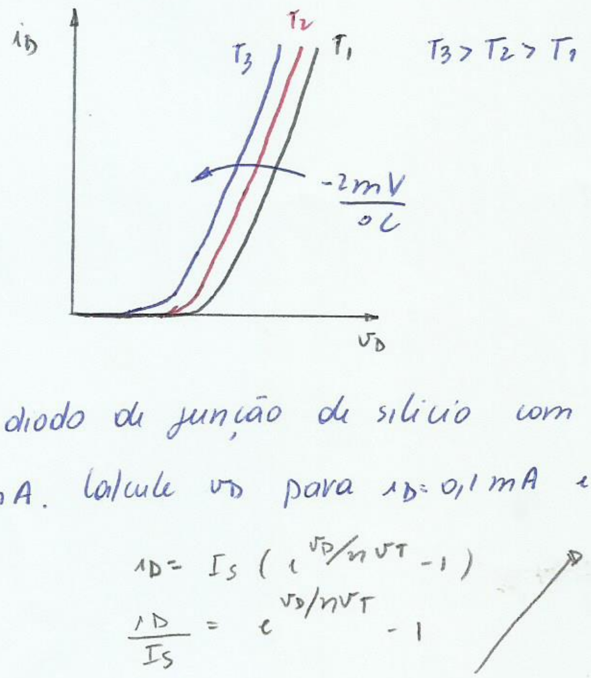
V_T: Tensão térmica

$$\boxed{V_T = \frac{kT}{q}} \quad (3.2)$$

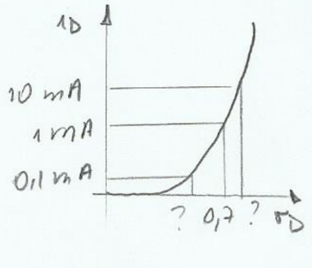
Exemplo: $T = 20°C \rightarrow 293$ K $\therefore$ $V_T = 25 mV$

k = constante de Boltzmann $= 1{,}38 \times 10^{-23}$ J/K
T = Temperatura em kelvin (K)
q = carga elétrica $= 1{,}6 \times 10^{-19}$ C
n = 1 a 2 (fornecido pelo fabricante)

- Influência da temperatura



Exemplo: Um diodo de junção de silício com $n = 1$ tem $v_D = 0{,}7$ V para $i_D = 1 mA$. Calcule v_D para $i_D = 0{,}1 mA$ e $i_D = 10 mA$



$$i_D = I_S \left(e^{v_D / n v_T} - 1 \right)$$

$$\frac{i_D}{I_S} = e^{v_D / n v_T} - 1$$

$$e^{v_D / n v_T} = \frac{i_D}{I_S} + 1$$

$$\frac{v_D}{n v_T} = \ln \left(\frac{i_D}{I_S} + 1 \right)$$

$$v_D = \ln \left(\frac{i_D}{I_S} + 1 \right) \times n v_T$$

Através de $i_D = 1 mA$ e $v_D = 0{,}7$ V temos: $I_S = \dfrac{i_D}{e^{v_D / n v_T} - 1} = \dfrac{1 \cdot 10^{-3}}{e^{\frac{0{,}7}{0{,}025}} - 1} = 6{,}91 \cdot 10^{-6}$ A

$\therefore$ Para $i_D = 10 mA \rightarrow v_D = \ln \left(\dfrac{10^{-3}}{6{,}91 \cdot 10^{-6}} + 1 \right) \cdot 1 \times 0{,}025 = 0{,}76$ V e $i_D = 0{,}1 mA \rightarrow v_D = 0{,}60$

- Polarização reversa

$$i_D = I_S \cdot \left(e^{v_D/nV_T} - 1\right) = I_S\, e^{v_D/nV_T} - I_S$$

para $v_D < 0 \rightarrow \boxed{i_D \cong -I_S}$

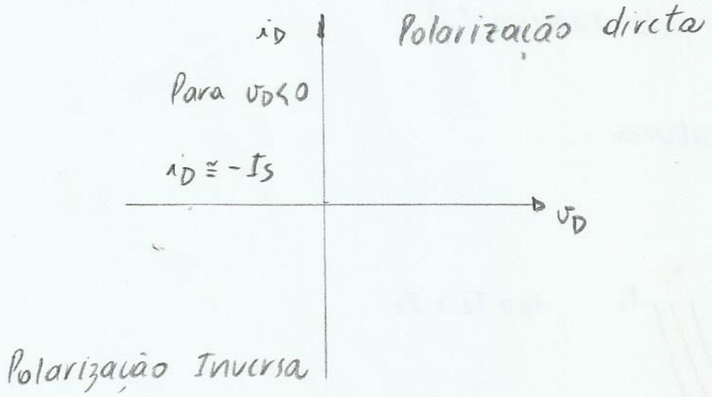
- Ruptura reversa

A característica $i_D \times v_D$ do diodo na ruptura reversa é quase uma linha vertical, ou seja, a tensão permanece constante para uma grande variação de corrente. Esta característica será utilizada na regulação de tensão com o diodo Zener

Lista 1 (15/08)

pag 92 → ex 3,4

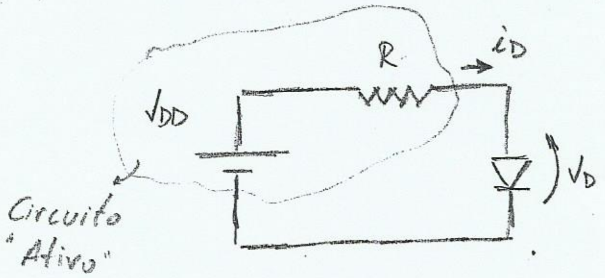
pag 95 → ex 3,6 ; 3,7 ; 3,8



ELETRÔNICA I

Análise de circuitos com diodos:

- Região direta de trabalho;
- Metodos de análise de circuitos com diodos:



$i_D = ?$
$V_D = ?$

Para $V_{DD} > 0{,}5 \rightarrow$ diodo está no início da condução

$$i_D = i_S \cdot \left(e^{V_D / n.V_T} - 1\right) \rightarrow i_D > i_S$$

$$\therefore \boxed{i_D \cong i_S \cdot e^{V_D / n.V_T}}$$

A partir da malha:

$$\boxed{i_D = \frac{V_{DD} - V_D}{R}}$$

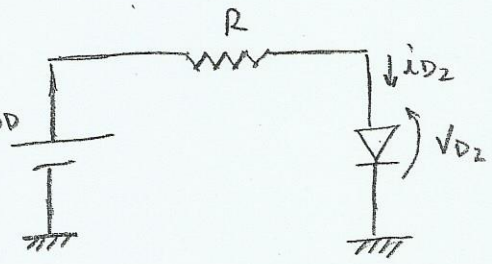
$\therefore$ Duas equações, 2 variaveis

Como determinar V_D e i_D?

- Método gráfico;
- Método interativo;
- Modelos equivalentes;

Exemplo 3.4

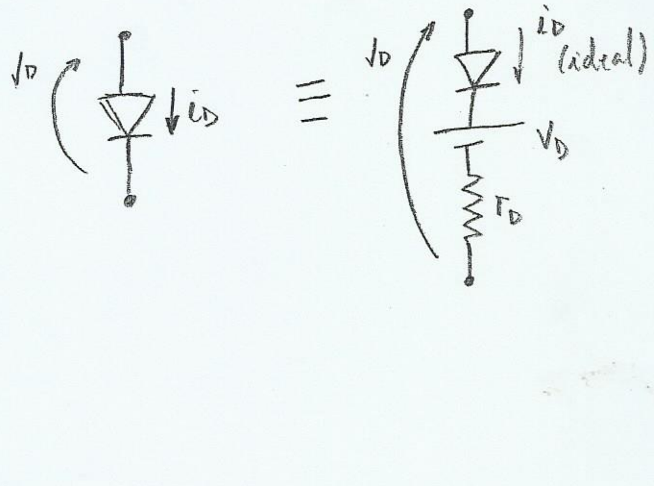
Determinar os valores de V_D e i_D para o circuito abaixo, sabendo-se que $V_{DD} = 5V$, $R = 1k\Omega$, $i_{D1} = 1mA \rightarrow V_{D1} = 0,7V$, $\Delta V_D = 0,1 V/década$. Resolver pelo método iterativo.



MODELOS SIMPLIFICADOS

• Modelos dos segmentos de reta.

A relação exponencial da curva $i_D \times V_D$ é aproximada por dois se
de reta.



$$\boxed{V_D = V_{D0} + r_D \cdot i_D}$$

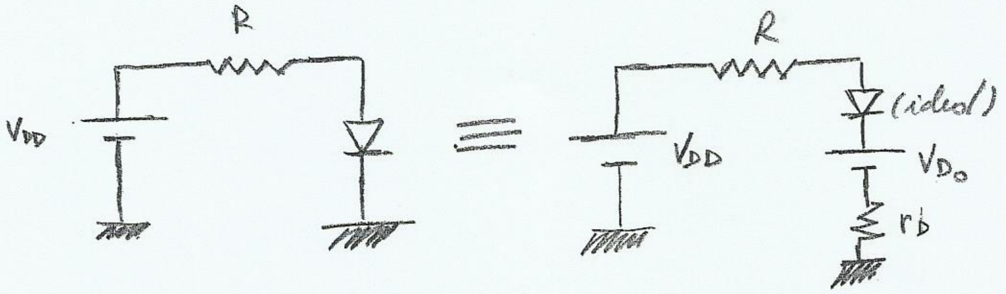
Exemplo 3.5:

Refazer exemplo 3.4 considerando modelo linear do diodo

Dados: $V_{D0} = 0,65\,V$

$r_d = 20\,\Omega$

$V_D = 0,7\,V \longrightarrow i_d = 1\,mA$ $\qquad \Delta V_D = 0,1\ V/\text{década}$



$$V_{DD} = R \cdot i_D + V_{D0} + r_D \cdot i_D$$

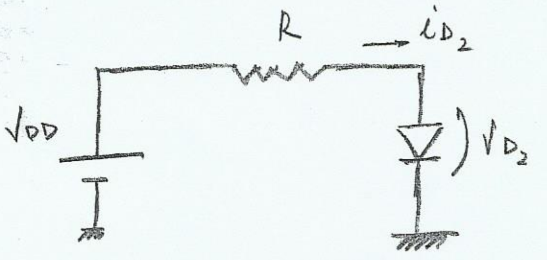
$$i_D = \frac{V_{DD} - V_{D0}}{R + r_D} = \frac{5 - 0,65}{1 \cdot 10^3 + 20} \Rightarrow \boxed{i_D = 4,26\,mA}$$

$$V_D = V_{D0} + r_D \cdot i_D$$

$$V_D = 0,65 + 20 \cdot 4,26 \cdot 10^{-3}$$

$$\boxed{V_D = 0,74\,V}$$

Exemplo 3.4



$V_{DD} = 5V$

$R = 1k\Omega$

$i_{D1} = 1mA \rightarrow V_{D1} = 0{,}7V$

$\Delta V_D = 0{,}1\, V/\text{decada}$

$\boxed{\ln x = 2{,}3 \cdot \log x}$

$\frac{\ln x}{\log x} = 2{,}3$

Para $V_{D1} \longrightarrow i_{D1} = i_s \cdot e^{V_{D1}/n \cdot V_T}$ (A)

Para $V_{D2} \longrightarrow i_{D2} = i_s \cdot e^{V_{D2}/nV_T}$ (B)

$$\frac{i_{D2}}{i_{D1}} = \frac{e^{V_{D2}/n \cdot V_T}}{e^{V_{D1}/n \cdot V_T}} \Rightarrow \frac{i_{D2}}{i_{D1}} = e^{\frac{(V_{D2} - V_{D1})}{n \cdot V_T}} \Rightarrow (V_{D2} - V_{D1}) = n \cdot V_T \cdot \ln\left[\frac{i_{D2}}{i_{D1}}\right]$$

$$(V_{D2} - V_{D1}) = 2{,}3 \cdot n \cdot V_T \cdot \log\left[\frac{i_{D2}}{i_{D1}}\right]$$

Malha $\rightarrow i_{D2} = \frac{V_{DD} - V_{D2}}{R}$ (C)

1º iteração:

Adotando $V_{D2}' = 0{,}7V \xrightarrow{(C)} i_{D2}' = ? \Rightarrow i_{D2}' = \frac{5 - 0{,}7}{1k} \Rightarrow \boxed{i_{D2}' = 4{,}3\, mA}$

$$V_{D2}' - V_{D1} = \underbrace{2{,}3 \cdot n \cdot V_T}_{\Delta V_D} \cdot \log\left[\frac{i_{D2}'}{i_{D1}}\right]$$

$0{,}1 = 2{,}3 \cdot n \cdot V_T$

$n = \frac{0{,}1}{2{,}3 \cdot V_T} \Rightarrow \boxed{n = 1{,}74}$

$$V_{D2}' - 0{,}7 = 0{,}1 \cdot \log\left(\frac{4{,}3 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-3}}\right)$$

$\boxed{V_{D2}' = 0{,}763V}$

2º iteração:

Adotando $V_{D2}'' = 0{,}763V \longrightarrow i_{D2}'' = ?$

$i_{D2}'' = \frac{5 - 0{,}763}{1k} \Rightarrow \boxed{i_{D2}'' = 4{,}237\, mA}$

$$V_{D2}'' - 0{,}7 = 0{,}1 \cdot \log\left(\frac{4{,}237 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-3}}\right) \Rightarrow \boxed{V_{D2}'' = 0{,}763V}$$

$$\boxed{\begin{array}{l} V_{D2} = 0{,}763V \\ i_{D2} = 4{,}237\, mA \end{array}}$$

Aula 04 (p. 97 a 99)

Modelos Simplificados do diodo (cont.)

- Modelo da queda de tensão constante

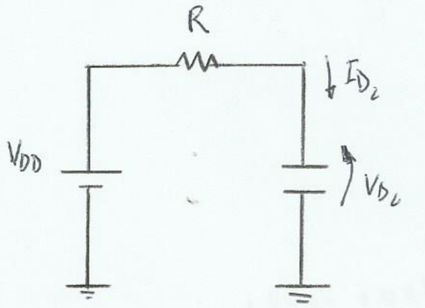
Reta vertical como aproximação da parte da curva experimental

Fig 3.15 Fig 3.16

- Modelo do diodo ideal

Para tensões no circuito bem maiores que a tensão de condução do diodo, podemos desprezar V_D.

Exercício 3.10: Para o circuito abaixo, determine I_{D_2} e V_{D_2}



Dados: $V_{DD} = 5V$

$R = 10 K\Omega$

$V_{D_1} = 0,7 V \rightarrow I_{D_1} = 1mA$

$\Delta V_D = 0,1 V$ /década

a) Utilizando o método iterativo

b) Utilizando o modelo dos segmentos da reta, sabendo-se que $V_{D0} = 0,65V$ e $r_D = 20\Omega$.

c) Modelo da queda de tensão constante, com $V_D = 0,7V$

Resolução

(a)

Malha $\rightarrow$ $I_{D_2} = \dfrac{V_{DD} - V_{D2}}{R}$

Modelo $\rightarrow$ $V_{D2} - V_{D1} = 2,3 \cdot n \cdot V_T \cdot \log\left(\dfrac{I_{D2}}{I_{D1}}\right)$

Sabendo que $\Delta V_D = 0{,}1\ V/\text{década}$

$$V_{D2} - V_{D1} = \underbrace{2{,}3\, n V_T}_{0{,}1\ V/\text{década}} \log\left(\frac{I_{D2}}{I_{D1}}\right)$$

1ª iteração

Adotando $V_{D2}' = 0{,}7V$ temos: $I_{D2}' = \frac{5-0{,}7}{10K}$ ∴ $I_{D2}' = 0{,}43.10^{-3} A$

$V_{D2} = 0{,}7 + 0{,}1 . \log\left(\frac{0{,}43}{1}\right)$ ∴ $V_{D2}' = 0{,}66\ V$

2ª iteração:

$V_{D2}'' = 0{,}663V \rightarrow I_{D2}'' = ?$

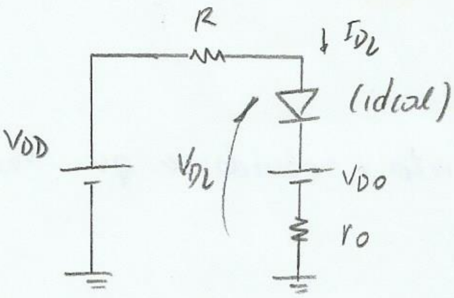
$I_{D2}'' = \frac{5 - 0{,}663}{10.10^3} = 0{,}43.10^{-3} A$

$V_{D2}'' = 0{,}7 + 0{,}1 . \log\left(\frac{0{,}434}{1}\right)$ ∴ $\boxed{V_{D2}'' = 0{,}66\ V}$

Resposta: $I_{D2} = 0{,}434\ mA$

$V_{D2} = 0{,}663\ V$

(b)



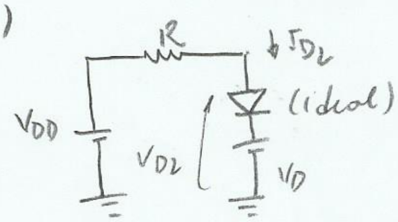
$V_{DD} = R . I_{D2} + V_{D0} + r_D I_{D2}$

$I_{D2} = \frac{V_{DD} - V_{D0}}{R + r_D} = \frac{5 - 0{,}65}{10.10^3 + 20}$

$\boxed{I_{D2} = 0{,}434\ mA}$

$V_{D2} = V_{D0} + r_D I_{D2} = 0{,}65 + 20 . 0{,}434 . 10^{-3}$ ∴ $\boxed{V_{D2} = 0{,}659\ V}$

(c)

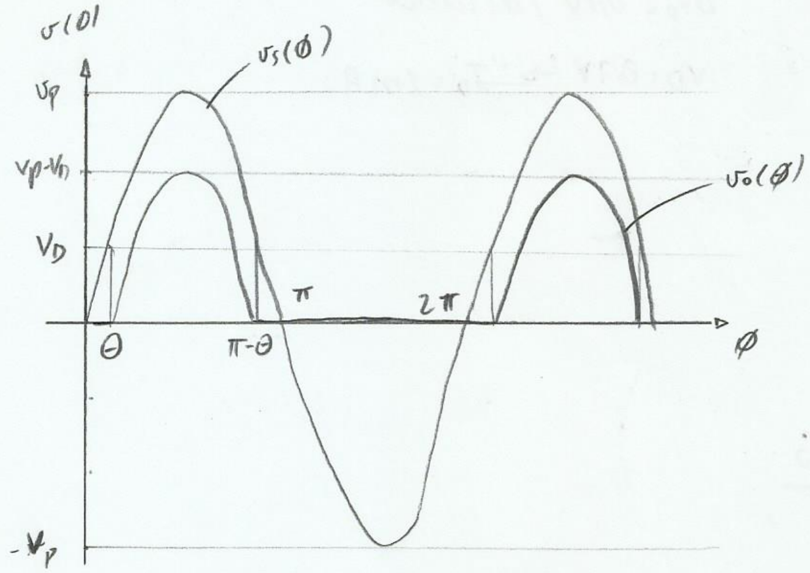


$V_{D2} = V_D$ ∴ $\boxed{V_{D2} = 0{,}7V}$

$I_{D2} = \frac{V_{DD} - V_{D2}}{R}$

$I_{D2} = \frac{5 - 0{,}7}{10.10^3}$ $\boxed{I_{D2} = 0{,}43\ mA}$

Ex. 3.20 Meia onda (Folha contrário)



Pede-se:

a) Demonstrar que $\theta = \sin^{-1}\left(\frac{V_D}{V_p}\right)$

b) Demonstrar que $\hat{v}_o \cong \frac{V_p}{\pi} - \frac{V_D}{2}$

c) Determinar $i_{D\,máx}$

d) Determinar $\hat{i}_D$, $\hat{i}_o$

e) Determinar PIV

f) Desenhar gráfico de $v_d(\phi)$

$\hat{v}_o$: Valor médio

Dados: $v_s = 12\ V_{ef}$ $R = 100\ \Omega$

$V_D \cong 0{,}7\ V$ $r_D \cong 0\Omega$

Solução

a) $\theta = ?$

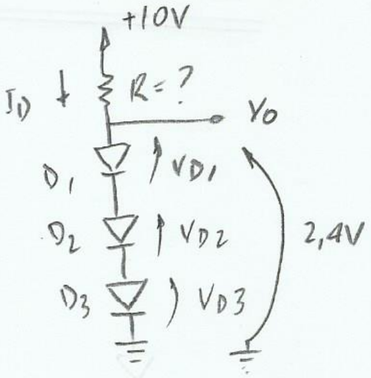
$v_s(\phi) = v_p \sin\phi$

Quando $v_s(\phi) = V_D \rightarrow \phi = \theta$

$V_D = V_p \sin\theta$ ∴ $\boxed{\theta = \sin^{-1}\left(\frac{V_D}{V_p}\right)}$

$V_p = 12\sqrt{2}\ V$ $\theta = \sin^{-1}\left(\frac{0{,}7}{12\sqrt{2}}\right)$ ∴ $\boxed{\theta = 2{,}36°}$

Exercício 3.12



$\Delta V_D = 0{,}1V$ / década

$V_D = 0{,}7V \rightarrow I_D = 1mA$

Solução:

Para $V_O = 2{,}4V \rightarrow V_{D1} = V_{D2} = V_{D3} = 0{,}8V$

	V_D		I_D	
$\Delta V_D = 0{,}1V$	0,7V	—	1mA	10x
	0,8V	—	?	

$\therefore \boxed{I_D = 10\ mA}$

$R = \frac{V_R}{I_D} = \frac{10-2{,}4}{10 \cdot 10^{-3}} \quad \therefore \boxed{R = 760\Omega}$

Aula 5 - (p. 106 a 110)

Circuitos retificadores

- Retificação: Uma das aplicações mais importantes para os diodos
- Diagramas de Blocos [Fig. 3.24]
- Retificador meia onda [Fig. 3.25]

Caraterísticas importantes no projeto:

→ PIV (Peak Inverse Voltage)

→ $i_{D\,max}$ (Corrente direta máxima)

b) $\hat{v_o} = ?$

$$\hat{v_o} = \frac{1}{T}\int_0^T v_o(\phi)\, d\phi$$

$$= \frac{1}{2\pi}\left[\cancel{\int_0^{\theta} 0\, d\phi} + \int_0^{\pi-\theta} (v_N(\phi) - V_D)\, d\phi + \cancel{\int_{\pi-\theta}^{2\pi} 0\, d\phi}\right]$$

$$= \frac{1}{2\pi}\left[\int_\theta^{\pi-\theta} (V_p \operatorname{sen}\phi - V_D)\, d\phi\right]$$

$$= \frac{1}{2\pi}\left[\int_\theta^{\pi-\theta} V_p \operatorname{sen}\phi\, d\phi - \int_\theta^{\pi-\theta} V_D\, d\phi\right]$$

$$= \frac{1}{2\pi}\left[-V_p \cos\phi \Big|_\theta^{\pi-\theta} - V_D \cdot \phi \Big|_\theta^{\pi-\theta}\right]$$

$$= \frac{-1}{2\pi}\left[V_p(\cos(\pi-\theta) - \cos\theta) + V_D(\pi-\theta-\theta)\right]$$

$$\boxed{\hat{v_o} = \frac{-1}{2\pi}\left[V_p(\cos(\pi-\theta) - \cos\theta) + V_D(\pi - 2\theta)\right]}$$

Para $V_p > V_D \rightarrow \underline{\theta \cong 0°}$

$$\hat{v_o} \cong \frac{-1}{2\pi}\left[V_p(\overset{-1}{\cancel{\cos}\pi} - \overset{1}{\cancel{\cos}\theta}) + V_D . \pi\right]$$

$$\hat{v_o} \cong \frac{-1}{2\pi}\left[-2V_p + V_D \pi\right] \therefore \boxed{\hat{v_o} \cong \frac{V_p}{\pi} - \frac{V_D}{2}}$$

$$\hat{v_o} \cong \frac{12\sqrt{2}}{\pi} - \frac{0{,}7}{2} \therefore \boxed{\hat{v_o} \cong 5{,}05\ V}$$

c) $i_D\, máx = ?$

Como o diodo e a carga estão em série, qdo $i_R\, máx \Rightarrow i_D\, máx$

$$i_R\, máx = \frac{V_R\, max}{R} = \frac{V_p - V_D}{R}$$

$$i_D\, máx = \frac{12\sqrt{2} - 0{,}7}{100} \therefore \boxed{i_D\, máx = 163\ mA}$$

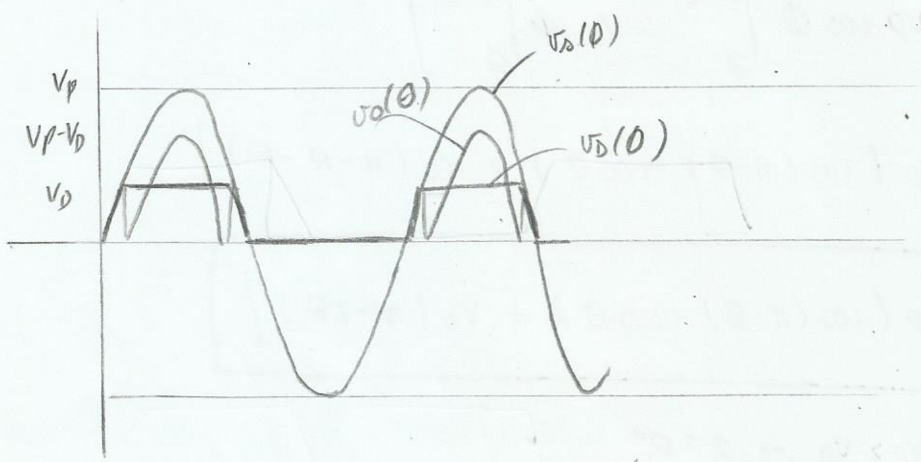
d) $\hat{i}_O = ?$, $i_D = ?$

$$\hat{i}_O = \frac{\hat{v}_O}{R} = \frac{5{,}05}{100} = \boxed{50{,}5\ mA} \quad \therefore \boxed{\hat{i}_D = \hat{i}_O = 50{,}5\ mA}$$

e) PIV = ?

$PIV = V_p \quad \therefore \boxed{PIV = 12\sqrt{2}\ V}$

f) $v_D(\phi) = ?$



Aula 06: Continuação

Retificadores

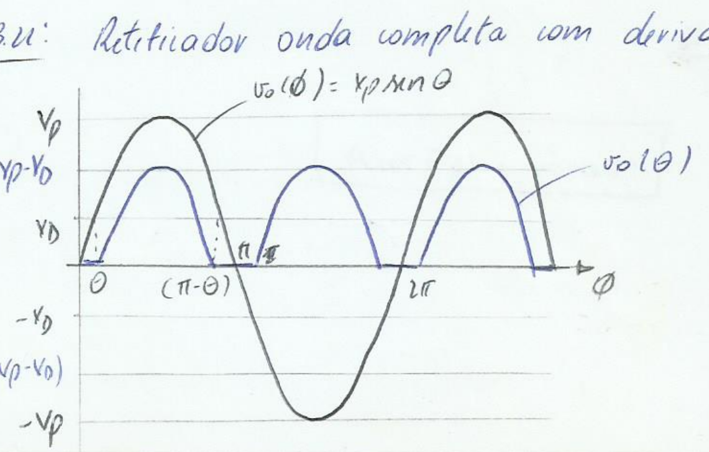
- Retificador de Onda Completa com Derivação Central

  Fig. 3.26

- Retificador de Onda Completa em ponte

  Fig. 3.27

Exercício 3.11: Retificador onda completa com derivação central (Fig. 3.26)



Pedese:

a) Prove que $v_O(\phi)=0$ para $2\,sen^{-1}(V_D/V_P)$

b) Demostre que $\hat{v}_O \cong \frac{2V_P}{\pi} - V_D$

c) Determine $i_{D\,m\acute{a}x}$

*d) Determine $\hat{i}_O$, $\hat{i}_{D1}$, $\hat{i}_{D2}$

*e) Determine PIV

*f) Desenhe os gráficos de $v_{d1}(\phi)$ e $v_{d2}(\phi)$, sincronizados com $v_o(\theta)$ e cortados

(*) itens incluídos no exercício

Dados: $V_{D1} = V_{D2} = V_D = 0{,}7\,V$

$r_D \cong 0\,\Omega$ (desprezível)

$R = 100\,\Omega$

$v_{S1} = v_{S2} = 12\,V_{ef} \rightarrow \boxed{V_P = 12\sqrt{2}\,V}$

Resolução

a) $v_O(\phi) = 0 \rightarrow 2\,sen^{-1}\left(\frac{V_D}{V_P}\right)$

$v_O(\phi) = 0$ durante 2θ, como $\theta = sen^{-1}\left(\frac{V_D}{V_P}\right)$, obtido do ex 3.20,

temos que $v_O(\phi) = 0 \rightarrow$ durante 2θ

b) $\hat{v}_O = ?$

$$\cos(\pi-\theta) = \overset{-1}{\cos\pi}\cos\theta + \cancel{sen\,\pi\, sen\,\theta}$$

$$\hat{v}_O = \frac{1}{T}\int_0^T v_O(\phi)\,d\phi$$

$$= \frac{1}{\pi}\left[\cancel{\int_0^\theta 0\,d\phi} + \int_\theta^{\pi-\theta}(v_S(\theta) - V_D)\,d\phi + \cancel{\int_{\pi-\theta}^{\pi} 0\,d\phi}\right]$$

$$= \frac{1}{\pi}\left[\int_\theta^{\pi-\theta}(V_P\,sen\,\phi - V_D)\,d\phi\right]$$

$$= \frac{1}{\pi}\left[-V_P\cos\phi - V_D\cdot\phi\right]\Big|_\theta^{\pi-\theta}$$

$$\boxed{\hat{v}_O = \frac{1}{\pi}\left[-V_P\left(\cos(\pi-\theta) - \cos\theta\right) - V_D(\pi-\theta-\theta)\right]}$$

Para $V_P \gg V_D \rightarrow \theta = 0°$ $\therefore$ $\boxed{\hat{v}_O \cong \frac{2V_P}{\pi} - V_D}$

$$\hat{v}_O = \frac{2\cdot 12\sqrt{2}}{\pi} - 0{,}7 \quad \therefore \quad \hat{v}_O \cong 10{,}1\,V$$

c) $i_{D\,max} = ?$

$$i_{D1(max)} = i_{D2(max)} = i_{R\,max} = \frac{V_{R\,max}}{R}$$

$$i_{D\,max} = \frac{(V_p - V_D)}{R} = \frac{12\sqrt{2} - 0{,}7}{100} \quad \therefore \boxed{i_{D\,max} = 163\ mA}$$

d) $\hat{i}_0 = ?\ ;\ \hat{i}_{D1} = ?\ ;\ \hat{i}_{D2} = ?$

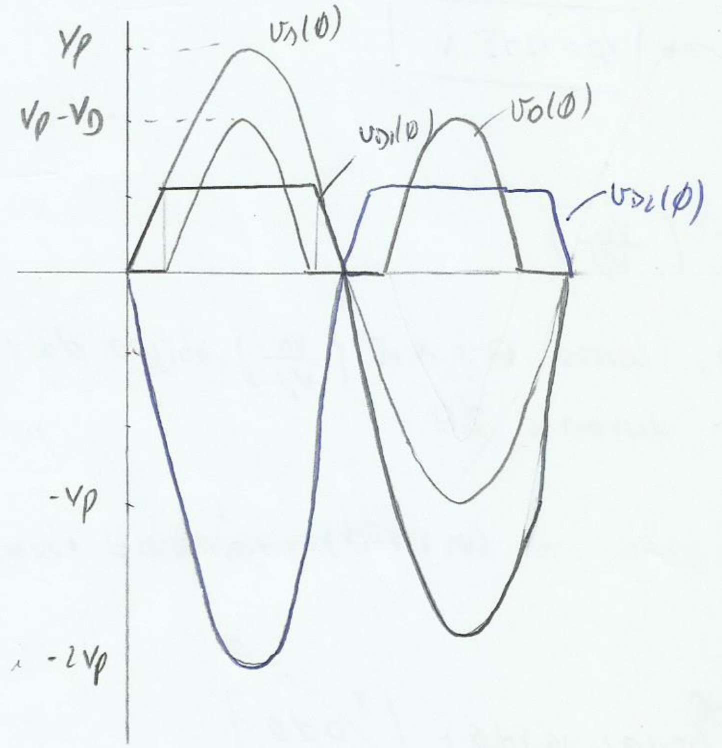
$$\hat{i}_0 = \frac{\hat{v}_0}{R} = \frac{10{,}1}{100} \Rightarrow \quad \therefore \boxed{\hat{i}_0 = 101\ mA}$$

$$\hat{i}_D = \frac{\hat{i}_0}{2} \quad \therefore \boxed{\hat{i}_D = 50{,}5\ mA} \quad ; \quad \underline{\hat{i}_D = \hat{i}_{D1} = \hat{i}_{D2}}$$

e) $PIV = 2V_p - V_D$

$$= 2 \cdot 2\sqrt{2} - 0{,}7 \Rightarrow \quad \therefore \boxed{PIV = 33{,}24\ V}$$

f)



HOMEWORK - To do ex. 3.22 (Very Important)

Retificador com capacitor de filtro

- Forma pulsante do sinal retificado é inadequado para circuitos que necessitam de sinais constantes de tensão e corrente.
- A utilização de um filtro capacitivo, colocado em paralelo com a carga, reduz significamente a variação do sinal retificado.

$\boxed{\text{Fig. 3.29}}$ < diodo ideal / carga paralela

A partir da Fig 3.29b, tem-se que:

corrente na carga $\rightarrow$ $i_L = \frac{v_O}{R}$ (3.23)

corrente no diodo $\rightarrow$ $i_D = i_C + i_L$ (3.24)

$i_D = C.\frac{dv_I}{dt} + i_L$ (3.25)

OBS.1: Enquanto o diodo está cortado, o capacitor descarrega através de R e v_O cai exponencialmente com uma constante de tempo RC. Ao final da descarga, $v_O = V_p - V_r$, onde V_r é a tensão de ondulação.

Qto maior RC, menor V_r

OBS.2: Qdo V_r é pequeno, $v_O \cong$ cte e igual ao valor de pico de v_I $\therefore V_O = V_p$

$\therefore I_L \cong \frac{V_p}{R}$ (3.26)

$\hat{v}_o \cong V_p - \frac{1}{2}V_r$ (3.27)

$V_r = ?$

Durante o intervalo de corte do diodo, $v_O = V_p . e^{-T/RC}$

Ao final da descarga, $v_O = V_p - V_r$

$\therefore V_p - V_r = V_p . e^{-T/RC}$

$V_r = V_p(1 - e^{-T/RC})$

Como $RC \gg T$ (período) $\rightarrow e^{-T/RC} \cong 1 - \frac{T}{RC}$

$$V_r = V_p \left(1 - \left(1 - \frac{T}{RC}\right)\right) \therefore \boxed{V_r \cong V_p \cdot \frac{T}{RC}} \quad (3.28)$$

$$\text{ou} \quad \boxed{V_r \cong \frac{V_p}{f.R.C}} \quad (3.29)$$

$\Delta t = ?$

Admitindo que o diodo para de conduzir no pico de v_2, tem-se:

$$v_0 = V_p - V_r = V_p \cos(w \Delta t)$$

$$W = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$$

Como $(w \Delta T)$ é um ângulo muito pequeno, tem-se:

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

$$V_p - V_r \cong V_p \left(1 - \frac{1}{2}(w\Delta t)^2\right)$$

$$V_p - V_r \cong V_p - \frac{V_p}{2}(w \Delta t)^2$$

$$\therefore V_r \cong \frac{V_p}{2}(w \Delta t)^2$$

$$\boxed{w \Delta t \cong \sqrt{\frac{2V_r}{V_p}}} \quad (3.30)$$

i_D médio = ?

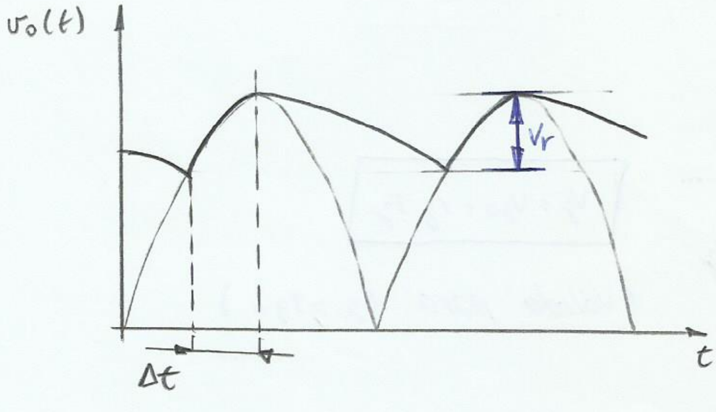
$$i_{D\,médio} = I_L\left(1 + \pi\sqrt{2V_p/V_r}\right) \quad (3.31)$$

i_D máx = ?

$$i_{D\,máx} = I_L\left(1 + 2\pi\sqrt{2V_p/V_r}\right) \quad (3.32)$$

Aula 07

Retificador de Onda Completa



OBS: O V_r para a onda completa, considerando o mesmo produto RC, é 1/2 do valor do V_r da meia onda.

$$\boxed{V_r = \frac{V_p}{2.f.R.C}} \quad (3.33)$$

$$\boxed{\omega\Delta t = \sqrt{\frac{2V_r}{V_p}}} \quad \text{(Mesmo da } \tfrac{1}{2} \text{ onda)}$$

$$\boxed{i_{D\,médio} = I_L\left(1 + \pi\sqrt{\frac{V_p}{2V_r}}\right)} \quad (3.34)$$

$$\boxed{i_{D\,máx} = I_L\left(1 + 2\pi\sqrt{V_p/2V_r}\right)} \quad (3.35)$$

$$\boxed{I_L = \frac{V_p}{R}}$$

OBS: As equações apresentadas p/ os retificadores 1/2 onda e onda completa consideraram o diodo como sendo ideal. Para o caso real deve-se fazer:

1/2 onda → substituir (V_p) por $(V_p - V_D)$

onda completa (derivação) → substituir (V_p) por $(V_p - V_D)$

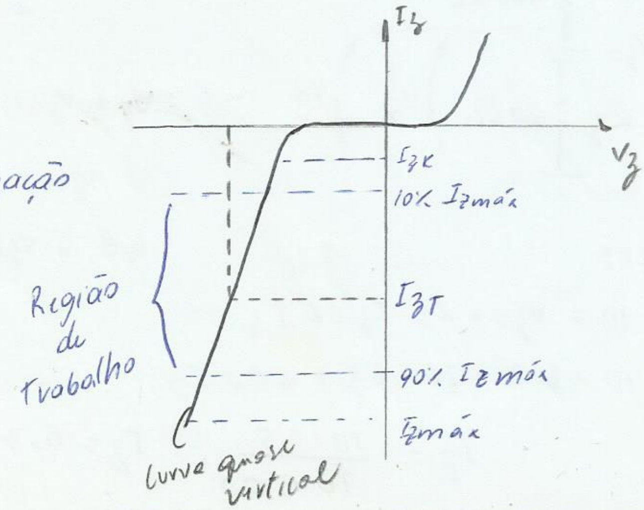
onda completa tipo ponte → substituir (V_p) por $(V_p - 2V_D)$

Aula 08 (p. 104 a 106)

Diodo Zener

- Operação na Região Reversa de polarização
- Trabalha na região de ruptura

Fig. 3.21



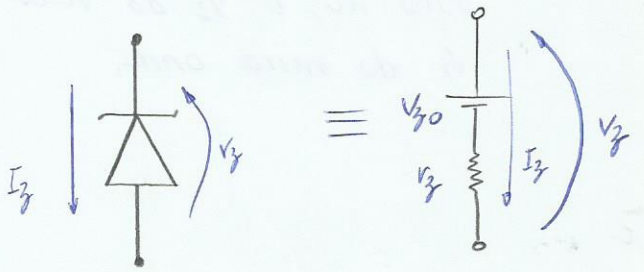
I_{ZK} = corrente mínima para manter o zener funcionando

$I_{Zmáx}$ = corrente máxima suportável ($P_{Zmáx}$)

I_{ZT} = corrente de teste

V_Z = tensão de referência

- Modelo Exponencial



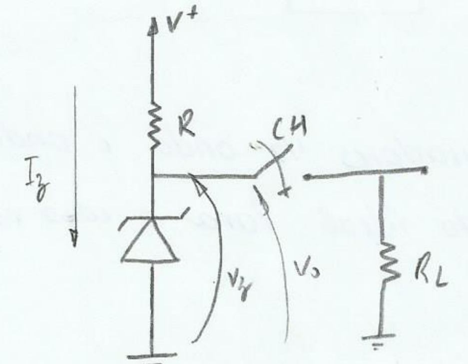
$$\boxed{V_Z = V_{Z0} + r_Z I_Z}$$

(Válido para $I_Z \geq I_{ZK}$)

$\underline{V_{Z0} + r_Z}$ → obtidos pela aplicação do modelo dos segmentos de reta

$$r_Z = \frac{\Delta V_Z}{\Delta I_Z} \quad \therefore \quad \boxed{\Delta V_Z = r_Z \cdot \Delta I_Z}$$

<u>Exemplo 3.8:</u>



<u>Dados</u>

$V^+ = 10 \pm 1V$

$R = 500\Omega$

$V_Z = 6{,}8V \rightarrow I_Z = 5mA$

$r_Z = 20\Omega$

$I_{ZK} = 0{,}2mA$

<u>Pede-se:</u>

a) $V_0 = ?$ sem carga e com V^+ nominal

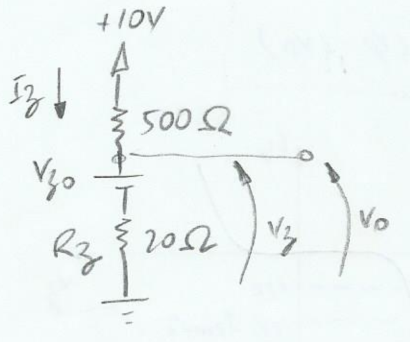
b) $\Delta V_0 = ?$ → $\Delta^+ = \pm 1V$

c) $\Delta V_0 = ?$ → $R_L = 2K\Omega$ (V^+ nominal)

d) $\Delta V_0 = ?$ → $R_L = 500\Omega$ (V^+ nominal)

e) $R_{Lmin} = ?$ (considerando ΔV^+)

a) $V_0 = ?$



$V_Z = V_{Z0} + r_Z I_Z$

V_{Z0} : Usar dados fornecido

$6{,}8 = V_{Z0} + 20 \cdot 5 \cdot 10^{-3}$ $\quad V_{Z0} = 6{,}7V$

↳ LKT

$10 = V_{Z0} + R_Z \cdot I_Z + R \cdot I_Z$

$10 = 6{,}7 + 20 \cdot I_Z + 500 I_Z$

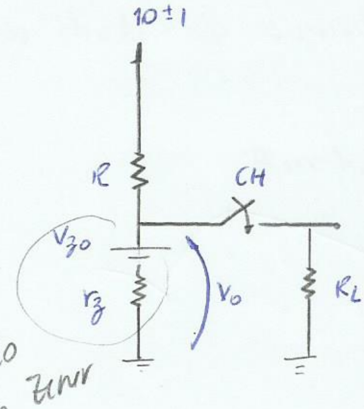
$\therefore I_Z = \frac{10 - 6{,}5}{20 + 500} \quad \therefore I_Z = 6{,}35mA$

$\therefore V_0 = V_Z = V_{Z0} + r_Z I_Z$

$= 6{,}7 + 20 \cdot 6{,}35 \cdot 10^{-3}$

$$\boxed{V_0 = 6{,}827V}$$

Exemplo 3.8 (continuação)



Modulo equiv. do Zener

$R = 500\Omega$

$r_Z = 20\Omega$

$I_{ZK} = 0{,}2mA$

$I_Z = 5mA \rightarrow V_Z = 6{,}8V$

a) $V_0 = 6{,}827V$ $\quad V_{Z0} = 6{,}7V$ $\quad I_Z = 6{,}35mA$

b) $\Delta V_0 = ? \rightarrow \Delta V^+ = \pm 1V$

Para $V^+ = 11V$

$$I_Z' = \frac{11 - V_0}{R + r_Z} = \frac{11 - 6{,}7}{500 + 20} \quad \therefore \quad I_Z' = 8{,}27\ mA$$

$$V_0' = 6{,}7 + 20 \cdot 8{,}27 \cdot 10^{-3} \quad \therefore \quad V_0' = 6{,}87V$$

Para $V^+ = 9V$

$$I_Z'' = \frac{9 - V_0}{R + r_Z} = \frac{9 - 6{,}7}{500 + 20} = 4{,}423\ mA$$

$$V_0'' = 6{,}7 + 20 \cdot 4{,}423 \cdot 10^{-3} \quad \therefore \quad V_0'' = 6{,}79V$$

$$\therefore \quad \Delta V_0 = 6{,}87 - 6{,}79 \quad \therefore \quad \boxed{\Delta V_0 = 0{,}08V = 80mV}$$

2ª Solução

$$\Delta V_Z = r_Z \, \Delta I_Z \qquad I_Z' - I_Z'' = \frac{11 - V_{Z0} - (9 - V_{Z0})}{R + r_Z}$$

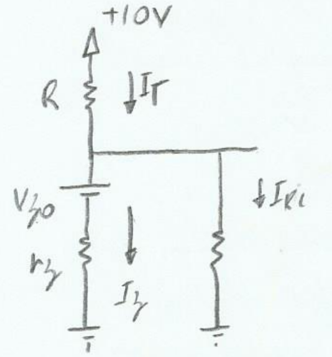
$$\Delta V_0 = r_Z \cdot \Delta I_Z \qquad I_Z' - I_Z'' = \frac{\Delta V^+}{R + r_Z}$$

$$\Delta I_Z = \frac{\Delta V^+}{R + r_Z}$$

$$\Delta V_0 = r_Z \cdot \frac{\Delta V^+}{R + r_Z} \quad \therefore \quad \Delta V_0 = \frac{20 \cdot 2}{500 + 20} = \boxed{0{,}08V}$$

ou $\boxed{\Delta V_0 = \pm 0{,}04V}$

c) $\Delta V_0 = ?$ → $R_L = 2K\Omega$ (V^+ nominal)



$I_{RL} \cong \frac{6,8}{R_L}$ → tensão de referência do diodo do Zener

$\cong \frac{6,8}{2.10^3}$ $\quad I_{RL} = 3,4\ mA$

∴ $\boxed{\Delta I_Z \cong -3,4\ mA}$

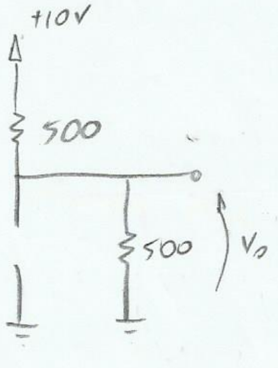
$\Delta V_0 = \Delta V_Z = r_Z \cdot \Delta I_Z$

$= 20 \cdot (-3,4).10^{-3}$ ∴ $\boxed{\Delta V_0 = -68\ mV}$

d) $\Delta V_0 = ?$ → $R_L = 500\Omega$ (V^+ nominal)

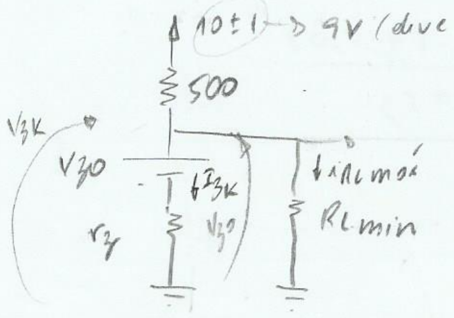
$I_{RL} \cong \frac{6,8}{500} = 13,6\ mA$ $\quad \Delta I_Z \cong -13,6\ mA$?

Para essa situação $I_Z << I_{ZK}$ ∴ Zener cortou !



$V_0 = 5V$ ∴ $\Delta V_0 \cong 5 - 6,8$ $\quad \boxed{\Delta V_0 \cong -1,8V}$

e) $R_{min} = ?$ (considerando ΔV^+)



$R_{Lmin} = \frac{V_{ZK}}{I_{RL\,máx}}$

$V_{ZK} = V_{Z0} + I_{ZK} \cdot r_Z$

$V_{ZK} = 6,7 + 20 \cdot 0,2 \cdot 10^{-3} = 6,704\ V$

$I_T = \frac{9 - V_{ZK}}{500} = \frac{9 - 6,704}{500} = 4,59\ mA$

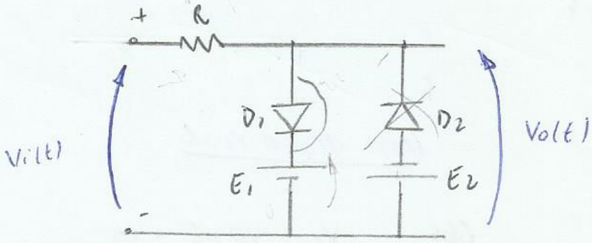
$I_{RL\,max} = 4,59 - 0,2 = 4,39\ mA$

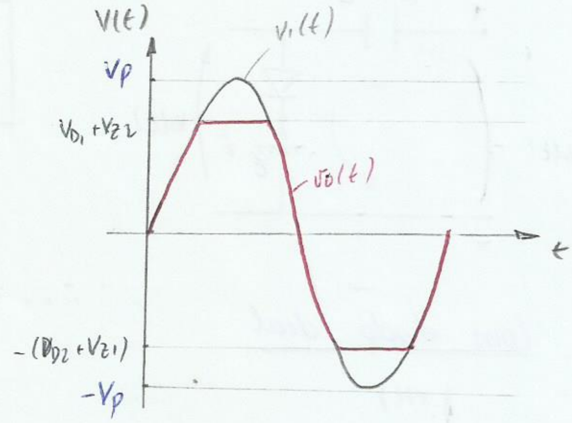
$R_{Lmin} = \frac{6,704}{4,39.10^{-3}}$ $\quad \boxed{R_{Lmin} = 1527,1\ \Omega}$

Aula 09 (p 114 a 117)

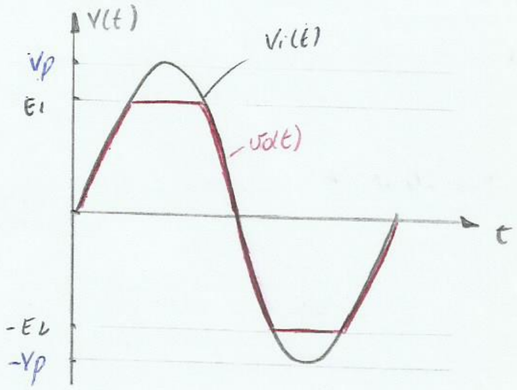
Circuitos com diodos

- Limitador (Duplo) ou Ceifatores

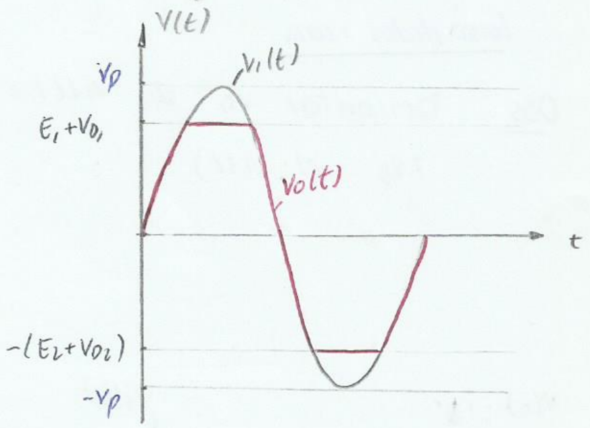




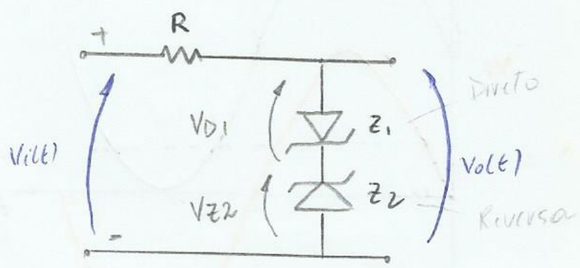
Com diodos ideais



Com diodos reais



Limitador Duplo com Zener (+ comum)

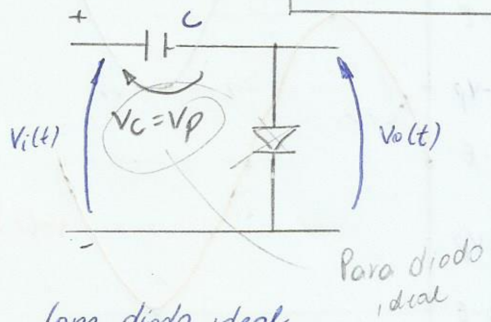


- Grampeador

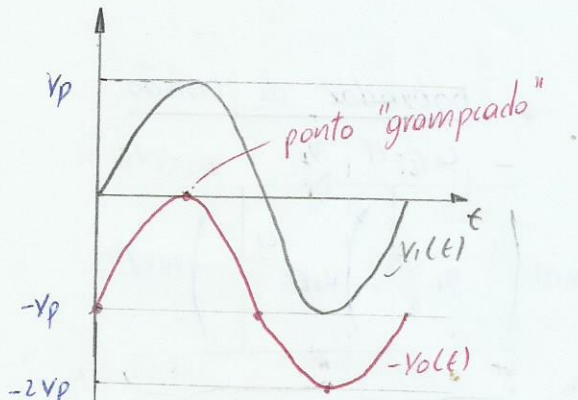
$V_o(t) = V_i(t) - V_C$

$$\boxed{V_o(t) = V_i(t) - V_p}$$

Nível Zero

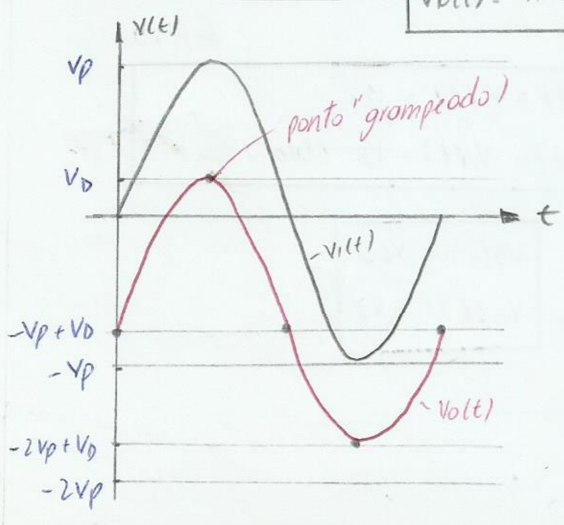


Com diodo ideal



$$\boxed{\begin{array}{l} V_C = V_p - V_D \\ V_o(t) = V_i(t) - V_p + V_D \end{array}}$$

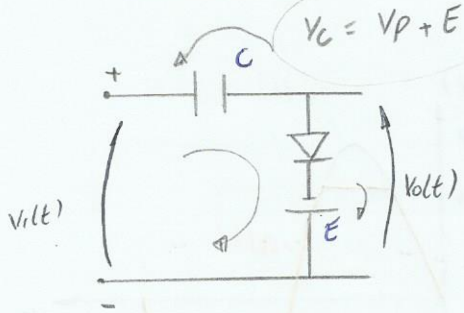
Com diodo real



Nível "E"

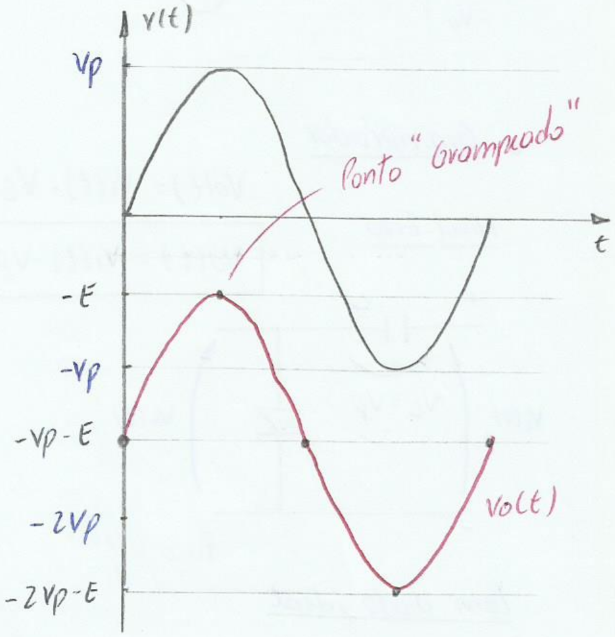
Para diodo ideal

$V_C = V_p + E$



$$\boxed{\begin{aligned} V_o(t) &= V_i(t) - V_C \\ V_o(t) &= V_i(t) - V_p - E \end{aligned}}$$ (diodo Ideal)

Com diodo ideal

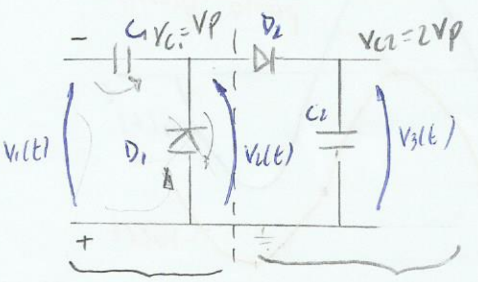


Com diodo real

Obs.: $V_C = V_p + E - V_D$

$\therefore V_o(t) = V_i(t) - V_p - E + V_D$

• Dobrador de tensão



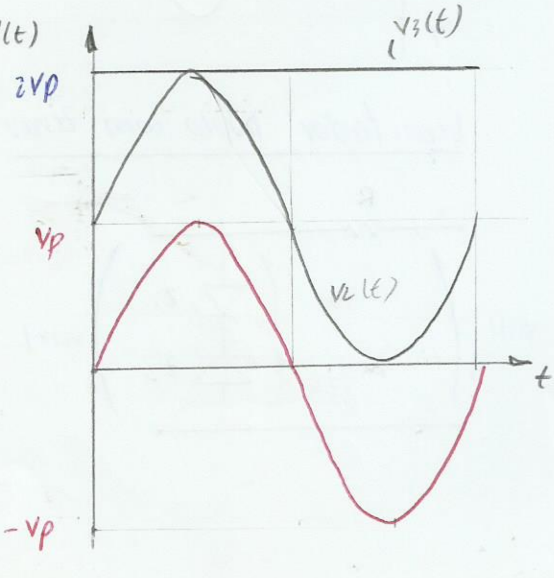
Grampeador "Nível Zero" Retificador Meia onda com filtro

$$\boxed{\begin{aligned} V_2(t) &= V_1(t) + V_{C1} \\ V_2(t) &= V_1(t) + V_p \quad \text{(Diodo Ideal)} \end{aligned}}$$

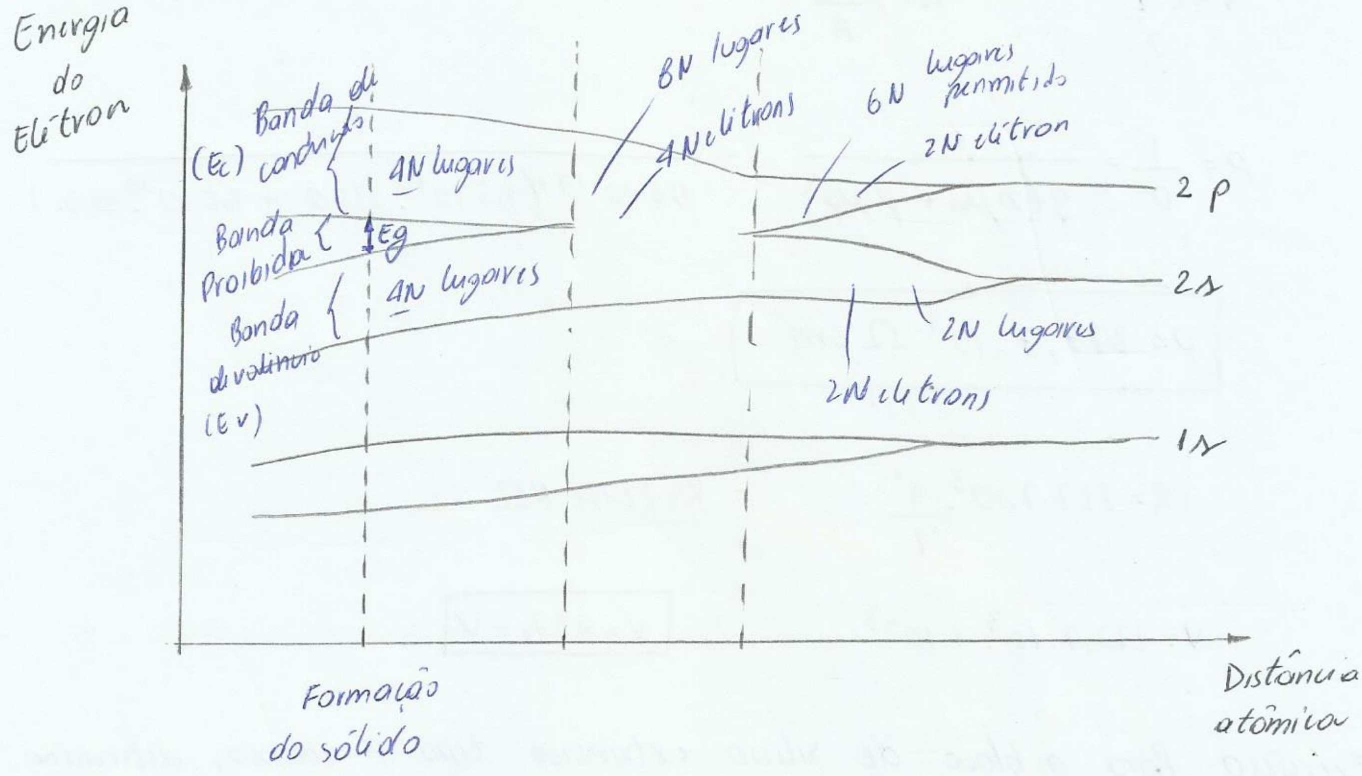
$$\therefore \boxed{\begin{aligned} V_3(t) &= V_{C2} \\ V_3(t) &= 2V_p \end{aligned}}$$

Com diodos reais

Obs.: Descontar V_D de $V_2(t)$ e $2V_D$ p/ $V_3(t)$



Bandas de Energia



Exemplo: Sólido de carbono

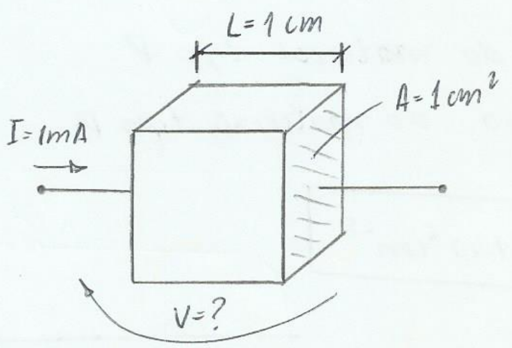
$Z = 6$ (único átomo) $\begin{cases} 1s^2 \\ 2s^2\,2p^2 \end{cases}$

↓

Sólido?

Qtos átomos? → N átomos

Exercício: Para o bloco de silício intrínseco abaixo. Determine a tensão máxima para produzir uma corrente $I = 1mA$. ↳ $n = p$. $n = p = n_i$



Dados:

$n_i = 1{,}5 \cdot 10^{10}\ cm^{-3}$

$\mu_n = 1350\ cm^2/V.s$

$\mu_p = 480\ cm^2/V.s$

$q = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ C$

$T = 300K$

Solução

Material Intrínseco: $\begin{cases} n = p \\ n = p = n_i \end{cases}$ $\therefore$ $n = 1{,}5 \cdot 10^{10}\ cm^{-3}$

$p = 1{,}5 \cdot 10^{10}\ cm^{-3}$

$V = ? \rightarrow I = 1mA$

$V = R \cdot I \quad \therefore \quad R = \rho \frac{L}{A}$

?

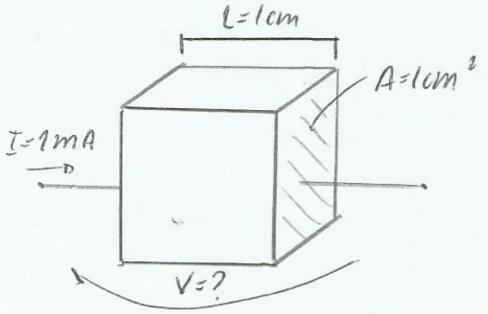
$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{q(n\mu_n + p\mu_p)} = \frac{1}{1{,}6 \cdot 10^{-19}(1{,}5 \cdot 10^{10} \cdot 1350 + 1{,}5 \cdot 10^{10} \cdot 480)}$$

$$\therefore \boxed{\rho = 227{,}7 \cdot 10^{3}\ \Omega cm}$$

$$R = 227{,}7 \cdot 10^{3} \cdot \frac{1}{1} \quad \therefore \quad R = 227{,}7\ K\Omega$$

$$V = 227{,}7 \cdot 10^{3} \cdot 1 \cdot 10^{-3} \quad \therefore \quad \boxed{V = 227{,}7\ V}$$

Exercício Para o bloco de silício extrínsico tipo P abaixo, determine a tensão necessária para produzir uma corrente $I = 1mA$



Dados:

$n_i = 1{,}5 \cdot 10^{10} cm^{-3}$

$\mu_n = 1110\ cm^2/Vs$

$\mu_p = 400\ cm^2/Vs$

$q = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ C$

$T = 300K$

$N_A = 1 \times 10^{16} cm^{3}$

Solução

Material tipo P

$p > n$

P_p = conc. de lacunas livres dentro do material tipo P

n_p = conc. de elétrons livres dentro do material tipo P

$P_p = n_i + N_A$

$P_p = 1{,}5 \cdot 10^{10} + 1 \cdot 10^{16}$ $\quad \boxed{P_p \cong 1 \cdot 10^{16} cm^{-3}}$

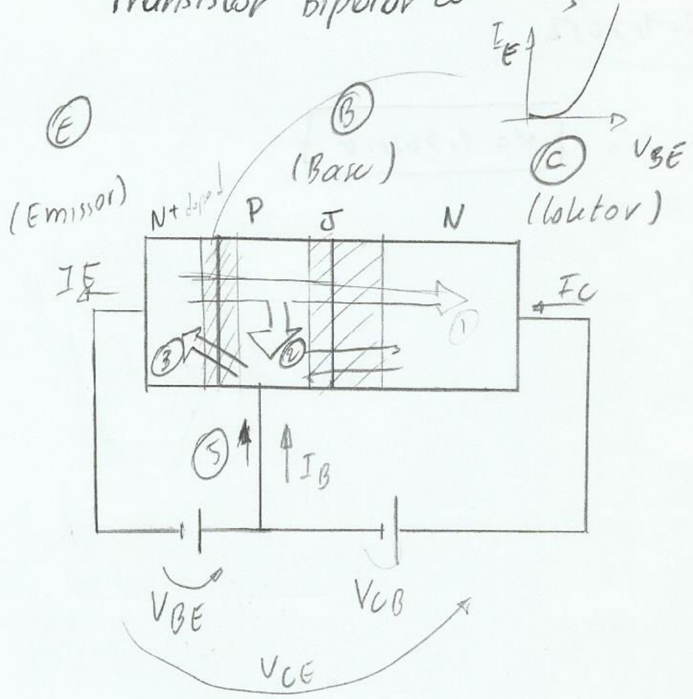
$$n_p = \frac{n_i^2}{P_p} = \frac{(1{,}5 \cdot 10^{10})^2}{1 \cdot 10^{16}} \quad n_p = \frac{2{,}25 \cdot 10^{20}}{1 \cdot 10^{16}} \quad \therefore \boxed{n_p = 2{,}25 \cdot 10^{4} cm^{-3}}$$

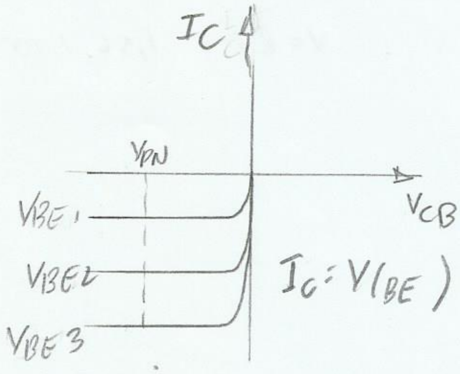
$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{q(n_p\mu_n + p_p\mu_p)} \quad \therefore \quad \rho = \frac{1}{1{,}6 \cdot 10^{-19}(2{,}25 \cdot 10^{4} * 1110 + 1 \cdot 10^{16} \cdot 400)} \quad \therefore \rho = 1{,}56\ \Omega m$$

$R = \rho \cdot \frac{L}{A} = \frac{1{,}56 \cdot 1}{1} \therefore \boxed{R = 1{,}56\,\Omega}$

$V = R \cdot I = 1{,}56 \cdot 1 \cdot 10^{-3} \therefore \boxed{V = 1{,}56\,mV}$

Transistor Bipolar de Junção NPN → Modo ativo { - Amplificador
- Fonte de corrente





- geração por temperatura, luz ou por ?

$$\boxed{I_E = I_C + I_B}$$

$$\boxed{V_{CE} = V_{BE} + V_{CB}}$$

Efeito transistor: A corrente por uma junção reversamente polarizada é ~~conduzida~~ controlada por uma junção diretamente polarizada colocada próximo. Nesta condição o transistor bipolar de junção (TBJ) funciona como amplificador e/ou fonte de corrente.

Correntes:

① Corrente de elétrons que saíram do emissor devido à polarização direta entre base-emissor, passaram pela base e chegaram ao coletor por deriva (pol. reversa da junção)

② Corrente de elétrons que saíram do emissor e foram recombinados com as lacunas da base

③ Corrente de difusão de lacunas da base para o emissor devido à polarização direta.

④ Corrente de deriva "natural" da junção reversamente polarizada

⑤ Corrente de difusão de lacunas para repor as lacunas perdidas devido às componentes ② e ③

- Estrutura física

$\boxed{\text{Fig 5.1}}$ → NPN $\boxed{\text{Fig 5.2}}$ → PNP

- Operação Física

$\boxed{\text{Fig. 5.3}}$ → NPN (modo ativo)

- Fluxo de corrente

$\boxed{\text{Fig. 5.4}}$

- Corrente no coletor

$$\boxed{i_C = I_S \cdot e^{\frac{v_{BE}}{V_T}}} \qquad \boxed{I_S = \frac{A_E \cdot q \cdot D_n \cdot n_i^2}{N_A \cdot W_B}}$$

A_E = área da junção

D_n = coeficiente de difusão do elétron

n_i = concentração intrínseca

N_A = dopagem da base tipo P.

W_B = largura da região da base

- ~~Correção~~ Corrente da base

$$\boxed{i_B = \frac{i_C}{\beta}} \qquad \boxed{\beta^{-1} = \left(\frac{D_p}{D_n} \cdot \frac{N_A}{N_D} \cdot \frac{W_B}{L_p} + \frac{1}{2} \frac{W_B^2}{D_n \cdot \tau_b} \right)}$$

N_D = concentração de elétrons do emissor tipo N

D_p = coeficiente de difusão de lacunas (base p/ o emissor)

L_p = comprimento de difusão de lacunas da base dentro do emissor

τ_b = tempo de vida do portador.

Aula 17 (pg 275 a 278)

O transistor como Amplificador

- Operação no Modo Ativo
- Polarização cc com o objetivo de estabelecer o pto de trabalho

$\boxed{\text{Fig. 5.48}}$

A corrente de coletor e a transcondutância

$v_{be} \neq 0 \rightarrow v_{BE} = V_{BE} + v_{be}$

$\therefore i_e = I_s \cdot e^{v_{BE}/V_T} = I_s \, e^{\frac{V_{BE}+v_{be}}{V_T}}$

$i_c = \underbrace{I_s \, e^{\frac{V_{BE}}{V_T}}}_{I_C} \cdot e^{\frac{v_{be}}{V_T}} \quad \therefore \boxed{i_c = I_C \cdot e^{\frac{v_{be}}{V_T}}} \quad (5.82)$

Admitindo $v_{be} \ll V_T$; (5.82) pode ser aproximada por:

$\boxed{i_c \cong I_C \left(1 + \frac{v_{be}}{V_T}\right)}$ (5.83) ← Válida para $v_{be} < 10\,mV$ (amplitude)

$\therefore \boxed{i_c = I_C + \frac{I_C \cdot v_{be}}{V_T}}$ (5.84)

$\underbrace{i_C}_{\text{Total}} = \underbrace{I_C}_{\text{DC}} + \underbrace{i_c}_{\text{AC}}$

$\therefore \boxed{i_c = \frac{I_C}{V_T} \cdot v_{be}}$ (5.85) → parte alternada (AC) da corrente do coletor

Chamando de $g_m = \frac{i_c}{v_{be}} = \frac{I_C}{V_T}$ a transcondutância, temos:

$\boxed{i_c = g_m \cdot v_{be}}$ (5.86)

$\boxed{g_m = \frac{I_C}{V_T}}$ (5.87)

Fig 5.49 → Interpretação gráfica de g_m

A corrente de base e a Resistência de Entrada da Base

$$i_B = \frac{i_C}{\beta} = \frac{I_C + i_c}{\beta}$$

$$i_B = \frac{I_C}{\beta} + \frac{i_c}{\beta} = \underbrace{\frac{I_C}{\beta}}_{I_B} + \underbrace{\frac{g_m \cdot v_{be}}{\beta}}_{i_b}$$

$$\therefore \boxed{i_b = \frac{g_m}{\beta} \cdot v_{be}} \quad (5.91)$$

A Resistência de Entrada da Base, definida entre a base e o emissor, é dada por:

$$\boxed{r_\pi = \frac{v_{be}}{i_b}} \quad (5.92)$$

$$\therefore r_\pi = \frac{\beta}{g_m} = \frac{\frac{I_C}{I_B}}{\frac{I_C}{V_T}} \quad \therefore \boxed{r_\pi = \frac{V_T}{I_B}} \quad (5.94)$$

A corrente de Emissor e a resistência de Entrada do Emissor

$$i_E = \frac{i_C}{\alpha} = \underbrace{\frac{I_C}{\alpha}}_{I_E} + \underbrace{\frac{i_c}{\alpha}}_{i_e}$$

$$\left. i_e = \frac{g_m v_{be}}{\alpha} = \frac{I_C}{\alpha . V_T} . v_{be} = \frac{I_E}{V_T} . v_{be} \right] \quad (5.96)$$

Chamando de r_e a resistência entre base e emissor, temos:

$$\boxed{r_e = \frac{v_{be}}{i_e}} \quad (5.97) \qquad \boxed{r_e = \frac{V_T}{I_E}} \quad (5.98)$$

Relação entre r_π e r_e: $\boxed{r_\pi = (1 + \beta) . r_e}$ (5.100)

Ganho de tensão (Av)

$\boxed{\text{Fig. 5.48}}$

$v_C = V_{CC} - i_C R_C$

$v_C = V_{CC} - (I_C + i_c) R_C$

$v_C = \underbrace{(V_{CC} - R_C I_C)}_{V_C} - \underbrace{R_C . i_c}_{v_c}$

$A_v = \frac{v_c}{v_{be}}$ (OBS: Para este circuito)

$A_v = \frac{-R_C . i_c}{v_{be}} = - \frac{R_C . g_m . \cancel{v_{be}}}{\cancel{v_{be}}} \therefore \boxed{A_v = -R_C . g_m}$

OBS: O sinal (-) significa inversão de fase entre o sinal de entrada (v_{be}) e de saída (v_c).

$\boxed{\text{Ex. 5.37}}$

TBJ $\begin{cases} \beta = 100 \\ I_C = 1mA \end{cases}$ $g_m = ?$ $r_\pi = ?$ $r_e = ?$

$g_m = \frac{I_C}{V_T} \therefore g_m = \frac{1mA}{25mV} \therefore g_m = 0{,}04 \frac{A}{V} \therefore \boxed{g_m = \frac{40mA}{V}}$

$r_\pi = \frac{V_T}{I_B}$ $\quad I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{10^{-3}}{100} = 10^{-5} A$

$\alpha = \frac{\beta}{\beta+1}$

$r_\pi = \frac{25 . 10^{-3}}{10^{-5}} \therefore \boxed{r_\pi = 2{,}5 K\Omega}$

$r_e = \frac{r_\pi}{1+\beta} = \frac{2{,}5 . 10^3}{1+100} \therefore \boxed{r_e \cong 25\Omega}$

Eletrônica I

01/10/2012

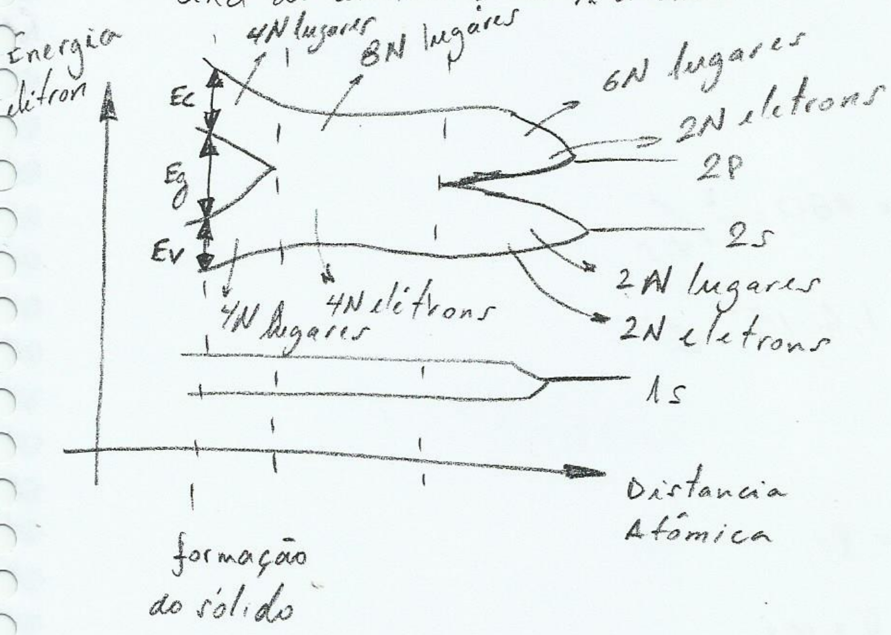
Sólido de carbono

$Z = 6$
(número atomico) $\begin{cases} 1s^2 \\ 2s^2\, 2p^2 \end{cases}$

↓

Sólido?

Qtd de atomos? → N átomos



E_g ⇒ Banda proibida

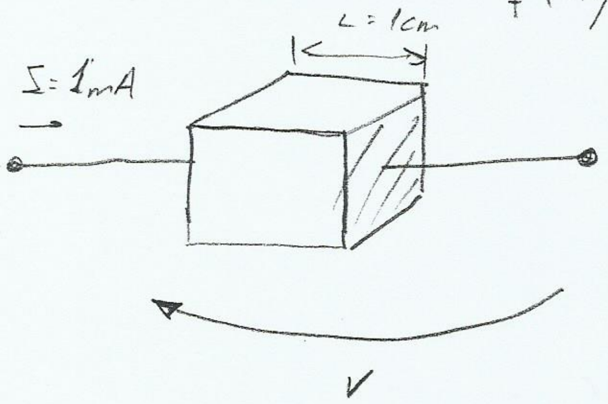
E_c ⇒ Banda de condução

E_v ⇒ Banda de valencia

Eletrônica I

08/10/2012

$R = \rho \cdot \frac{L}{A}$; $\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{q \cdot (n \cdot \mu n + p \cdot \mu p)}$



Intrínseco

$ni = 1,5 \cdot 10^{10}\ cm^{-3}$ $\qquad \mu p = 480\ cm^2/V.s$

$\mu n = 1350\ cm^2/V.s$ $\qquad q = 1,6 \cdot 10^{-19}\ C$

$T = 300K$

material intrínseco $\begin{cases} n = p \\ n = p = ni \end{cases}$

$\therefore$

$n = 1,5 \cdot 10^{10}\ cm^{-3}$, $p = 1,5 \cdot 10^{10}\ cm^{-3}$

$V = R \cdot I \Rightarrow R = \rho \cdot \frac{L}{A}$

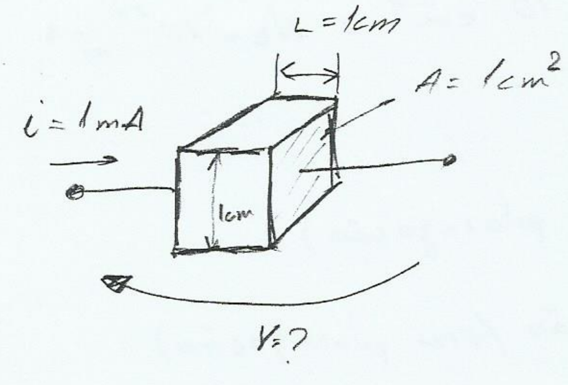
$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{q\,(n\mu n + p \cdot \mu p)}$$

$$\rho = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot (1,5 \cdot 10^{10} \cdot 1350 + 1,5 \cdot 10^{10} \cdot 480)}$$

$\rho = 227,7 \cdot 10^{3}\ \Omega\, cm \Rightarrow R = 227,7 \cdot 10^{3} \cdot \frac{1}{1}$

$\boxed{R = 227,7\ K\Omega} \Rightarrow V = 227 \cdot 10^{3} \cdot 10^{-3} \Rightarrow$

Extrínseco tipo P



$n_i = 1{,}5 \cdot 10^{10}\ cm^{-3}$

$\mu_n = 1110\ cm^2/V.s$

$\mu_p = 400\ cm^2/V.s$

$q = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ C$

$T = 300K$

$N_A = 1 \cdot 10^{16}\ cm^{-3}$

material tipo P:

$p > n$

P_p = concentração de lacunas livres dentro do material tipo P.

n_p = concentração de elétrons livres dentro do material tipo P

$$P_p = n_i + n_A \Rightarrow P_p = 1{,}5 \cdot 10^{10} + 1 \cdot 10^{16} \Rightarrow P_p \cong 1 \cdot 10^{16}\ cm^{-3}$$

$$n_p = \frac{n_i^2}{P_p} \Rightarrow n_p = \frac{(1{,}5 \cdot 10^{10})^2}{1 \cdot 10^{16}} \Rightarrow n_p \cong 2{,}25 \cdot 10^{4}\ cm^{-3}$$

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{q(n_p \cdot \mu_n + p_p \cdot \mu_p)} \Rightarrow \rho = \frac{1}{1{,}6 \cdot 10^{-19}(2{,}25 \cdot 10^{4} \cdot 1110 + 1 \cdot 10^{16} \cdot 400)}$$

$$\rho \cong 1{,}56\ \Omega.cm$$

$$R = \rho \cdot \frac{L}{A} \Rightarrow R = 1{,}56 \cdot \frac{1}{1} \Rightarrow \boxed{R = 1{,}56\ \Omega}$$

$$V = R \cdot i \Rightarrow V = 1{,}56 \cdot 1 \cdot 10^{-3} \Rightarrow V = 1{,}56\ mV$$

ELETRÔNICA I

10/10/12

Para junção PN dopada com $N_A = 10^{17}\ cm^{-3}$ e $N_D = 10^{16}\ cm^{-3}$, calcule.

a) O potencial de contato V_0 (sem polarização);

b) A largura da região de depleção (sem polarização);

c) Os valores de x_p e x_n

d) O novo valor de W para uma polarização reversa de 20V

Dados: $n_i = 1{,}5 \cdot 10^{10}\ cm^{-3}$; $V_t = 25mV$

Solução:

a) $V_0 = ?$

$$V_0 = \frac{K \cdot T}{q} \cdot \ln\left(\frac{N_A \cdot N_D}{n_i^2}\right) \Rightarrow V_0 = 25 \cdot 10^{-3} \cdot \ln\left(\frac{10^{17} \cdot 10^{16}}{(1{,}5 \cdot 10^{10})^2}\right)$$

$$V_0 = 0{,}728\ V$$

b)

$$W = \sqrt{\frac{2 \cdot 1{,}04 \cdot 10^{-12}}{1{,}6 \cdot 10^{-19}} \cdot \left(\frac{1}{10^{17}} + \frac{1}{10^{16}}\right) \cdot 0{,}728}$$

$$W = 3{,}23 \cdot 10^{-5}\ cm$$

c)

$x_p + x_n = W$ $\qquad$ $x_n = 10 x_p$

$x_p \cdot N_A = x_n \cdot N_D$ $\qquad$ $x_p = \frac{W}{11} = x_p = 0{,}294 \cdot 10^{-5}\ cm$

$x_n = 2{,}94 \cdot 10^{-5}\ cm$

d)

$W = ? \rightarrow V_{rev} = 20V$

$$W = \sqrt{\frac{2 \cdot 1{,}04 \cdot 10^{-12}}{1{,}6 \cdot 10^{-19}} \cdot \left(\frac{1}{10^{17}} + \frac{1}{10^{16}}\right) \cdot (0{,}728 + 20)} \Rightarrow W = 16{,}92 \cdot 10^{-5}$$

Eletrônica I

15/10/2012

- **Efeito transistor:** A corrente por uma junção reversamente polarização é controlada por uma junção diretamente polarorizada colocada próxima. Nesta condição o transistor bipolar de junção (TBJ) funciona como amplificador e/ou fonte de corrente.

- **Corrente:**

① Corrente de elétrons que saíram do emissor devido a polarização direta entre base-emissor, passaram pela base e chegaram ao coletor por deriva (pol. reversa da junção).

② Corrente de eletrons que saíram do emissor e foram recombinadas com as lacunas da base.

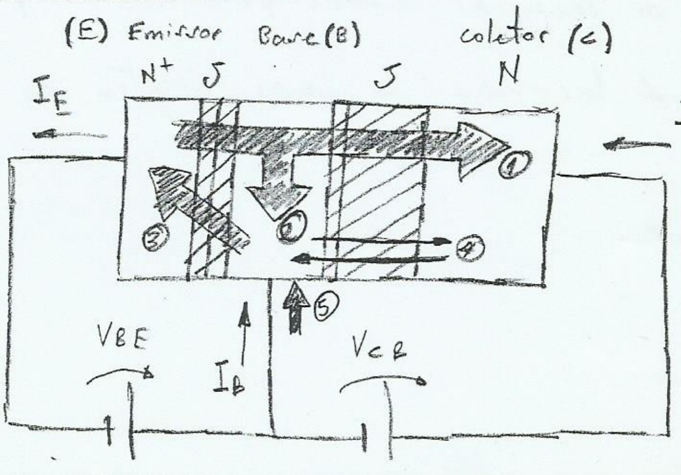
③ Corrente de difusão de lacunas da base para o emissor devido a polarização direta.

④ Corrente de deriva "natural" da junção reversamente polarizada.

⑤ Corrente de difusão de lacunas para repor as lacunas perdidas devido as componentes ② e ③.

- **Estrutura física:**

→ transistor NPN:

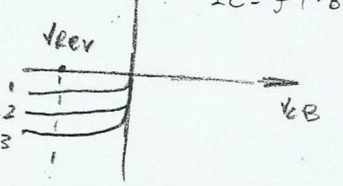


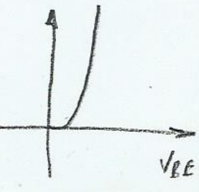
modo ativo { - Amplificador; - Fonte de corrente;

$I_E = I_B + I_C$

$V_{CE} = V_{BE} + V_{CB}$

$I_C = f(V_{BE})$





→ transistor PNP:

• Corrente no coletor:

$$\boxed{i_C = I_S \cdot e^{\frac{V_{BE}}{V_t}}}$$

$$\boxed{I_S = \frac{A_E \cdot q \cdot D_n \cdot n_i^2}{N_A \cdot W_B}}$$

A_E: Área da junção;

D_n: coeficiente de difusão do elétron;

n_i: concentração intrínseca;

N_A: dopagem da base tipo P;

W_B: largura da região da base;

• Corrente de base:

$$\boxed{i_B = \frac{i_C}{\beta}}$$

$$\boxed{\beta^{-1} = \left(\frac{D_p}{D_n} \cdot \frac{N_A}{N_D} \cdot \frac{W_B}{L_p} + \frac{1}{2} \cdot \frac{W_B^2}{D_n \cdot \tau_b} \right)}$$

N_D = concentração de elétrons do emissor tipo N.

D_p = coeficiente de difusão de lacunas (base p/ o emissor)

L_p = comprimento de difusão de lacunas da base dentro do emissor.

τ_b = tempo de vida do portador.

ELETRÔNICA I

17/10/2013

- **Corrente do emissor:**

$i_E = i_C + i_B$; $i_C = \beta \cdot i_B$; $i_E = i_C + \frac{i_C}{\beta}$; $i_E = \left(\frac{\beta + 1}{\beta}\right) \cdot i_C$

$\alpha = \frac{\beta}{\beta + 1}$; $i_C = \alpha \cdot i_E$

α = ganho de corrente ($\alpha \cong 1$)

$i_E = \frac{i_C}{\alpha} = \frac{I_S}{\alpha} \cdot e^{V_{BE}/V_t}$; $i_B = \frac{i_C}{\beta} = \frac{I_S}{\beta} \cdot e^{V_{BE}/V_t}$

$\frac{I_S}{\alpha}$ e $\frac{I_S}{\beta}$ → Fator de escala

- **Corrente Reversa I_{CBo}:**

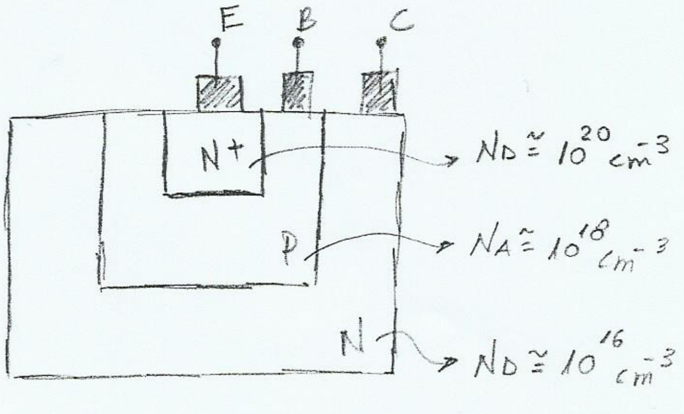
$i_C = \beta \cdot i_B + I_{CBo}$

I_{CBo} = Corrente entre base e coletor (reversa) com o emissor em aberto.

→ Desprezível à temperatura ambiente

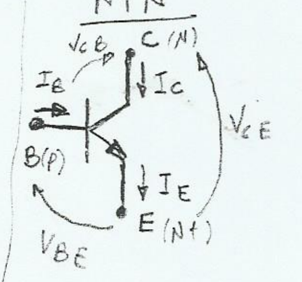
→ Dobra a cada 10°C de aumento da temperatura.

- **Estrutura do TBJ:**



- **Símbolos do TBJ**

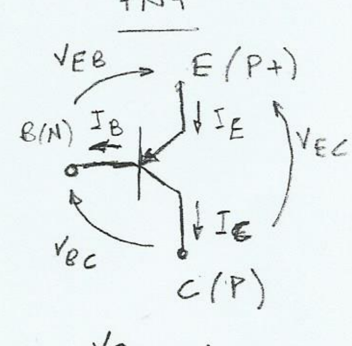
NPN



$V_{CE} = V_{BE} + V_{CB}$

$I_E = I_B + I_C$

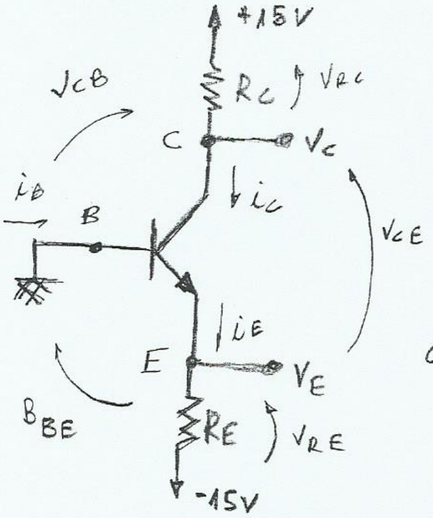
PNP



$V_{EC} = V_{EB} + V_{BC}$

$I_E = I_B + I_C$

Exemplo 5.1:



$\beta = 100$

$V_{BE} = 0{,}7V \to I_C = 1mA$

Calcule R_E e R_C para $I_C = 2mA$ e $V_C = 5V$.

Admitindo modelo ativo:

$R_C = \frac{15-5}{2\cdot10^{-3}} \Rightarrow \boxed{R_C = 5k\Omega}$

$i_C = \alpha \cdot i_E \Rightarrow i_E = \frac{i_C}{\alpha}$

$\alpha = \frac{\beta}{\beta+1} \Rightarrow \alpha = \frac{100}{100+1} \Rightarrow \boxed{\alpha = 0{,}99}$

$R_E = \frac{V_{RE}}{i_E} = \frac{V_E - (-15)}{i_E}$

$i_E = \frac{2\cdot10^{-3}}{0{,}99} \Rightarrow \boxed{I_E = 2{,}02mA}$

$V_E = ? \to V_{BE} = ?$, quando $I_C = 2mA$

$I_C = I_S \cdot e^{V_{BE}/V_T} \Rightarrow I_S = \frac{I_C}{e^{V_{BE}/V_T}} \Rightarrow I_S = \frac{1\cdot10^{-3}}{e^{\frac{0,7}{25\cdot10^{-3}}}} \therefore I_S = 6{,}91\cdot10^{-16}A$

$V_{BE} = V_T \cdot \ln\frac{I_C}{I_S} \Rightarrow V_{BE}' = 25\cdot10^{-3}\cdot\ln\frac{2{,}02\cdot10^{-3}}{6{,}91\cdot10^{-16}}$

$V_{BE}' = 0{,}717V$

$V_B = V_B - V_E \Rightarrow \boxed{V_E = -0{,}717V}$

$R_E = \frac{-0{,}717+15}{2{,}02\cdot10^{-3}} \Rightarrow R_E = 7{,}07k\Omega$

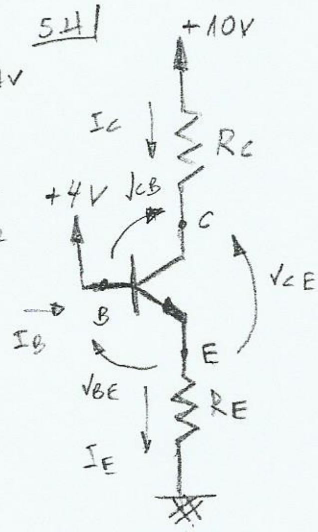
22/10/2012

ELETRÔNICA I

Análise CC de circuitos com TBJ:

5.41

$V_{BE} = 0,7V$
$\beta = 100$
$R_E = 3,3k\Omega$
$R_C = 4,7k\Omega$



Admitindo que o TBJ está no modo ativo.

$\boxed{V_B = 4V}$; $V_{BE} = V_B - V_E \Rightarrow \boxed{V_E = 3,3V}$

$I_E = \frac{V_{RE}}{R_E} \Rightarrow I_E = \frac{V_E}{R_E} \Rightarrow \frac{3,3}{3,3k} \Rightarrow \boxed{I_E = 1mA}$

$I_C = \alpha . I_E \Rightarrow \alpha = \frac{I_C}{I_E} \Rightarrow \alpha = \frac{\beta}{\beta+1} \Rightarrow \alpha = \frac{100}{100+1} \Rightarrow$

$\boxed{\alpha = 0,99}$, $I_C = 0,99 . 1 . 10^{-3} \Rightarrow \boxed{I_C = 0,99mA}$

$I_E = I_C + I_B \Rightarrow I_B = I_E - I_C \Rightarrow \boxed{I_B = 0,01mA}$

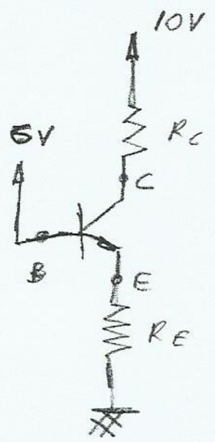
$V_C = 10 - R_C . I_C \Rightarrow V_C = 10 - 4,7 . 10^3 . 0,99 . 10^{-3} \Rightarrow$

$\boxed{V_C = 5,35V}$

$V_{CB} = 5,35 - 4 \Rightarrow \boxed{V_{CB} = 1,35V}$ ✓ junção base coletor esta reversamente polarizado.

$V_{CE} = V_{CB} + V_{BE} \Rightarrow V_{CE} = 1,35 + 0,7 \Rightarrow \boxed{V_{CE} = 2,05V}$

5.5



Admitindo modo ativo

$\boxed{V_B = 6V}$

$\boxed{V_{BE} = 0,7V}$

$V_E = 6 - 0,7$

$\boxed{V_E = 5,3V}$

$\boxed{i_C = 1,59mA}$

$i_E = \frac{V_E}{R_E}$

$\boxed{i_E = 1,61mA}$

$i_C = 0,99 \cdot 1,61 \cdot 10^{-3}$

$I_B = I_E - I_C$

$\boxed{I_B = 0,02mA}$

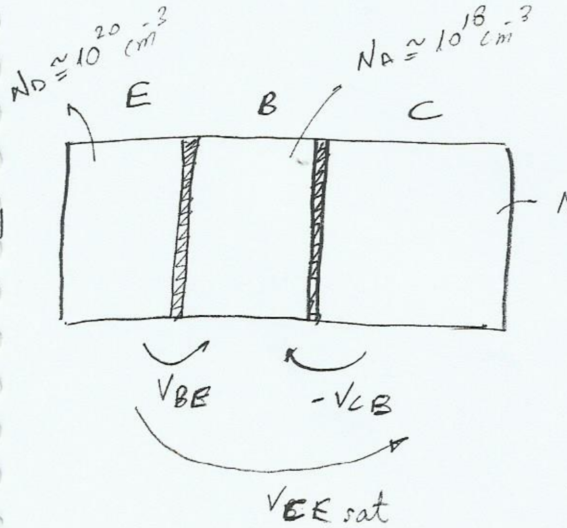
$V_C = 10 - 4,7 \cdot 10^{3} \cdot 1,59 \cdot 10^{-3}$

$\boxed{V_C = 2,53V}$

$V_{CB} = V_C - V_B \Rightarrow V_{CB} = 2,53 - 6 \Rightarrow \boxed{V_{CB} = -3,47V}$?

A junção base coletor está diretamente polarizado, portanto não está a ativo.

Considerando estado saturado.:



$$V_0 = \frac{K.T}{q} \cdot \ln\left(\frac{N_A . N_D}{n_i^2}\right)$$

$V_0(BE) > V_0(BC)$

$V_0(BE) \cong 0,7V$ e $V_0(BC) \cong 0,5V$ $\therefore$ $\boxed{V_{CE\,sat} \cong 0,2V}$

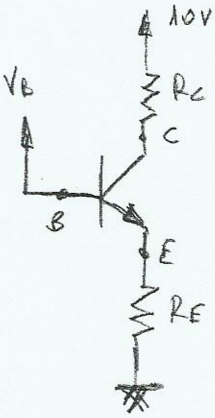
$\boxed{V_B = 6V}$ e $\boxed{V_E = 5,3V}$; $\boxed{I_E = 1,61mA}$

$V_C = V_E + V_{CE sat} \Rightarrow V_C = 5,3 + 0,2 \Rightarrow \boxed{V_C = 5,5V}$

$I_C = \frac{V_{RC}}{R_C} \Rightarrow I_C = \frac{10 - V_C}{R_C} \Rightarrow I_C = \frac{10 - 5,5}{4,7 \cdot 10^{3}} \Rightarrow \boxed{I_C = 0,96mA}$

$I_B = I_E - I_C \Rightarrow I_B = (1,61 - 0,96) \cdot 10^{-3}$ $\therefore$ $\boxed{I_B = 0,65mA}$

Exercício 5.6



$V_{BE} = 0{,}7V$

$\beta = 100V$

$R_E = 3{,}3K\Omega$

$R_C = 4{,}7K\Omega$

Determinar o valor de V_B que mantém o TBJ no limiar entre saturação e ativo.

No limiar, $V_{CB} = 0V \begin{cases} V_C = V_B \\ V_{CE} = V_{BE} \end{cases}$

$V_C = V_{CC} - R_C \cdot i_C;$

$V_B = V_E + V_{BE};$

$V_{CC} - R_C \cdot i_C = V_E + V_{BE} = R_E \cdot i_E + V_{BE}$

$i_C = \alpha \cdot i_E$ (Pode ser utilizado no limiar)

$V_{CC} - R_C \cdot \alpha \cdot i_E = R_E \cdot i_E + V_{BE}$

$$i_E = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{\alpha \cdot R_C + R_E} \Rightarrow i_E = \frac{10 - 0{,}7}{0{,}99 \cdot 4{,}7 \cdot 10^3 + 3{,}3 \cdot 10^3} \Rightarrow i_E = 1{,}17\,mA$$

$V_B = R_E \cdot i_E + V_{BE} \Rightarrow V_B = 3{,}3 \cdot 10^3 \cdot 1{,}17 + 0{,}7$

$\boxed{V_B = 4{,}56\,V}$

ELETRÔNICA I

24/10/2012

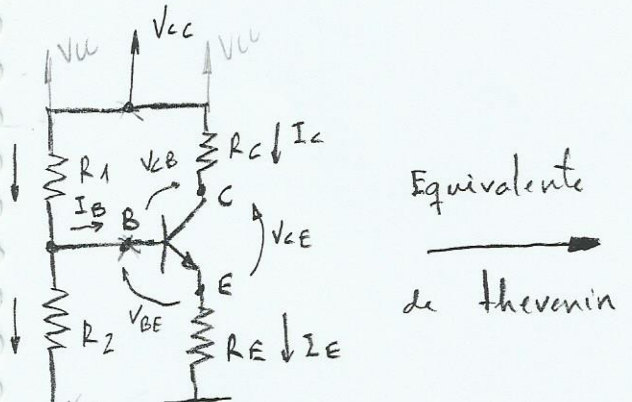
Análise gráfica e polarização do TBJ

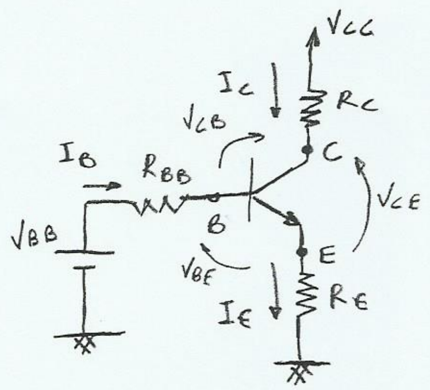
$$P/V_i = 0 \begin{cases} V_{BB} = V_{BE} + R_B \cdot i_B & \text{(malha da base)} \\ V_{CC} = V_{CE} + R_C \cdot i_C & \text{(malha do coletor)} \end{cases}$$

$$\text{Curva } i_B \times V_{BE} \begin{cases} \text{ponto A} \rightarrow i_B = 0 \rightarrow V_{BE} = V_{BB} \\ \text{ponto B} \rightarrow V_{BE} = 0 \rightarrow i_B = \dfrac{V_{BB}}{R_B} \end{cases}$$

Determinada a corrente de base $i_B = I_B$, sabemos que o ponto de operação estará sobre a curva $i_C \times V_{CE}$, correspondendo ao valor da corrente de base $i_B = I_B$.

$$\text{Curva } i_C \times V_{CE} \begin{cases} \text{Ponto A} \rightarrow i_C = 0 \rightarrow V_{CE} = V_{CC} \\ \text{Ponto B} \rightarrow V_{CE} = 0 \rightarrow i_C = \dfrac{V_{CC}}{R_C} \end{cases}$$





$$V_{BB} = R_2 \cdot \frac{V_{CC}}{R_1 + R_2} \qquad R_{BB} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

Malha da Base:

$$V_{BB} = R_{BB} \cdot I_B + V_{BE} + R_E \cdot I_E$$

Malha do coletor:

$$V_{CC} = R_C \cdot I_C + V_{CE} + R_E \cdot I_E$$

A partir da malha (2), temos:

$$V_{BB} - V_{BE} = R_B \cdot I_B + R_E \cdot I_E$$

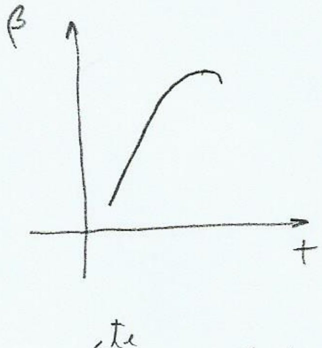
$$I_B = \frac{I_E}{(1+\beta)}$$

$$V_{BB} - V_{BE} = R_B \cdot \frac{I_E}{1+\beta} + R_E \cdot I_E$$

$$I_E = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_E + \frac{R_{BB}}{(1+\beta)}}$$

Efeito da temperatura $\begin{cases} \text{· modifica } V_{BE} \\ \text{· modifica } \beta \\ \text{· modifica } I_{CBO} \end{cases}$

$$I_C = \beta \cdot I_B + I_{CBO}$$



β => aumenta com a temperatura!

I_{CBO} => aumenta com a temperatura!
(geração térmica)

$$\overset{cte}{I_C} = \beta \cdot \cancel{I_B} + \cancel{I_{CBO}}$$

Para manter $I_C = cte$, I_B tem que diminuir uma vez que β e I_{CBO} aumentam com a temperatura. Para isto existe a resistencia R_E, que produz uma realimentação negativa na malha da base.

Quando, $\left. T\uparrow \rightarrow I_C\uparrow \rightarrow I_E\uparrow \rightarrow \downarrow I_B \right\}$.

$$\overset{cte}{V_{BB}} = \overset{cte}{R_{BB}} \cdot I_B\downarrow + \overset{\simeq cte}{V_{BE}} + \overset{cte}{R_E} \cdot I_E\uparrow$$

Para manter estabilidade, tem-se, a partir de:

$$\boxed{V_{BB} >> V_{BE}}$$

$$\boxed{\frac{R_{BB}}{1+\beta} << R_E} \rightarrow \text{Regra prática: 10 vezes menor!}$$

ELETRÔNICA I

29/10/2012

O transistor como amplificador:

- Operação no modo ativo;
- Polarização cc com o objetivo de estabelecer o ponto de trabalho;

A corrente de coletor e a transcondutância:

$v_{be} \neq 0 \rightarrow v_{BE} = V_{BE} + v_{be}$

$\therefore \; i_c = I_s . e^{v_{BE}/V_t} = I_s . e^{\frac{(V_{BE}+v_{be})}{V_t}}$

$i_c = \underbrace{I_s . e^{V_{BE}/V_t}}_{I_c} . e^{v_{be}/V_t} \Rightarrow \boxed{i_c = I_c . e^{v_{be}/V_t}}$

Admitindo $v_{be} \ll V_t$, pode ser aproximada por:

$i_c \cong I_c . \left(1 + \frac{v_{be}}{V_t}\right)$; válida para $v_{be} < 10mV$ (amplitude)

$\therefore \; i_c = I_c + \frac{I_c . v_{be}}{V_t}$

$\underbrace{i_C}_{total} = \underbrace{I_C}_{DC} + \underbrace{i_c}_{AC} \quad \therefore \quad \boxed{i_c = \frac{I_c}{V_t} . v_{be}}$ → parte alternada (AC) de corrente do coletor.

Chamando de $g_m = \frac{i_c}{v_{be}} = \frac{I_c}{V_t}$ = transcondutancia, temos:

$\boxed{i_c = g_m . v_{be}}$

$\boxed{g_m = \frac{I_c}{V_t}}$

A corrente de base e a Resistência de entrada da base:

$$i_B = \frac{i_C}{\beta} = \frac{I_C + i_c}{\beta}$$

$$i_B = \frac{I_C}{\beta} + \frac{i_c}{\beta} = \underbrace{\frac{I_C}{\beta}}_{I_B} + \underbrace{\frac{g_m \cdot v_{be}}{\beta}}_{i_b}$$

$$\therefore \boxed{i_b = \frac{g_m}{\beta} \cdot v_{be}}$$

A resistência de entrada da base, definida entre a base e o emissor, é dado por:

$$\boxed{r_\pi = \frac{v_{be}}{i_b}} \quad \therefore \quad r_\pi = \frac{\beta}{g_m} = \frac{\frac{I_C}{I_B}}{\frac{I_C}{V_T}}$$

$$\therefore \boxed{r_\pi = \frac{V_T}{I_B}}$$

A corrente de emissor e a resistência de entrada do emissor:

$$i_E = \frac{i_C}{\alpha} = \underbrace{\frac{I_C}{\alpha}}_{I_E} + \underbrace{\frac{i_c}{\alpha}}_{i_e}$$

$$i_e = \frac{g_m \cdot v_{be}}{\alpha} = \frac{I_C}{\alpha \cdot V_T} \cdot v_{be} = \frac{I_E}{V_T} \cdot v_{be}$$

Chamando de r_e a resistência entre base e emissor, temos:

$$r_e = \frac{v_{be}}{i_e}$$

$$\therefore \boxed{r_e = \frac{V_T}{I_E}}$$

Relação entre r_π e r_e:

$$\boxed{r_\pi = (1+\beta) \cdot r_e}$$

<u>Ganho de tensão (A_v):</u>

$$v_C = V_{CC} - i_C \cdot R_C$$

$$v_C = V_{CC} - (I_C + i_c) \cdot R_C$$

$$v_C = \underbrace{(V_{CC} - R_C \cdot I_C)}_{V_C} - \underbrace{R_C \cdot i_c}_{v_c}$$

$A_v = \dfrac{v_c}{v_{be}}$ (obs: para este circuito)

$$A_v = -\frac{R_C \cdot i_c}{v_{be}} = -\frac{R_C \cdot g_m \cdot \cancel{v_{be}}}{\cancel{v_{be}}}$$

$$\therefore \boxed{A_v = -R_C \cdot g_m}$$

<u>OBS</u>: O sinal negativo (-) significa inversão de fase entre o sinal de entrada (v_{be}) e de saída (v_c).

Exercício:

$$TBJ \begin{cases} \beta = 100 \\ I_c = 1mA \end{cases} \quad g_m = ? \quad r_\pi = ? \quad r_e = ?$$

$V_T = 25mV$

$$I_c = \beta \cdot I_B \Rightarrow I_B = \frac{I_c}{\beta} \Rightarrow I_B = \frac{1m}{100} \Rightarrow \boxed{I_B = 10\mu A}$$

$$g_m = \frac{I_c}{V_T} \Rightarrow g_m = \frac{1m}{25m} \Rightarrow \boxed{g_m = 40 mA/V}$$

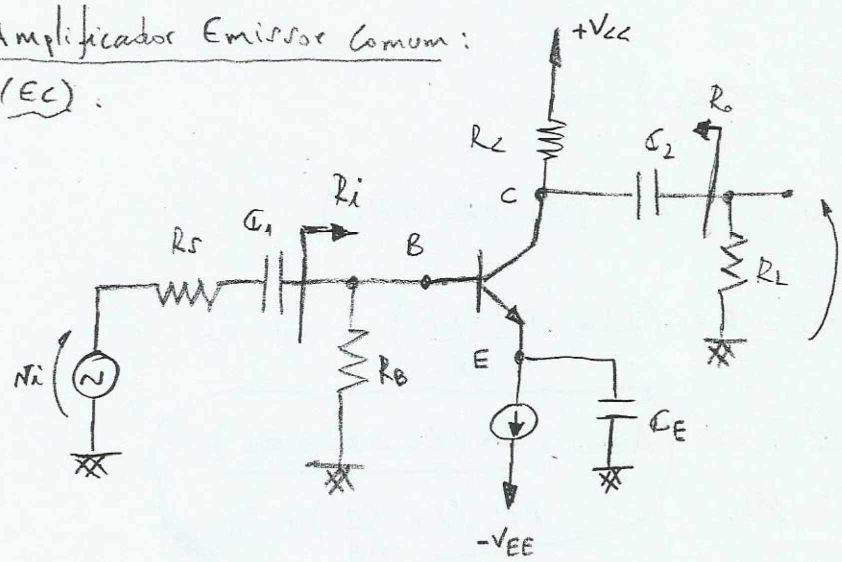
$$r_\pi = \frac{V_T}{I_B} \Rightarrow r_\pi = \frac{25m}{10\mu} \Rightarrow \boxed{r_\pi = 2{,}5\, k\Omega}$$

$$r_\pi = (1+\beta) \cdot r_e \Rightarrow r_e = \frac{r_\pi}{1+\beta} \Rightarrow \boxed{r_e = 25\Omega}$$

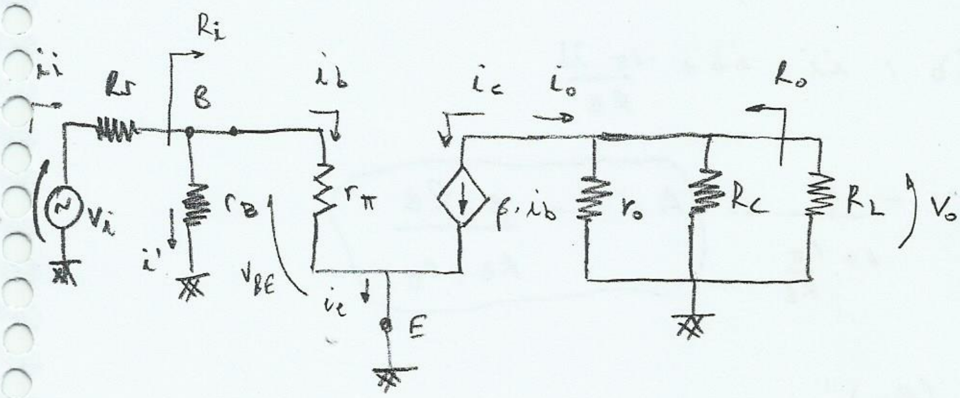
ELETRÔNICA I

05/11/2012

- Amplificador Emissor Comum: (EC).



Análise CA (com efeito Early)



- Resistência de entrada (R_i):

$$R_i = \frac{v_b}{i_i} \quad ; \quad v_b = R_B \cdot i' = r_\pi \cdot i_b \quad ; \quad i_i = i_b + i'$$

$$i' = \frac{v_b}{R_B} = \frac{r_\pi \cdot i_b}{R_B} \Rightarrow i_i = i_b + \frac{r_\pi \cdot i_b}{R_B} \Rightarrow R_i = \frac{v_b}{i_i} \Rightarrow$$

$$R_i = \frac{r_\pi \cdot \cancel{i_b}}{\cancel{i_b} + \frac{r_\pi \cdot \cancel{i_b}}{R_B}} \Rightarrow R_i = \frac{r_\pi}{1 + \frac{r_\pi}{R_B}} \Rightarrow R_i = \frac{r_\pi}{\frac{R_B + r_\pi}{R_B}} \Rightarrow R_i = \frac{r_\pi \cdot R_B}{R_B + r_\pi}$$

$$\therefore \boxed{R_i = r_\pi \,//\, R_B}$$

- Ganho de tensão (Av):

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} \quad ; \quad v_o = (R_C // R_O // R_L) \cdot i_o$$

$$i_o = -i_C = -\beta \cdot i_b \Rightarrow v_o = -\beta \cdot i_b \cdot (R_C // R_O // R_L)$$

$$v_i = R_S \cdot i_i + r_\pi \cdot i_b \Rightarrow v_i = R_S \cdot \left(i_b + \frac{r_\pi \cdot i_b}{R_B}\right) + r_\pi \cdot i_b$$

$$A_v = \frac{-\beta \cdot \cancel{i_b} \cdot (R_C // R_O // R_L)}{R_S \cdot \left(\cancel{i_b} + \frac{r_\pi \cdot \cancel{i_b}}{R_B}\right) + r_\pi \cdot \cancel{i_b}} \Rightarrow A_v = \frac{-\beta \cdot (R_C // R_O // R_L)}{R_S \cdot \left(1 + \frac{r_\pi}{R_B}\right) + r_\pi}$$

- Ganho de corrente (Ai):

$$A_i = \frac{i_o}{i_i} \quad ; \quad i_o = -\beta \cdot i_b \quad ; \quad i_i = i_b + \frac{r_\pi \cdot i_b}{R_B}$$

$$A_i = \frac{-\beta \cdot \cancel{i_b}}{\cancel{i_b} + \frac{r_\pi \cdot \cancel{i_b}}{R_B}} \Rightarrow A_i = \frac{-\beta}{1 + \frac{r_\pi}{R_B}} \Rightarrow A_i = -\frac{\beta \cdot R_B}{R_B + r_\pi}$$

- Resistência de saída (Ro):

$$R_o = R_C // r_o$$

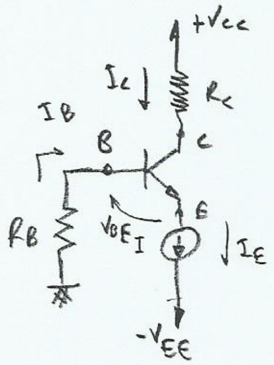
5.43

Dados: $R_L = 5k\Omega$; $R_S = 5k\Omega$; $R_C = 8k\Omega$; $R_B = 100k\Omega$

$I = 1mA$; $\beta = 100$; $r_o = 100k\Omega$

Pede-se: $A_v = ?$; $A_i = ?$; $R_i = ?$ $v_\pi = v_{be} = 5mV$ → $v_{i\,max} = ?$ → $v_{o\,max} = ?$

Análise CC:



$\boxed{I_E = 1mA}$

$\alpha = \dfrac{\beta}{\beta+1} \Rightarrow \alpha = \dfrac{100}{101} \Rightarrow \boxed{\alpha = 0{,}99}$

$I_C = \alpha \cdot 1 \cdot 10^{-3} \Rightarrow \boxed{I_C = 0{,}99\,mA}$

$I_B = I_E - I_C \Rightarrow \boxed{I_B = 0{,}01\,mA}$

$g_m = \dfrac{I_C}{V_T} \Rightarrow g_m = \dfrac{0{,}99 \cdot 10^{-3}}{0{,}025} \Rightarrow \boxed{g_m = 39{,}6\,mA/V}$

$r_\pi = \dfrac{V_T}{I_B} \Rightarrow r_\pi = \dfrac{25 \cdot 10^{-3}}{0{,}1 \cdot 10^{-3}} \Rightarrow \boxed{r_\pi = 2{,}5\,k\Omega}$

$r_e = \dfrac{V_T}{I_E} \Rightarrow r_e = \dfrac{r_\pi}{1+\beta} \Rightarrow r_e = \dfrac{2{,}5 \cdot 10^{-3}}{1+100} \therefore \boxed{r_e \cong 25\,\Omega}$

Análise CA

- Resistência de entrada: (R_i)

$R_i = r_\pi // R_B \Rightarrow R_i = \dfrac{2{,}5K \cdot 100K}{2{,}5K + 100K} \Rightarrow \boxed{R_i = 2{,}44K\Omega}$

- Ganho de tensão (A_v) :

$A_v = \dfrac{-\beta \cdot (R_C // R_L // r_o)}{R_S \cdot \left(1 + \frac{r_\pi}{R_B}\right) + r_\pi} \Rightarrow A_v = \dfrac{-100 \cdot (8k // 100k // 5k)}{5k \cdot \left(1 + \frac{2{,}5k}{100k}\right) + 2{,}5k} \Rightarrow \boxed{A_v = -39{,}4\,V/V}$

- Ganho de corrente (A_i):

$A_i = \dfrac{-\beta}{1 + \frac{r_\pi}{R_B}} \Rightarrow A_i = -\dfrac{100}{1 + \frac{2{,}5k}{100k}} \Rightarrow \boxed{A_i = -97{,}56\,A/A}$

Para $v_{be\,máx} = 5mV \begin{cases} \rightarrow v_{i\,máx} = ? \\ \rightarrow v_{o\,máx} = ? \end{cases}$

$$v_i = R_S \cdot i_i + \underbrace{r_\pi \cdot i_b}_{V_{be}}$$

$$v_i = R_S \cdot \left(\underbrace{i_b}_{\frac{V_{be}}{r_\pi}} + \frac{\overbrace{r_\pi \cdot i_b}^{V_{be}}}{R_B}\right) + \underbrace{r_\pi \cdot i_b}_{V_{be}}$$

$$v_{i\,máx} = R_S \cdot \left(\frac{v_{be\,máx}}{r_\pi} + \frac{v_{be\,máx}}{R_B}\right) + v_{be\,máx}$$

$$v_{i\,máx} = 5K \cdot \left(\frac{5m}{2,5K} + \frac{5m}{100K}\right) + 5m$$

$$v_{i\,máx} = 15mV$$

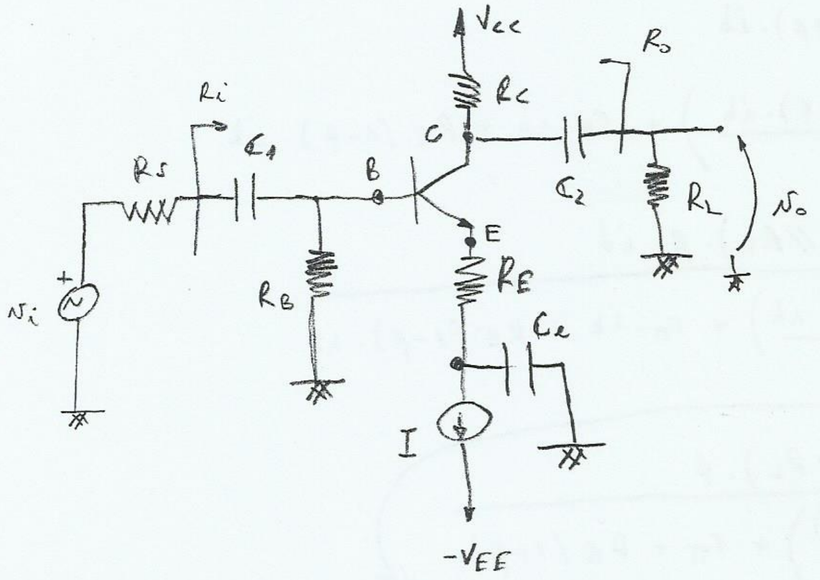
$$v_{o\,máx} = A_V \cdot v_{i\,máx} \Rightarrow v_{o\,máx} = -39,4 \cdot 15m$$

$$v_{o\,máx} = -0,591\ V$$

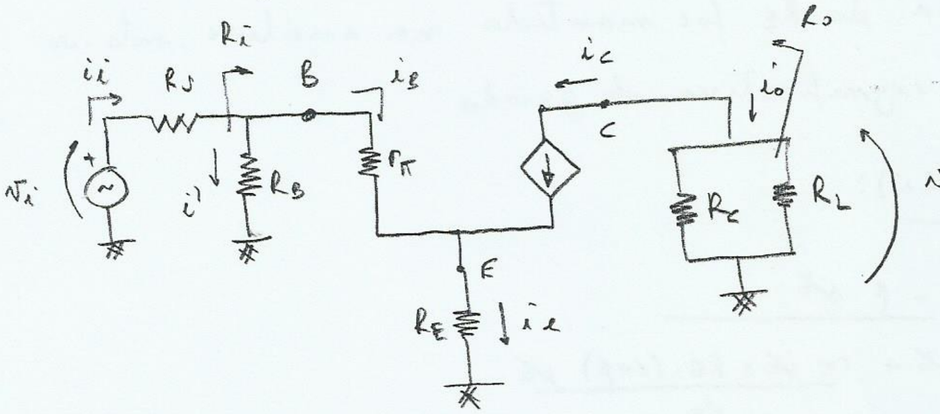
07/11/2012

ELETRÔNICA I

Amplificador em Emissor comum com resistência de emissor:



Análise CA:



• **Resistência de entrada (Ri):**

$$Ri = \frac{Nb}{ii} \quad ; \quad Nb = r_\pi \cdot ib + R_E \cdot ie \quad ; \quad Nb = r_\pi \cdot ib + R_E \cdot (1+\beta) \cdot ib$$

$$ii = ib + i' \quad ; \quad i' = \frac{Nb}{R_B} \Rightarrow i' = \frac{r_\pi \cdot ib + R_E \cdot (1+\beta) \cdot ib}{R_B}$$

$$ii = ib + \frac{r_\pi \cdot ib + R_E \cdot (1+\beta) \cdot ib}{R_B} \quad ; \quad Ri = \frac{r_\pi \cdot ib + R_E \cdot (1+\beta) \cdot ib}{ib + \frac{r_\pi \cdot ib + R_E \cdot (1+\beta) \cdot ib}{R_B}}$$

$$Ri = \frac{r_\pi + R_E \cdot (1+\beta)}{1 + \frac{r_\pi + R_E \cdot (1+\beta)}{R_B}} \Rightarrow Ri = \frac{(r_\pi + R_E \cdot (1+\beta))}{\frac{R_B + (r_\pi + R_E \cdot (1+\beta))}{R_B}} \Rightarrow Ri = \frac{R_B \cdot (r_\pi + R_E \cdot (1+\beta))}{R_B + (r_\pi + R_E \cdot (1+\beta))}$$

$$\therefore \boxed{Ri = R_B \,//\, (r_\pi + R_E \cdot (1+\beta))}$$

- Ganho de tensão: (A_v)

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} \; ; \; v_o = (R_C // R_L) \cdot i_o \Rightarrow v_o = -(R_C // R_L) \cdot \beta \cdot i_b$$

$$v_i = R_S \cdot i_i + r_\pi \cdot i_b + R_E \cdot (1+\beta) \cdot i_b$$

$$v_i = R_S \cdot \left(i_b + \frac{r_\pi \cdot i_b + R_E \cdot (1+\beta) \cdot i_b}{R_B} \right) + r_\pi \cdot i_b + R_E \cdot (1+\beta) \cdot i_b$$

$$A_v = \frac{-(R_C // R_L) \cdot \beta \cdot i_b}{R_S \cdot \left(i_b + \frac{r_\pi \cdot i_b + R_E \cdot (1+\beta) \cdot i_b}{R_B} \right) + r_\pi \cdot i_b + R_E \cdot (1+\beta) \cdot i_b}$$

$$A_v = \frac{-(R_C // R_L) \cdot \beta}{R_S \cdot \left(1 + \frac{r_\pi + R_E \cdot (1+\beta)}{R_B} \right) + r_\pi + R_E (1+\beta)}$$

OBS: Se a presença do R_E for mantida na análise, nota-se uma redução significativa do ganho.

- Ganho de corrente (A_i):

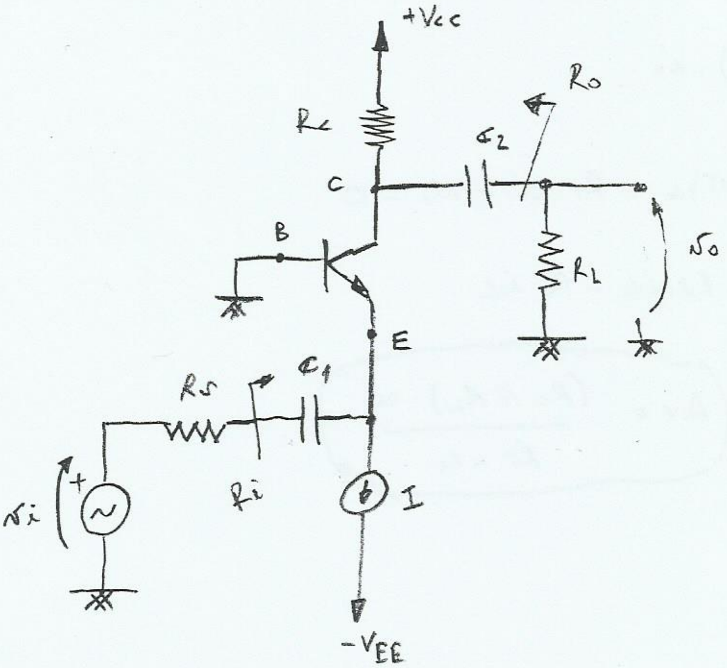
$$A_i = \frac{i_o}{i_i} \; ; \; A_i = \frac{-\beta \cdot \cancel{i_b}}{\cancel{i_b} + \frac{r_\pi \cdot \cancel{i_b} + R_E \cdot (1+\beta) \cdot \cancel{i_b}}{R_B}}$$

$$A_i = \frac{-\beta}{1 + \frac{r_\pi + R_E \cdot (1+\beta)}{R_B}} \; ; \; A_i = \frac{-\beta \cdot R_B}{R_B + r_\pi + R_E \cdot (1+\beta)}$$

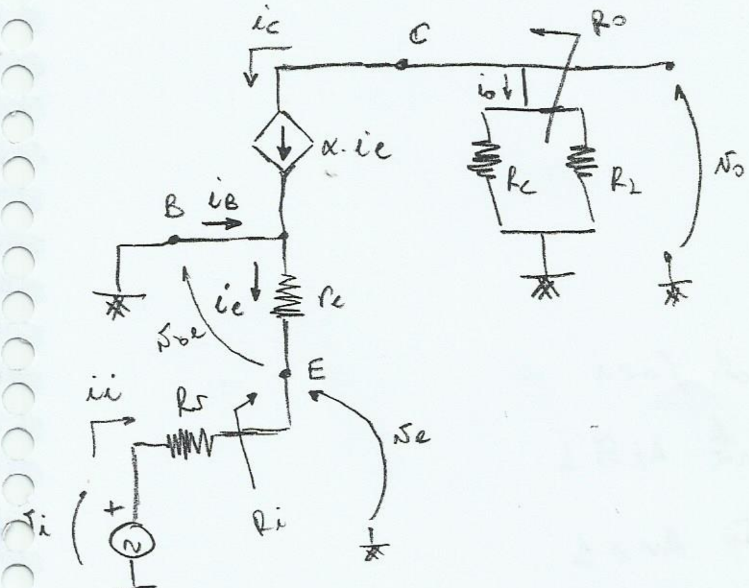
- Resistência de saída: (R_o)

$$R_o = R_C$$

Amplificador em base comum (BC):



Análise CA: (modelo T, sem r_o)



• Resistência de entrada (R_i):

$R_i = \frac{v_e}{i_i}$; $v_e + v_{be} = 0 \Rightarrow v_e = -v_{be} \Rightarrow v_e = -r_e \cdot i_e$

$i_i = -i_e \Rightarrow R_i = +\frac{r_e \cdot \cancel{i_e}}{+\cancel{i_e}} \Rightarrow \boxed{R_i = r_e}$

- Ganho de tensão: (A_v)

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} \quad ; \quad v_o = (R_c // R_L) \cdot i_o$$

$$v_o = -(R_c // R_L) \cdot \alpha \cdot i_e \quad ; \quad -v_{be} + R_s \cdot i_i - v_i = 0$$

$$v_i = R_s \cdot i_i - v_{be} \Rightarrow v_i = -R_s \cdot i_e - r_e \cdot i_e$$

$$A_v = \frac{-(R_c // R_L) \cdot \alpha \cdot \cancel{i_e}}{-R_s \cdot \cancel{i_e} - r_e \cdot \cancel{i_e}} \Rightarrow A_v = \frac{(R_c // R_L) \cdot \alpha}{R_s + r_e}$$

- Ganho de corrente: (A_i)

$$A_i = \frac{i_o}{i_i} \Rightarrow A_i = \frac{\cancel{-}\,\alpha \cdot \cancel{i_e}}{\cancel{-}\,\cancel{i_e}} \Rightarrow A_i = \alpha$$

- Resistencia de saída: (R_o)

$$R_o = R_c$$

OBS:

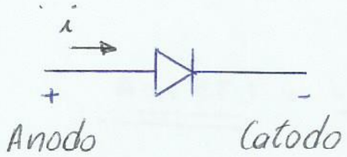
1 → Não há inversão de fase

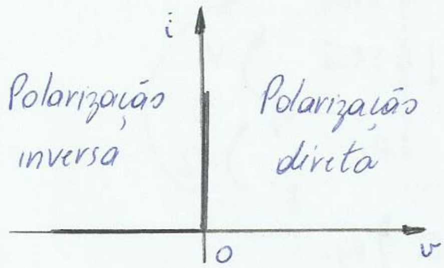
2 → O ganho de corrente $A_i \cong 1$

3 → O ganho de tensão $A_v > 1$

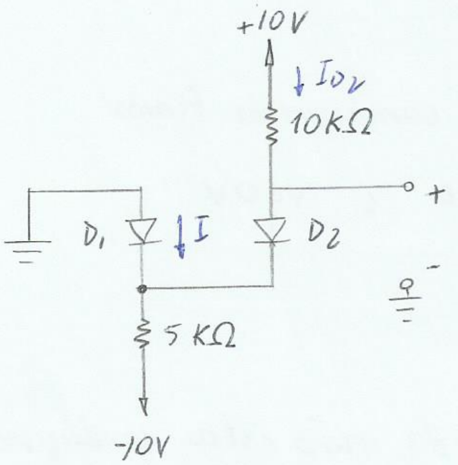
Exercícios

Capítulo 3 - Diodos

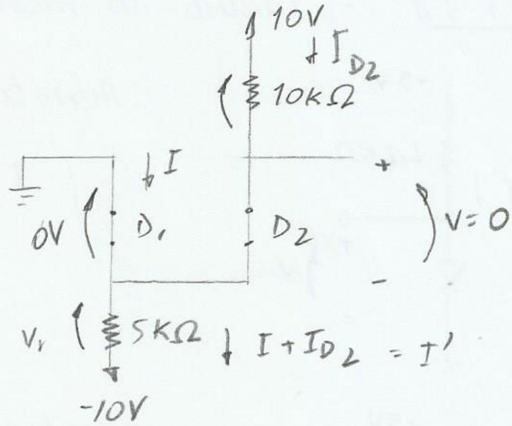




Exemplo 3.2 (a)



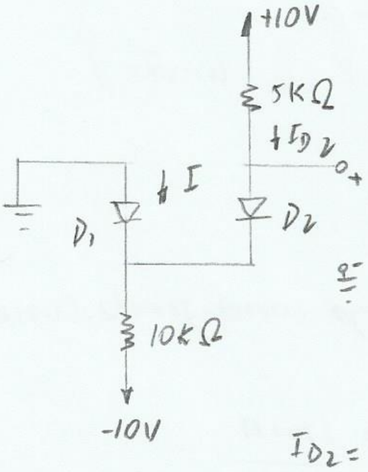
Admitindo D_1 e D_2 conduzindo, temos



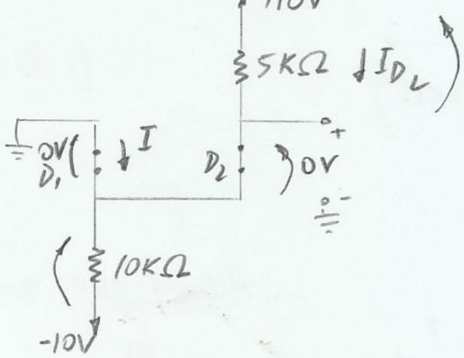
$I_{D2} = \frac{10}{10K} = 1mA$ $\quad$ $I' = \frac{0-(-10)}{5K} = 2mA$

$I_1' = I + I_{D2}$ $\therefore$ $I = 2 - 1 = 1mA$ $\quad$ logo $\boxed{\begin{array}{l} I = 1mA \\ I_{D2} = 1mA \end{array}}$.

Exemplo 3.2 (b)



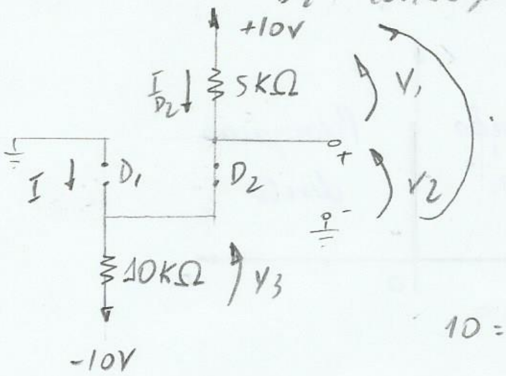
Admitindo D_1 e D_2 conduzindo



$I_{D2} = \frac{10-0}{5K} = 2mA$ $\quad$ $I_1 = \frac{0-(-10)}{10K} = 1mA$

logo $I = 1 - 2 = -1mA$ $\therefore$ Portanto essa hipótese não é válida, pois a corrente é negativa.

2ª hipótese D_1 : cortado
D_2 : conduzindo



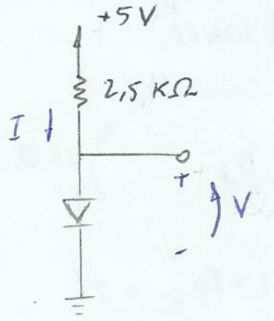
$V_T = V_1 + V_3$

$I_{D_2} = \frac{10-(-10)}{15K} = \underline{\underline{1{,}33\ mA}}$

$10 = 5K \cdot 1{,}33m + V_2 \quad \therefore \quad \underline{\underline{V_2 = +3{,}33V}}$

Exercício 3.4 - Calcule os valores de I e V

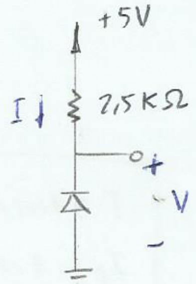
(a)



Admitindo o diodo conduzindo temos:

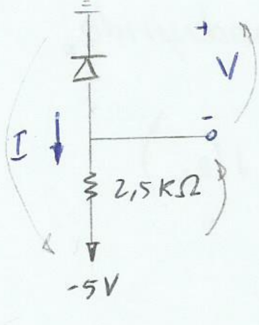
$I = \frac{5-0}{2{,}5K} = 2mA$ e $V = 0V$

(b)



Admitindo que o diodo não esta conduzindo, temos que a corrente $\underline{I=0}$ logo $\underline{V=5V}$

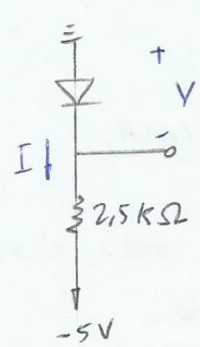
(c)



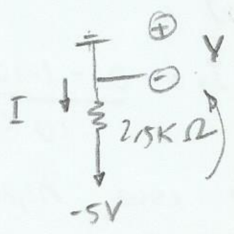
Admitindo que o diodo não esta conduzindo, temos, $\underline{I=0}$ e $\underline{V=5V}$

(Duvida no sinal da tensão) ..

(d)



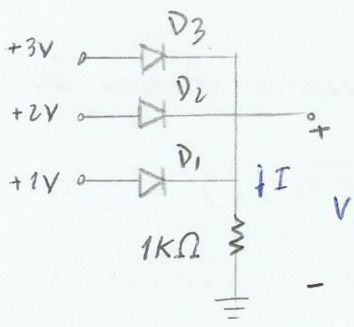
Admitindo que o diodo esteja conduzindo, temos



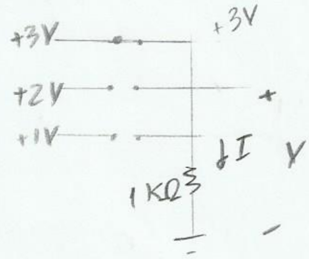
$I = \frac{0-(-5)}{2{,}5K} = \underline{2mA}$

$V = \underline{0V}$

e)



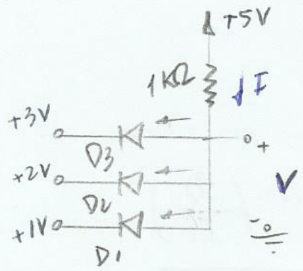
Admitindo $\begin{cases} D_3\text{: conduzindo} \\ D_2 \text{ e } D_1 \text{ cortado, temos} \end{cases}$



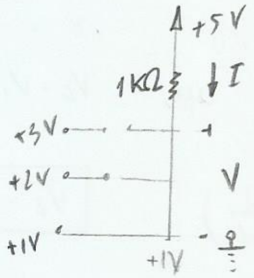
$\underline{V = 3V}$

$I = \dfrac{3}{1K} = \underline{3mA}$

f)



Admitindo $\begin{cases} D_1\text{: conduzindo} \\ D_2 \text{ e } D_3 \text{ cortado, temos} \end{cases}$



$I = \dfrac{5-1}{1K} = \underline{4mA}$

$\underline{V = +1V}$

Região de polarização direta

$$\boxed{i = I_s\left(e^{\frac{v}{nV_T}} - 1\right)}$$

× Polarização direta é uma operação estabelecida quando a tensão v for positiva.

$\underline{I_s}$ $\underline{\text{é a}}$ $\underline{\text{corrente de saturação}}$, (ou corrente de escala). Ela é uma função muito influenciada pela temperatura. ($\approx 10^{-5}$ A).

Obs.: I_s dobra a cada 5°C de aumento na temperatura.

$$\boxed{V_T = \frac{kT}{q}}$$

$k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ $\dfrac{\text{joules}}{\text{Kelvin}}$ (constante de Boltzmann)

T: Temperatura absoluta em Kelvin

q: $1{,}60 \cdot 10^{-19}$ coulomb (Valor da carga do elétron)

Observação: Quando não tiver os dados. Assumimos que:

temperatura ambiente: 20°C e $V_T = 25mV$

Exercício 3.6:

Diodo de um silício : $n = 1{,}5$

Determine a variação na tensão se a corrente varia de 0,1 mA a 10 mA.

$$i = I_S \left(e^{\frac{v}{nV_T}} - 1 \right)$$

$$I_1 = I_S \left(e^{\frac{V_1}{nV_T}} - 1 \right)$$

$$I_2 = I_S \left(e^{\frac{V_2}{nV_T}} - 1 \right)$$

Fazendo o quociente de I_1 e I_2

$$\frac{I_1}{I_2} = e^{\frac{V_1 - V_2}{nV_T}} \rightarrow \ln\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = \frac{V_1 - V_2}{nV_T}$$

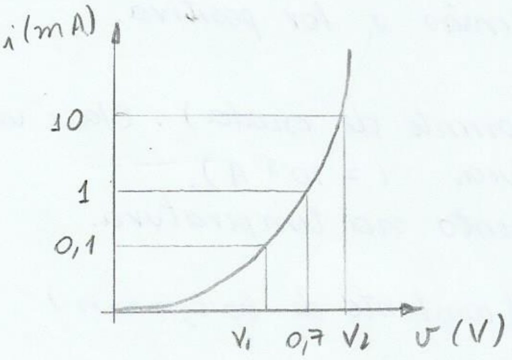
$$V_1 - V_2 = nV_T \ln\left(\frac{I_1}{I_2}\right) \quad \text{ou} \quad V_2 - V_1 = nV_T \ln\left(\frac{I_2}{I_1}\right)$$

$$V_2 - V_1 = 1{,}5 . 25\,10^{-3} \ln\left(\frac{10}{0{,}1}\right) \therefore \boxed{V_2 - V_1 = 172{,}7 \text{ mV}}$$

Exercício 3.7:

Diodo de junção de silício: $n = 1$ $v = 0{,}7\text{ V}$ $i = 1\text{mA}$

Calcule a queda de tensão para $i = 0{,}1\text{ mA}$ e 10mA



$$i = I_S \left(e^{\frac{v}{nV_T}} - 1 \right)$$

$$1.10^{-3} = I_S \left(e^{\frac{0{,}7}{25.10^{-3}}} - 1 \right)$$

$$\therefore I_S = 0{,}69.10^{-15} \text{ A}$$

$$i = I_S \left(e^{\frac{v}{nV_T}} - 1 \right)$$

$$\frac{i}{I_S} = e^{\frac{v}{nV_T}} - 1$$

$$\ln\left(\frac{i}{I_S}\right) = \frac{v}{nV_T}$$

$$v = nV_T \ln\left(\frac{i}{I_S}\right)$$

Para $i = 0{,}1\text{ mA}$ temos

$$v = 1.25.10^{-3} . \ln\left(\frac{0{,}1}{0{,}69} . \frac{10^{-3}}{10^{-15}}\right)$$

$$\boxed{v = 0{,}64 \text{ V}}$$

Para $i = 10\text{mA}$ temos

$$v = 1.25.10^{-3} . \ln\left(\frac{10 . 10^{-3}}{0{,}69 . 10^{-15}}\right)$$

$$\boxed{v = 0{,}76 \text{ V}}$$

Exercício 3.8)

Diodo de silício tem $I_S = 10^{-14}$ A a 25°C

I_S aumenta em 15% por °C

x Calcule o valor de I_S a 125°C

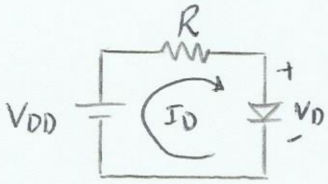
$I_S = 10^{-14} \cdot 1{,}15^{100}$

$\boxed{I_S = 1{,}17 \cdot 10^{-8} \text{ A}}$

$i = I_S \left(e^{\frac{v}{nV_T}} - 1 \right)$

Modelos matemáticos para a curva característica do diodo na região de polarização direta

* Modelo exponencial

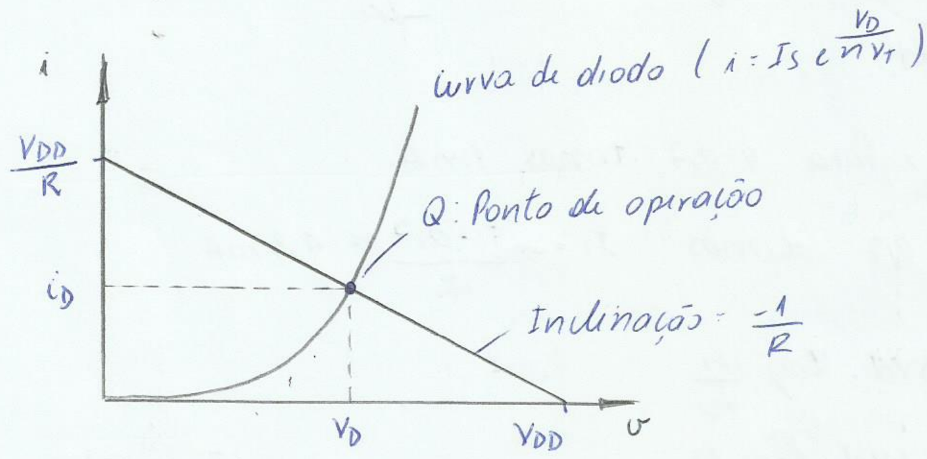


$V_{DD} = RI_D + V_D \quad \therefore \quad I_D = \dfrac{V_{DD} - V_D}{R}$

Para $V_{DD} > 0{,}5$ (diodo está no início de condução)

$\therefore \quad I_D = I_S \, e^{\frac{V_D}{nV_T}}$

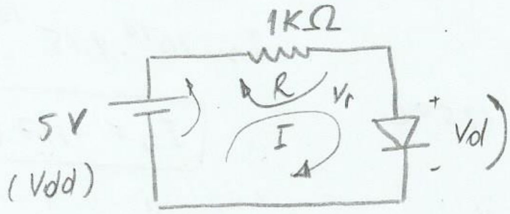
Análise gráfica



- O que é "década"?

Exemplo 3.4 (Análise interativa empregando-se o modelo exponencial)

x Determine os valores de I_D e V_D



Diodo: $I = 1mA \rightarrow 0{,}7V$

$\Delta V_D = \frac{0{,}1V}{década}$

$Vdd = IR + Vd$

$I = \frac{Vdd - Vd}{R} = \frac{5 - 0{,}7}{1K} = 4{,}3mA$

Para $i \gg i_s$ desconsidera a parcela (-1)

Para $Vd_1 \Rightarrow \quad i_1 = I_S (e^{\frac{vd_1}{nV_T}})$

" $Vd_2 \Rightarrow \quad i_2 = I_S (e^{\frac{vd_2}{nV_T}})$

$\frac{i_1}{i_2} = e^{\frac{vd_1 - vd_2}{nV_T}} \Rightarrow \frac{vd_1 - vd_2}{nV_T} = \ln \frac{i_1}{i_2}$

$vd_1 - vd_2 = nV_T \ln \frac{i_1}{i_2}$, $\frac{\ln x}{\log x} = 2{,}3$ logo; $\ln x = 2{,}3 \log x$

$vd_1 - vd_2 = \underbrace{2{,}3\, n V_T}_{\Delta Vd} \log \frac{i_1}{i_2}$; $\Delta Vd = \frac{0{,}1 V}{dec.}$

1ª interação Para $V = 0{,}7$ temos $1mA$

Adotando $vd_2' = 0{,}7$ temos $I_2 = \frac{5 - 0{,}7}{1K} = 4{,}3mA$

$vd_1 - vd_2 = \Delta Vd . \log \frac{i_1}{i_2}$

$vd_2 - vd_1 = \Delta Vd . \log \frac{i_2}{i_1}$

$vd_2'' - 0{,}7 = 0{,}1 . \log\left(\frac{4{,}3}{1}\right) \therefore vd_2'' = 0{,}763 V$

R: $Id = 4{,}3mA$ e $Vd = 0{,}763V$

2ª interação

Adotando $vd_2'' = 0{,}763$ temos $i_2'' = \frac{5 - 0{,}763}{1K} = 4{,}24 mA$

$vd_2 - 0{,}7 = 0{,}1 \log\left(\frac{4{,}24}{1}\right) \quad \therefore \quad vd_2 = 0{,}763$

$$\boxed{\text{logo} \quad Vd = 0{,}763\,V \quad e \quad Id = 4{,}237\,mA}$$

Exemplo 3.5 (Modelo de segmentos lineares)

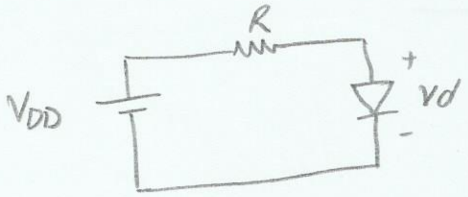
$V_{DD} = 5\,V$ e $R = 1\,K\Omega$

Para $id = 1mA$ $vd = 0{,}7V$

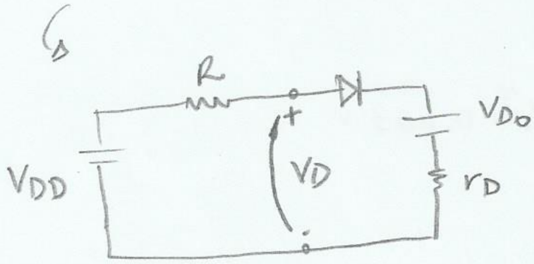
$\Delta Vd = 0{,}1\,V$ / década

$V_{D0} = 0{,}65\,V$

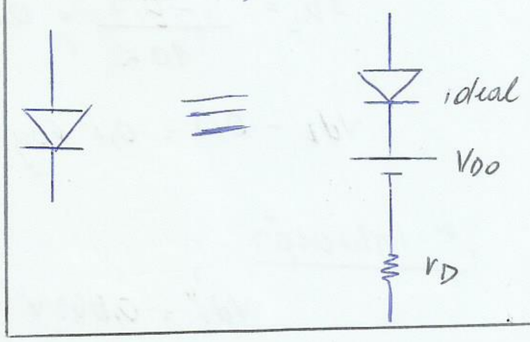
$rd = 20\,\Omega$



× Determinar I_D e V_D



Observação:



$$V_{DD} = I_D(R + r_D) + V_{D0}$$

$$I_D = \frac{V_{DD} - V_{D0}}{R + r_D} = \frac{5 - 0{,}65}{1K + 20} = 4{,}265\,mA$$

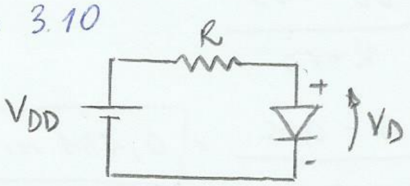
$$V_D = V_{D0} + Id \cdot r_D$$

$$V_D = 0{,}65 + 4{,}265 \cdot 10^{-3} \cdot 20 \quad \therefore \quad V_D = 0{,}735\,V$$

$$\therefore \boxed{I_D = 4{,}265\,mA \quad e \quad V_D = 0{,}735\,V}$$

Exercícios p. 99

Exercício 3.10



$V_{DD} = 5\,V$

$R = 10\,K\Omega$

Diodo:

$0{,}7V \to 1mA$

$\Delta V = 0{,}1\,V$ / década

1a) Método interativo

$i = I_S\left(e^{\frac{vd}{nV_T}} - 1\right)$ Para $i \gg I_S$ temos $i = I_S\, e^{\frac{vd}{nV_T}}$

logo; $i_2 = I_S\, e^{\frac{vd_2}{nV_T}}$ e $i_1 = I_S\, e^{\frac{vd_1}{nV_T}}$

$$\frac{i_2}{i_1} = e^{\frac{Vd_2 - Vd_1}{nV_T}} \to \frac{Vd_2 - Vd_1}{nV_T} = \ln\frac{i_2}{i_1} \quad ; \quad \ln x = 2{,}3 \log x$$

Portanto:

$$V_{d2} - V_{d1} = 2{,}3\, n V_T \log\left(\frac{I_2}{I_1}\right)$$

Outra relação: (Através da lei de Kirchof)

$$V_{DD} = I_d \cdot R + V_D \quad \therefore \quad I_D = \frac{V_{DD} - V_D}{R}$$

1ª interação   Admintindo $V_{D_2}' = 0{,}7V$

$$I_{D_2}' = \frac{5 - 0{,}7}{10K} = 0{,}43\ mA$$

$$V_{d2} - 0{,}7 = 0{,}1 \log\left(\frac{0{,}43}{1}\right) \quad \therefore \quad V_{d2}'' = 0{,}663\ V$$

2ª interação

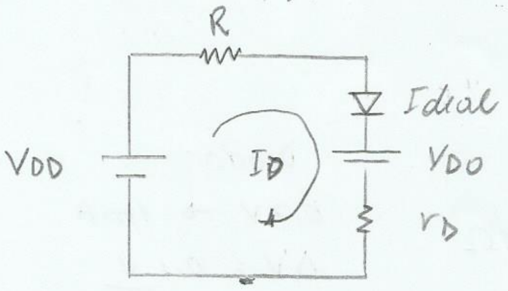
$$V_{d2}'' = 0{,}663V \rightarrow I_{d2}'' = ?$$

$$I_{d2}'' = \frac{5 - 0{,}663}{10K} = 0{,}434\ mA$$

$$V_{d2}''' - 0{,}7 = 0{,}1 \log(0{,}434) \quad \therefore \quad V_{d2}''' = 0{,}664\ V$$

$\boxed{\text{Resposta: } I_d = 0{,}434 \quad V_d = 0{,}664V}$

(b) Modelo de segmentos lineares com $V_{D0} = 0{,}65V$ e $r_D = 20\Omega$



$$V_{DD} = R.I_D + V_{D0} + r_D.I_D$$

$$I_D = \frac{V_{DD} - V_{D0}}{R + r_D} = \frac{5 - 0{,}65}{10K + 20} = \boxed{0{,}434\ mA}$$

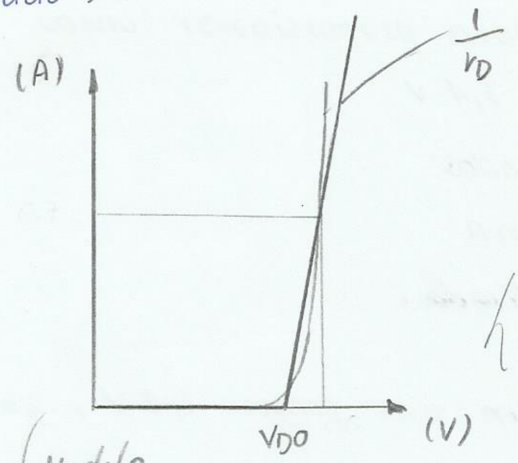
$$V_D = V_{D0} + I_D.r_D$$

$$= 0{,}65 + 0{,}434.m.20 \quad \therefore \quad \boxed{V_D = 0{,}659\ V}$$

(c) Modelo de queda de tensão constante com $V_D = 0{,}7V$

$$I_D = \frac{V_{DD} - V_D}{R} = \frac{5 - 0{,}7}{10K} \quad \therefore \quad \boxed{I_D = 0{,}43\ mA \quad e \quad V_D = 0{,}7V}$$

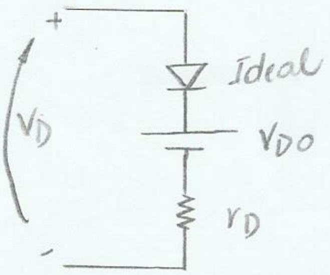
Exercício 3.11



– Diodo 100 vezes maior que as característica ao lado

$$\begin{cases} i_D = I_S \cdot (e^{\frac{V_d}{nV_T}} - 1) \\ r_D = \frac{1}{50} \text{ e } V_{D0} = 0{,}65 \end{cases}$$

(Modelo



$V_D = V_{D0} + I_D \cdot r_D$ logo $I_D' = 100\, I_D$

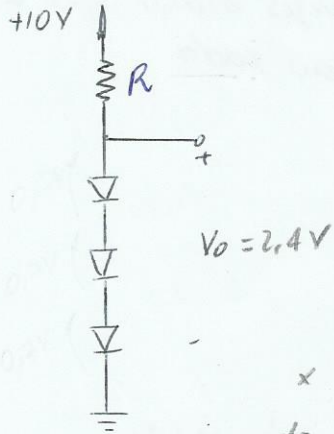
$$I_D = \frac{V_D - V_{D0}}{r_D}$$

Como $V_{D0} = cte$, temos

$$I_D = \frac{V_D - V_{D0}}{r_D}$$; como V_d e V_{D0} = cte o r_D tem que diminuir 100 vezes

∴ logo $r_D' = \frac{20}{100} = 0{,}2$ e V_{D0}' é o mesmo que V_{D0}

Exercício 3.12



- Projete o circuito para proporcionar uma tensão de saída de 2,4 V.

Sabendo que os diodos:

0,7V e 1mA

ΔV : 0,1 V / década

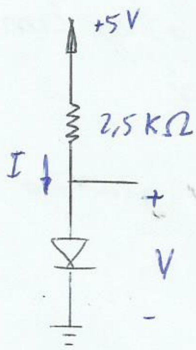
× Como os 3 diodos em série possui 2,4 V, para cada diodo temos 0,8 V

$$0{,}1 \quad \left(\begin{array}{l} 0{,}7\,V - 1\,mA \\ 0{,}8\,V - i \end{array} \right) \times 10 \qquad \text{logo } i = 10\,mA$$

$$R = \frac{10 - 2{,}4}{10m} = 760\,\Omega$$

Exercício 3.13

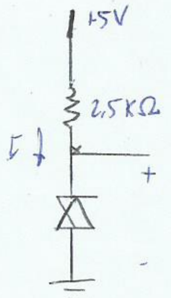
(a)



$\boxed{V_D = 0{,}7V}$

$$I_D = \frac{5 - 0{,}7}{2{,}5K} \therefore \boxed{I_D = 1{,}72\,mA}$$

(b)



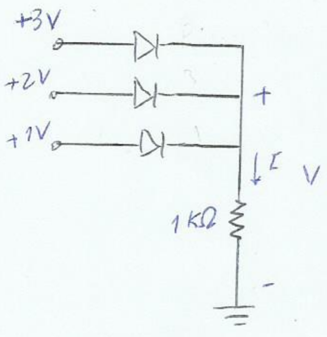
$\boxed{\begin{array}{c} I_D = 0 \\ V_D = 5V \end{array}}$

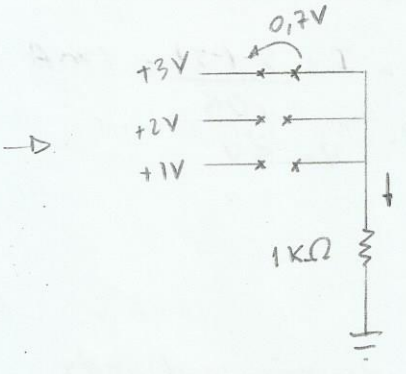
(c) $\boxed{\begin{array}{c} I_D = 0 \\ V_D = 5V \end{array}}$

(d) $\boxed{V_D = 0{,}7V}$

$$Id = \frac{(0 - 0{,}7) - (0 - 5)}{2{,}5K} = 1{,}72\,mA$$

e)

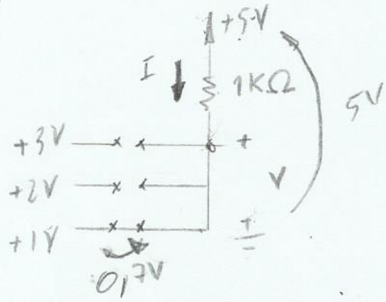




$I = \dfrac{3-0{,}7}{1K} = \underline{\underline{2{,}3\,mA}}$

$V = 3 - 0{,}7 = \underline{\underline{2{,}3\,V}}$

f)

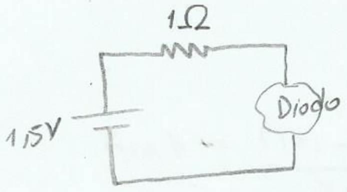


$I = \dfrac{5-0{,}7-1}{1K} = \underline{\underline{3{,}3\,mA}}$

$V = 1 + 0{,}7$ $\quad \boxed{V = 1{,}7\,V}$

Problemas do livro - Seção 3.1.

Exercício 3.1



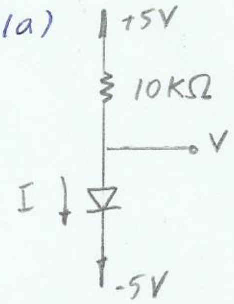
a) Quando o catodo esta no positivo

$I_D = 0$ e $V = 1{,}5\,V$

b) $I_D = \dfrac{1{,}5}{1} = 1{,}5\,A$ e $V_D = 0\,V$

Exercício 3.2

(a)

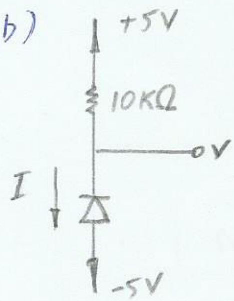


Diodo conduzindo

$I = \dfrac{5-(-5)}{10K} = 1\,mA$

$V = -5\,V$

(b)

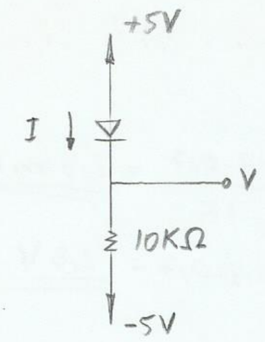


Diodo não esta conduzindo

$I = 0\,A$

$V = 5\,V$

c)

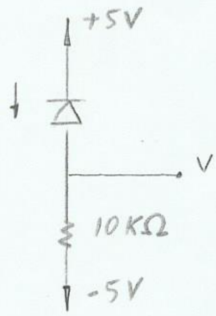


Diodo conduzindo

$I = \frac{5-(-5)}{10K} = 1mA$

$V = 5V$

d)



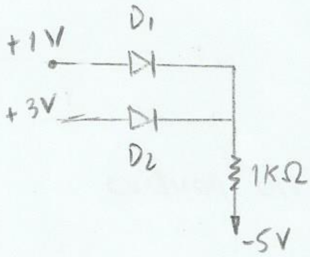
Diodo não conduzindo

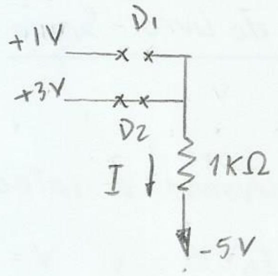
$I = 0\,mA$

$V = -5V$

Exercício 3.3)

(a)

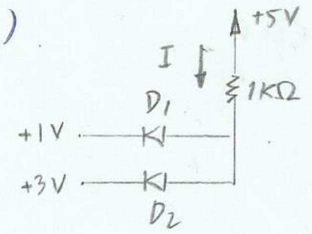


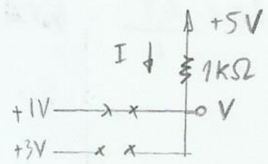


$I = \frac{+3-(-5)}{1K} = 8mA$

$V = +3V$

(b)



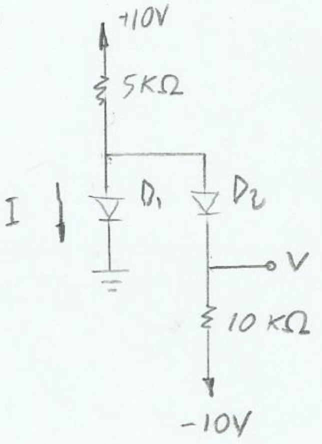


$I = \frac{+5-(+1)}{1K} = 4mA$

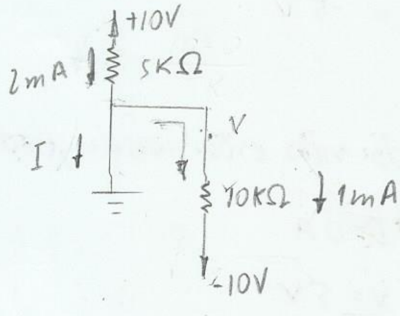
$V = +1V$

Exercício 3.4)

(a)

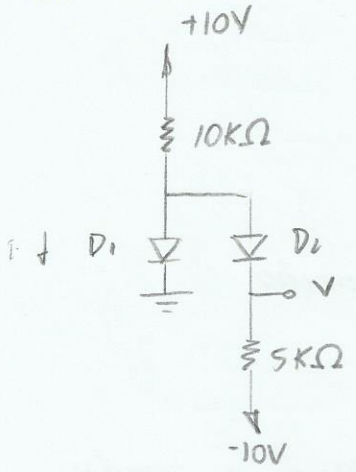


Para D1 e D2 conduzindo

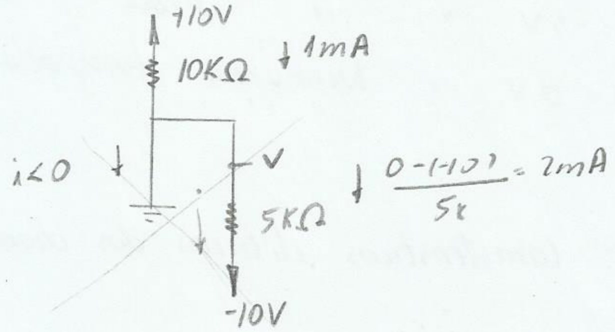


$I = 2mA - 1mA$ $\therefore$ $\boxed{I = 1mA}$

(b)

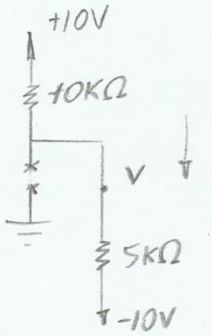


Admitindo D_1 e D_2 conduzindo, temos:



$\frac{0-(-10)}{5k} = 2mA$

Admitindo D_1 não conduz e D_2 conduzindo



$I = 0\,mA$

$$I' = \frac{10-V}{10K} = \frac{V-(-10)}{5K}$$

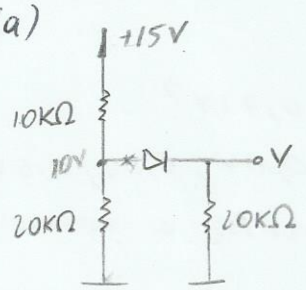
$$(10-V).5K = (V+10).10K$$

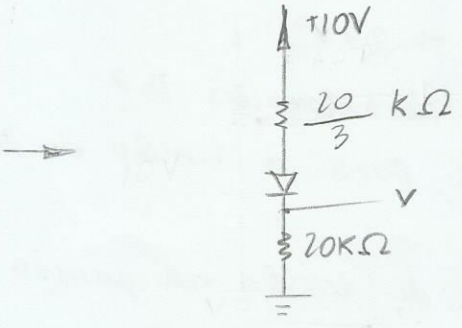
$$10 - V = 2V + 20$$

$$3V = -10 \quad \therefore \quad \boxed{V = -3{,}3\,V}$$

Exercício 3.5)

(a)



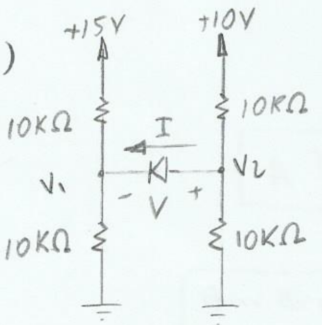


$$I = \frac{10}{\left(\frac{20}{3} + 20\right)10^3}$$

$$I = 0{,}375\,mA$$

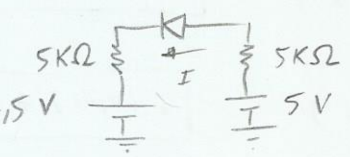
$$V = \frac{20}{20 + \frac{20}{3}} . 10 = 7{,}5V$$

(b)



$V_1 = \frac{10}{10+10} . 15 = 7{,}5\,V \qquad R_{Th1} = 5\,K\Omega$

$V_2 = 5\,V \qquad R_{Th2} = 5\,K\Omega$



$I = 0\,mA$

$V = 5 - 7{,}5 = \underline{-2{,}5\,V}$

3.6)

Quando $V = +3V$ → Lampada vermelha acesa

" $V = -3V$ → " verde "

" $V = 0V$ → Nenhuma lampada acesa

Seção 3.2: Características elétricas dos diodos de junção

Exercício 3.7:

x Qual a queda de tensão no diodo, quando $n = 2$ e conduz $1000\, I_S$?

x Qual a corrente circula no mesmo diodo quando $V_D = 0{,}7V$?

$$i = I_S\left(e^{\frac{Vd}{nV_T}} - 1\right)$$

$$1000\, \cancel{I_S} = \cancel{I_S}\left(e^{\frac{Vd}{2 \cdot 25 \cdot 10^{-3}}} - 1\right) \therefore \boxed{Vd = 0{,}345\,V}$$

$$i = I_S\left(e^{\frac{0{,}7}{2 \cdot 25 \cdot 10^{-3}}} - 1\right) \therefore \boxed{i = 1{,}2 \cdot 10^{6}\, I_S}$$

Exercício 3.8:

Diodo: $n = 1$

para $3mA \to 0{,}7V$

x Qual a corrente de saturação I_S?

x Qual a corrente para a tensão do diodo $0{,}71V$?

x " " " " " " $0{,}8V$; $0{,}69$; $0{,}6V$?

x " " " aumento de tensão na junção aumenta a corrente

x Que aumento de tensão na junção aumenta a corrente por um fator de 10?

$$i = I_S\left(e^{\frac{Vd}{nV_T}} - 1\right)$$

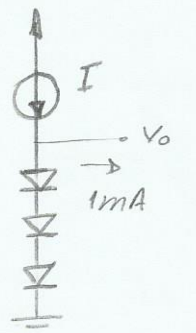
$$3 \cdot 10^{-3} = I_S\left(e^{\frac{0{,}7}{1 \cdot 25 \cdot 10^{-3}}} - 1\right) \therefore \boxed{I_S = 2{,}07 \cdot 10^{-15}\,A}$$

$$i = 2{,}07 \cdot 10^{-15}\left(e^{\frac{0{,}71}{25 \cdot 10^{-3}}} - 1\right) \therefore \boxed{i(0{,}71) = 4{,}48\,mA}$$

$$\boxed{i(0{,}8) = 164\,mA \quad i(0{,}69) = 2{,}01\,mA \quad i(0{,}6) = 0{,}05\,mA}$$

$$\frac{1}{10} = e^{\frac{\Delta V}{nV_T}} - 1 \;;\; n = 1 \text{ e } V_T = 25mV \text{ logo } \Delta V = 2{,}38\,mV$$

Exercício 3.9)



$n = 1$

$I_S = 10^{-14}$ A

x Calcule o valor da corrente I para obter tensão $V_o = 2V$

xx Para uma corrente de 1mA for drenada do terminal de saída por uma carga, qual a variação na tensão de saída?

x

Tensão na associação dos 3 diodos: 2V

Tensão para cada diodo $= \frac{2}{3}V$

22,9mV

$I = I_S\left(e^{\frac{V_d}{nV_T}} - 1\right)$

$I = 10^{-14}\left(e^{\frac{2/3}{1.25.10^{-3}}} - 1\right) \therefore I = 3{,}81\ mA$

xx

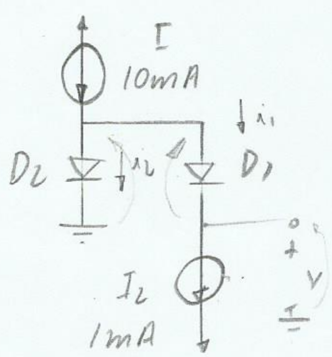
$$\div\begin{cases} I_1 = I_S\left(e^{\frac{V_{d1}}{nV_T}} - 1\right) \\ I_2 = I_S\left(e^{\frac{V_{d2}}{nV_T}} - 1\right)\end{cases}$$

$\frac{I_2}{I_1} = e^{\frac{V_{d2} - V_{d1}}{nV_T}} \rightarrow \underbrace{V_{d2} - V_{d1}}_{\Delta V_{d1}} = nV_T \ln\left(\frac{I_2}{I_1}\right)$

$\Delta V_d = 1.25.10^{-3} \ln\left(\frac{2{,}81}{3{,}81}\right) \therefore \Delta V_{d1} = -7{,}61.10^{-3}$ V

$\therefore \Delta V_d = 3.(-7{,}61.10^{-3}) \therefore \Delta V_d = -22{,}83$ mV

Exercício 3.10



Diodos: $n = 2$

Área de junção: $D_1 = 10\, D_2$; $I_{S1} = 10\, I_{S2}$

x Qual o valor de V?

xx Qual a corrente I_2 para $V = 50mV$?

x $V_{d2} = V_{d1} + V \therefore V = V_{d2} - V_{d1}$

$I_1 = I_{S1}\left(e^{\frac{V_{d1}}{nV_T}}\right) \quad I_2 = I_{S2}\left(e^{\frac{V_{d2}}{nV_T}}\right)$

$\frac{I_2}{I_1} = \frac{I_{S2}}{I_{S1}} e^{\frac{V_{d2} - V_{d1}}{nV_T}}$

$\frac{I_2}{I_1} = \frac{\cancel{I_{S2}}}{10\,\cancel{I_{S2}}} e^{\frac{V_{d2} - V_{d1}}{nV_T}}$

$V = nV_T \ln\left(\frac{10 I_2}{I_1}\right)$

$= 1.25.10^{-3} \ln\left(\frac{10.9}{1}\right)$ $\boxed{V = 0{,}22V}$

$Vd2 = Vd1 + V \qquad V = Vd2 - Vd1 = 50\,mV$

$$\begin{cases} i_2 = I_{S2}\, e^{\frac{Vd2}{nV_T}} \\ i_1 = I_{S1}\, e^{\frac{Vd1}{nV_T}} \end{cases} \quad ; \; I_{S1} = 10\, I_{S2}$$

$$\begin{cases} i_2 = I_{S2}\, e^{\frac{Vd2}{nV_T}} \\ i_1 = 10\, I_{S2}\, e^{\frac{Vd1}{nV_T}} \end{cases} \qquad \frac{i_2}{i_1} = \frac{1}{10}\, e^{\frac{\Delta V}{nV_T}}$$

$$\frac{i_2}{i_1} = \frac{1}{10} \cdot e^{\frac{0{,}50}{2 \cdot 25 \cdot 10^{-3}}} \qquad \therefore \quad \frac{i_2}{i_1} = 0{,}272$$

$$i_2 = 0{,}272\, i_1$$

$i_1 + i_2 = 10\,mA$

$i_1 + 0{,}272\, i_1 = 10\,mA$

$i_1\,(1 + 0{,}272) = 10\,mA \qquad \therefore \quad i_1 = 7{,}86\,mA$

$i_2 = 2{,}14\,mA$

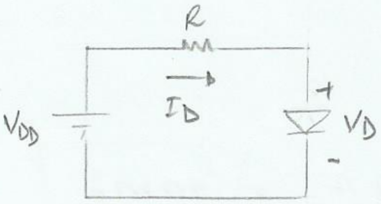
Exercício 3.11

Diodo de potência: $0{,}8\,V \rightarrow 10\,A \qquad n = 2$

Fonte de corrente: $0{,}5$ a $1{,}5\,mA$

Seção 3.3: Modelos matemáticos para a curva característica do diodo na região de polarização direta

Exercício 3.12

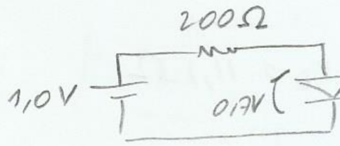


$V_{DD} = 1V$
$R = 1K\Omega$
$I_S = 10^{-15} A$
$n = 1$

Fazer Depois

Exercício 3.13

Diodo { $v_D = 0{,}7\ V$ e $i_D = 1mA$ }



(a) $i_D = \frac{1-0{,}7}{200}$ $\therefore$ $i_D = 1{,}5\ mA$

(b) Corrente no diodo? Pelo método interativo e assumindo $n=2$

$i_1 = I_S \left(e^{\frac{Vd_1}{nV_T}}\right)$

$i_2 = I_S \left(e^{\frac{Vd_2}{nV_T}}\right)$

$\frac{i_1}{i_2} = e^{\frac{Vd_1 - Vd_2}{nV_T}}$

$Vd_1 - Vd_2 = 2{,}3\, nV_T \log\left(\frac{i_1}{i_2}\right)$

ou

$Vd_2 - Vd_1 = 2{,}3\, nV_T \log\left(\frac{i_2}{i_1}\right)$ [1]

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

1ª) interação: Assumindo $V_{D1} = 0{,}7\ V$ e $I_D = 1mA$

$I_{D2}' = \frac{1-0{,}7}{200} = 1{,}5\ mA$

$V_{D2}' - 0{,}7 = 2{,}3 \cdot 2 \cdot 25 \cdot 10^{-3} \log\left(\frac{1{,}5}{1}\right)$ $\quad V_{D2} = 0{,}720\ V$

2ª) interação

$I_{D2}'' = \frac{1 - 0{,}720}{200} = 1{,}399\ mA$

$V_{D2}' - 0{,}7 = 2{,}3 \cdot 2 \cdot 25 \cdot 10^{-3} \log\left(\frac{1{,}399}{1}\right)$ $\quad V_{D2}' = 0{,}717\ V$

3ª) interação

$I_{D2}'' = \frac{1-0{,}717}{200} = 1{,}416\ mA$ $\quad V_{D2} - 0{,}7 = 2{,}3 \cdot 2 \cdot 25 \cdot 10^{-3} \log(1{,}416)$

$V_{D2} = 0{,}717\ V$

Exercício 3.14)

Característica do diodo para 10mA e 1mA

x Qual combinação? Qual o v_D? Qual V_{D0}?

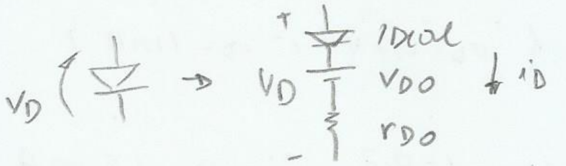
Looking at the copy of fig. 3-12 below, we see at

$i_D = 1mA \rightarrow v_D = 0{,}7\ V$

$i_D = 10mA \rightarrow v_D = 0{,}8\ V$

$$\frac{1}{r_D} = \frac{(10-1) \cdot 10^{-3}}{0{,}8 - 0{,}7} \therefore \frac{1}{r_D} = 0{,}09\ \frac{A}{V} = \boxed{90\ \frac{mA}{V}}$$

$$\boxed{r_D = 11{,}1\ \Omega}$$



$$i_D = \frac{V_D - V_{D0}}{r_D} \qquad 10 \cdot 10^{-3} = \frac{0{,}8 - V_{D0}}{\frac{1}{0{,}09}} \therefore \boxed{V_{D0} = 0{,}69\ V}$$

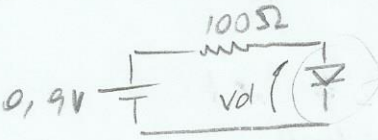
Exercício 3.15)

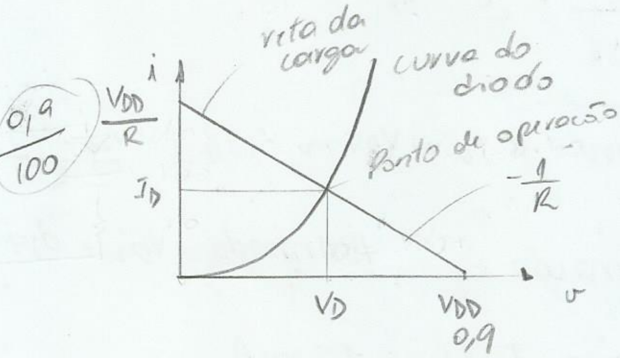
Fonte de tensão: 0,9 V

resistor: 100 Ω

x Quais os valores de queda de tensão no diodo e da corrente de malha

a) Curva característica:





$$i_D = \frac{0{,}9 - V_D}{100}$$

$$i_D = 9 \cdot 10^{-3} - 0{,}01\ V_D$$

$i_D(0) = 9 \cdot 10^{-3}\ A = 9\ mA$

$i_D(0{,}9) = 0\ mA$

$V_D = 0{,}73\ V$

$I_D = 1{,}7\ mA$

(b) Modelo de dois segmentos

$V_D = 0{,}7\ V$

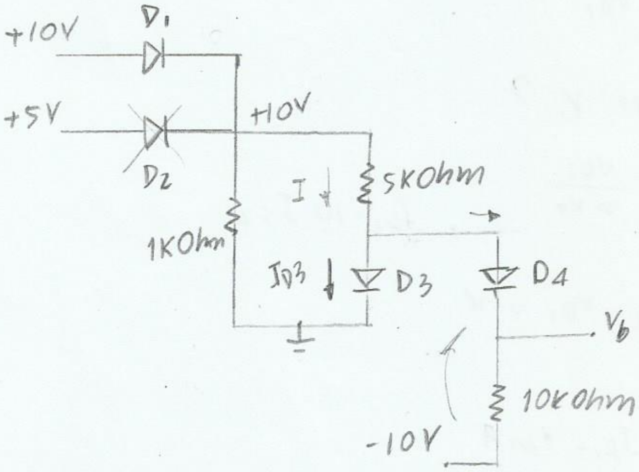
$I_D = 2\ mA$

~~Exercício 03/6~~

Lista do Base

1ª Parte - Circuitos com Diodos Ideais

(Exercício de Prova) × Determine V_b e I_{D3}



Para D3 e D4 conduzindo

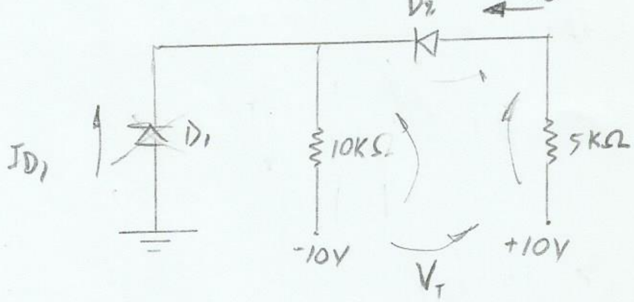
$I = \dfrac{10-0}{5K} = 2mA$

$I_{D4} = \dfrac{0-(-10)}{10K} = 1mA$

$I_{D3} = 2 - 1 = \boxed{1mA}$

$\boxed{V_b = 0V}$

(Exercício de Prova) × Determine I_{D1} e I_{D2}



$V_T = V-(-10) - (V-10)$

$= V + 10 - V + 10$

$= 20$

Para D1 e D2 conduzindo

$I_2 = \dfrac{10-0}{5K} = 2mA$ $I = \dfrac{0-(-10)}{10K} = 1mA$

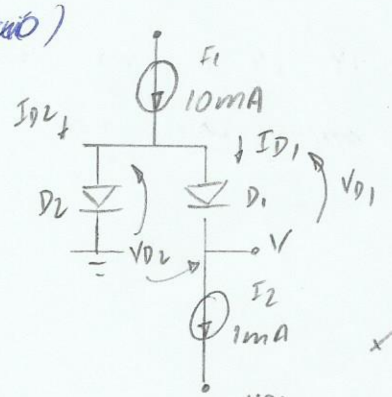
$I = I_2 + I_{D1}$ $\therefore$ $I_{D1} = 1 - 2 = -1mA$ ×

Para D2 conduzindo e D1 não conduzindo

$I_{D2} = \dfrac{10-(-10)}{15K} = 1,3mA$ e $I_{D1} = 0mA$

2ª Parte - Circuitos com Diodos Reais

(Exercício)



Diodos: $n = 2$

$I_{S1} = 10 I_{S2}$

$V = V_{D2} - V_{D1}$

× Determinar V ?

$i_{D1} = I_{S1} e^{\frac{V_{D1}}{nV_T}}$ $\quad i_{D2} = I_{S2} e^{\frac{V_{D2}}{nV_T}}$; $I_{S1} = 10 I_{S2}$

$\frac{i_{D2}}{i_{D1}} = \frac{\cancel{I_{S2}}}{10 \cancel{I_{S2}}} e^{\frac{V_{D2}-V_{D1}}{nV_T}}$; $V_{D2} - V_{D1} = V$

$V = n V_T \ln\left(\frac{10 I_{D2}}{I_{D1}}\right)$; $I_{D1} = 1mA$

$I_{D2} = 10-1 = 9mA$

$V = 2.25.10^{-3} \ln\left(\frac{10.9}{1}\right) \therefore \boxed{V = 225mV}$

× Determinar I_2 para obter $V = 50mV$

$\frac{I_{D2}}{I_{D1}} = \frac{1}{10} e^{\frac{V_{D2}-V_{D1}}{nV_T}}$; $I_{D2} + I_{D1} = 10mA$

$\frac{I_{D2}}{I_{D1}} = \frac{1}{10} e^{\frac{50.10^{-3}}{2.25.10^{-3}}}$

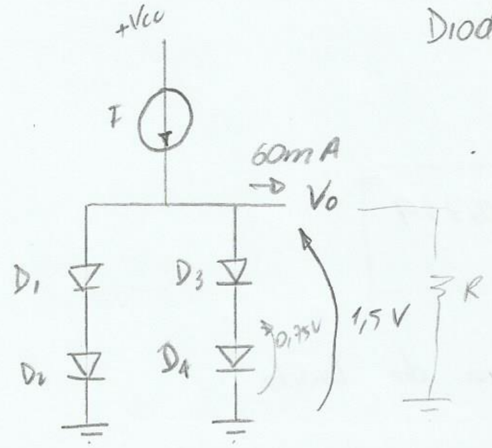
$I_{D2} = 0,272 I_{D1}$

$I_{D2} + I_{D1} = 10mA$

$0,272 I_{D1} + I_{D1} = 10mA \therefore I_{D1} = 7,86mA$

$\boxed{\text{logo } I_2 = 7,86mA}$

P1 - Noturno - 2º sem - 2011



Diodos: $n = 1$ $I_S = 10^{-14}$ A

(a) Calcule o valor de I para $V_o = 1{,}5$ V

(b) Para uma carga consumindo 60mA, qual o novo valor de Vo?

(a)

$$I = I_S \cdot (e^{\frac{V_d}{nV_T}} - 1)$$

$$I = 10^{-14} \left(e^{\frac{0{,}75}{1 \cdot 25 \cdot 10^{-3}}} - 1 \right) \quad \therefore \quad I_d = 107 \text{ mA}$$

logo $I = 0{,}214$ A ou $I = 214$ mA

$I = 214$ mA

$I_{D_T} = 214 - 60$

$= 0{,}154$

$\therefore I_{D_T}' = 0{,}077$

(b)

$$I_1 = I_{S1} (e^{\frac{V_{d1}}{nV_T}}) \quad ; \quad I_{S1} = I_{S2}$$

$$I_2 = I_{S2} (e^{\frac{V_{d2}}{nV_T}})$$

$$\frac{I_2}{I_1} = e^{\frac{V_{d2} - V_{d1}}{nV_T}} \qquad V_{d2} - V_{d1} = nV_T \ln \left(\frac{I_2}{I_1} \right)$$

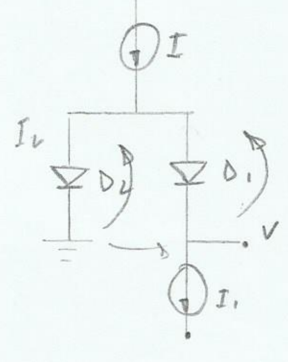
$$V_{d2} - 0{,}75 = 1 \cdot 25 \cdot 10^{-3} \ln \left(\frac{0{,}077}{0{,}107} \right)$$

$\therefore V_{d2} = 0{,}734$ V logo $V = 1{,}47$ V

e $R = 24{,}45\ \Omega$

P1 - Diurno - 2º sem - 2010

Diodos: $n = 1$ $I_{S1} = 10 I_{S2}$



$$V = V_{D2} - V_{D1}$$

$$\begin{cases} I_2 = I_{S2}\, e^{\frac{V_{D2}}{nV_T}} \\ I_1 = I_{S1}\, e^{\frac{V_{D1}}{nV_T}} \end{cases} ; \quad I_{S1} = 10 I_{S2}$$

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{1}{10} e^{\frac{V_{D2} - V_{D1}}{nV_T}} \quad ; \quad V = V_{D2} - V_{D1}$$

$$V = nV_T \ln \left(\frac{10 I_2}{I_1} \right)$$

b)

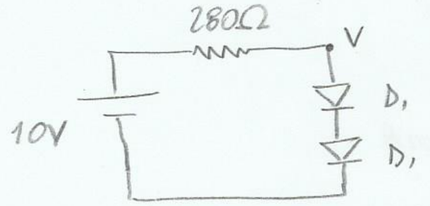
$$2nV_T = V = nV_T \ln\left(\frac{10 I_2}{I_1}\right)$$

logo; $2 = \ln\left(\frac{10 I_2}{I_1}\right)$

$$e^2 = 10\frac{I_2}{I_1} \quad \boxed{\frac{I_2}{I_1} = 0{,}739}$$

3ª Parte - Modelos / Métodos para a curva do Diodo

(Exercício 15)

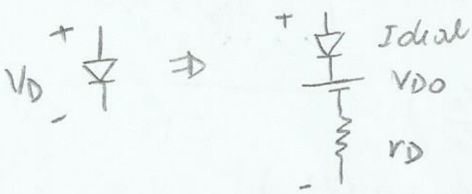


Diodos: $1V \rightarrow 10\,mA$

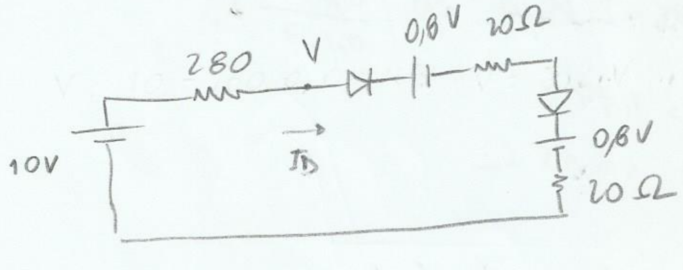
$\Delta V = \frac{0{,}1\,V}{\text{década}}$

(a) Modelo de segmentos lineares

$V_{D0} = 0{,}8\,V \quad r_D = 20\Omega$



$V_D = V_{D0} + I_D \cdot r_D$



$10 = 280 Id + 2(0{,}8 + 20 Id)$

$10 = 280 Id + 1{,}6 + 40 Id$

$Id = \frac{10 - 1{,}6}{320} = 26{,}25 \cdot 10^{-3} A$

$\boxed{\therefore Id = 26{,}25\,mA}$

$V = 2(0{,}8 + 20 \cdot 26{,}25 \cdot 10^{-3})$

$\boxed{\therefore V = 2{,}65\,V}$

(b) Modelo de queda de tensão constante

$V_D = 1{,}0\,V$

$\boxed{V = 2V} \quad I = \frac{10-2}{280} = \boxed{28{,}57\,mA}$

(c) Método Interativo

$$I_2 = I_S\, e^{\frac{V_{d2}}{nV_T}} \qquad \frac{I_2}{I_1} = e^{\frac{V_{d2}-V_{d1}}{nV_T}} \quad \therefore \quad V_{d2} - V_{d1} = nV_T \ln\left(\frac{I_2}{I_1}\right)$$

$$I_1 = I_S\, e^{\frac{V_{d1}}{nV_T}} \qquad V_{d2} - V_{d1} = 2{,}3nV_T \log\left(\frac{I_2}{I_1}\right)$$

Variação da corrente

$$I_D = \frac{V - V_D}{R}$$

1º) interação: Para $I_2 = 10mA$ e $1{,}0V$

$$I_{D_2} = \frac{10-2}{280} = 28{,}57\,mA$$

$$V_{d2}' - 1 = 0{,}1 \log\left(\frac{28{,}57}{10}\right) \quad \therefore \quad V_{d2}' = 1{,}05\,V$$

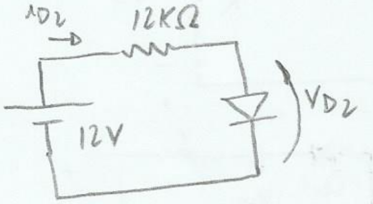
2º) interação

$$I_{D2}'' = \frac{10 - 2 \cdot 1{,}05}{280} = 28{,}25\,mA$$

$$V_{d2}' - 1 = 0{,}1 \log\left(\frac{28{,}25}{10}\right) \quad \therefore \quad V_{d2}' = 1{,}05\,V$$

$V = 2 \times 1{,}05$; logo $\boxed{V = 2{,}09\,V \text{ e } I = 28{,}25\,mA}$

01- Diurno - 2º sem 2008



Diodo: $0{,}7V \rightarrow 1{,}0\,mA$

$\Delta V = 0{,}15V$ / década

* Determine I_{D2} e V_{D2}

(a) Método interativo, iniciando com 0,68 V

$$V_{d2} - V_{d1} = \underbrace{2{,}3 \cdot nV_T}_{\Delta V} \log\left(\frac{I_2}{I_1}\right) \quad e \quad i_{D2} = \frac{V_{DD} - V_{D2}}{R}$$

1ª interação)

$$i_{D2} = \frac{12 - 0{,}68}{12K} = 0{,}943\,mA$$

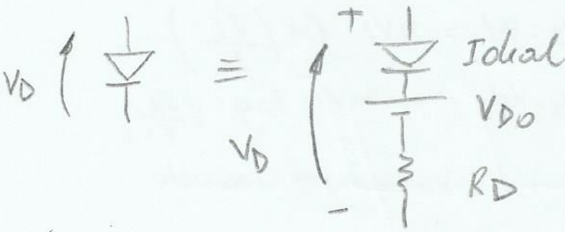
$$V_{d2} - 0{,}7 = 0{,}15 \log\left(\frac{0{,}943}{1}\right) \quad \therefore \quad V_{d2} = 0{,}696\,V$$

2ª interação)

$$i_D = \frac{12 - 0{,}696}{12K} = \boxed{0{,}942\,mA}$$

$$V_{d2} - 0{,}7 = 0{,}15 \log\left(\frac{0{,}942}{1}\right) \quad \therefore \quad \boxed{V_{d2} = 0{,}696\,V}$$

b) Modelo de segmento de reta, Sabendo que: $V_{D0} = 0{,}65\,V$ $r_D = 15\,\Omega$



logo $V_D = V_{D0} + I_R \cdot V_D$

$$I_d = \frac{12 - 0{,}65}{12K + 15} \therefore \boxed{I_d = 0{,}945\,A \quad e \quad V_D = 0{,}664\,V}$$

Estudar análise Gráfica do Diodo

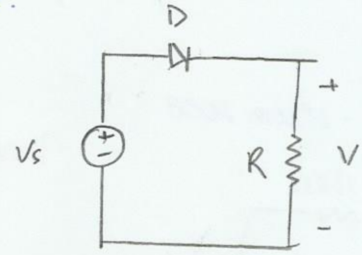
Circuitos retificadores

Lembrete: $V_{ef} = \frac{V_p}{\sqrt{2}}$

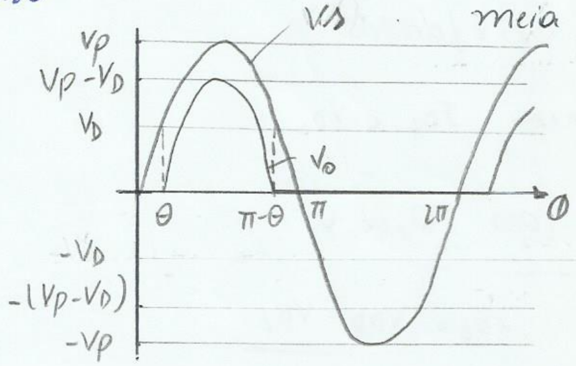
- O diodo é aplicado em circuitos retificadores
- Na escolha do diodo, deve ser observado:
  - + Capacidade de condução de corrente que o diodo pode conduzir
  - + Tensão de pico reversa (PIV) que o diodo deve ser capaz de suportar sem atingir a região de ruptura.

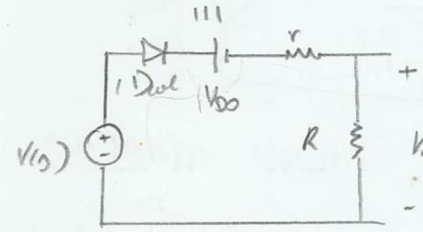
$\boxed{PIV = V_s}$

Retificador de meia onda



Ex. 3.20





Dados

12 V (rms)

$V_{D0} = 0{,}7\,V$

$R = 100\,\Omega$

(a) Prove que $\theta = \sin^{-1}\left(\frac{V_{D0}}{V_s}\right)$

$V_s = V_p \sin\phi$

$V_s(\phi) = V_D$, quando $\phi = \theta$

$$\therefore V_D = V_p \sin\theta \therefore \boxed{\theta = \sin^{-1}\left(\frac{V_d}{V_p}\right)}$$

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{0{,}7}{12\sqrt{2}}\right) \therefore \boxed{\theta = 2{,}36^{o}}$$

(b) Determinar $\hat{V_o}$

Lembrando que

$$\text{Valor Médio} = \frac{1}{T}\int_0^T v(\theta)d\theta$$

$$\hat{V_o} = \frac{1}{T}\int_0^T V_o(\phi)d\phi$$

$$= \frac{1}{T}\left[\int_0^{\theta} \cancel{0\, d\phi} + \int_{\theta}^{\pi-\theta}(V_s\sin\phi - V_d)d\phi + \int_{\pi-\theta}^{\pi} 0\, d\phi\right]$$

$$= \frac{1}{T}\left[-V_s\cos\phi - V_d.\phi\right]\Big|_{\theta}^{\pi-\theta}$$

$$= \frac{1}{T}\left[-V_s(\cos(\pi-\theta)-\cos\theta) - V_d(\pi-\theta-\theta)\right]$$

$$\boxed{\hat{V_o} = \frac{1}{T}\left[-V_s(\cos(\pi-\theta)-\cos\theta) - V_d(\pi-2\theta)\right]} \quad ; V_s = V_p$$

Para $V_p > V_d \to \theta \simeq 0$

$$\hat{V_o} = \frac{1}{2\pi}\left[-V_p(\cos(\pi-0)-\cos 0) - V_d(\pi-2.0)\right]$$

$$= \frac{1}{2\pi}\left[-V_p(-1-1) - \pi V_d\right]$$

$$= \frac{2V_p}{2\pi} - \frac{\pi V_d}{2\pi} \quad \therefore \quad \boxed{\hat{V_o} = \frac{V_p}{\pi} - \frac{V_d}{2}}$$

logo $\hat{V_o} = \dfrac{12\sqrt{2}}{\pi} - \dfrac{0,7}{2}$ $\therefore$ $\boxed{\hat{V_o} = 5,05\ V}$

(c) Determinar $i_{D\,máx}$

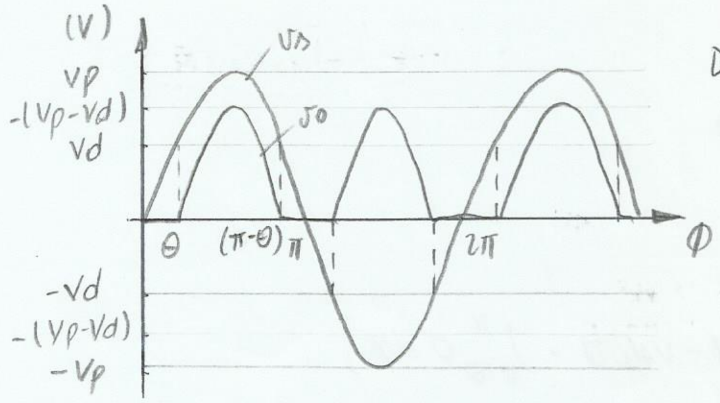
$$i_{D\,máx} = \frac{V_{o\,max}}{R} = \frac{V_s - V_D}{R} = \frac{12\sqrt{2} - 0,7}{100} \quad \boxed{i_D = 163\ mA}$$

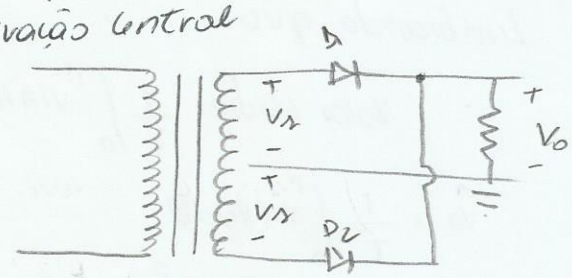
(d) PIV: ?

$$PIV = V_p = 12\sqrt{2}\ V$$

Ex. 3.21

Retificador de Onda Completa com Derivação Central





Dados

$v_p = 12\sqrt{2}$ V

$V_D = 0{,}7$ V

$R = 100\Omega$

a) Prove que $v_o(\phi) = 0$

$V_s(\phi) = V_p \sin\phi$

$V_s(\theta) = V_d \quad \rightarrow \quad V_d = V_p \sin\theta$

$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{V_d}{V_p}\right)$

$V_s(2\phi) = 0$

logo $V_s = 0$ para $2\theta = 2\sin^{-1}\left(\frac{V_d}{V_p}\right)$

b) Valor médio de v_o

$$\hat{v}_o = \frac{1}{T}\int_0^T v_o \, d\phi$$

$$= \frac{1}{\pi}\left[\cancelto{0}{\int_0^\theta 0\, d\phi} + \int_\theta^{\pi-\theta}(V_p \sin\phi - V_d)\, d\phi + \cancelto{0}{\int_{\pi-\theta}^{\pi} 0\, d\phi}\right]$$

$$= \frac{1}{\pi}\left[-V_p\cos\phi - V_d\phi\right]\Big|_\theta^{\pi-\theta}$$

$$= \frac{1}{\pi}\left[-V_p(\cos(\pi-\theta) - \cos\theta) - V_d(\pi-\theta-\theta)\right]$$

$$\boxed{\hat{v}_o = \frac{1}{\pi}\left[-V_p(\cos(\pi-\theta) - \cos\theta) - V_d(\pi - 2\theta)\right]}$$

Para $V_p \gg V_d \rightarrow \theta \approx 0$

$$\hat{v}_o = \frac{1}{\pi}\left[-V_p(\cancelto{-1}{\cos(\pi-0)} - \cancelto{1}{\cos 0}) - V_d(\pi - 2.0)\right]$$

$$\boxed{\hat{v}_o = \frac{2V_p}{\pi} - V_d} \qquad \hat{v}_o = \frac{2.12\sqrt{2}}{\pi} - 0{,}7 \quad \therefore \quad \boxed{\hat{v}_o = 10{,}1\text{ V}}$$

(c) Corrente pico de cada diodo

$$i_D = \frac{V_R}{R} = \frac{V_P - V_d}{R} \Rightarrow i_D = \frac{12\sqrt{2} - 0{,}7}{100} = \boxed{163\,mA}$$

× Fração de cada ciclo durante $v_o > 0$

fração: $\pi - 2\theta$; $\theta = \sin^{-1}\left(\frac{V_d}{V_p}\right)$

$$\pi - 2\sin^{-1}\left(\frac{V_d}{V_p}\right)$$

π — 100

$\pi - 2\sin^{-1}\left(\frac{V_d}{V_p}\right)$ — $\frac{\text{fração}}{100}$

$\Rightarrow$ π — 100%

3,025 — fração

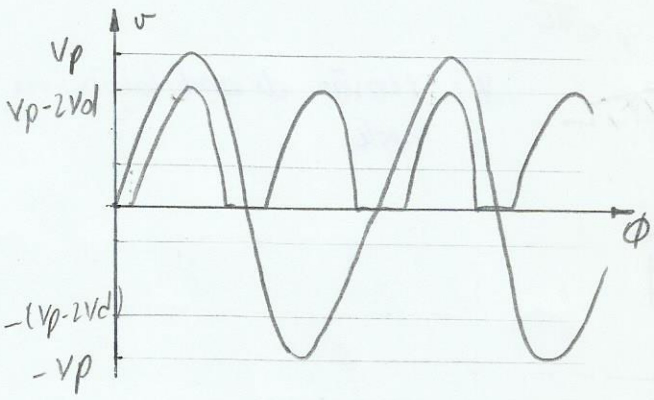
$\boxed{R: 97{,}37\%}$

× PIV

$PIV = 2V_S - V_D$

$PIV = 2 \cdot 12\sqrt{2} - 0{,}7$ $\quad \boxed{PIV = 33{,}24\,V}$

Ex. 3.22 Retificador em ponte



a) $\hat{V_o} = ?$

$$\hat{V_o} = \frac{1}{\pi}\left[\cancel{\int_0^{\theta} 0\, d\phi} + \int_{\theta}^{\pi-\theta} (V_p \sin\phi - 2V_d)\, d\phi \; \cancel{\int_{\pi-\theta}^{\pi} 0\, d\phi}\right]$$

$$= \frac{1}{\pi}\left[-V_p\cos\phi - 2V_d\phi\right]\Big|_{\theta}^{\pi-\theta}$$

$$= \frac{1}{\pi}\left[-V_p(\cos(\pi-\theta) - \cos\theta) - 2V_d(\pi - \theta - \theta)\right]$$

p/ $V_p > V_d \Rightarrow \theta \simeq 0$

$$\hat{V_o} = \frac{1}{\pi}\left[-V_p \times (-2) - 2V_d(\pi)\right] \quad \therefore \quad \boxed{\hat{V_o} = \frac{2V_p}{\pi} - 2V_d}$$

b) Corrente no diodo?

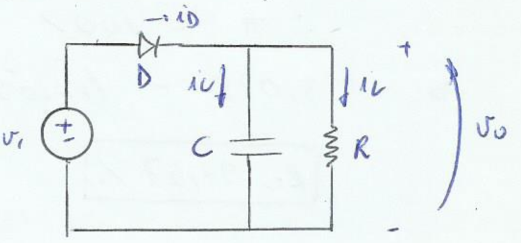
$$i_D = \frac{v_O}{R} = \frac{v_S - 2V_d}{R}$$

c) PIV:

$PIV = v_O + V_D$; $v_O = v_S - 2v_D$

$= v_O + v_S - 2v_D$ $\therefore$ $\boxed{PIV = V_p - V_D}$

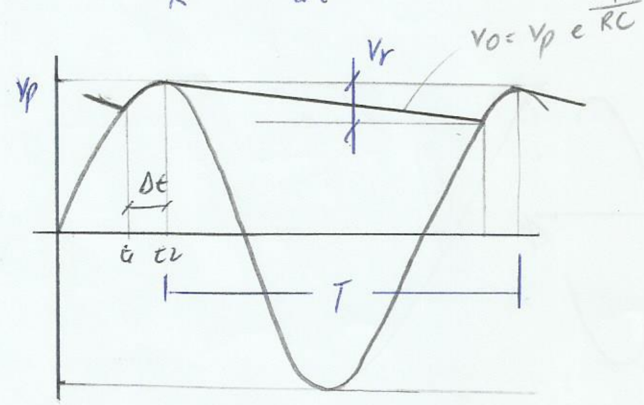
Retificador com capacitor de filtro



$i_L = \frac{v_O}{R}$ (Corrente na carga)

$i_C = C.\frac{dv_I}{dt}$ (Corrente no capacitor)

$i_D = i_L + i_C = \frac{v_O}{R} + \frac{C dv_I}{dt}$ (Corrente no Diodo)



Vr: tensão de ondulação; ou ripple

- Observação: Quando a ~~tempo de descarga~~ constante de tempo for muito maior que o período, temos: ($RC \gg T$):
  - × Tensão de ondulação (ripple): Vr é pequeno
  - × $V_O \cong V_p$
  - × $I_L \cong \frac{V_p}{R}$
  - × $\hat{v_O} = V_p - \frac{V_r}{2}$

Durante o intervalo de corte do diodo $v_o = V_p \cdot e^{\frac{-T}{RC}}$

Ao final da descarga ; $v_o = V_p - V_r$

$$V_p - V_r = V_p\, e^{\frac{-T}{RC}}$$

$$V_r = V_p\left(1 - e^{\frac{-T}{RC}}\right)$$; como $RC \gg T$, temos:

$$e^{\frac{-T}{RC}} \cong 1 - \frac{T}{RC}$$

logo: $$V_r = V_p\left(1 - \left(1 - \frac{T}{RC}\right)\right)$$

$$= V_p\left(1 - 1 + \frac{T}{RC}\right) \therefore \boxed{V_r = \frac{V_p\, T}{RC} \quad \text{ou} \quad V_r = \frac{V_p}{RC \cdot f}}$$

Admitindo que o diodo pare de conduzir no pico, temos

$$v_o = V_p - V_r = V_p \cos(\underbrace{\omega \Delta t}_{\text{ângulo}}) \quad ; \quad \omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$$

Como $\omega \Delta t$ é muito pequeno, podemos usar a seguinte relação

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

$$V_p - V_r \cong V_p \cdot \left(1 - \frac{1}{2}(\omega \Delta t)^2\right)$$

$$\cancel{V_p} - V_r \cong \cancel{V_p} - \frac{V_p}{2}(\omega \Delta t)^2$$

$$V_r \cong \frac{V_p}{2}(\omega \Delta t)^2 \quad \therefore \quad \boxed{\omega \Delta t \cong \sqrt{\frac{2V_r}{V_p}}}$$

Corrente no diodo:

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

$$\boxed{I_{D\,máx} = I_L\left(1 + 2\pi\sqrt{\frac{2V_p}{V_r}}\right)}$$

Retificador com capacitor de filtro para onda completa

temos que V_r (meia onda) $= 2 \times V_r$ (onda completa) ; logo

$$\boxed{V_r = \frac{V_p}{2RC \cdot f}}$$

Resultando em:

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

$$\boxed{I_{D\,máx} = I_L\left(1 + 2\pi\sqrt{\frac{V_p}{2V_r}}\right)}$$

Observação

$V_p \rightarrow V_p - V_d$ (1/2 onda)

$V_p \rightarrow V_p - V_d$ (1 onda)

$V_p \rightarrow V_p - 2V_d$ (tipo ponte)

Exemplo 3.9)

Retificador de pico:

$f = 60Hz$

$V_p = 100V$

$R = 10K\Omega$

× Calcule capacitância C, que resulte em uma ondulação de pico a pico de 2V? $V_r = 2V$

× Calcule a fração do ciclo durante a condução do diodo, valor médio e de pico da corrente no diodo.

×

$$V_r = \frac{V_p}{f.RC} \therefore C = \frac{100}{2.60.10.10^3} \therefore \boxed{C = 83{,}33\mu F}$$

××

Angulo de condução do diodo: $w\Delta t$

$$w\Delta t = \sqrt{\frac{2V_r}{V_p}} = \sqrt{\frac{2.2}{100}} = 0{,}2\ rad$$

$2\pi - 100$

$0{,}2 - X$ $\therefore$ O diodo conduz cerca de $\boxed{3{,}18\%}$

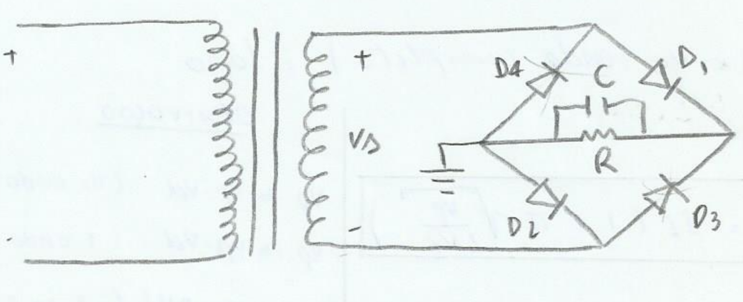
$$i_{D\,médio} = I_L\left(1 + \pi \times \sqrt{\frac{2V_p}{V_r}}\right)$$

$$I_L = \frac{V_p}{R} = \frac{100}{10K} = 0{,}01$$

$$i_{D\,médio} = 0{,}01\left(1 + \pi . \sqrt{\frac{2.100}{2}}\right) \therefore \boxed{i_{D\,médio} = 324mA}$$

$$i_{D\,max} = 0{,}01\left(1 + 2\pi \sqrt{\frac{2\,100}{2}}\right) \therefore \boxed{i_{D\,max} = 638mA}$$

Exercício P3.24



$V_S = 12V\ (rms)$

$f = 60Hz$

$V_D = 0{,}8V$

$R = 100\Omega$

× Calcule o valor de C que resulta em uma tensão de ondulação máxima de 1V pico a pico.

$V_r = 1V$ e $C = ?$

$V_r = \frac{V_P}{2f.RC}$; como o circuito é tipo ponte, temos $V_P = V_P - 2V_D$; logo:

$V_r = \frac{V_P - 2V_D}{2f.RC}$ ∴ $C = \frac{12\sqrt{2} - 2.0,8}{2.60.100.1}$ ∴ $\boxed{C = 1280,9\,\mu F}$

× Qual a tensão cc na saída?

$V_{saída} = V_s - 2V_D$

$= 12\sqrt{2} - 2.0,8$ ∴ $\boxed{V_{saída} = 15,37\,V}$

× Calcule a corrente na carga

$I = \frac{V_{saída}}{R} = \frac{15,37}{100}$ ∴ $\boxed{I = 153,7\,mA}$

× Angulo de condução do diodo.

$w\Delta t$: angulo de condução do diodo

$w\Delta t = \sqrt{\frac{2V_r}{V_P'}} = \sqrt{\frac{2V_r}{V_P - 2V_d}} = \sqrt{\frac{2.1}{12\sqrt{2} - 2.0,8}}$ ∴ $\boxed{w\Delta t = 0,36\,rad}$

× Qual a corrente média e máxima do diodo

$i_{D\,médio} = I_L\left(1 + \pi\sqrt{\frac{V_P - 2V_d}{2V_r}}\right)$ $\boxed{i_{máx} = 2,83A}$

$= 153,7.10^{-3}\left(1 + \pi\sqrt{\frac{12\sqrt{2} - 2.0,8}{2.1}}\right)$

∴ $\boxed{i_{D\,médio} = 1,49\,A}$

× Qual a tensão de pico inversa em cada diodo?

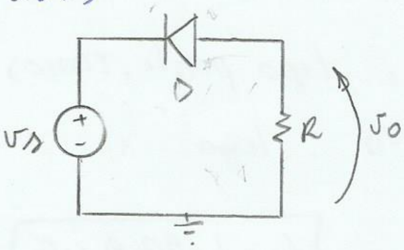
$PIV = V_{saída} + V_d$

$= 15,37 + 0,8$ ∴ $\boxed{PIV = 16,17\,V}$

Dúvida: Como especificar a corrente de pico e sua PIV

Seção 3.5: Os circuitos retificadores

Exercício 3.24)



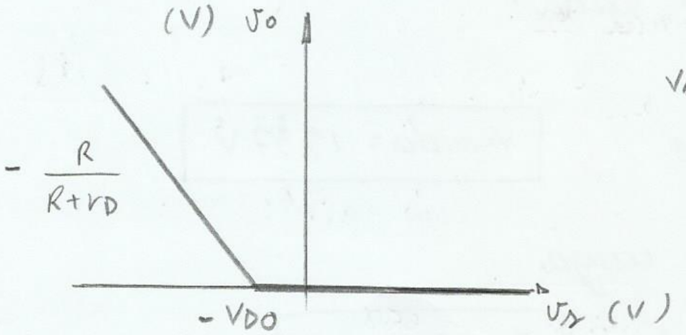
v_s: Sinoidal

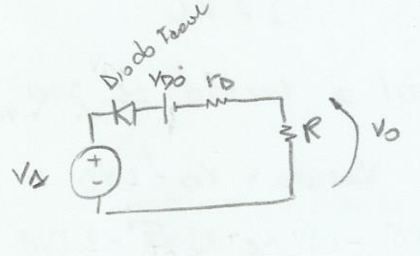
$V_p = 20V$

$R = 2K\Omega$

$V_D = 0{,}7V$

(a) Característica de transferência



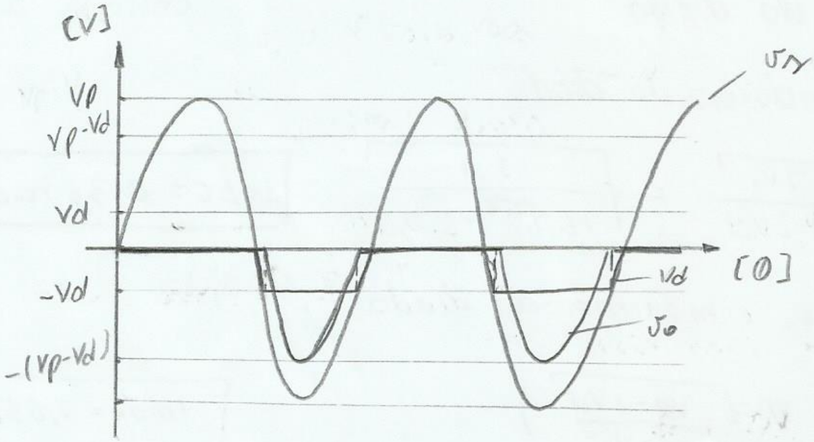


$$v_O = \frac{v_s - V_{D0}}{R+R} R$$

I

Para $v_s \gg V_{D0}$

(b) Esboce a forma de onda v_o



(c) Calcule o valor médio de v_o.

$$\hat{v}_O = \frac{1}{T}\int_0^T v_o\, d\phi$$

$$= \frac{1}{T}\left[\int_0^{\theta} \overset{\to 0}{0\, d\phi} + \int_{\theta}^{\pi-\theta} -(V_p \sin\phi - V_d)\, d\phi + \overset{\to 0}{\int_{\pi-\theta}^{\pi} 0\, d\phi}\right]$$

$$= \frac{1}{T}\left[V_p \cos\phi + V_d \phi\right]\Big|_{\theta}^{\pi-\theta}$$

$$= \frac{1}{2\pi}\left[V_p(\cos(\pi-\theta) - \cos\theta) + V_d(\pi-\theta-\theta)\right]$$

$$= \frac{1}{2\pi}\left[V_p(\cos(\pi-\theta) - \cos\theta) + V_d(\pi - 2\theta)\right]$$

Para $V_p \gg V_d \to \theta = 0$

$$\hat{v}_O = \frac{1}{2\pi}\left[V_p(-1-1) + V_d(\pi)\right]$$

$\hat{v_o} = \frac{-V_p}{\pi} + \frac{V_d}{2}$ $\quad \hat{v_o} = \frac{-10}{\pi} + \frac{0,7}{2}$ $\quad \boxed{\hat{v_o} = -2,83\ V}$

(d) Calcule o valor da corrente de pico no diodo

$i_D = \frac{20 - 0,7}{2K} \therefore i_D = 9,7\ mA$ X

(e) Calcule o PIV do diodo

$\boxed{PIV = 10\ V}$

Exercício 3.25)

Circuito retificador de meia onda

Diodo: Queda de tensão constante 0,7 V

$\left\{ \begin{array}{l} 1K\Omega \\ 120V\,(rms)\ /\ 60Hz \\ 10:1 \end{array} \right.$

× Qual a tensão de pico de saída retificada?

$120 \cdot \frac{1}{10} = 12V\ (rms) = V_p$ (eficaz)

$V_{saída} = V_p - V_d$

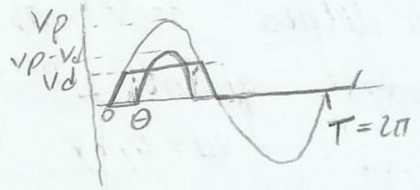
$= 12\sqrt{2} - 0,7$ $\quad \boxed{V_{saída} = 16,27\ V}$

× Para qual fração do ciclo o diodo conduz?

Como $v_s(\phi) = V_p \sin\phi$

$v_s(\theta) = V_d$

logo $V_d = V_p \sin\theta$, com isso temos:



$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{V_d}{V_p}\right) \Rightarrow$

$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{0,7}{12\sqrt{2}}\right) \therefore \theta = 0,041$

conduz em: $\pi - 2\theta = \pi - 2 \cdot 0,041 = \boxed{3,06\ rad}$

$2\pi - 100$

$3,06 - x$ $\quad \therefore \quad \boxed{x = 48,7\%\ \text{ciclo}}$

× Qual a tensão média na saída?

$\bar{V_o} = \frac{1}{T}\int_0^T v_o\, d\phi$

$= \frac{1}{T}\left[\cancel{\int_0^\theta 0\, d\phi} + \int_\theta^{\pi-\theta} (V_p \sin\phi - V_d)\, d\phi + \cancel{\int_{\pi-\theta}^{\pi} 0\, d\phi}\right]$

$= \frac{1}{T}\left[-V_p \cos\phi - V_d\,\phi\right]\Big|_\theta^{\pi-\theta}$

$$\hat{V_o} = \frac{1}{2\pi}\left[-V_p\left[\cos(\pi-\theta) - \cos\theta\right] - V_d(\pi-\theta-\theta)\right)$$

$$= \frac{1}{2\pi}\left[-V_p\left(\cos(\pi-\theta) - \cos\theta\right] - V_d\left[\pi - 2\theta\right]\right]$$

Para $V_p >> V_d \Rightarrow \theta = 0$

$$= \frac{1}{2\pi}\left[-V_p\left(\cos\underbrace{(\pi-0)}_{-1} - \underbrace{\cos 0}_{1}\right] - V_d\left[\pi - 2.0\right]\right]$$

$$= \frac{V_p}{\pi} - \frac{V_d}{2};$$

$$\hat{V_o} = \frac{12\sqrt{2}}{\pi} - \frac{0{,}7}{2} \quad \therefore \quad \boxed{\hat{V_o} = 5{,}05\,V}$$

x Qual a corrente média?

$$I_m = \frac{5{,}05}{1K} \quad \therefore \quad \boxed{I_m = 5{,}05\,mA}$$

Exercício 3.26

Circuito Retificador de Onda completa, (terminal central)

$R = 1K\Omega$

rede elétrica: 120V (rms) / 60Hz (transformador 5:1)

Diodos: quant. 2

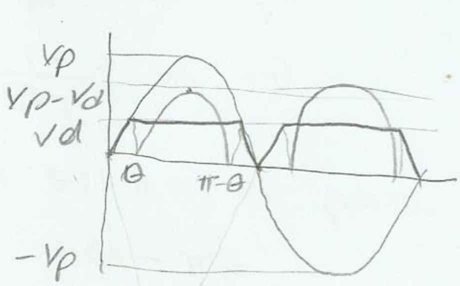
$V_d = 0{,}7V$ (para qualquer corrente)

$V_{eficaz} = \frac{V_{max}}{\sqrt{2}}$

x Qual a tensão de pico da saída retificada?

$$v_o = V_p - V_d$$

$$= \left(\frac{120}{5}\right)\cdot\sqrt{2} - 0{,}7 \quad \therefore \quad \boxed{v_o = 33{,}24V}$$



x Para qual fração do ciclo o diodo conduz?

$$V_s(\phi) = V_p \sin\phi \qquad \Rightarrow \qquad V_d = V_p \sin\theta$$

$$V_s(\theta) = V_d \qquad\qquad \theta = \sin^{-1}\left(\frac{V_d}{V_p}\right) = \sin^{-1}\left(\frac{0{,}7}{\frac{120}{5}\sqrt{2}}\right)$$

$\therefore \theta = 0{,}021$ Conduz: $\pi - 2\cdot 0{,}021 = 3{,}1$ rad

logo π — 100

$3{,}1$ — x

$$\therefore \quad \boxed{x = 98{,}69\,\%}$$

× Qual a tensão média da saída?

$$\hat{V_o} = \frac{1}{T}\int_0^T V_o \, d\phi$$

$$= \frac{1}{\pi}\left[\cancel{\int_0^\theta 0 \, d\phi}^{\,0} + \int_\theta^{\pi-\theta}(V_p \sin\phi - V_d)\, d\phi + \cancel{\int_{\pi-\theta}^{\pi} 0 \, d\phi}^{\,0}\right]$$

$$= \frac{1}{\pi}\left[-V_p \cos\phi - V_d\phi\right]\Big|_\theta^{\pi-\theta}$$

$$= \frac{1}{\pi}\left[-V_p(\cos(\pi-\theta - \cos\theta) - V_d(\pi-\theta-\theta)\right]$$

$$= \frac{1}{\pi}\cdot\left[-V_p(\cos(\pi-\theta)-\cos\theta) - V_d(\pi-2\theta)\right]$$

para $V_p >> V_d$, temos $\theta \simeq 0$, logo

$$\hat{V_o} = \frac{1}{\pi}\cdot\left[-V_p(\cos(\pi-0)-\cos 0 - V_d(\pi-2.0)\right]$$

$$\hat{V_o} = \frac{1}{\pi}\left[+2V_p - V_d\pi\right] \quad \therefore \quad \hat{V_o} = \frac{2V_p}{\pi} - V_d$$

$$\hat{V_o} = \frac{2.\frac{120\sqrt{2}}{5}}{\pi} - 0{,}7 \quad \therefore \quad \boxed{\hat{V_o} = 20{,}91V}$$

× Qual a corrente média da carga?

$$\hat{i} = \frac{20{,}9}{1K} = \boxed{20{,}9\ mA}$$

Exercício 3.27

Circuito retificador de onda completa

$R = 1K\Omega$

rede elétrica: 120 V(rms) / 60 Hz   transformador 10 : 1

Diodos: $n = 4$ $V_d = 0{,}7V$ para qualquer corrente

× Qual a tensão de pico da saída retificada?

$$v_o = V_p - 2V_d \quad ; \quad V_p = \frac{120\sqrt{2}}{10} = 12\sqrt{2}$$

$$= 12\sqrt{2} - 2.0{,}7$$

$$\therefore \boxed{v_o = 15{,}57V}$$

x Para qual a fração do ciclo o diodo conduz

$V_s(\phi) = V_p \sin\theta$

$V_s(\theta) = 2V_d$

logo $2V_d = V_p \sin\theta$

$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{2V_d}{V_p}\right)$

$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{0{,}7}{12\sqrt{2}}\right) \therefore \theta = 0{,}041 \text{ rad}$

conduz em: $\pi - 2\theta = \pi - 2 \cdot 0{,}041 = 3{,}06$

$\pi - 100$

$3{,}06 - x$ $\therefore$ $\boxed{x = 97{,}37\%}$

x Qual a tensão média de saída?

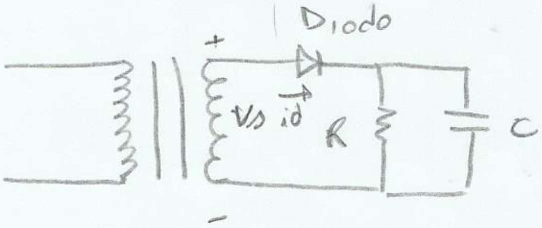
$\hat{V_o} = \frac{1}{\pi}\left(-V_p \times (-2) - 2\pi V_d\right)$

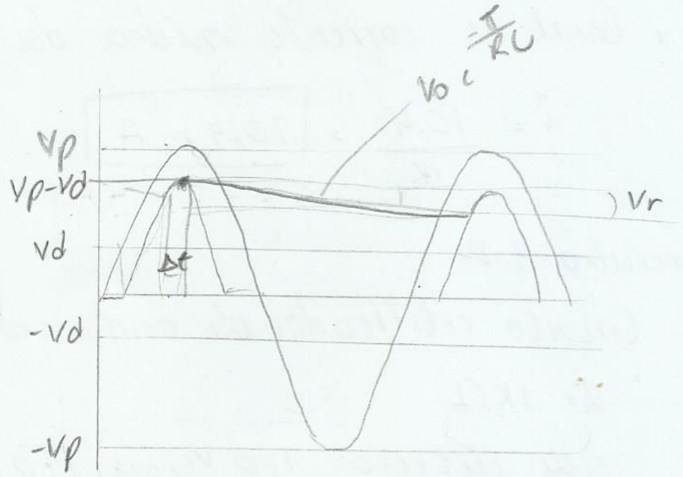
$= \frac{2V_p}{\pi} - 2V_d = \frac{2 \cdot 12\sqrt{2}}{\pi} - 2 \cdot 0{,}7 = \boxed{9{,}4V}$

x Qual é a corrente média?

$I = \frac{9{,}4}{1K} \therefore \boxed{I = 9{,}4mA}$

Exercício P3.28





Dados: $R = 1K\Omega$

Transformador 120V (rms) / 60Hz

Rebaixador: 10:1

Diodo = 0,7V

x Determine o que for pedido para:

(i) V_r = 10% do valor de pico de saída

(ii) V_r = 1% do valor de pico de saída

(a) Qual a tensão média resultante?

$$\hat{V}_O = V_p - \frac{V_r}{2}$$

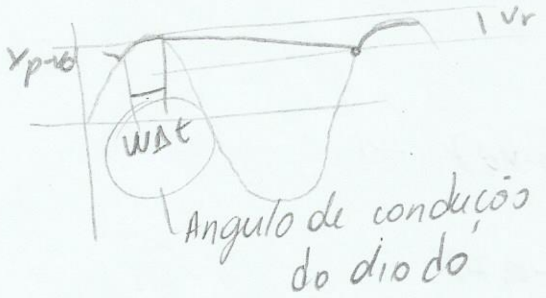
(i)

$$V_r = 0{,}10 \cdot (V_p - V_d) = 0{,}10\,(12\sqrt{2} - 0{,}7) = 1{,}627$$

$$\hat{V}_O = 12\sqrt{2} - 0{,}7 - \frac{1{,}627}{2} = \boxed{15{,}46\ V}$$

(ii) $$\hat{V}_O = (12\sqrt{2} - 0{,}7) - \frac{0{,}01 \cdot (12\sqrt{2} - 0{,}7)}{2} \therefore \boxed{\hat{V}_O = 16{,}19\ V}$$

(b) Para qual fração do ciclo o diodo conduz?



$$V_O = V_p - V_d - V_r = V_p \cos wt - V_d$$

Para $w\Delta t \ll$ pequeno

$$V_O = V_p - V_d - V_r = V_p\left(1 - \frac{1}{2}(w\Delta t)^2\right) - V_d$$

$$\cancel{V_p} - \cancel{V_d} - V_r = \cancel{V_p} - \frac{V_p}{2}(w\Delta t)^2 - \cancel{V_d}$$

$$w\Delta t = \sqrt{\frac{2V_r}{V_p}}$$

(1) $$w\Delta t = \sqrt{\frac{2 \cdot 0{,}10(12\sqrt{2} - 0{,}7)}{12\sqrt{2} - 0{,}7}} \therefore w\Delta t = 0{,}45$$

$2\pi - 100$
$0{,}45 - x$ $\therefore$ $\boxed{x = 7{,}1\%}$

(2) $$w\Delta t = \sqrt{\frac{2 \cdot 0{,}01\,\cancel{(12\sqrt{2} - 0{,}7)}}{\cancel{12\sqrt{2} - 0{,}7}}} \therefore w\Delta t = 0{,}14$$

$2\pi - 100$
$0{,}14 - x$ $\boxed{x = 2{,}25\%}$

(c) Qual a corrente média no diodo?

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

$$= \frac{15{,}46}{1K}\left(1 + \pi\sqrt{\frac{2 \cdot \cancel{(12\sqrt{2} - 0{,}7)}}{0{,}1\,\cancel{(12\sqrt{2} - 0{,}7)}}}\right) \quad \boxed{i_{Dmédia} = 233\ mA}$$

$$i_{D\,max} = \frac{15{,}46}{1K}\left(1 + 2\pi\sqrt{\frac{2.(12\sqrt{2}-0{,}7)}{0{,}1(12\sqrt{2}-0{,}7)}}\right) = 450mA$$

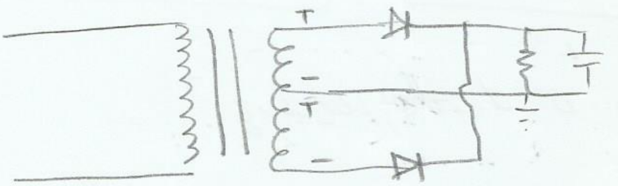
Exercício P3.29)

Retificador de onda completa com derivação central

$R = 1K\Omega$

110V (rms) / 60 Hz   transformador rebaixador 5:1

$V_d = 0{,}7V$ para qualquer corrente



(a) Tensão média resultante?

$$\hat{V_o} = (V_p - V_d) - \frac{V_r}{2} \quad ; V_r = 0{,}1.(V_p - V_d)$$

$$= \left(\frac{24}{2}\sqrt{2} - 0{,}7\right) - \frac{0{,}1\left(\frac{24}{2}\sqrt{2} - 0{,}7\right)}{2}$$

$$\boxed{\hat{V_o} = 15{,}46\,V}$$

(b) Qual a fração do ciclo o diodo conduz?

$$V_o = -V_d + V_p \cos w\Delta t \quad ; \cos w\Delta t = 1 - \frac{1}{2}(w\Delta t)^2 \text{ , } w\Delta t \text{ muito pequeno}$$

$$V_o = -V_d + V_p\left(1 - \frac{1}{2}(w\Delta t)^2\right)$$

$$V_o = V_p - V_d - V_r$$

$$\cancel{V_p} \cancel{- V_d} - V_r = \cancel{-V_d} + \cancel{V_p} - \frac{V_p}{2}(w\Delta t)^2$$

$$w\Delta t = \sqrt{\frac{2V_r}{V_p}} = \sqrt{\frac{2.0{,}1\cancel{(12\sqrt{2}-0{,}7)}}{\cancel{(12\sqrt{2}-0{,}7)}}} = 0{,}45$$

π — 100

0,45 — x $\therefore$ $\boxed{x = 14{,}23\%}$

(c) Qual a corrente média do diodo

$$i_{D médio} = i_L \left(1 + \pi \sqrt{\frac{V_p}{2V_r}}\right)$$

$$= \frac{(12\sqrt{2} - 0{,}7)}{1K} \left(1 + \pi \sqrt{\frac{\cancel{12\sqrt{2} - 0{,}7}}{2 \cdot 0{,}1 \cancel{(12\sqrt{2} - 0{,}7)}}}\right)$$

$$\boxed{i_{médio} = 131\ mA}$$

(d) Qual a corrente de pico do diodo

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

$$= \frac{(12\sqrt{2} - 0{,}7)}{1K} \left(1 + 2\pi \sqrt{\frac{\cancel{12\sqrt{2} - 0{,}7}}{2 \cdot 0{,}1 \cdot \cancel{(12\sqrt{2} - 0{,}7)}}}\right)$$

$$\boxed{i_D = 245\ mA}$$

Exercício P3.30

Retificador de onda completa tipo ponte

$R = 1K\Omega$

$120\ V(rms) / 60Hz \quad (10:1)$

$V_d = 0{,}7V$

(a) Tensão média resultante

$$\hat{V_o} = V_p - 2V_d - \frac{V_r}{2}$$

$$= 12\sqrt{2} - 2 \cdot 0{,}7 - \frac{0{,}1\,(12\sqrt{2} - 2 \cdot 0{,}7)}{2}$$

$$\hat{V_o} = 14{,}79\ V$$

(b) Para qual fração do ciclo o diodo conduz?

$V_o = V_p \cos w\Delta t - 2V_d \quad ; \quad \cos w\Delta t = 1 - \frac{1}{2}(w\Delta t)^2 \ ;$

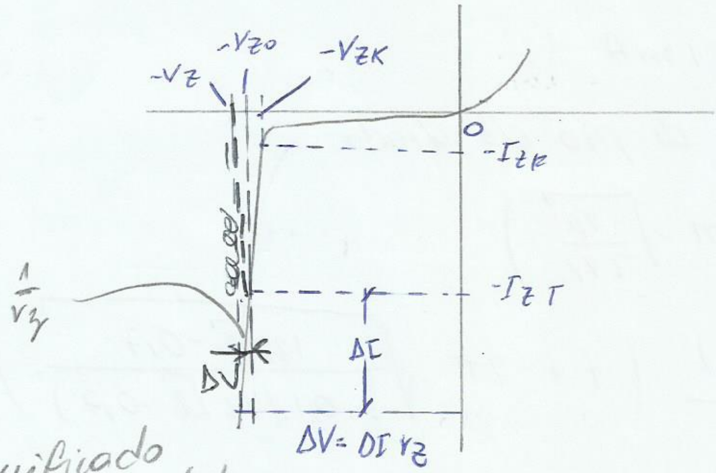
$V_o = V_p - 2V_d - V_r$

$$\cancel{V_p} - \frac{V_p}{2}(w\Delta t)^2 - \cancel{2V_d} = \cancel{V_p} - \cancel{2V_d} - V_r$$

$$w\Delta t = \sqrt{\frac{2V_r}{V_p}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0{,}1\,(12\sqrt{2} - 2 \cdot 0{,}7)}{(12\sqrt{2} - 2 \cdot 0{,}7)}} = 0{,}45 \rightarrow \boxed{14{,}23\%}$$

Diodos zener

- Operação na região Reversa de polarização
- Trabalha na região de ruptura



/ Especificado no catalogo

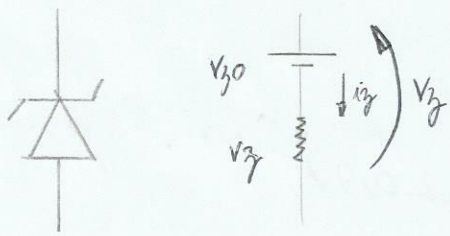
I_{ZK}: Corrente mínima para manter o zener funcionando

$I_{Zmáx}$: Corrente máxima suportável

I_{ZT}: Corrente de teste

V_Z: Tensão de referência

Modelo do diodo zener:



$V_Z = V_{ZO} + r_Z I_Z$

Válido para $I_Z > I_{ZK}$

$V_{ZO} + r_Z \Rightarrow$ obtidos pela aplicação do modelo de segmento de retas

$$r_Z = \frac{\Delta V_Z}{\Delta I_Z} \therefore \boxed{\Delta V_Z = r_Z \cdot \Delta I_Z}$$

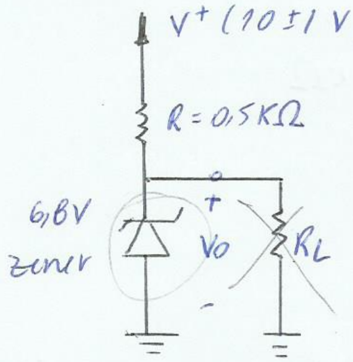
Exemplo 3.8:

Diodo zener. 6,8V

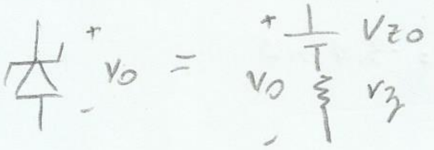
Especificação. $V_Z = 6{,}8V$ com $I_Z = 5mA$, $r_z = 20\Omega$ e $I_{ZK} = 0{,}2mA$

Fonte de alimentação V^+ é de $10V \pm 1V$

(a)



× Calcule o valor de Vo sem a carga e com o valor de V+ nominal



$V_O = V_{Z0} + I_Z r_Z$

$6{,}8 = V_{Z0} + 5.10^{-3}.20 \therefore V_{Z0} = 6{,}7\ V$

$$I_D = \frac{10 - 6{,}7}{0{,}5K + 20} = 6{,}35\ mA$$

$V_O = 6{,}7 + 6{,}35.10^{-3}.20 \therefore \boxed{V_O = 6{,}83V}$

× Calcule a variação em Vo resultante da variação de ±1 V em V+. ($\Delta V_O \to \pm 1V$)

1º método

(+1) $I_D = \frac{11 - 6{,}7}{0{,}5K + 20} = 8{,}27mA$ $\quad V_O = 6{,}7 + 8{,}27.10^{-3}.20 = 6{,}865V$

(-1) $I_D = \frac{9 - 6{,}7}{0{,}5K + 20} = 4{,}42mA$ $\quad V_O = 6{,}7 + 4{,}42.10^{-3}.20 = 6{,}788V$

$\Delta V_O = 6{,}865 - 6{,}788$ $\quad \therefore \Delta V_O = 76{,}92mV$ ou $\pm 38{,}46\ mV$

2º método

$\Delta V_Z = r_Z\, \Delta I_Z$; $\quad \Delta I_Z = \frac{11 - V_{Z0}}{R + r_Z} - \frac{(9 - V_{Z0})}{R + r_Z}$

$\Delta V_O = r_Z \frac{\Delta V^+}{r_Z + R}$ $\quad = \frac{2}{R + r_Z} \Delta V^+$

$$\Delta V_O = \frac{20 \cdot \pm 1}{20 + 0{,}5K} = \pm 38{,}46\ mV$$

x Calcule a variação em V_o resultante, quando R_L consumir uma corrente $I_L = 1mA$ e determine a regulação de carga

$\Delta V_o = r_Z \cdot \Delta I_Z$, $\Delta I_Z = -1$

$\Delta V_o = -20mV$

Regulação da carga $= \dfrac{\Delta V_o}{\Delta I_L} = \dfrac{-20mV}{mA}$

x Calcule a variação em V_o quando $R_L = 2K\Omega$

$\Delta I_L = -\Delta I_Z = \dfrac{6,8}{2K} = -3,4mA$

$\Delta V_o = r_Z \cdot \Delta I_Z$

$= 20 \cdot -3,4m$ ∴ $\boxed{\Delta V_o = -68mV}$

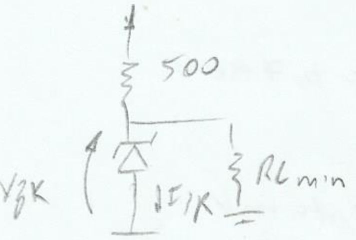
x

$\Delta I_L = \dfrac{6,8}{0,5K} = 13,6mA$ ∴ $\Delta I_Z = -13,6mA$

Não é possível drenar essa corrente, logo o zener está em corte

$V_o = \dfrac{10}{2} = 5$ $\Delta V = 5 - 6,8 = -1,8V$

x Qual o valor mínimo de R_L com o qual o diodo continua operando na região de ruptura?



$V_{ZK} = V_{Z0} + r_Z \cdot I_Z$

$V_{ZK} = 6,7 + 20 \cdot 0,2 \cdot 10^{-3} = 6,704 \approx 6,7$

$V_{ZK} \cong V_{Z0}$ e $r \equiv 0$

$I = \dfrac{9 - 6,7}{500} = 4,6 \cdot 10^{-3}$ ∴ $I_L = (4,6 - 0,2) \cdot 10^{-3}$

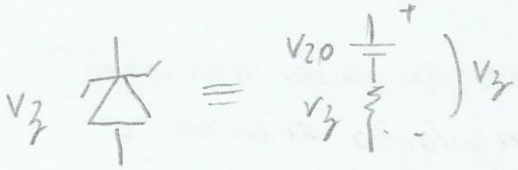
∴ $I_L = 4,4 \cdot 10^{-3}$

$R_L = \dfrac{6,7}{4,4 \cdot 10^{-3}}$ ∴ $R_L \cong 1,5K\Omega$

Exercício 3.17

Diodo zener: Tensão nominal: 10V com 10mA $r = 50\Omega$

x Que valor de tensão você espera para V_{Z0} se a corrente no diodo cair pela metade?



$$V_Z = V_{Z0} + I_Z \cdot r_Z$$

$$10 = V_{Z0} + 10 \cdot 10^{-3} \cdot 50$$

$$\boxed{\therefore V_{Z0} = 9{,}5V}$$

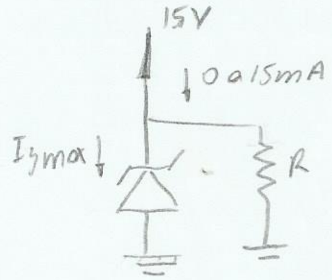
$$V' = 9{,}5 + \frac{10}{2} \cdot 10^{-3} \cdot 50 \quad \therefore \boxed{V' = 9{,}75V}$$

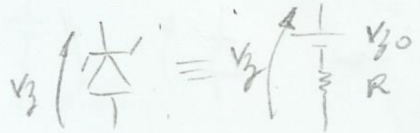
x E se a corrente dobrar?

$$V'' = 9{,}5 + 2 \cdot 10 \cdot 10^{-3} \cdot 50 \quad \therefore \boxed{V'' = 10{,}5V}$$

Exercício P3.18

Diodo zener: $5{,}6V \rightarrow I = 5 \cdot I_{ZK}$; $I_{ZK} = 1mA$





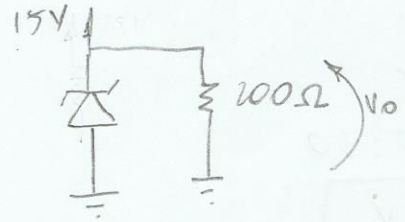
x Encontre o valor de R. Qual a máxima potência de dissipação do zener?

$5{,}6V \rightarrow 5mA$ $\Delta = 15mA$

Exercício 3.19)

Diodo zener: $5,1V \rightarrow I = 50mA \quad r = 7\Omega$

Vd-nominal = 15V através de um resistor de 200Ω

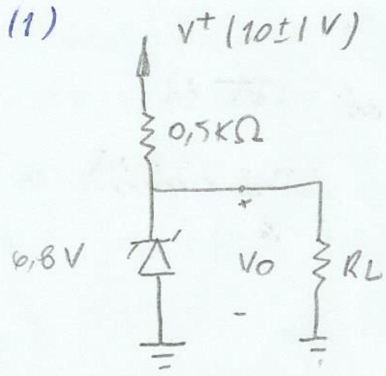


$5,1 = V_{Z0} + 7.50.10^{-3} \quad \therefore V_{Z0} = 4,75V$

- Qual a tensão de saída sem carga?
- Calcule a regulação de linha e regulação de carga?

Exercícios da Lista do Base - Diodo Zener

(1)



Diodo: $V_Z = 6,8V \rightarrow I_Z = 5mA$

$r_Z = 20\Omega \quad I_{ZK} = 0,2mA$

1°) Determinar V_{Z0}:

$V_Z = V_{Z0} + I_Z \cdot r_Z$

$6,8 = V_{Z0} + 5.10^{-3}.20$

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

a) Vo sem carga e com V^+ nominal

$$i_D = \frac{10 - 6,7}{0,5k + 20} = 6,35 mA$$

$$Vo = 6,7 + 6,35.10^{-3}.20 \quad \boxed{Vo = 6,83V}$$

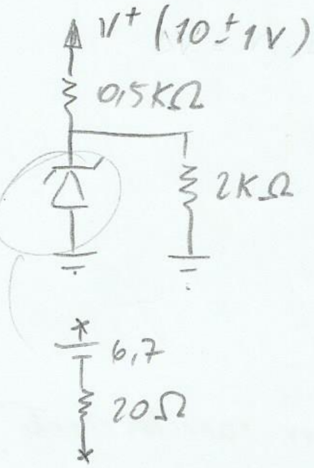
b) Regulação de linha $= \frac{\Delta Vo}{\Delta V^+}$ $\quad \Delta I_Z = \frac{\Delta V^+}{r + R}$

$\Delta V_Z = r_Z \Delta I_Z$

$\Delta Vo = r_Z \Delta I_Z$

$$\Delta Vo = r_Z \cdot \frac{\Delta V^+}{r + R} \rightarrow \Delta Vo = \frac{2.20}{20 + 500} = 76,92mV = \pm 38,46mV$$

c) ΔV_o com $R_L = 2K\Omega$ e V^+ nominal



$\Delta V_o = r_z \cdot \Delta I_z$

$\Delta I_z = \frac{6,83}{2K} = 3,41\,mA$

$\Delta V_o = -20 \cdot 3,41m = -68,26\,mV$

b) ΔV_o com $R_L = 500\Omega$ e V^+ nominal

$\Delta I_L = \frac{6,83}{500} = 13,65\,mA$

No momento em que adiciona a carga de 500Ω, ele necessita de uma corrente de 13,65mA, porém inicialmente a corrente que esta sendo conduzida é apenas 6,83 mA, logo o diodo zener não conduz.

$\Delta V_o = r_z \cdot \Delta I_L$ $\quad$ $\Delta V_o = 6,83 - 5 = \boxed{1,83\,mV}$

2.) (P1 - Noturno - 1° sem 2002)

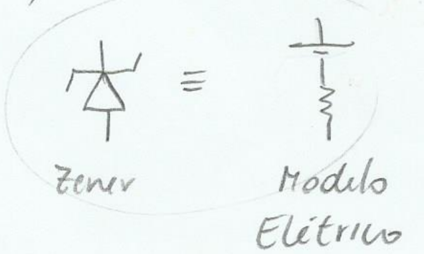
Diodo zener: $V_z = 9,1V \rightarrow I_z = 20mA$ $\quad r_z = 10\Omega$

$I_{zmáx} = 40mA$ $\quad I_{zK} = 4mA$

Potencia nominal 4mA

Corrente na carga varia de 0 a $I_{Lmáx}$

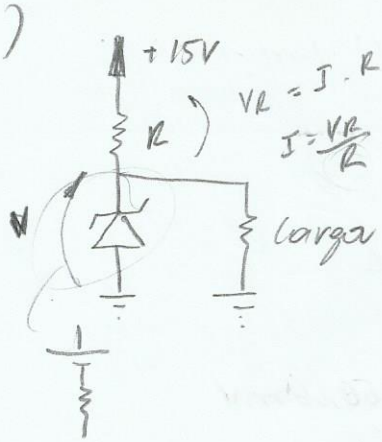
a) Modelo elétrico do zener utilizado: (São os valores de V_{zo} e r_o)



$9,1 = V_{zo} + 20 \cdot 10^{-3} \cdot 10$ $\quad \therefore \boxed{V_{zo} = 8,9\,V}$

$r = 10\Omega$

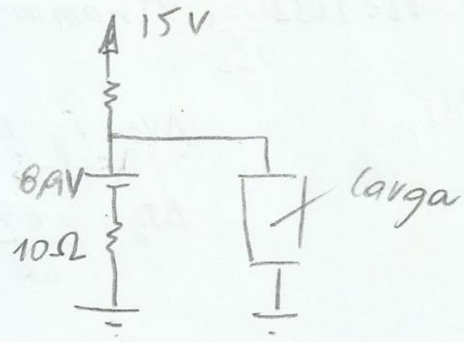
b)



$V_R = I \cdot R$

$I = \frac{V_R}{R}$

$\equiv$



c) Qual o valor de R para o regulador funcionar corretamente?

$15 = V_R + V_Z$

$V_Z = V_{Z0} + I_Z \cdot r_Z$

$9{,}1 = V_{Z0} + 20 \cdot 10^{-3} \cdot 10$

$\therefore V_{Z0} = 8{,}9V$

Admitindo a corrente $I_{Z\,máx}$ para que o regulador funcionar adequadamente.

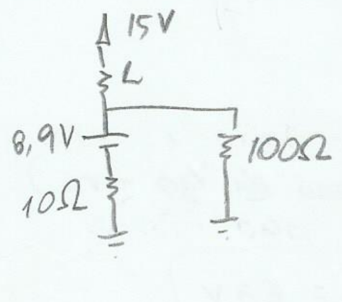
$V_Z = 8{,}9 + 10\, I_Z$

$15 = R \cdot I_{Z\,máx} + (8{,}9 + 10\, I_{Z\,máx})$

Para $I_{Z\,máx} = 40mA$

$R = \dfrac{15 - 8{,}9 - 10 \cdot 40 \cdot 10^{-3}}{40 \cdot 10^{-3}} \therefore \boxed{R = 142{,}5\,\Omega}$

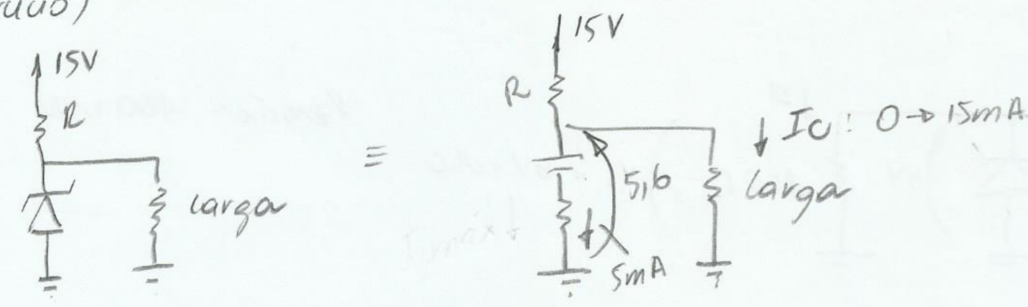
d) Para uma resistência de carga de 100Ω qual é a tensão na carga? Qual a potência dissipada pelo zener?



Assumindo $R = 142{,}5$ temos

$\Delta V = r_Z \cdot \Delta I_Z$;

Exercício)



Diodo: 5,6V → $5 \cdot I_{ZK}$; $I_{ZK} = 1mA$ ∴ $I_Z = 5mA$

corrente varia de 0 → 15mA

x Qual a máxima potência dissipada pelo zener

$$R = \frac{15 - 5,6}{5 \cdot 10^{-3} + 15 \cdot 10^{-3}} = 470\,\Omega$$

Modelo do diodo: $V_Z = V_{Z0} + I_Z r_Z$

$P_{Z\,máx} = V_Z \cdot I_{Z\,máx}$; $I_{Z\,máx} = I_{L\,max} + I_{Z\,min}$

$= 5,6 \cdot 20 \cdot 10^{-3}$ $= 15 \cdot 10^{-3} + 5 \cdot 10^{-3} = 20 \cdot 10^{-3}$

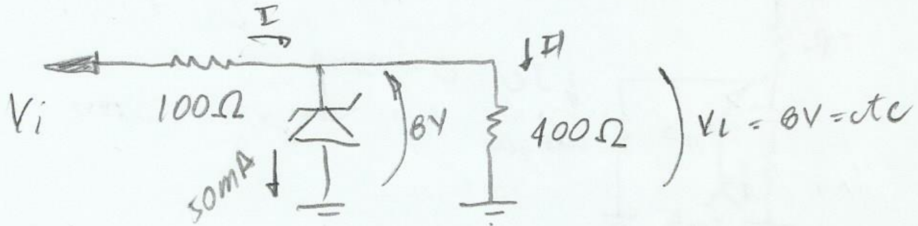
∴ $\boxed{P_{Z\,máx} = 112mW}$

x Qual será o valor adequado para resistência R de polarização do zener?

O valor adequado de R para polarização do zener é quando a corrente é máxima, logo $\boxed{R = 470\,\Omega}$

x Quando a corrente $I_Z < I_{ZK}$ o circuito não estará funcionando corretamente, pois o diodo zener não estará na região de ruptura.

Exercício)



$P_{Z\,máx} = 400\ mW$

$V_Z = 8V$ para $I_Z \geq I_{ZK}$ e que $I_{ZK} = 0{,}1\ I_{Z\,máx}$

x Determine o intervalo para Vi que mantém V_L constante e igual a 8V e não exceda a potência máxima.

$P_{Z\,máx} = V_{máx} \cdot I_{Z\,máx}$; $V = 8V$

$I_{Z\,máx} = \dfrac{0{,}4}{8} = 0{,}05\ A = 50\ mA$

$I_L = \dfrac{8}{400} = 0{,}02\ A = 20\ mA$

$I = (50 + 20).m \quad \therefore \quad I = 70\ mA$

$V_i = 70.10^{-3}.100 + 8V \quad \therefore \quad V_i = 15V$ ($I_{Z\,máx}$)

$I_{Z\,min} = 0{,}1\ I_{Z\,máx} = 0{,}1 . 50.10^{-3} = 5.10^{-3}$

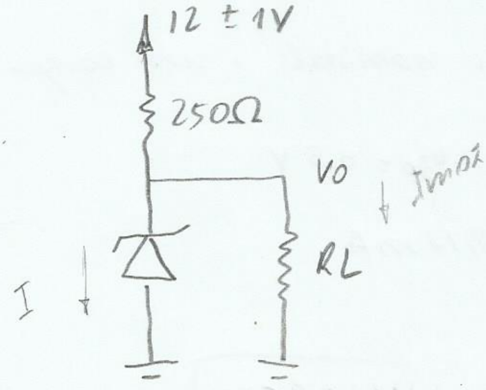
$I = 5.10^{-3} + 20.10^{-3} = 25.10^{-3}$

$V_i = 25.10^{-3}.100 + 8 \quad \therefore \quad V_i = 10{,}5V$

$\therefore \boxed{10{,}5 < V_i < 15V}$

P1- Diurno - 2º sem - 2008)

Diodo zener: $V_Z = 9{,}2V \rightarrow I_Z = 10\,mA \quad r_Z = 20\Omega \quad I_{ZK} = 1{,}0\,mA$



(a) Calcule o valor Vo sem carga e com o valor de Vcc nominal.

$$V_Z = V_{Z0} + I_Z \cdot r_Z$$

$$9{,}2 = V_{Z0} + 10.10^{-3}.20 \quad \therefore V_{Z0} = 9V$$

$$I = \frac{12-9}{250+20} \quad \therefore I = 11{,}11\,mA \quad \text{logo } V_o = 9 + 11{,}11 \times 20.10^{-3}$$

$$\boxed{V_o = 9{,}22\ V}$$

(b) Calcule a variação de Vo resultante da variação de ±1V em Vcc (sem carga)

$$\Delta V_o = r_Z \cdot \Delta I_Z \quad ; \quad \Delta I_Z = \frac{\Delta V}{R+r}$$

$$\Delta V_o = \frac{20.}{250+20}(\pm 1) \quad \therefore \quad \boxed{\Delta V_o = \pm\ 74{,}07\ V}$$

(c) Determinar a resistência mínima de carga para que o zener ainda esteja na região de ruptura Zener

$$V_{min} = 9 + 1.10^{-3}.20 = 9{,}02V$$

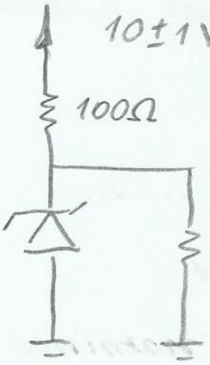
$$I_T = \frac{11 - 9{,}02}{250} = 7{,}92\,10^{-3}\,A$$

$$I_L = (7{,}92.-1).10^{-3}\,A = 6{,}92\,10^{-3}\,A$$

$$R_L = \frac{9{,}02}{6{,}92.10^{-3}} = \boxed{1{,}3\,K\Omega}$$

P1 - Diurno - 1º sem 2010)

Diodo zener: $V_Z = 8{,}5\,V \rightarrow I_Z = 10\,mA$ $\quad r_Z = 20\,\Omega$ $\quad I_{ZK} = 1{,}0\,mA$



(a) Calcule Vo para Vcc nominal e sem carga

$$8{,}5 = V_{Z0} + 10 \cdot 10^{-3} \cdot 20 \quad \therefore V_{Z0} = 8{,}3\,V$$

$$I = \frac{10 - 8{,}3}{100 + 20} = 14{,}17\,mA$$

$$V_o = 8{,}3 + 14{,}17 \cdot 10^{-3} \cdot 20 \quad \therefore \boxed{V_o = 8{,}58\,V}$$

(b) Calcule a variação em Vo resultante da variação de ±1 V em Vcc (sem carga)

$$\Delta V_o = r_Z \cdot \Delta I_Z \quad ; \quad \Delta I_Z = \frac{\Delta V}{r + R}$$

$$= r_Z \cdot \frac{\Delta V}{r + R} = \frac{\pm 1 \cdot 20}{20 + 100} \quad \therefore \boxed{\Delta V_o = \pm 0{,}17\,V}$$

(c) Determine R_L min para que o zener esteja na região de ruptura.

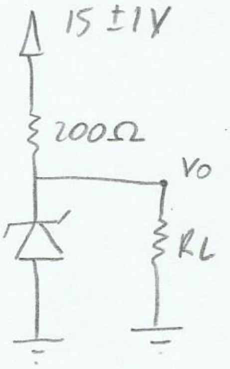
$$V_o = 8{,}3 + 1 \cdot 10^{-3} \cdot 20 = 8{,}32\,V$$

$$I_L = I_T - I_{ZK}$$

$$= \frac{9 - 8{,}32}{100} - 1 \cdot 10^{-3} = 5{,}8 \cdot 10^{-3}\,A$$

$$R_L = \frac{8{,}32}{5{,}8 \cdot 10^{-3}} \qquad \boxed{R_L = 1{,}43\,k\Omega}$$

P1 - Diurno · 2º sem · 2010



Diodo zener: $V_Z = 7{,}5V \rightarrow I_Z = 15mA$ $r_Z = 20\Omega$

$I_{ZK} = 1{,}0\ mA$

$V_Z = V_{Z0} + r_Z I_Z$

$V_{Z0} = 7{,}5 - 20 \cdot 15 \cdot 10^{-3}$ $\therefore V_{Z0} = 7{,}2\ V$

(a) Calcule o valor Vo sem carga e com valor Vcc nominal

$I = \frac{15 - 7{,}2}{200 + 20} = 0{,}035$ $\therefore V_O = 7{,}2 + 0{,}035 \times 20$ $\boxed{V_O = 7{,}91V}$

(b) Calcule a variação em Vo resultante da variação de ±1V em Vcc (sem a carga)

$\Delta V_O = r_Z \cdot \Delta I_Z$; $\Delta I_Z = \frac{\Delta V}{R + r_Z}$

$\Delta V_O = \frac{\pm 1 \cdot 20}{200 + 20} = \pm 90{,}9\ mV$

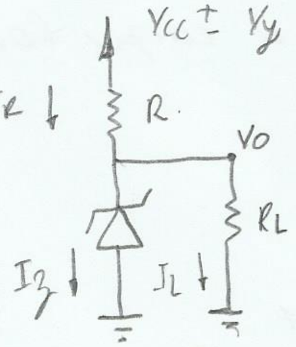
(c)

$V_{min} = 7{,}2 + 1 \cdot 10^{-3} \cdot 20 = 7{,}22\ V$

$I = \frac{14 - 7{,}22}{200} = 0{,}0339$ $I_L = 0{,}0339 - 1 \cdot 10^{-3} = 0{,}0329$

$R_{Lmi} = \frac{7{,}22}{0{,}0329} = \boxed{219{,}45\Omega}$

P3 - Diurno - 2º sem 2010



Modelo do diodo tem os parametros:

V_{Z0}, r_Z, I_{ZK}

(a) Calcule o valor de Vo sem carga (RL) e com a tensão nominal

$V_O = V_{Z0} + r_Z \cdot I_Z$; $I_Z = \frac{V_{CC} - V_{Z0}}{R + r_O}$

$V_O = V_{Z0} + r_Z \left(\frac{V_{CC} - V_{Z0}}{R + r_O} \right)$

(b)

$$V_O = \frac{R_L}{R+R_L} \cdot V_{CC}$$

(c)

$$V_O = V_{Z0} + I_{ZK} \cdot r_Z$$

$$I_R = \frac{V_{CC} - V_{Z0}}{R} \quad ; \quad I_L = I_R - I_Z$$

$$I_L = \frac{V_{CC} - V_{Z0}}{R} - I_{ZK}$$

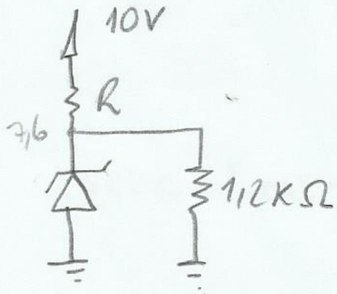
$$R_L = \frac{V_O}{I_L} = \frac{V_{Z0} + I_{ZK} \cdot r_Z}{\frac{V_{CC} - V_{Z0}}{R} - I_{ZK}}$$

P1 - Diurno - 2º sem - 2011

Diodo: 7,6V → 12 mA $r_Z = 20\Omega$ $I_{ZK} = 0{,}5\ mA$

Fonte: 10V e carga: 1,2KΩ

a) Que valor de R você deve escolher? Desenhe o circuito do retificador.



$$V = V_O + I_Z \cdot r_Z$$

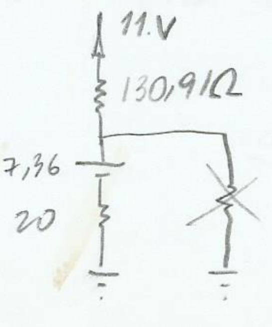
$$7{,}6 = V_O + 12 \cdot 10^{-3} \cdot 20 \quad \therefore V_o = 7{,}36V$$

$$I_R = I_Z + I_L$$

$$= 12 \cdot 10^{-3} + \frac{7{,}6}{1{,}2K} = 18{,}33 \cdot 10^{-3} A$$

$$R = \frac{10 - 7{,}6}{18{,}33 \cdot 10^{-3}} \quad \therefore \boxed{R = 130{,}91\Omega}$$

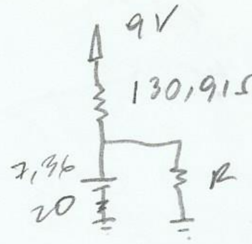
b) Qual a tensão de saída, quando a tensão de entrada for 10% mais alta e ao mesmo tempo a carga for removida?



$$I = \frac{11 - 7{,}36}{130{,}91 + 20} = 0{,}024$$

$$V_O = 7{,}36 + 20 \cdot 0{,}024 \quad \therefore V_O = 7{,}84$$

c)



$V_o = 7{,}36 + 20 \cdot 0{,}5 \cdot 10^{-3} \therefore V_o = 7{,}37V$

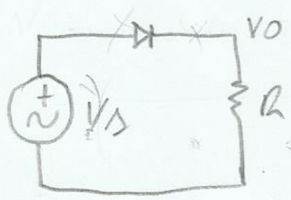
$I = \dfrac{9 - 7{,}37}{130{,}91} = 0{,}012$

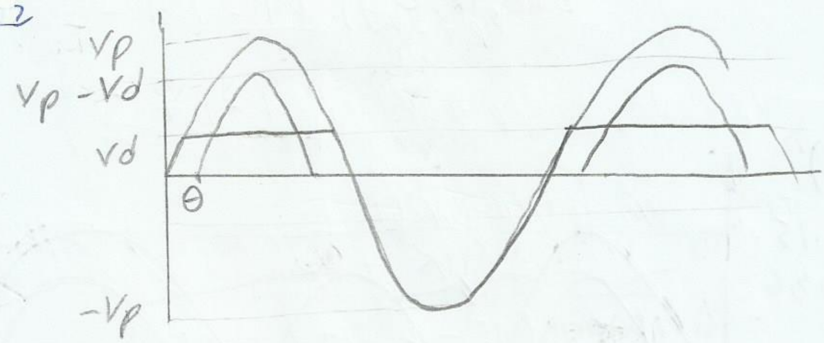
$I_L = 0{,}012 - 0{,}5 \cdot 10^{-3} = 0{,}012 \text{ A}$

$\therefore R = \dfrac{7{,}37}{0{,}012} \therefore \boxed{R = 617\Omega}$

Circuito Retificador

Retificador meia onda



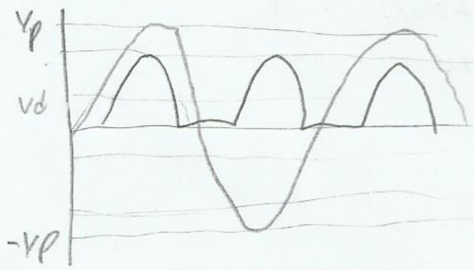


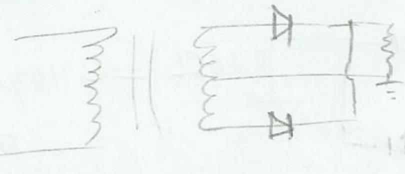
$V_o = V_p - V_d$

$PIV = -V_p$

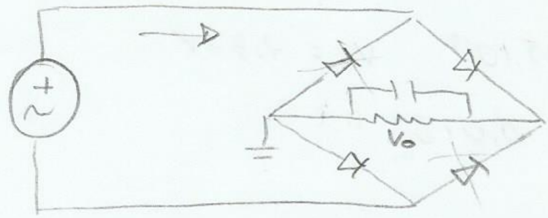
$\hat{V_o} = \dfrac{V_p}{\pi} - \dfrac{V_d}{2}$

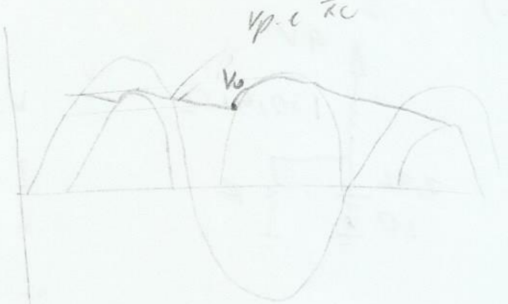
Retificador onda completa com derivação central





$\hat{V_o} = \dfrac{2V_p}{\pi} - V_d$





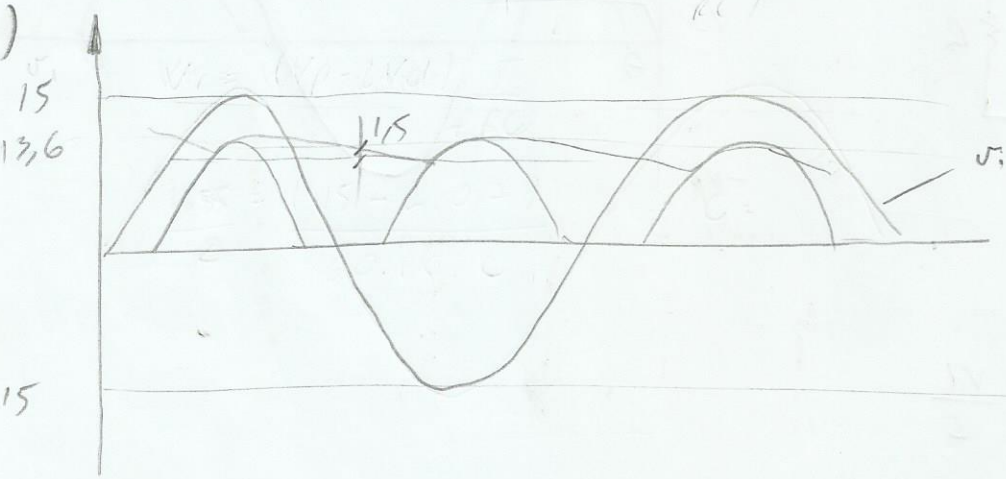
$V_o = V_p - 2V_d$

$PIV = V_o + V_d = V_p - V_d$

$V_r = \frac{V_p}{2f.RC}$

$1{,}5 = \frac{15 - 2.0{,}7}{2.60.1K.C} \quad \Rightarrow \quad \boxed{C = 75{,}6\,\mu F}$

b)

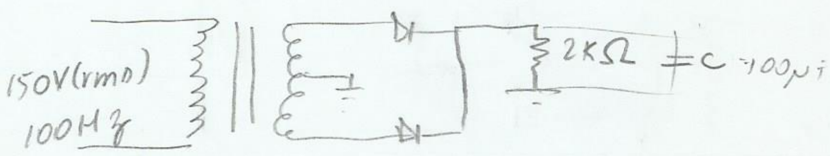


P1 - Diurno - 2º sem 2003

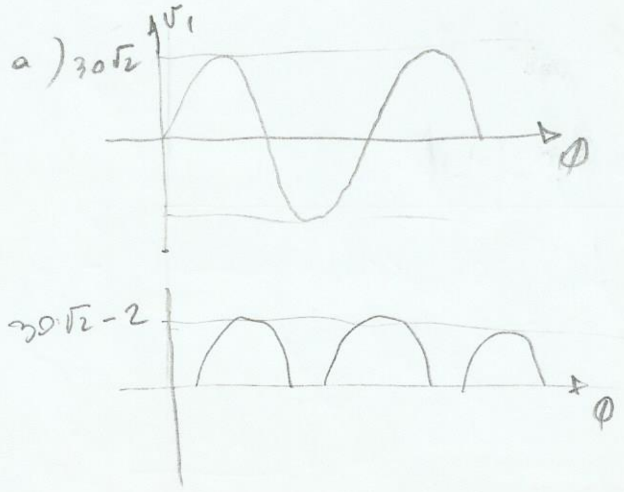
$V_{ef} = \frac{V_p}{\sqrt{2}}$

Transformador: 5:1

Vd = 1V



a)



~~II - Diurno - 1º sem 2010~~

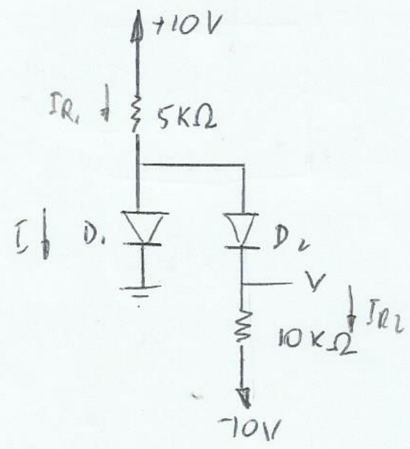
Exercícios pré-prova

horário atual: 7:10h
horário de parada: 9:10h

2:00h

Prova: 09:30h

- Diodo ideal
- Diodo real (representações, modelos)
- Diodos de junção
- Retificadores
- Zener



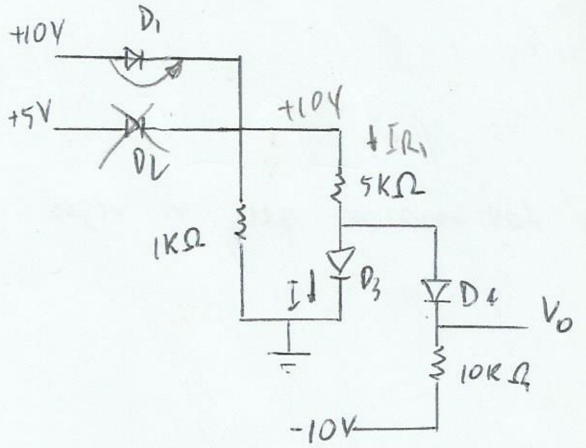
Assumindo D_1 e D_2 conduzindo

$$I_{R_1} = \frac{10-0}{5K} = 2mA$$

$$I_{R2} = \frac{0-(-10)}{10K} = 1mA$$

logo $I = I_{R_1} - I_{R2} = 1mA$

$V = 0V$



Assumindo D_3, D_4 conduzindo

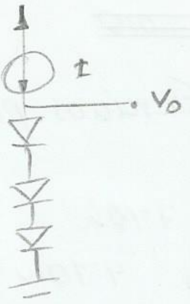
$$I_{R_1} = \frac{10}{5K} = 2mA$$

$$I_{R_2} = \frac{0-(-10)}{10K} = 1mA$$

logo $I = 1mA$

$V_0 = 0V$

Exercício 3.9 do livro



3 diodos idênticos em série

$n=1$ $\quad I_S = 10^{-14}$ A

x Calcule o valor da corrente I para obter $V_o = 2V$.

$V_d = \frac{2}{3}$ $\quad I = I_s\left(e^{\frac{V_d}{nV_T}} - 1\right)$

$= 10^{-14}\left(e^{\frac{2/3}{1 \cdot 25 \cdot 10^{-3}}} - 1\right)$ $\quad \therefore \boxed{I = 3{,}81\,mA}$

x Se uma corrente de 1mA for drenada do terminal de saída por uma carga, qual a variação na tensão V_o.

$I_1 = I_s\left(e^{\frac{V_{d1}}{nV_T}}\right)$

$I_2 = I_s\left(e^{\frac{V_{d2}}{nV_T}}\right)$

$\frac{I_2}{I_1} = e^{\frac{V_{d2} - V_{d1}}{nV_T}}$, $\quad V_{d2} - V_{d1} = \Delta V$

$\Delta V = nV_T \cdot \ln\left(\frac{I_2}{I_1}\right)$

$= 1 \cdot 25 \cdot 10^{-3} \ln\left(\frac{3{,}81 - 1}{3{,}81}\right)$ $\quad \therefore \Delta V = -7{,}061\,mV$

$\therefore \boxed{\Delta V_o = -22{,}82\,mV}$

Lembretes

- Quando a área de junção D_1 for maior que n vezes a área de D_2, temos:

$I_{s1} = n I_{s2}$

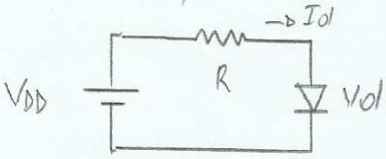
- Quando $i >> I_s$

$I = I_s \cdot e^{\frac{V_d}{nV_T}}$

- $\frac{\ln x}{\log x} = 2{,}3$ $\quad$ logo $\quad \ln x = 2{,}3 \log x$

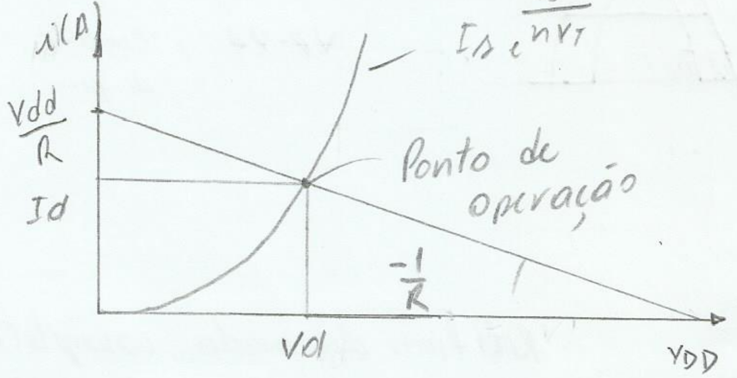
Modelos matemáticos para a curva característica do diodo na região de polarização direta

- Modelo exponencial



$V_{dd} = V_d + R.I_d$ $\qquad$ $i_d \gg I_s$

logo. $I_d = \dfrac{V_{dd} - V_d}{R}$ e $I_d = I_s e^{\frac{V_d}{nV_T}}$



- É o modelo mais preciso

- Análise interativa

+ Para a análise interativa, utiliza o modelo exponencial, logo temos que

$$I_d = \frac{V_{dd} - V_d}{R} \quad e$$

$$I_1 = I_s e^{\frac{V_{d1}}{nV_T}}$$

$$I_2 = I_s e^{\frac{V_{d2}}{nV_T}}$$

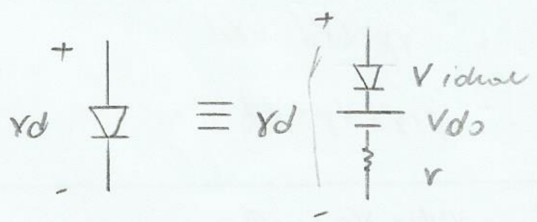
$$\frac{I_2}{I_1} = e^{\frac{V_{d2} - V_{d1}}{nV_T}}$$

$$V_{d2} - V_{d1} = nV_T \ln\left(\frac{I_2}{I_1}\right)$$

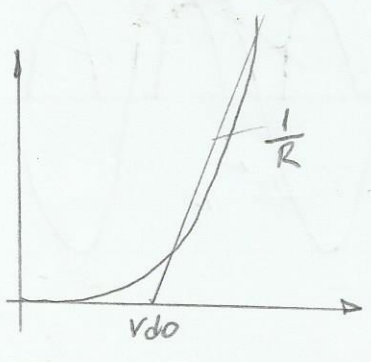
$$V_{d2} - V_{d1} = 2{,}3\, nV_T \log\left(\frac{I_2}{I_1}\right)$$

década de variação de corrente

- Modelo de segmentos lineares

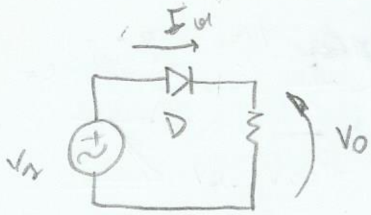


$V_d = V_{do} + I_d\, r$

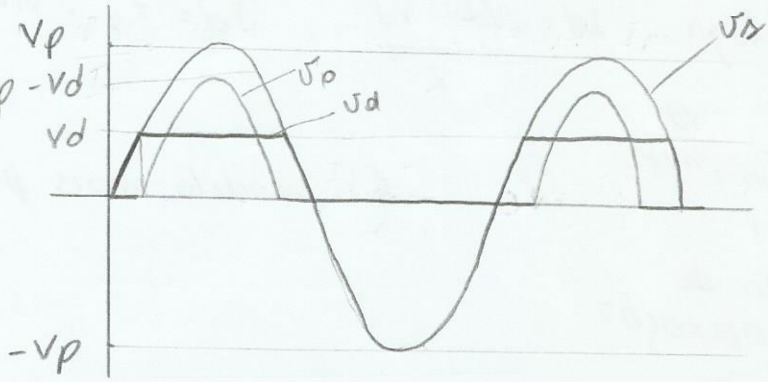


+ Conhecido

Retificadores

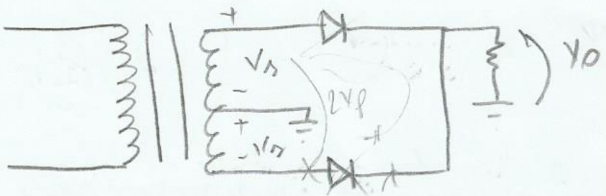


Retificador meia onda



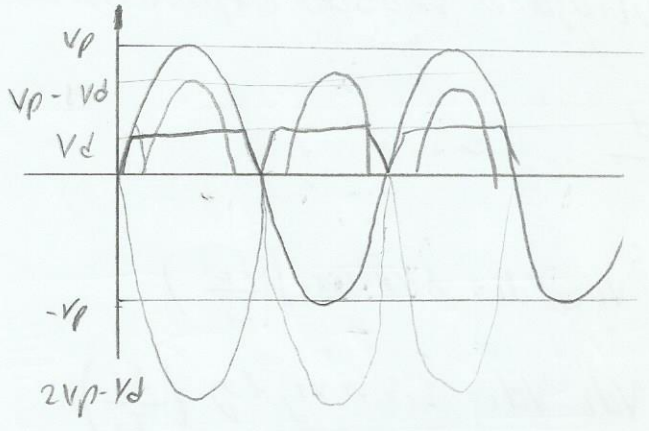
$PIV = V_p$

$V_p - V_d$) tensão de pico

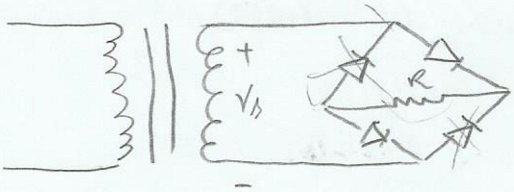


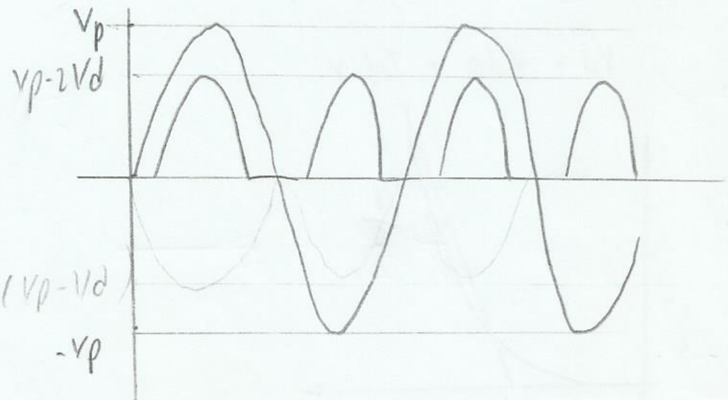
Retificador de onda completa com derivação central

$PIV = 2V_p - V_d$



Retificador de onda completa em ponte





$V_o + V_d$, $V_o = V_p - 2V_d$

↳ $V_p - 2V_d + V_d$

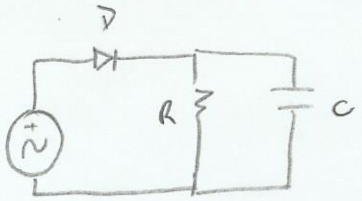
$PIV = V_p - V_d$

$v(\phi) = V_p \sin \phi$

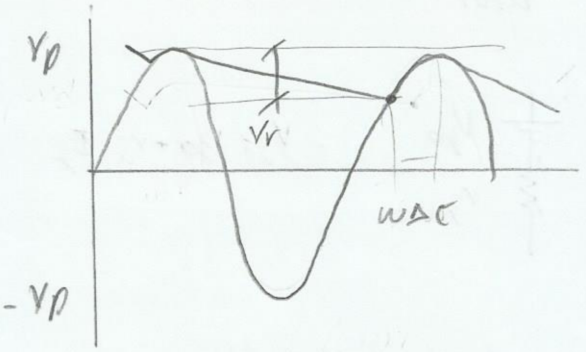
$v(\theta) = V_d$

$V_d = V_p \sin \phi$

$\phi = \sin^{-1}\left(\frac{V_d}{V_p}\right)$



Retificador de meia
Onda com filtro



$$\hat{V_o} = Vp - \frac{Vr}{2}$$

$$Vp - Vr = Vp\, e^{\frac{-T}{RC}} \quad ; \text{para } T \gg RC \;\therefore\; e^{\frac{-T}{RC}} \approx 1 - \frac{T}{RC}$$

$$Vr = Vp - Vp\, e^{\frac{-T}{RC}}$$

$$= Vp\left(1 - e^{\frac{-T}{RC}}\right)$$

$$= Vp\left(\cancel{1} - \left(\cancel{1} - \frac{T}{RC}\right)\right) = \frac{VpT}{RC} = \frac{Vp}{fRC} \quad \therefore \boxed{Vr = \frac{Vp}{fRC}}$$

$$V_o = Vp - Vr = Vp \cos \omega\Delta t \quad ; \text{com } \omega\Delta t \text{ muito pequeno}$$

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

$$Vp - Vr = Vp\left(1 - \frac{(\omega\Delta t)^2}{2}\right)$$

$$\cancel{Vp} - Vr = \cancel{Vp} - \frac{Vp(\omega\Delta t)^2}{2} \qquad \boxed{\omega\Delta t = \sqrt{\frac{2Vr}{Vp}}}$$

$$i_{D\,médio} = I_L\left(1 + \pi\sqrt{\frac{2Vp}{Vr}}\right)$$

$$i_{D\,máx} = I_L\left(1 + 2\pi\sqrt{\frac{2Vp}{Vr}}\right)$$

<u>Observação</u>: Para os seguintes retificadores temos

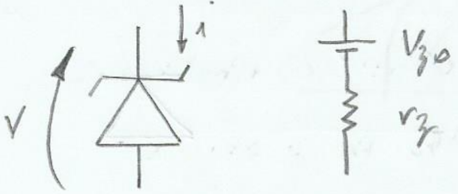
$Vp \to Vp - Vd$ $\left(\frac{1}{2} \sim\right)$

$Vp \to Vp - Vd$ $(1 \sim)$

$Vp \to Vp - 2Vd$ (ponte)

* Vr para onda completa é $\frac{Vr}{2}$ da meia onda

Diodo Zener



$V_Z = V_{Z0} + r_Z\, I_Z$

Regulação de linha $\dfrac{\Delta V_o}{\Delta V^+}$

Regulação de carga $\dfrac{\Delta V_o}{\Delta I_L}$

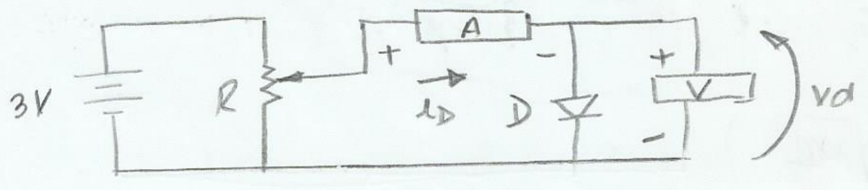
$\boxed{\text{Preparação para P2}}$

Experimentos do laboratório

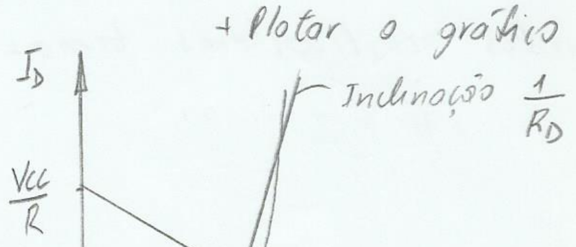
2ª Experiência: "Curva do diodo e reta da carga"

Levantamento da curva característica do Diodo

1. Sentido de polarização direta (Diodo paralelo com o resistor)

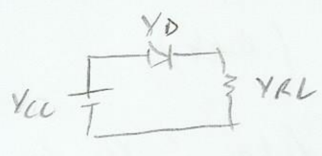


Procedimento: + Variar o resistor e anotar a tensão correspondente a uma determinada corrente.
+ Plotar o gráfico



Diodo Real

Representação

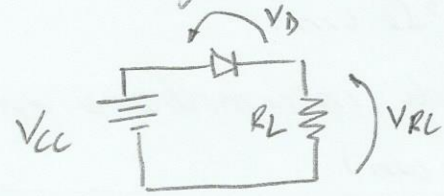


$I_D = \dfrac{V_{CC} - V_{DD}}{R_L}$

2- Sentido da polarização reversa (Diodo em série com o resistor)

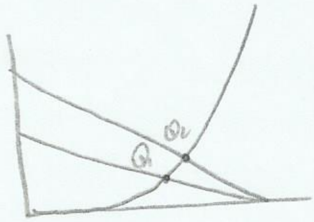
x A corrente no diodo é 0

3- Reta de carga do diodo e determinação do ponto de trabalho



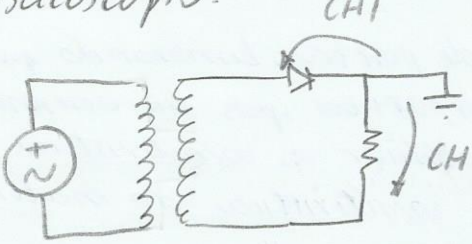
+ Medir a tensão V_D e V_{RL} no experimento
+ Calcular I_D : $I_D = \frac{V_{RL}}{R_L}$

+ Plotar no gráfico



- Os valores do ponto de trabalho deve ser praticamente iguais.

4- Levantamento da curva característica do diodo com o auxílio do osciloscópio.



Procedimento

- display XY
- Centralizar a tela
- Canal 1 ou "x"

"menu" inverter DESL

"acoplam": cc

ajustar ganho da escala $500\frac{mV}{div}$

- Canal 2 ou "Y"

"menu" inverter LIG ou função MATH: LIG

função "acoplam": cc

ajustar ganho 5V/div

3ª Experiência: "Circuitos com Diodos: Retificadores com carga resistiva"

Semicondutores

* Características dos materiais:
  - Condutor Alta condutividade ($10^{-6}\ \Omega\ cm$)
  - Isolante Baixa condutividade ($10^{3}\ \Omega\ cm$)
  - Semicondutor Apresenta condutividade intermediaria entre condutores e isolantes. ($10^{12}\ \Omega\ cm$)

× Resistencia é o inverso de condutividade

× Resistividade (ρ)

× Através da 2° lei de OHm : $R = \rho . \frac{l}{A}$ (Ω) ; logo:

$$\boxed{\rho = \frac{RA}{l} = (\Omega\ cm)}$$

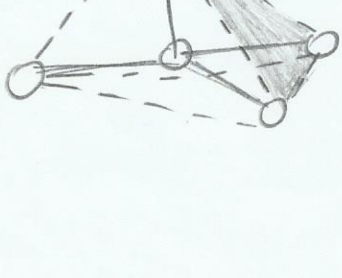
× Os materias semicondutores mais conhecidos são: germonio (Ge) e silício (Si). Porém o mais utilizado é o silício.

× Porque o silício ou Germonio?

- Podem ser fabricados com alto ~~tax~~ nível de pureza. Lembrando que é extramamente importante a redução de impureza, pois ao acrescentar uma impureza (do tipo adequado) pode modificar as caracteristica do material
- Capacidade de alteração radical das caracteristica do material por meio desse processo, conhecido como "dopagem"
- Suas características podem ser significativamente alteradas pela aplicação de calor ou luz.

× Estrutura atômica:

- O modelo do Ge e Si é bem preciso, chamado cristal
- O arranjo periódico dos átomos é chamado de trelica
- O Ge e Si, o seu cristal tem estrutura de diamante tridimensional



cristal singular (pois é um material composto de estruturas cristalinas repetidas do mesmo tipo)

→ Esse tipo de cristal não se modifica significamente com adição de impurezas no processo de dopagem.

Materiais Intrínsecos

× Materiais intrínsecos são semicondutores cuidadosamente refinados para se obter a redução de impurezas a um nível muito baixo - são basicamente tão puros quanto permite a tecnologia moderna.

× Ou melhor, são materiais formado por um único elemento químico, sem defeitos ou impurezas

Portadores intrínsecos: são os elétrons livres, a lotaces naturais.

× Na temperatura ambiente possuem baixa quantidade de portadores livres.

× Quando a temperatura aumentar, pode resultar em um aumento substancial do número de elétrons livres no material.

Quando a temperatura aumenta, o número de elétrons na camada de valência absorve energia térmica e se desprende da ligação covalente, logo aumenta o numero de portadores livres. Com o número de portadores livres maior, resulta no aumento de condutividade e menor resistencia.

Semicondutor {
- Diminui a resistência quando a temperatura é elevada
- Coeficiente de temperatura negativo.

Condutor {
- Aumenta a resistência quando a temperatura é elevada
- Coeficiente de temperatura positivo.

Níveis de Energia

- Na estrutura atômica isolada há níveis de energia para cada elétron em órbita.
- Quanto mais longe o elétron estiver do núcleo, maior será o estado de energia. O elétron que tiver deixado o seu átomo de origem apresentará um estado de energia maior do que qualquer outro na estrutura atômica.
- Gaps de energia são os intervalos entre os níveis discretos de energia.
- Região proibida é localizada entre a banda de valência e o nível de ionização.
- Ionização é o mecanismo pelo qual um elétron pode absorver energia suficiente para desprender-se da estrutura atômica e entrar na banda de condução

- Energia associada a cada elétron (eV)

$$\boxed{W = QV \; ; \; eV = 1{,}6 \cdot 10^{-19} \, J}$$

Materiais extrínsecos do tipo n e p

- Um material semicondutor submetido ao processo de dopagem é chamado de material extrínseco.

TIPO N: Material semicondutor dopado com impurezas pentavalentes. (5 elétrons de valência)

As impurezas difundidas com cinco elétrons de valência são chamadas de átomos doadores.

Materiais mais utilizados: antimônio, o arsênio e o fósforo.

TIPO P: Material semicondutor dopado com impurezas trivalentes (três elétrons de valência).

(+) ( )

Lacuna: é um espaço vazio

As impurezas difundidas com três elétrons de valência são chamadas átomos aceitadoras.

* Fluxo de Elétrons versus Lacunas

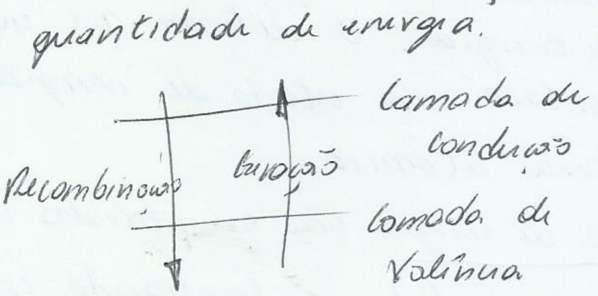
- Quando um elétron de valência adquire energia cinética suficiente para quebrar a sua ligação covalente ele irá preencher outra lacuna, liberando a lacuna anterior. Portanto, há um deslocamento de lacunas para a esquerda e de elétrons para a direita.

Relações Importantes:

$g_i = r_i$	g_i = taxa de geração
$n = p$	r_i = taxa de recombinação
$n \cdot p = n_i^2$	n = concentração de elétrons livres
	p = concentração de lacunas livres
	n_i = concentração intrínseca

- Quando a temperatura aumenta, alguns elétrons deixam a camada de valência indo para a camada de condução. A densidade (concentração) destes elétrons na camada de ~~valência são chamados de lacunas e sua densidade é dada por p~~ condução é denotada por n. Os níveis desocupados na camada de valência são chamados de lacunas e sua densidade é dada por p.

- Recombinação: É a associação de um elétron a uma lacuna, reconstituindo uma ligação covalente e a liberação de uma certa quantidade de energia.



* Portadores Majoritários e Minoritários

• Tipo N: O número de lacunas não varia significativamente em relação ao nível intrínseco. Portanto, o número de elétrons excede em muito o número de lacunas. Logo o elétron é o portador majoritário e a lacuna é o portador minoritário.

• TIPO P: O número de lacunas excede o número de elétrons. Logo, a lacuna é o portador majoritário, e o elétron é o portador minoritário.

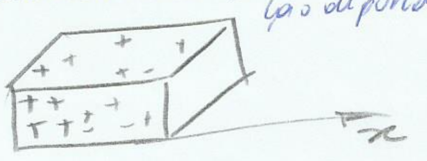
Recombinação:

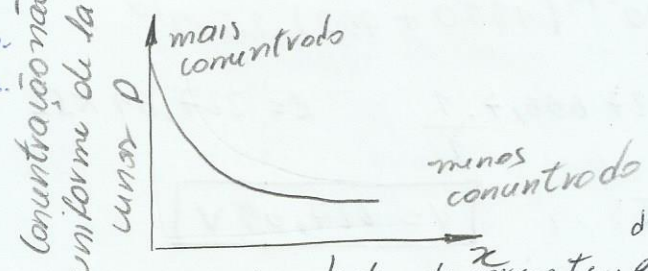
- No equilíbrio térmico, a taxa de recombinação é igual a taxa de ionização (ou taxa de geração térmica): $n = p = n_i$

Difusão e Deriva

Existe dois mecanismo pelos quais as lacunas e os elétrons se movimentam através de um cristal de silício - difusão e deriva.

Difusão: - Está associada ao movimento aleatório em decorrência a agitação térmica.
- Proporcional à variação de concentração de portadores.





$J_p = I_{p\text{-}dif} = -q \cdot D_p \cdot \frac{dp}{dx}$

$J_n = I_{n\text{-}dif} = q \cdot D_n \cdot \frac{dn}{dx}$

J_n: densidade de corrente de difusão de elétrons
J_p: densidade de corrente de lacunas
q: carga do elétron: $1{,}6 \cdot 10^{-19}$
D_p: const. de difusão ou difusividade de lacunas
D_n: difusividade de elétrons

Para elétrons e lacunas em difusão no silício intrínseco, valores típicos para as constantes de difusão são $D_p = 12 \frac{cm^2}{s}$ e $D_n = 34 \frac{cm^2}{s}$.

Deriva: Proporcional ao campo elétrico.

$v_{deriva} = \mu_p \cdot E$; v_{deriva}: velocidade das cargas positivas $\left(\frac{cm}{s}\right)$
μ_p: mobilidade de lacunas $\left(\frac{cm^2}{V \cdot s}\right)$
μ_n: " " elétrons

$J_{p\text{-}deriva} = q \cdot p \cdot \mu_p \cdot E$

$J_{n\text{-}deriva} = q \cdot n \cdot \mu_n E$

$J_{deriva} = q(p\mu_p + n\mu_n)E$; Sabendo que $\rho = \frac{1}{q(p\mu_p + n\mu_n)}$

Relação de Einstein: $\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = V_T$; $V_T \cong 25mV$

Para o silício intrínseco: $D_p = 12 \frac{cm^2}{s}$ $D_n = 34 \frac{cm^2}{s}$

Exercício 1) (Cadirno)

Dados: Material intrínseco silício

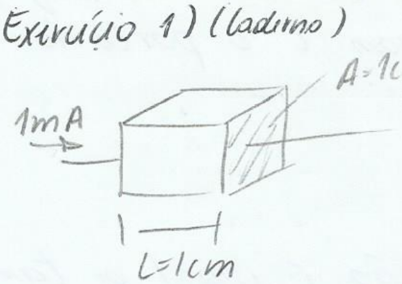
$n_i = 1,5 \cdot 10^{10}\ cm^{-3}$

$\mu_n = 1350\ cm^2/Vs$

$\mu_p = 480\ cm^2/Vs$

$q = 1,6 \cdot 10^{-19} C$

$T = 300\ K$



× Determine a tensão máxima para obter uma corrente de 1mA.

$$R = \rho \cdot \frac{L}{A} \ ; \ \rho = \frac{1}{q(\mu_n \cdot n + \mu_p \cdot p)}$$

Como o material é intrínseco, $n = p = n_i$

$$\rho = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19}(1350 + 480) \cdot 1,5 \cdot 10^{10}} \therefore \rho = 227\,686,7\ \Omega cm$$

$$\therefore R = 227\,686,7 \cdot \frac{1}{1} \therefore R = 227,69\ k\Omega$$

$$V = RI \therefore \boxed{V = 227,69\ V}$$

Exercício 2) (Cadirno)

Dados: Silício extrínseco tipo P

$n_i = 1,5 \cdot 10^{10}\ cm^{-3}$

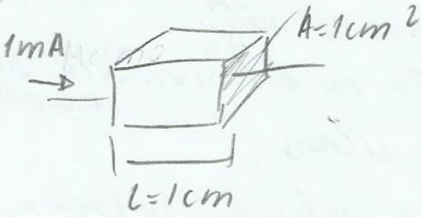
$\mu_n = 1110\ cm^2/Vs$

$\mu_p = 400\ cm^2/Vs$

$q = 1,6 \cdot 10^{-19} C$

$T = 300 K$

$N_A = 1 \cdot 10^{16}\ cm^{-3}$



× Determine a tensão necessária para gerar 1mA.

$P > N$

$$p_{po} = 1,5 \cdot 10^{10} + 1 \cdot 10^{16} = 1 \cdot 10^{16}$$

$$n_{po} \cdot p_{po} = n_i^2 \ ;$$

$$n_{po} = \frac{(1,5 \cdot 10^{10})^2}{1 \cdot 10^{16}} = 22500$$

$$\rho = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19}(1110 \cdot 22500 + 400 \cdot 1 \cdot 10^{16})} = 1,563$$

$$R = \rho \frac{L}{A} = \rho \cdot \frac{1}{1} \therefore R = \rho \Rightarrow V = R \cdot I$$

$$\boxed{V = 1,56\ mV}$$

Exercícios do Livro

3.29) Calcule a densidade intrínseca de portadores n_i a 250K, 300K, 350K

$\boxed{n_i^2 = BT^3 e^{-E_G/kT}}$; sendo: $B = 5{,}4 \cdot 10^{31}$
$E_g = 1{,}12\ eV$
$K = 8{,}62 \cdot 10^{-5}\ \frac{eV}{K}$

Para $T = 250K \Rightarrow n_i = 150{,}5 \cdot 10^6\ cm^{-3}$

Para $T = 300K \Rightarrow n_i = 1{,}5 \cdot 10^{10}\ cm^{-3}$

Para $T = 350K \Rightarrow n_i = 4{,}18 \cdot 10^{11}\ cm^{-3}$

3.30 Dados: Silício tipo N com $N_D = 10^{17}\ cm^{-3}$

x Determine as concentrações de elétrons e lacunas a partir das densidades intrínseca de portadores do exercício anterior.

$n_{no} p_{no} = n_i^2$

$p_{no} = \frac{(150{,}5\ 10^6)^2}{10^{17}}$ ∴ $p_{no} = 0{,}23\ cm^{-3}$ e $n = 10^{17}\ cm^{-3}$

$p_{no} = \frac{(1{,}5 \cdot 10^{10})^2}{10^{17}}$ ∴ $p_{no} = 2250\ cm^{-3}$ e $n = 10^{17}\ cm^{-3}$

$p_{no} = \frac{(4{,}18 \cdot 10^{11})^2}{10^{17}}$ ∴ $p_{no} = 1{,}75 \cdot 10^6\ cm^{-3}$ e $n = 10^{17}\ cm^{-3}$

3.31 Dados

(a) Silício intrínseco
$n_i = 1{,}5\ 10^{10}\ cm^{-3}$
$\mu_n = 1350\ cm^2/Vs$
$\mu_p = 480\ cm^2/Vs$

(b) silício tipo p com $N_A = 10^{16}\ cm^{-3}$
$n_i = 1{,}5 \cdot 10^{10}\ cm^{-3}$
$\mu_n = 1110\ cm^2/Vs$
$\mu_p = 400\ cm^2/V.s$

x Determine a resistividade de cada material

(a) $\rho = \frac{1}{q(\mu_n . n + \mu_p . p)}$; $n_i = p = n$

$\rho = \frac{1}{1{,}6 \cdot 10^{-19}(1350 + 480) \cdot 1{,}5 \cdot 10^{10}}$ ∴ $\rho = 2{,}28 \cdot 10^5\ \Omega . cm$

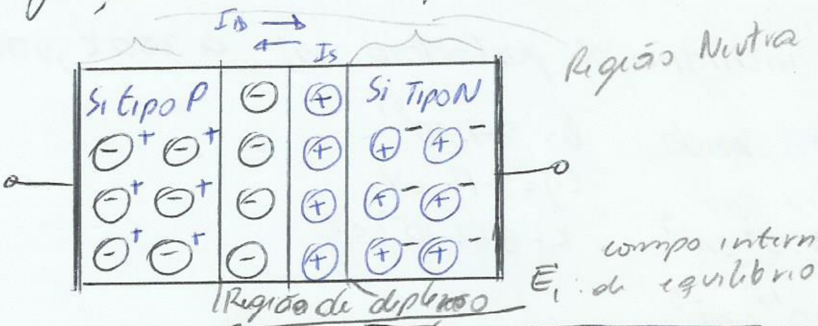
(b) $n_{po} . p_{po} = n_i^2$; $p_{po} = N_A$

$n_{po} = \frac{(1{,}5 \cdot 10^{10})^2}{10^{16}} = 22500$

$\rho = \frac{1}{1{,}6 \cdot 10^{-19}(1110 . 22500 + 400 . 10^{16})}$

$\rho = 1{,}56\ \Omega cm$

A junção PN na condição de circuito aberto



- A corrente de difusão: $\boxed{I_D = I_{p\text{-}dif} + I_{n\text{-}dif}}$ (Sentido P para N)

- Surge uma diferença de potencial na região de depleção devido, a ausência de elétrons na junção do tipo N e lacunas do tipo P.
- Essa queda de tensão gera uma barreira para que as lacunas se difundem na região n e os elétrons se difundem na região P.
- No lado n é gerado algumas lacunas minoritárias e no lado P é gerado alguns elétrons minoritários. Devido ao campo elétrico, os elétrons minoritários são acelerados para o lado n e as lacunas para o lado P. Com isso é criado a corrente de deriva I_S, que é a soma de ambos, porém com o sentido de N para P. Como ela é formada pelos portadores minoritários, ela não depende da tensão, somente da temperatura.

- Corrente de deriva (I_S) ∴ $\boxed{I_S = I_{p\text{-}der} + I_{n\text{-}der}}$

- Para o circuito aberto: $I_D = I_S$

- Caso a corrente $I_D > I_S$, então mais cargas ficarão descobertas de ambos os lados da junção, logo a camada de depleção aumentará, resultando na diminuição da corrente I_D até $I_D = I_S$
- Quando a corrente $I_S > I_D$, então a quantidade de cargas descobertas diminuirá, logo a camada de depleção diminuirá, resultando no aumento da corrente I_D, até $I_D = I_S$.

* Tensão interna sem aplicação de uma tensão externa:

$$\boxed{V_0 = V_T \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right)} \qquad V_T = \frac{KT}{q}$$

* Quando os terminais da junção PN estão abertos $V_0 = 0$

- Largura da camada de depleção:

lado P $\rightarrow x_p$ lado N $\rightarrow x_n$

$$q\, x_p . A N_A = q\, x_n A N_D$$; logo

$$\boxed{\frac{x_n}{x_p} = \frac{N_A}{N_D}}$$

Largura da região de depleção (W_{dep})

$$\boxed{W_{dep} = x_n + x_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q}\left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D}\right)V_0}}$$

ε_s: permissividade elétrica do silício

$\varepsilon_s = 11{,}7\,\varepsilon_0 = 11{,}7 . 8{,}85.10^{-14}$ $\therefore$ $\varepsilon_s = 1{,}04.10^{-12}$ F/cm

Exercício 3.2

Dados: Junção PN com $N_A = 10^{17}\,cm^{-3}$, $N_B: 10^{16}\,cm^{-3}$ e $T = 300\,K$
$n_i = 1{,}5.10^{10}\,cm^{-3}$

x Determine a tensão interna, largura da região de depleção e as distancias pelas quais ela se estende do lado p e no lado n.

$V_0 = V_T . \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right)$; $V_T = \frac{KT}{q}$, $K = 1{,}38.10^{-23}\,\frac{J}{K}$

$V_0 = \frac{1{,}38.10^{-23}.300}{1{,}6.10^{-19}} \ln\left(\frac{10^{17}.10^{16}}{(1{,}5.10^{10})^2}\right)$ $\therefore$ $V_0 = 0{,}754\,mV$

±

$W_{dep} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q}\left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D}\right)V_0} = \sqrt{\frac{2.1{,}04.10^{-12}}{1{,}6.10^{-19}}\left(\frac{1}{10^{17}} + \frac{1}{10^{16}}\right).V_0}$

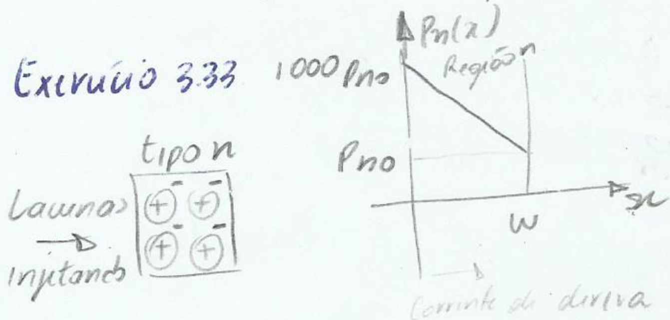
$W_{dep} = 32{,}83\ 10^{-6}\,cm = \boxed{0{,}33\,\mu m}$

$W_{dep} = x_n + x_p$; $\frac{x_n}{x_p} = \frac{N_A}{N_D} \rightarrow x_n = x_p \frac{N_A}{N_D}$

$0{,}33 = x_p . \frac{10^{17}}{10^{16}} + x_p$ $\therefore$ $x_p = 0{,}03\,\mu m$ $\therefore$ $x_n = 0{,}30\,\mu m$

Exercícios Seção 3.7: Operação física dos diodos

Exercício 3.33



Dados:

$N_D = 10^{16}\ cm^{-3}$

$n_i = 1{,}5 \cdot 10^{10}\ cm^{-3}$

$W = 5\,\mu m = 5 \cdot 10^{-4}\ cm$

× Determine a densidade de corrente em direção x.

$p_{no} \cdot n_{no} = n_i^2$

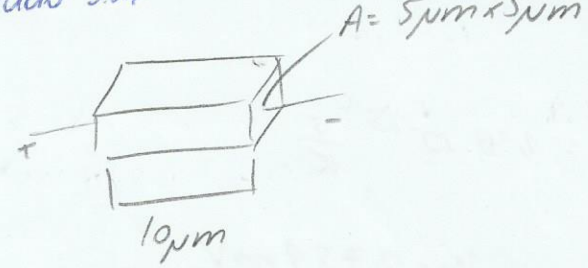
$$p_{no} = \frac{(1{,}5 \cdot 10^{10})^2}{10^{16}} = \boxed{22500\ cm^{-3}}$$

$$I_p = -q\,D_p \frac{dp}{dx} \;;\quad q = 1{,}6 \cdot 10^{-19} \quad D_p = 12$$

$$I_p = -q \cdot D_p \cdot \frac{dp}{dx}$$

$$= 1{,}6 \cdot 10^{-19} \cdot 12 \times \frac{22500}{5 \cdot 10^{-4}} (1000-1) \quad \therefore \boxed{I_p = 8{,}63 \cdot 10^{-8}\ \frac{A}{cm^2}}$$

Exercício 3.34



$N_D = 10^5\ cm^{-3}$

$N_A = 10^5\ cm^{-3}$

$V = 1\,V$

$\mu_n = 1350\ \frac{cm^2}{Vs}$ $\quad \mu_p = 480\ \frac{cm^2}{Vs}$

$$\rho = \frac{1}{q(N_D \cdot \mu_n + N_A\,\mu_p)}$$

$$R = \rho \cdot \frac{L}{A} = \frac{1}{1{,}6 \cdot 10^{-19}(10^{5} \cdot 1350 + 10^{15} \cdot 480)} \cdot \frac{10 \cdot 10^{-6} \cdot \cancel{100}}{25 \cdot 10^{-6} \cdot \cancel{10^{-6}} \cdot 100\ \cancel{100}}$$

$$I = \frac{V}{R} \;;\; V = 1\,V \quad \therefore \quad I = \frac{1}{R} \quad \therefore \boxed{I = 19{,}2\,\mu A}$$

Exercício 3.35)

Concentração de Dopantes	μ_n cm^2/Vs	μ_p cm^2/Vs	D_n cm^2/s	D_p cm^2/s
Intrínseco	1350	480	34	12
10^{16}	1100	400	28	10
10^{17}	700	260	18	7
10^{18}	360	150	9	4

$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = V_T$ Para temperatura ambiente; $V_T = 25mV$

$D_n = 0{,}025 . 1350 = 33{,}75 \simeq 34 \frac{cm^2}{s}$

$D_p = 0{,}025 . 480 = 12 \frac{cm^2}{s}$

Sabendo que a mobilidade de portadores quanto a difusividade diminuem com aumento de concentração no silício.

~~Exercício 3.36~~) Lista do Base: Semicondutor Intrínseco, Extrínseco e Junção PN

1) Dados:

Barra com $10\,cm^3 = \underbrace{1cm^2}_{A} \times \underbrace{10cm}_{L}$

$N_D = 1.10^{17} cm^{-3}$ DDP = 2V $n_i = 2\,10^{10} cm^{-3}$

$\mu_n = 500\ cm^2/Vs$ $\mu_p = 200\ cm^2/Vs$ $q = 2.10^{-19}C$

a) Determine as concentrações portadoras majoritárias e minoritárias, identificando-as

$(2\,10^{10})^2 = 1\,10^{17}.p$ ∴ $p = 4000 cm^{-3}$ (minoritária) $n = 1.10^{17} cm^{-3}$ (majoritária)

b) Resistividade da barra = ?

$$\rho = \frac{1}{2.10^{-19}(500.1.10^{17} + 200.4000)} \quad \therefore \boxed{\rho = 0{,}1\,\Omega cm}$$

c) Corrente que circula pela barra

$$I = \frac{V}{R};\ R = \rho.\frac{L}{A} \quad \therefore \quad I = \frac{V.A}{\rho.L} = \frac{2.1}{0{,}1.10} \quad \therefore \quad \boxed{I = 2A}$$

2) Encontre a resistividade para

(a) silício intrínseco

$n_i = 2.10^{10}\ cm^{-3}$

$\mu n = 1000\ cm^2/Vs$

$\mu p = 500\ cm^2/Vs$

(b) silício com $Na = 10^{16} cm^{-3}$

$\mu n = 600\ cm^2/Vs$

$\mu p = 400\ cm^2/Vs$

$n_i = 2.10^{10}\ cm^{-3}$

(a) Para o silício intrínseco $n_i = n = p$

$$\rho = \frac{1}{2.10^{-19}(1000.+500).2.10^{10}} \therefore \rho = 0{,}17.10^{6}\ \Omega cm$$

(b)

$$n_{po} . p_{po} = n_i^2$$

$$n_{po} = \frac{(2.10^{10})^2}{10^{16}} = 40000\ cm^{-3}$$

$$\rho = \frac{1}{2.10^{-19}(40\,000.600 + 10^{16}.400)} \therefore \rho = 1{,}25\ \Omega cm$$

3) Barra ; $A = 2cm^2$ $L = 10\ cm$

$Na = 1.10^{17}\ cm^{-3}$ $DDP = 2V$ $T = 300K$ $n_i = 1{,}5.10^{10}\ cm^{-3}$

$\mu n = 600\ cm^2/Vs$ $\mu p = 200\ cm^2/Vs$ $q = 2.10^{-19} C$ Determine:

(a) As concentrações de portadores majoritários e minoritários

Tipo P

$(1{,}5.10^{10})^2 = (1.10^{17} \times n \therefore n = 2250\ cm^{-3}$

logo: portador majoritário: $p = 1.10^{17}\ cm^{-3}$

" minoritário: $n = 2250\ cm^{-3}$

(b) $$\rho = \frac{1}{2.10^{-19}(600.2250 + 200.1.10^{17})} \therefore \boxed{\rho = 0{,}25\ \Omega cm}$$

(c) $$R = \frac{0{,}25.10}{2} = 1{,}25$$

$$I = \frac{2}{1{,}25} \therefore \boxed{I = 1{,}6\ A}$$

4)

a) Material A:

$(1{,}5.10^{10})^2 = 1.10^{17}.p \therefore p = 2250\ cm^{-3}$ (minoritários)

$n = 1.10^{17} cm^{-3}$ (majoritários)

Material B:

$(1{,}5.10^{10})^2 = 1.10^{16} n \therefore n = 22500\ cm^{-3}$ (minoritários)

$p = 1.10^{16}\ cm^{-3}$ (majoritários)

b) $\rho_A = 0{,}078\ \Omega cm \quad \rho_B = 1{,}47\ \Omega cm$

c) $R_A = \frac{0{,}078}{100} \cdot \frac{10.10^{-6}}{2\ 1{,}5.10^{-6}.10^{-6}} = 2600\ \Omega$

$R_B = \frac{1{,}47}{100} \cdot \frac{10^{-6}}{2.1{,}5.10^{-6}.10^{-6}} = 4900\ \Omega$

$R_{eq} = 2600 // 4900 = 1699\ \Omega$

$I = \frac{1}{1699}. \quad I = 0{,}59\ mA$

Transistores bipolares de junção (TBJ)

- Transistor: npn e pnp
- Terminais do transistor: emissor (E), base (B) e coletor (C).
- Formado por duas junções: junção emissor-base (JEB) e a junção coletor-base (JCB).
- Existe 4 modos de operação do TBJ, corte, ativo, ativo reverso e saturação. Sendo, que os modos de operação depende da condição de polarização (direta ou reversa) de cada junção.

Modos de operação do TBJ

Modo	JEB	JCB
Corte	Reversa	Reversa
Ativo	Direta	Reversa
Ativo reverso	Reversa	Direta
Saturação	Direta	Direta

Operação do transistor npn no modo ativo

- De acordo com a tabela do modo de operação, o transistor deve estar ~~em~~ polarizado diretamente a junção emissor-base. E polarizado inversamente na junção coletor-base.

VBE: Base: potencial maior do que o emissor
Coletor tem potencial maior que a base
x Para que seja polarizado diretamente o potencial da base deve ser maior que a referência que você está utilizando.

Fluxo de corrente:

- As correntes de deriva devidas aos portadores minoritários gerados termicamente são muito pequenas e podem ser desprezada.
- Na polarização direta na junção emissor-base, a corrente que circula por essa região é chamada de corrente de emissor i_E. Essa corrente é composta por duas componentes: elétrons injetados do emissor na base e lacunas injetadas da base no emissor. O numero de elétrons injetados na base é muito maior que as lacunas injetadas no emissor. Para que isso ocorra o emissor deve possuir um alto grau de dopagem. logo a densidade de elétrons no emissor é alta e a densidade de lacunas na base é baixa.
- Sentido da corrente de emissor é saindo do terminal emissor.

- Os elétrons injetados do emissor para base, são portadores minoritários na base do tipo p.
- A concentração de elétrons será maior na região mais próxima do emissor do que o coletor.
- Os elétrons se difundem pela região da base em direção do coletor
- Devido a tensão no coletor, os elétrons são capturados através da região de depleção JCB.
- Logo existe uma corrente de difusão I_n da direita para a esquerda.

Corrente do coletor:
- Como os elétrons do emissor é injetado na base, e em seguida são injetados no coletor por deriva, formando a corrente I_n. Podemos dizer que a corrente I_n é a corrente no coletor.
- O sentido da corrente do coletor ~~de~~ direita para esquerda (coletor para o emissor).

- A corrente do coletor não depende da tensão na JCB, apenas é necessário que o potencial do coletor seja maior que o da base.

$$\boxed{i_C = I_S \cdot e^{\frac{v_{BE}}{V_T}}}$$

$V_T = \frac{KT}{q}$; $k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$
$q = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$

i_C: corrente no coletor
I_S: corrente de saturação
v_{BE}: tensão na base e emissor
V_T: tensão térmico; Onde geralmente é $\approx 25mV$ para temperatura ambiente.

Corrente de saturação:

$$\boxed{I_S = \frac{A_E \cdot q \cdot D_n n_{p0}}{W} \; ; \; n_{p0} = \frac{n_i^2}{N_A} \quad \therefore I_S = \frac{A_E \cdot q \cdot D_n \cdot n_i^2}{N_A W}}$$

Observação: I_S é fortemente dependente da temperatura.

- A corrente de saturação também é conhecido como fator de escala de corrente.

Corrente na base: (i_B)

$$\boxed{i_B = \frac{i_C}{\beta}} \quad \text{logo} \quad i_B = I_S \, e^{\frac{v_{BE}}{V_T}}$$

$$\boxed{\beta = \left(\frac{D_p}{D_n} \frac{N_A}{N_D} \frac{W}{L_p} + \frac{1}{2} \frac{W^2}{D_n \tau_b} \right)^{-1}}$$

β: ganho de corrente de emissor comum.

- O ganho de corrente de emissor comum (β) é influenciada por dois fatores: a largura da Base W e a razão das regiões de base e emissor (N_A/N_D).
- Para β ser elevado W deve ser pequeno e ~~as~~ dopagem da base também, enquanto o emissor deve ser altamente dopado.

Corrente no emissor: (i_E)

$i_E = i_C + i_B$

$i_E = \frac{i_C}{\beta} + i_C = \frac{i_C(1+\beta)}{\beta} \quad \therefore \quad \boxed{i_E = \frac{\beta+1}{\beta} \cdot i_C}$

$\hookrightarrow i_C = \alpha \cdot i_E$; $\cancel{\alpha = \frac{\beta+1}{\beta}}$

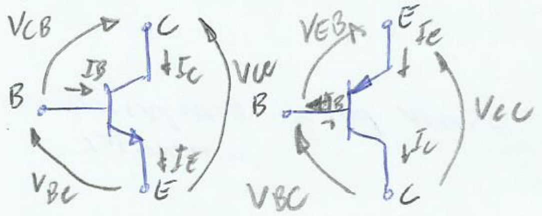
$$\boxed{i_E = \frac{\beta+1}{\beta} \cdot I_S \cdot e^{\frac{v_{BE}}{V_T}}}$$

$\alpha = \frac{\beta}{\beta+1}$; $\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}$

α: ganho de corrente em base comum

Símbolos e convenções para circuitos

Símbolo para o TBJ



$V_{EC} = V_{BC} + V_{EB}$

$I_E = I_B + I_C$

$V_{CE} = V_{BE} + V_{CB}$

$I_E = I_B + I_C$

Para o transistor npn cuja JEB está diretamente polarizada operará no modo ativo enquanto o potencial no coletor não cair abaixo do potencial da base mais que aproximadamente 0,4 V. Caso contrário, o transistor sai do modo ativo e entra na região de saturação de operação.

Para o transistor pnp, se JEB for diretamente polarizado e o potencial do coletor não ultrapassar o potencial de base por mais que aproximadamente 0,4 V. Caso contrário, a JCB fica diretamente polarizada, e o transistor pnp entra no modo de saturação de operação

Corrente reversa de coletor-base (I_{CBO}) / Ocorre com o emissor aberto

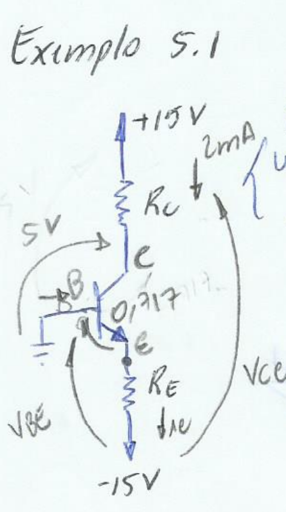
↳ depende da temperatura,

↳ dobra a cada 10°C

↳ desprezível a temperatura ambiente

$$\boxed{i_C = \beta \cdot i_B + I_{CBO}}$$

Exemplo 5.1



β = 100
$V_{BE} = 0{,}7V$
$i_C = 1mA$

x Projete o circuito de modo que uma corrente de 2mA circule pelo coletor e a tensão no coletor seja de +5V

$i_B = \frac{i_C}{\beta}$ ∴ $i_B = \frac{2.10^{-3}}{100}$ logo $i_B = 20\,\mu A$

$V_{RC} = 15 - 5 = 10$ ∴ $R_C = \frac{10}{2.10^{-3}} = \underline{5K\Omega}$

$i_E = i_B + i_C$

$i_E = 20.10^{-6} + 2.10^{-3}$ ∴ $i_E = 2{,}02.10^{-3}$

Para $v_{BE} = 0{,}7V \rightarrow i_C = 1mA$

$i_C = I_S \cdot e^{\frac{V_{BE}}{V_T}}$; $V_T = 25mV$

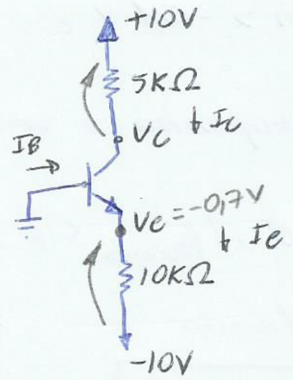
$I_S = \frac{1m}{e^{\frac{0{,}7}{25m}}}$ $\therefore I_S = 6{,}91 \cdot 10^{-16}$ A

$V_{BE} = \ln\left(\frac{i_C}{I_S}\right) \cdot V_T$; Para $I_C = 2mA$

$V_{BE} = \ln\left(\frac{2 \cdot 10^{-3}}{6{,}91 \cdot 10^{-16}}\right) \cdot 25 \cdot 10^{-3}$ $\therefore V_{BE} = 0{,}717$ V

$R_E = \frac{V_{RE}}{I_C} = \frac{-0{,}717-(-15)}{2{,}02 \cdot 10^{-3}}$ $\therefore$ $\underline{R_E = 7{,}07 \, K\Omega}$

Exercício 5.10



$V_E = -0{,}7$ V

Se $\beta = 50$. Determine I_E, I_B, I_C e V_C

$I_E = \frac{-0{,}7-(-10)}{10K}$ $\therefore$ $\boxed{I_E = 0{,}93mA}$

$I_E = I_C + I_B$; $I_B = \frac{I_C}{\beta}$

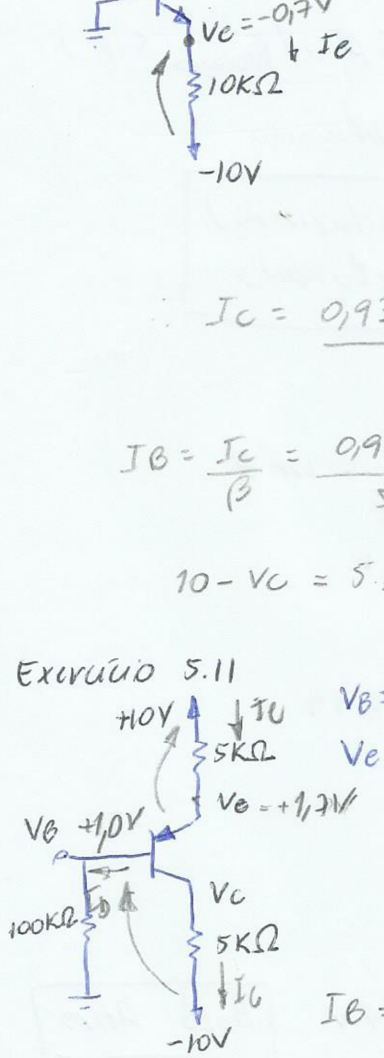
$I_E = I_C + \frac{I_C}{\beta}$ $\therefore$ $I_E = \frac{\beta+1}{\beta} \cdot I_C$

$I_C = \frac{0{,}93 \cdot 10^{-3} \cdot 50}{50+1}$ $\therefore$ $\boxed{I_C = 0{,}91 \, mA}$

$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{0{,}91 \cdot 10^{-3}}{50}$ $\therefore$ $\boxed{I_B = 18{,}24 \mu A}$

$10 - V_C = 5 \cdot 10^{3} \cdot 0{,}91 \cdot 10^{-3}$ $\therefore$ $\boxed{V_C = +5{,}44 \, V}$

Exercício 5.11



$V_B = +1{,}0V$

$V_E = +1{,}7V$

× Quais os valores de α e β?

× Qual é o valor de V_C no coletor?

$I_E = \frac{+10-(+1{,}7)}{5K}$ $\therefore$ $I_E = 1{,}66mA$

$I_E = I_C + I_B$

$I_C = 1{,}66m - 10\mu$

$\therefore$ $I_C = 1{,}65 \, mA$

$I_B = \frac{1{,}0-0}{100K}$ $\therefore$ $I_B = 10\mu A$

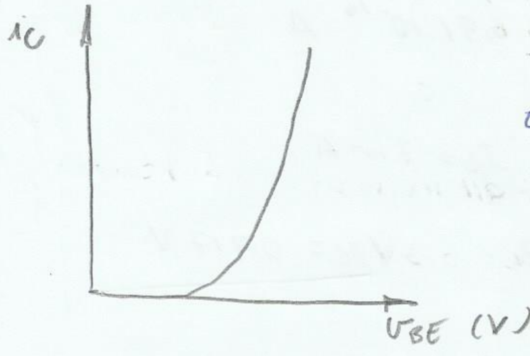
$I_B = \frac{I_C}{\beta}$ $\therefore$ $\beta = \frac{1{,}65m}{10\mu}$ $\therefore$ $\boxed{\beta = 165}$

$\alpha = \frac{\beta}{\beta+1}$ $\therefore$ $\boxed{\alpha = 0{,}994}$

$V_C - (-10) = 5 \cdot 10^{3} \cdot 1{,}65 \cdot 10^{-3}$ $\therefore$ $\boxed{V_C = -1{,}75V}$

Representação gráfica das características do transistor

Gráfico de $i_C \times v_{BE}$; sabendo que $i_C = I_S e^{\frac{v_{BE}}{V_T}}$



- A curva característica de $i_B \times v_{BE}$ e $i_E \times v_{BE}$ também são exponenciais, porém existe um fator de escala. Sendo

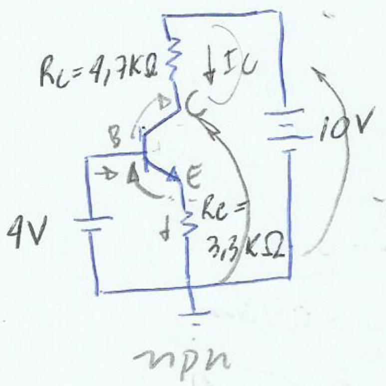
- Para $\boxed{I_E : \frac{I_S}{\alpha}}$ e Para $\boxed{I_B : \frac{I_S}{\beta}}$ — fatores de escala

Circuitos TBJ em CC

- Objetivo inicial, verificar em que modo o transistor está operando.
- Caso você suponha que o transistor esteja operando no modo ativo, você deve determinar as diversas tensões e correntes.
  ↳ Para realizar a checagem verifique se v_{CB} no npn $> -0,4$ V e v_{CB} no pnp $< 0,4$
- Caso a análise no modo ativo não seja verdadeira, suponha o modo saturação, e determine as correntes e tensões.
  ↳ Para realizar a checagem, deve verificar se $\frac{I_C}{I_B} < \beta$; ($\beta_{forçado} < \beta$)

Exemplo 5.4 × Analise o circuito ($\beta = 100$) → Modelo simplificado

$\boxed{\begin{array}{l} v_{BE} \cong 0{,}7V \text{ (para o transistor conduzindo)} \\ v_{CE} \cong 0{,}2 \text{ (para o transistor saturado)} \end{array}}$



npn

- Admitindo o modo ativo

$v_E = V_B - V_{BE}$; logo $I_E = \frac{3{,}3}{3{,}3K} = 1mA$

$v_E = 4 - 0{,}7 = 3{,}3V$

$I_B = \frac{I_C}{\beta}$; $I_C = \beta . I_B$; lembrando que

$\alpha = \frac{\beta}{\beta + 1} = \frac{100}{100+1} = 0{,}99$

$I_C = \alpha I_E$

$I_C = 0{,}99 . 1m$ $\therefore I_C = 0{,}99\,mA$

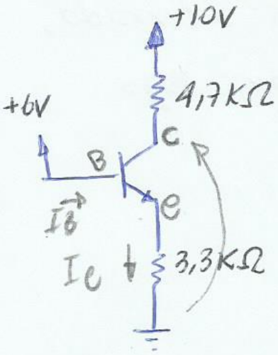
$V_C = 10 - 4{,}7K . 0{,}99m$ $\therefore V_C = 5{,}35V$

logo: $V_C - V_B = V_{CB} = 5{,}35 - 4$ $\therefore V_{CB} = 1{,}35V > -0{,}4V$ $\therefore$ $\boxed{\text{Modo Ativo}}$

$I_B = I_E - I_C$; $\therefore I_B = 0{,}01mA$

Exemplo 5.5)

Suponha β pelo menos 50



Supondo operação no modo ativo

v_{BE} : direto v_{BC} : inverso

$V_e = 6 - V_{BE}$; Adimitindo $v_{BE} = 0,7V$

$V_e = 6 - 0,7 \therefore V_e = 5,3V$

npn

$I_e = \frac{V_e}{R_e} \therefore I_e = \frac{5,3}{3,3K} \therefore I_e = 1,61mA$

$I_e = I_B + I_C$; $I_B = \frac{I_C}{\beta}$

$I_e = \frac{I_C}{\beta} + I_C$

$I_e = \frac{(1+\beta) I_C}{\beta}$, $\alpha = \frac{\beta}{(1+\beta)}$

$I_C = \alpha I_e$, $\alpha = \frac{50}{50+1} = 0,98$

$I_C = 0,98 \cdot 1,61 \therefore I_C = 1,57mA$

$V_C = 10 - 1,57 \cdot 4,7 \therefore V_C = 2,6V$

$V_{CB} = V_C - V_B = 2,6 - 6 = -3,4V < -0,4$ logo não esta no modo ativo. Podemos verificar isso, pois o potencial no coletor é menor do que o potencial da base.

Supondo operação no modo de saturação

$V_e = 6 - 0,7 = 5,3V$; $I_e = \frac{5,3}{3,3K} = 1,61mA$

$V_C = V_e + V_{CEsatu}$; Admintindo $V_{CEsat} = 0,2V$

$V_C = 5,3 + 0,2 = 5,5V$

logo $I_C = \frac{10 - 5,5}{4,7K} = 0,96mA$

$I_e = I_B + I_C$

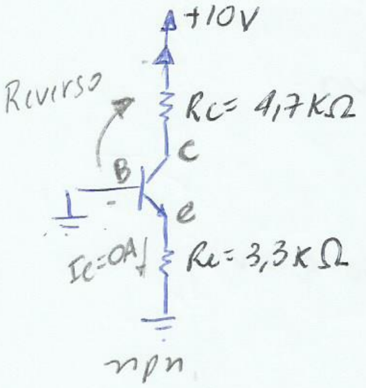
$I_B = 1,61m - 0,96m$

$\therefore I_B = 0,65mA$

$\beta_{forçado} = \frac{I_C}{I_B} = \frac{0,96m}{0,65} \therefore \beta_{forçado} = 1,47 < \beta$

$\therefore$ Modo Saturado

Exemplo 5.6



- Como $V_B = 0V$ e o emissor está aterrado, não existe corrente no emissor, logo

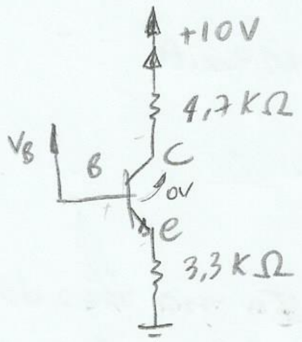
$I_e = 0A$

$I_C = I_S . e^{\frac{V_{BE}}{V_T}}$

$I_C = 0$ logo $V_C = 10V$

Adicional: Determine o valor de V_B que mantém o TBJ no limiar entre saturação e ativo.

Sabendo que. $V_{BE} = 0,7V$ $\beta = 100$



$V_{BC} > -0,4$

No limiar a tensão no JCB deve ser 0V

Como $V_{CB} = 0V$; $V_B = V_C$

$V_{CE} = V_{BE}$

$$\begin{cases} V_{CC} = V_C + I_C . R_C \\ V_B = V_{BE} + I_e R_e \end{cases} ; \quad V_C = V_B$$

$$\begin{cases} V_{CC} = V_B + I_C . R_C \\ V_B = V_{BE} + I_e . R_e \end{cases}$$

$V_{CC} = V_{BE} + I_e R_e + I_C . R_C$

$I_C = \alpha I_e$

$V_{CC} = V_{BE} + I_e R_e + \alpha I_e R_C$

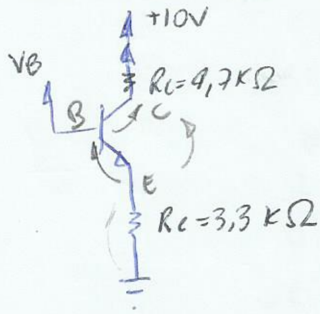
$$I_e = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_e + \alpha R_C} ; \quad \frac{10 - 0,7}{3,3K + \frac{100}{101} . 4,7K} \quad \therefore I_e = 1,17 mA$$

$V_e = 3,3K . 1,17m \quad \therefore V_e = 3,86V$

$V_B = V_{BE} + V_e$

$$\boxed{V_B = 4,56V}$$

Exercício 5.22



Suponha $\alpha = 1$ e determine VB para o maior valor de tensão para que ela permaneça no modo ativo

Para que o transistor permaneça no modo ativo, a tensão na JCB tem que ser maior que -0,4 V ; $V_{CB} > -0,4V$

$I_C = \alpha I_e$

$V_C = V_e + V_{Be} + V_{BC}$; $\frac{V_{CC} - V_C}{R_C} = I_C \therefore V_C = V_{CC} - I_C R_C$

$V_{CC} - I_C R_C = I_e R_e + V_{BE} + V_{BC}$; $I_C = \alpha I_e$

$V_{CC} - \alpha I_e R_C = I_e R_e + V_{Be} + V_{BC}$

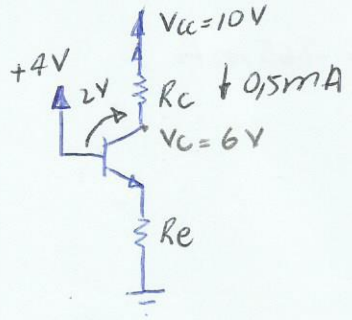
$I_e R_e + \alpha I_e R_C = V_{CC} - V_{Be} - V_{BC}$

$$I_e = \frac{V_{CC} - V_{Be} - V_{BC}}{R_e + \alpha R_C} = \frac{10 - 0,7 - (-0,4)}{3,3K + 4,7K} \therefore I_e = 1,21mA$$

$V_B = I_e R_e + V_{Be}$

$V_B = 1,21m \cdot 3,3K + 0,7 \therefore \boxed{V_B = 4,7V}$

Exercício 5.23



* Determine Rc e Re para o circuito abaixo, considerando $\alpha \cong 1$

$V_C = 4 + 2 = 6V$

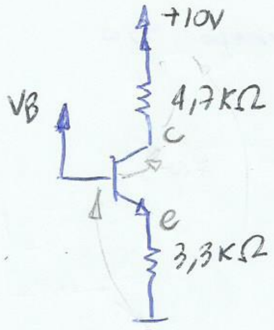
$R_C = \frac{10-6}{0,5m} \therefore \boxed{R_C = 8K\Omega}$

$I_C = \alpha I_e \therefore I_e \cong 0,5mA$

$V_e = 4 - 0,7 = 3,3V$

$\therefore R_e = \frac{3,3}{0,5m} \therefore \boxed{R_e = 6,6K\Omega}$

Exercício 5.24



Determine V_B para que o transistor opere ~~com~~ na saturação com β forçado de 5.

$$\beta_f = \frac{I_C}{I_B}$$

$$I_e = I_C + I_B$$

$$I_e = I_C + \frac{I_C}{\beta}$$

$$I_e = \frac{\beta+1}{\beta} \cdot I_C$$

$$V_B = V_{Be} + I_e \cdot R_e$$

$$V_{CC} = V_C + I_C \cdot R_C$$

$$V_C = V_{CE} + I_e R_e$$

$$V_{CC} = V_{CE} + I_e R_e + I_C R_C$$

$$V_{CC} = V_{CE} + \frac{\beta+1}{\beta} \cdot I_C R_e + I_C R_C$$

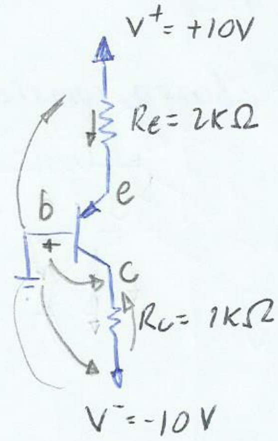
$$I_C \left(\frac{\beta+1}{\beta} \cdot R_e + R_C \right) = V_{CC} - V_{CE}$$

$$I_C = \left(\frac{5+1}{5} \cdot 3{,}3K + 4{,}7K \right) = 10 - 0{,}2 \quad \therefore \quad I_C = 1{,}13\,mA$$

$$V_B = V_{Be} + \left(\frac{\beta+1}{\beta} \right) \cdot I_C \cdot R_e$$

$$V_B = 0{,}7 + \left(\frac{5+1}{5} \right) \cdot 1{,}13m \cdot 3{,}3K \quad \therefore \quad \boxed{V_B = +5{,}18\,V}$$

Exemplo 5.7)



pnp

Admitindo modo ativo

$$V^+ = V_b + V_{eb} + R_e I_e$$

$$+10 = 0 + 0{,}7 + 2K\, I_e \quad \therefore \quad I_e = 4{,}65\,mA$$

Admitindo $\beta = 100 \quad \therefore \quad \alpha = 0{,}99$

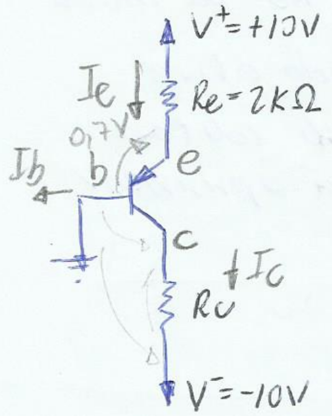
$$I_C = \alpha I_e \quad \therefore \quad I_C = 4{,}6\,mA$$

$$V^- = V_C - I_C \cdot R_C$$

$$-10 = V_C - 4{,}6 \quad \therefore \quad V_C = -5{,}4\,V$$

Como o potencial da base é maior que o potencial do coletor, o transistor está no modo ativo.

Exercício 5.25



x Calcule o maior valor de R_c de modo que o transistor permaneça no modo ativo.

$v_{cb} < 0{,}4$

$V_c^- = V_{cb} - I_c R_c$

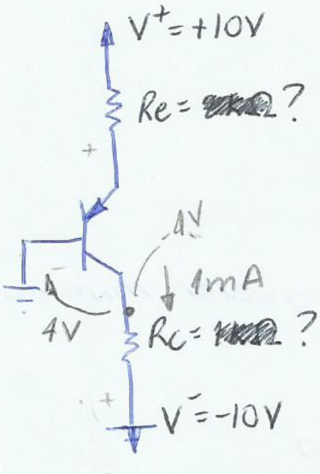
$I_e = \dfrac{10 - 0{,}7}{2K} = 4{,}65\,mA$

Admitindo $\beta = 100$ logo $\alpha = \dfrac{100}{101} = 0{,}99$

$I_c = \alpha I_e \therefore I_c = 0{,}99 \cdot 4{,}65m \therefore I_c = 4{,}60\,mA$

$R_c = \dfrac{V_{cb} - V_c^-}{I_c} = \dfrac{0{,}4 - (-10)}{4{,}6\,m} \therefore \boxed{R_c = 2{,}26\,K\Omega}$

Exercício 5.26



pnp

x Determine R_e e R_c para $I_c = 1mA$ e uma polarização reversa da JCB de 4V.

suponha $\alpha \simeq 1$

$R_c = \dfrac{-4 - (-10)}{1mA} = \boxed{6K\Omega}$

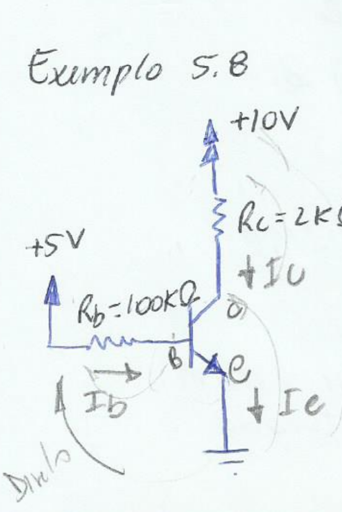
$I_c = \alpha I_e$

$I_e = 1mA$

$V^+ = V_{EB} + I_e R_e$

$R_e = \dfrac{10 - 0{,}7}{1mA} \therefore \boxed{R_e = 9{,}3\,K\Omega}$

Exemplo 5.8



Analise o circuito, sabendo que $\beta = 100$

Admitindo modo ativo.

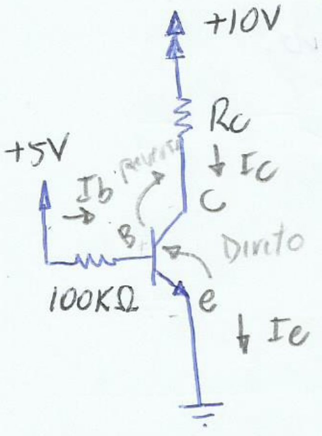
$5 = R_b \cdot I_b + v_{be}$; $v_{be} = 0{,}7$

$\therefore I_b = \dfrac{5 - 0{,}7}{100K} \therefore I_b = 0{,}043\,mA$

$I_b = \dfrac{I_c}{\beta} \therefore I_c = 100 \cdot 0{,}043m \therefore I_c = 4{,}3\,mA$

$V_c = 10 - 2K \cdot 4{,}3m = 1{,}4V$ $V_b = 5 - 100K \cdot 0{,}043m = 0{,}7 \therefore$ Modo Ativo

Exercício 5.27



$50 < \beta < 150$; Determine o valor para Rc de modo que o circuito esteja no modo ativo. Qual a faixa de tensões de coletor o circuito fabricado poderá apresentar.

$v_{be} = 0{,}7\,V$

$I_b = \frac{5-0{,}7}{100K} = 0{,}043\,mA$

npn

$v_{cb} > -0{,}4\,V$

$v_c = v_b + v_{cb} = 0{,}7 + (-0{,}4) = \boxed{0{,}3\,V}$ (mínimo)

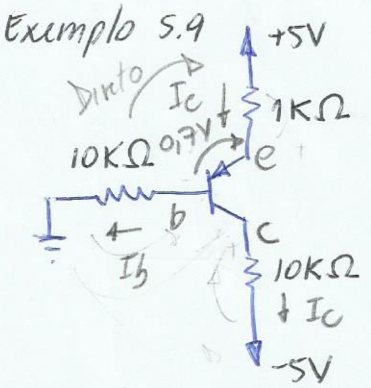
$I_c = 150 \cdot 0{,}043m = 6{,}45\,mA$

$R_c = \frac{10-0{,}3}{6{,}45m} \therefore \boxed{R_c = 1{,}5K\Omega}$

$I_c' = 50 \cdot 0{,}043m = 2{,}15\,mA$

$v_c = 10 - 1{,}5K \cdot 2{,}15m \therefore \boxed{v_c = 6{,}78\,V}$

Exemplo 5.9



Analise o circuito, sabendo que o valor mínimo de β é 30

pnp

Admitindo o modo ativo.

$V^+ = Ib.Rb + Veb + Ie.re$

Sabendo que $Ib = \frac{Ic}{\beta}$; $ie = ib + ic$

$V^+ = Ib\,Rb + veb + (Ib + ic).re$

$V^+ = Ib\,Rb + veb + (Ib + Ib\beta)\,Re$

$I_b = \frac{5-0{,}7}{10K + 1K + 1K.30} \therefore I_b = 0{,}105\,mA$

$I_c = 30 I_b \therefore I_c = 3{,}15\,mA$

$V_c = -5 + 10K.I_c$

$\therefore V_c = 26{,}46\,V$ $\quad V_b = 10K.I_b = 1{,}05\,V$ ∴ Deve estar saturado

$I_e = I_b + I_c \quad ; \quad I_b = \frac{V_b}{10K}$

$V_e = V_b + V_{eb} \; ; \; V_{eb} = 0{,}7$

$V_e = V_b + 0{,}7$

$V_e = V_{ec} + V_c$

$V_e = 0{,}2 + V_c$

$I_e = \frac{5 - V_e}{1K} = \frac{5 - (V_b + 0{,}7)}{1K} = \frac{4{,}3 - V_b}{1K}$

$-5 = V_c - I_c . 10K$

$I_c = \frac{V_c + 5}{10K} = \frac{V_e - 0{,}2 + 5}{10K} = \frac{V_b + 0{,}7 - 0{,}2 + 5}{10K} = \frac{V_b + 5{,}5}{10K}$

$I_e = I_b + I_c$

$\frac{4{,}3 - V_b}{1K} = \frac{V_b}{10K} + \frac{V_b + 5{,}5}{10K} \quad (\times 10K)$

$43 - 10V_b = V_b + V_b + 5{,}5$

$\boxed{\begin{array}{l} V_b = 3{,}125\,V \\ V_e = 3{,}825\,V \\ V_c = 3{,}625\,V \end{array}}$

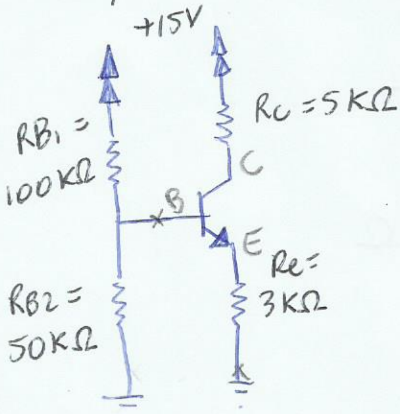
$\boxed{I_b = 0{,}313\,mA \quad I_c = 0{,}863\,mA \quad I_e = 1{,}78\,mA}$

$\beta_{forçado} = \frac{0{,}86}{0{,}31} \simeq 2{,}8$

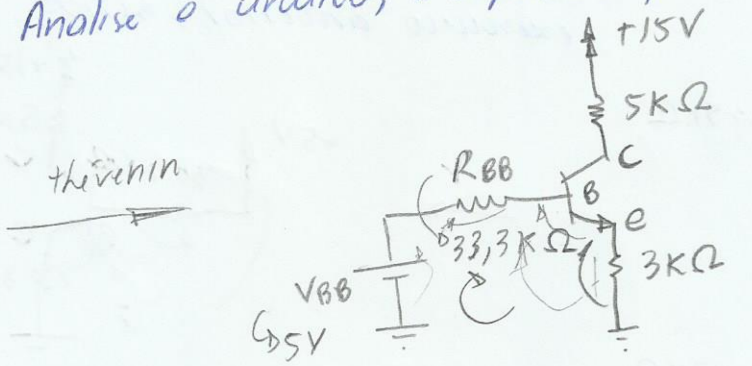
$\beta_{forçado} < \beta$

(logo; Saturado)

Exemplo 5.10



Analise o circuito, e suponha $\beta = 100$



$R_{BB} = 100K // 50K \therefore R_{BB} = 33{,}3K\Omega$

$V_{BB} = \frac{50}{50+100} . 15 \therefore V_{BB} = 5V$

Admitindo modo ativo.

Malha na base: $V_{BB} = I_b . R_{bb} + V_{be} + I_e . R_e$

$V_{BB} = I_b . R_{bb} + V_{be} + (1+\beta) . I_b . R_e$

$I_e = I_b + I_c \; ; \; I_b = \frac{I_c}{\beta}$

$I_e = I_b + \beta I_b$

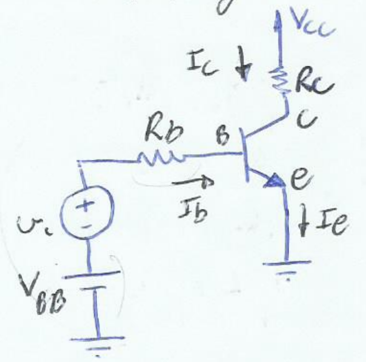
$\therefore I_e = (1+\beta) I_b$

$I_b = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_{bb} + (1+\beta) . R_e}$

$I_b = \frac{5 - 0{,}7}{33{,}3K + (1 + 100) . 3K}$

$I_b = 0{,}0126\,mA$

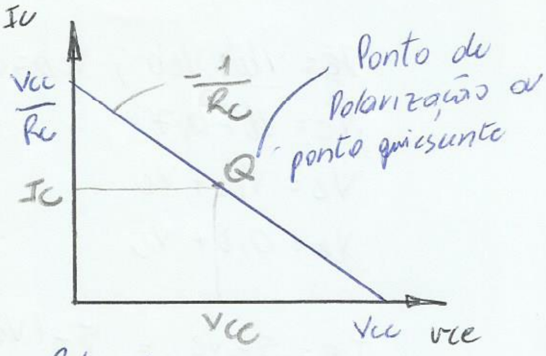
Análise gráfica



Para $v_i = 0$

$$V_{CC} = V_{CE} + I_C R_C$$

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C}$$



Reta de carga

$I_e = (1+\beta) I_b \therefore I_e = 1{,}29\,mA$

$V_e = 3K \cdot I_e \therefore \boxed{V_e = 3{,}87\,V}$

$V_B = V_{BB} - I_b \cdot R_{bb} = 5 - 0{,}0126m \cdot 33{,}3K \therefore \boxed{V_B = 4{,}57\,V}$

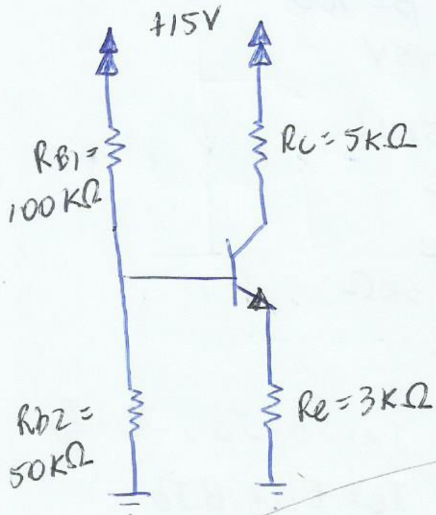
$I_e = I_c + I_b \therefore \boxed{I_C = 1{,}28\,mA}$

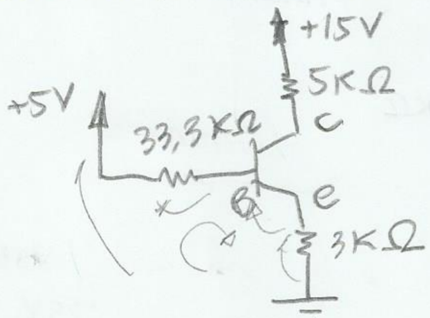
$V_C = 15 - 5K \cdot 1{,}28m \therefore \boxed{V_C = 8{,}61\,V}$

$\therefore$ Modo ativo

Exercício 5.28

Determine I_C e sua variação em relação ao exercício anterior, sendo $\beta = 50$





$V_{BB} = R_{BB} \cdot I_b + V_{BE} + I_e \cdot R_e$

$I_e = I_C + I_B \; ; \; I_B = \frac{I_C}{\beta}$

$I_e = \beta I_b + I_b \therefore I_e = (\beta + 1) I_b$

$V_{BB} = R_{BB} I_b + V_{be} + (\beta+1) \cdot I_b R_e$

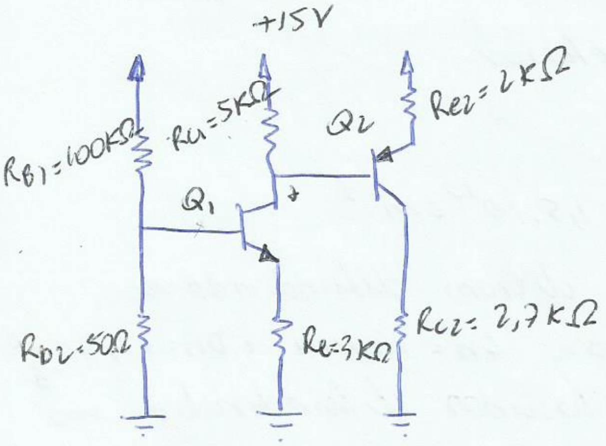
$$I_b = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_{BB} + (\beta+1) \cdot R_e} = \frac{5 - 0{,}7}{33{,}3K + (50+1) 3K} \therefore I_b = 0{,}023\,mA$$

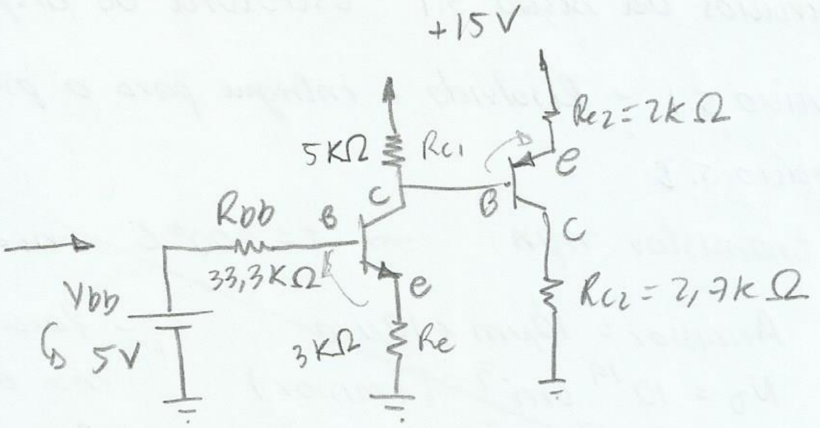
$\boxed{I_C = 1{,}15\,mA}$

$I_e = 1{,}18\,mA$

$\boxed{\text{variação} = 10{,}2\%}$

Exemplo 5.11





Admitindo Q_1 no modo ativo

$V_{B1} = 4,57V \quad I_{B1} = 0,0128\,mA \quad I_{e1} = 1,29mA \quad I_{C1} = 1,28mA$

Admitindo a corrente $I_{B2} < I_{C1}$ logo $V_{C1} = V_{B2} = 15 - 5K \cdot 1,28 = 8,6V$

Admitindo Q_2 no modo ativo

$V_e = V_B + V_{eB} = 8,6 + 0,7 = 9,3V$

$I_{e2} = \dfrac{15-9,3}{2K} \therefore I_{e2} = 2,85\,mA$

$I_{C2} = \alpha I_{e2}$; $\alpha = 0,99 \therefore I_{C2} = 2,82\,mA$

$V_C = 2,7K\, I_{C2} \therefore V_C = 7,62\,V$

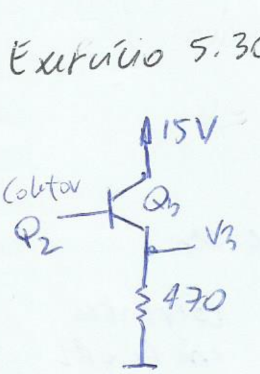
(Portanto Modo ativo)

Exercício 5.29

Determina a corrente drenada pela fonte e potência total dissipada do exercício anterior.

Somando as correntes da fonte temos $\boxed{I = 4,135\,mA}$

Exercício 5.30



Fazer depois, o tempo está curto!!

Exercícios da seção 5.1 - Estrutura do dispositivo e operação física

Exercício 5.1 - Resolvido e entregue para o professor

Exercício 5.2

- transistor npn → $T = 300°C$ $n_i = 1{,}5 \cdot 10^{10}\ cm^{-3}$

$A_{emissor} = 10\mu m \times 10\mu m$

$N_D = 10^{19}\ cm^{-3}$ (emissor)

$N_A = 10^{17}\ cm^{-3}$ (base)

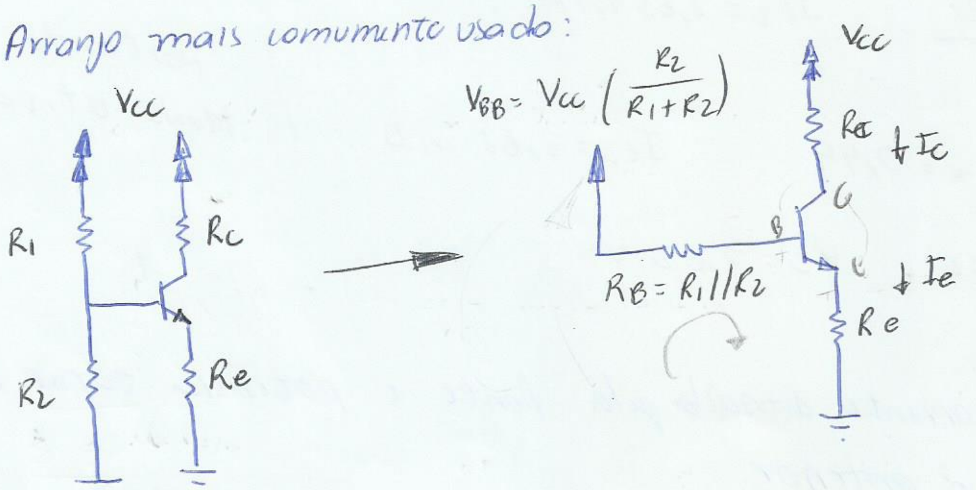
$N_D = 10^{15}\ cm^{-3}$ (coletor)

- Para elétrons difundindo-se na base $L_n = 19\mu m$ e $D_n = 21{,}3\ cm^2/s$
- Para lacunas difundindo-se no emissor: $L_p = 0{,}6\mu m$ $D_p = 1{,}7\ cm^2/s$

Polarização de circuitos amplificadores TBJ

- O problema da polarização é estabelecer uma corrente cc constante no coletor do TBJ
- Temos dois arranjos que não são bons:
  - x colocar V_{BE} fixo
  - x I_b fixo

- Arranjo mais comumente usado:



$I_e = I_c + I_B$

$I_e = \beta I_b + I_b$

$I_c = (\beta + 1) I_b$

$V_{BB} - I_B \cdot R_B - V_{BE} - I_e \cdot R_e = 0$; logo

$V_{BB} - I_B \cdot R_B - V_{BE} - (\beta+1) I_b \cdot R_e = 0$

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B + (\beta+1) \cdot R_e} \Rightarrow I_e = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{\frac{R_B}{\beta+1} + R_e}$$

Para que I_e fique insensível ~~para~~ a temperatura e as variações de β temos que respeitar:

$V_{BB} \gg V_{BE}$ e $R_E \gg \frac{R_B}{\beta+1}$

Regra prática:

$V_{BB} = \frac{1}{3} V_{CC}$

V_{CB} ou $(V_{CE}) = \frac{1}{3} V_{CC}$

$I_C R_C = \frac{1}{3} V_{CC}$

correntes em R_1 e R_2

I_e é $0{,}1 I_e$

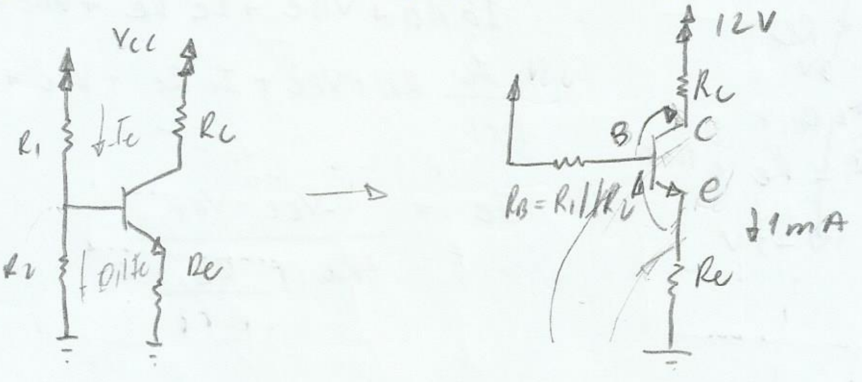
Exemplo 5.13

Projete a rede de polarização do amplificador.

$I_E = 1mA$

$V_{CC} = +12V$

$\beta = 100$



$\frac{V_{CC}}{3} = \frac{12}{3} = 4V$

Através da regra prática, temos

$V_B = 4V$

$V_e = V_B - V_{Be} = 4 - 0{,}7 \therefore V_e = 3{,}3V$

$R_e = \frac{3{,}3}{1m} \therefore \boxed{R_e = 3{,}3K}$

$R_2 = \frac{4}{0{,}1 \cdot 1m} \therefore \boxed{R_2 = 40K\Omega}$

$V_{R2} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{CC} \rightarrow 4 = \frac{40K}{R_1 + 40K} \cdot 12 \therefore \boxed{R_1 = 80K\Omega}$

$$I_E = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_e + \frac{R_B}{\beta + 1}} = \frac{4 - 0{,}7}{3{,}3K + \frac{(80//40) \cdot K}{101}} = 0{,}92mA$$

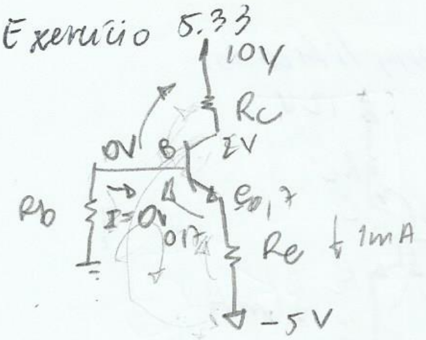
↳ Esse valor é pouco menor que 1mA. Como queremos obter uma corrente mais alta podemos diminuir a resistência para 8K e 4K, logo

$$I_E = \frac{4 - 0{,}7}{3{,}3K + \frac{(8//4)K}{101}} \therefore I_e = 0{,}99\,mA \therefore I_c = \frac{100}{100} \cdot 0{,}99\,mA$$

↳ $\therefore I_e = 0{,}98\,mA$

$\therefore R_c = \frac{12 - 8}{0{,}98m} \therefore \boxed{R_c = 4{,}07K\Omega}$

Exercício 5.33



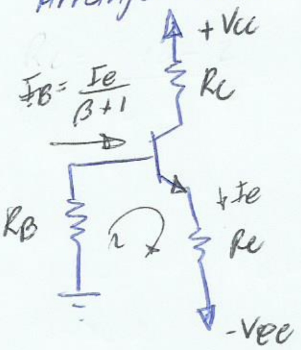
$$Ib.Rb + V_{BE} + Ie\ Re + V_{EE} + V_{EE} = 0$$

$$\frac{Ie}{\beta+1} Rb + V_{BE} + Ie\ Re + V_{EE} + V_{EE} = 0$$

$$Ie = \frac{-V_{EE} - V_{BE}}{Re + \cancel{\frac{Rb}{\beta+1}} \approx 0}$$

$$Re = \frac{-(-5) - 0{,}7}{1mA} \quad \therefore \quad Re = 4{,}3K\Omega$$

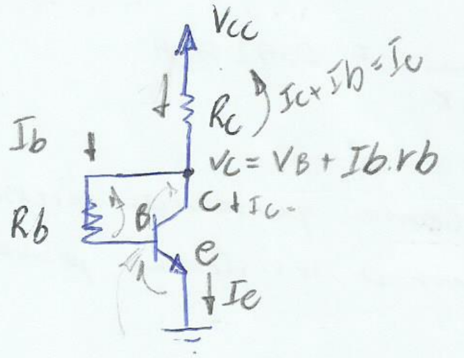
Lembrete: Arranjo clássico de polarização



$$Ie = \frac{V_{EE} - V_{BE}}{Re + \frac{R_B}{\beta+1}}$$

amplificador em base comum

Polarização utilizando um resistor de realimentação de coletor para a base



$$Ie = Ic + Ib$$

$$Vcc = Ie.\ Rc + V_{BE} + Ib\ rb$$

$$Ie = Ic + \frac{Ic}{\beta}$$

$$Ie = \frac{\beta+1}{\beta} . Ic$$

$$Ic = \frac{\beta}{\beta+1} Ie$$

$$Ib = \frac{Ic}{\beta}$$

$$Ib = \frac{\beta}{\beta+1} Ie \div \cancel{\beta}$$

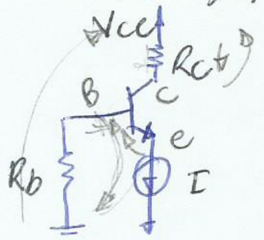
$$Vcc = Ie\ Rc + v_{be} + \frac{Ie\ rb}{\beta+1}$$

$$\boxed{Ie = \frac{Vcc - v_{be}}{Rc + \frac{Rb}{\beta+1}}}$$

Para que Ie seja insensível as variações de β ? $Rc \gg \frac{Rb}{\beta+1}$

$$V_{CB} = I_B Rb = Ie. \frac{R_B}{\beta+1}$$

Polarização usando uma fonte de corrente



Para $V_{CC} = 10V$ $I = 1mA$ $\beta = 100$

$R_b = 100K\Omega$ $R_C = 7{,}5K$

x Calcule a tensão cc na base, no emissor e no coletor

$I_e = 1mA$; $I_e = I_C + I_b$; $I_b = \frac{I_C}{\beta}$

$I_e = (\beta+1) I_b$

$\therefore I_b = \frac{1m}{101} = 9{,}9\mu A$

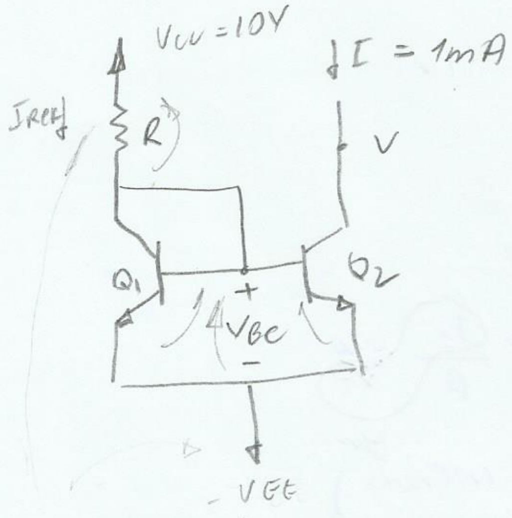
$V_b = I_b . 100K \therefore \boxed{V_b = -0{,}99V}$

$V_C = -0{,}99 - 0{,}7 \therefore \boxed{V_e = -1{,}69\,V}$

$I_C = 9{,}9\mu . 100 \therefore I_C = 0{,}99\,mA$

$V_C = 10 - 7{,}5 I_C . K \therefore \boxed{V_C = 2{,}57V}$

x Se Vee for 10V determine o valor de R

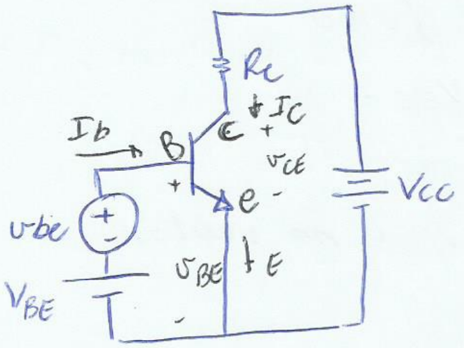


; $I = I_{REF}$; pois a tensão no coletor é a mesma

$$I_{REF} = \frac{10 - V_{BE} - (-V_{EE})}{R}$$

$$\therefore R = \frac{10 - 0{,}7 + 10}{1mA} \therefore \boxed{R = 19{,}3K\Omega}$$

Operação em pequeno sinal e modelos



$$i_C = I_S \cdot e^{\frac{v_{BE}}{V_T}}$$

$$v_{BE} = v_{be} + V_{BE}$$

$$\rightarrow i_C = I_S\, e^{\frac{(v_{be}+V_{BE})}{V_T}}$$

$$i_C = \underbrace{I_S\, e^{\frac{v_{be}}{V_T}}\, e^{\frac{V_{BE}}{V_T}}}_{I_C}.$$

Para $v_{be} \ll V_T$, temos

$$e^{\frac{v_{be}}{V_T}} = 1 + \frac{v_{be}}{V_T}$$

logo $i_C = I_C\, e^{\frac{v_{be}}{V_T}} \rightarrow i_C = I_C \cdot \left(1 + \frac{v_{be}}{V_T}\right)$

$$\boxed{\underset{(\text{total})}{i_C} = \underset{(DC)}{I_C} + \underset{(AC)}{\frac{I_C v_{be}}{V_T}}}$$

transcondutancia

$$\boxed{g_m = \frac{I_C}{V_T}}$$

$i_c = \frac{I_C v_{be}}{V_T}$ $\rightarrow i_c = g_m v_{be}$

A corrente de base e a resistência de entrada da base

$$i_C = I_C + \frac{I_C\, v_{be}}{V_T}$$

$$i_B = \frac{I_C}{\beta} + \frac{I_C}{\beta}\frac{v_{be}}{V_T}$$

$\rightarrow i_B = I_B + i_b$, onde $I_B = \frac{I_C}{\beta}$ e $i_b = \frac{I_C}{\beta}\frac{v_{be}}{V_T}$ — g_m

$i_b = \frac{g_m}{\beta} v_{be}$; $r_\pi = \frac{v_{be}}{i_b}$ (resistencia de entrada da base)

$$r_\pi = \frac{v_{be}}{i_b} = \frac{\beta}{g_m} = \frac{\beta}{\frac{I_C}{V_T}} = \frac{\beta}{\frac{I_B \cdot \beta}{V_T}} \quad \therefore \quad \boxed{r_\pi = \frac{V_T}{I_b}}$$

A corrente de emissor e a resistência de entrada do emissor

$$i_E = \frac{i_C}{\alpha} = \frac{I_C}{\alpha} + \frac{i_c}{\alpha} \quad ; \quad i_E = I_E + i_e$$

Lembrando que $\boxed{I_C = \alpha I_e} \rightarrow I_e = \frac{I_C}{\alpha}$

$$i_e = \frac{i_c}{\alpha} = \frac{I_C \cdot v_{be}}{\alpha \; V_T} = I_e \frac{v_{be}}{V_T}$$

resistência do emissor

logo: $r_e = \dfrac{v_{be}}{i_e} \rightarrow \dfrac{v_{be}}{i_e} = \dfrac{V_T}{I_e}$ $\quad \boxed{r_e = \dfrac{V_T}{I_e}}$

Como $g_m = \dfrac{I_C}{V_T}$; $r_e = \dfrac{V_T}{I_E}$

$$V_T = \frac{I_C}{g_m} \qquad r_e = \frac{\frac{I_C}{g_m}}{\frac{I_C}{\alpha}} \quad \therefore \quad r_e = \frac{\alpha}{g_m} \cong \frac{1}{g_m}$$

Relações entre r_π e r_e

$$v_{be} = i_b \cdot r_\pi = i_e \cdot r_e \qquad \Big| \qquad i_e = (\beta+1) i_b$$

$$r_\pi = \frac{i_e}{i_b} \cdot r_e \rightarrow r_\pi = \frac{(\beta+1) i_b}{i_b} \cdot r_e$$

$$\boxed{r_\pi = (\beta+1) \cdot r_e}$$

Ganho de tensão

$$v_C = V_{CC} - i_C R_C$$
$$= V_{CC} - (I_C + i_c) R_C$$
$$= (V_{CC} - I_C R_C) - i_c R_C$$
$$v_C = V_C - i_c R_C \quad \therefore \quad v_c = -i_c R_C = -g_m v_{be} R_C$$

$$v_c = (-g_m R_C) v_{be}$$

O ganho de tensão nesse amplificador é

$$A_v = \frac{v_c}{v_{be}} = -g_m R_C$$

Resumo "Operação pequeno sinal e modelos"

- A corrente de coletor

$i_C = I_C + \frac{I_C}{V_T} v_{be}$

transcondutância

$\boxed{g_m = \frac{I_C}{V_T}}$

$i_C = I_C + g_m v_{be}$

- A corrente de base

$i_B = I_B + i_b$

$i_B = I_B + \frac{g_m}{\beta} v_{be}$

$\boxed{r_\pi = \frac{v_{be}}{i_b}}$ resistência de entrada na base

$\boxed{r_\pi = \frac{V_T}{I_B}}$

- A corrente de emissor ~~eme~~

$i_E = I_E + i_e$

$i_E = I_E + \frac{I_E}{V_T} v_{be}$

$\boxed{r_e = \frac{v_{be}}{i_e} = \frac{V_T}{I_E} = \frac{1}{g_m}}$

resistência de emissor

lembrete: $r_\pi = (\beta + 1) r_e$

Exercício 5.37

$\beta = 100 \quad I_C = 1mA$

x Calcule os valores de g_m, r_e e r_π no ponto de polarização

$g_m = \frac{I_C}{V_T} \therefore g_m = \frac{1mA}{25mV}$ $\boxed{g_m = 40 \frac{mA}{V}}$

$i_b = \frac{i_c}{\beta} \therefore i_c = g_m \cdot v_{be}$

$\hookrightarrow i_b = \frac{g_m v_{be}}{\beta} \therefore r_\pi = \frac{v_{be}}{i_b} = \frac{\beta}{g_m}$ $\boxed{r_\pi = 2{,}5\,k\Omega}$

$i_e = \frac{i_c}{\alpha} = \frac{g_m \cdot v_{be}}{\alpha}$ $r_e = \frac{v_{be}}{i_e} = \frac{\alpha}{g_m} = \frac{\frac{\beta}{\beta+1}}{g_m} = \frac{\frac{100}{101}}{40 \cdot 10^{-3}}$

$\boxed{r_e = 24{,}75\,\Omega}$