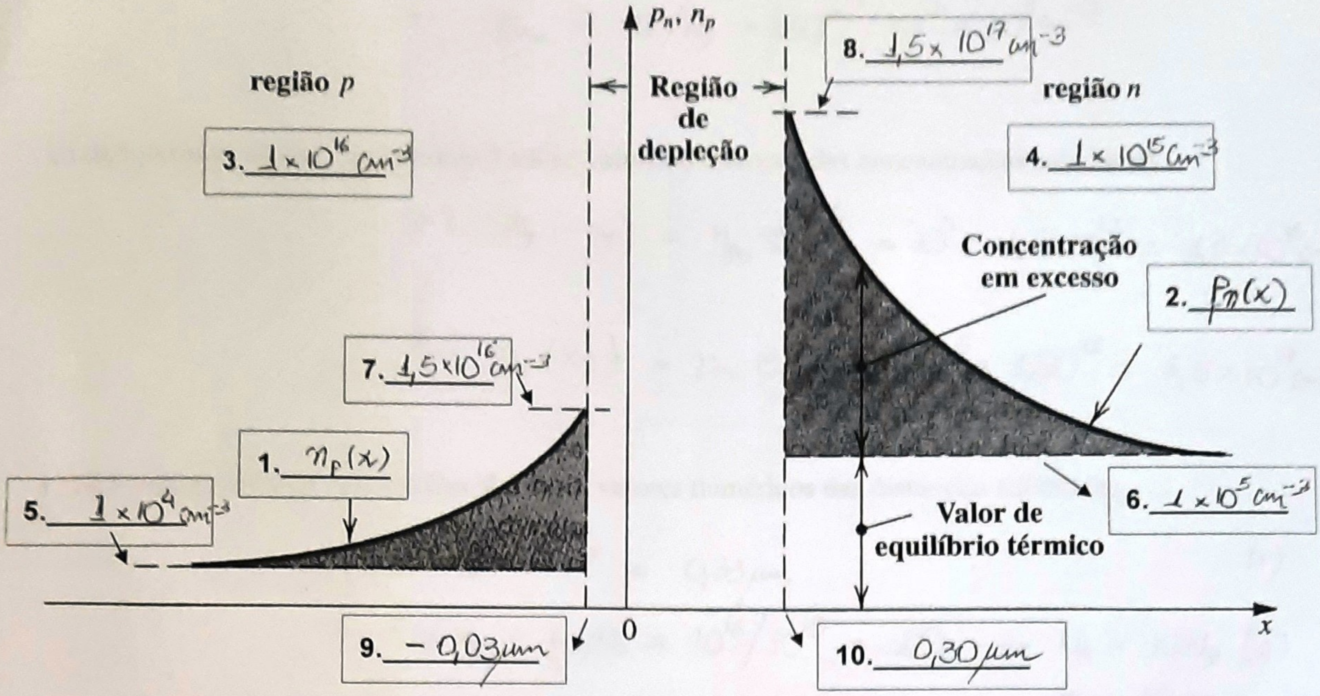
Questão 1) (2,5 pontos) A figura abaixo apresenta a distribuição de excesso de portadores minoritários numa junção *pn* diretamente polarizada. Considere N_A=1,0x10^{16}/cm^3, N_D=1,0x10^{15}/cm^3; n_i=1,0x10^{10}/cm^3; W_{dep} = *0,33um*, $e^{V/VT}$=*1,5x10^{12}*. Com o auxílio das expressões apresentadas abaixo, pede-se:



$$p_n(x) = p_{n0} + [p_n(x_n) - p_{n0}]e^{-(x-x_n)/L_p} \qquad p_n(x_n) = p_{n0}e^{V/V_T}$$

$$n_p(x) = n_{p0} + [n_p(-x_p) - n_{p0}]e^{+(x+x_p)/L_n} \qquad n_p(-x_p) = n_{p0}e^{V/V_T}$$

$$n_{n0} \cong N_D \qquad p_{n0} = n_i^2/N_D \qquad \frac{x_n}{x_p} = \frac{N_A}{N_D}$$

$$p_{p0} \cong N_A \qquad n_{p0} = n_i^2/N_A$$

a) (0,5 ponto) Indique nos quadros 1 e 2 o nome do perfil de concentração representado(exemplo:$p_p(y)$)

1: $n_p(x)$

2: $p_n(x)$

b) (0,5 ponto) Coloque nos quadros 3 e 4 o valor numérico das concentrações de portadores majoritários das regiões neutras dos lados *p* e *n* respectivamente.

3: $p \cong N_A = 1\times10^{16}\ cm^{-3}$

4: $n \cong N_D = 1\times10^{15}\ cm^{-3}$

c) (0,5 ponto) Coloque nos quadros 5 e 6 os valores numéricos das concentrações solicitadas.

$$5: \quad n_{p0} = n_i^2/N_A = (10^{10})^2/10^{16} = 10^4\ cm^{-3}$$

$$6: \quad p_{n0} = n_i^2/N_D = (10^{10})^2/10^{15} = 10^5\ cm^{-3}$$

d) (0,5 ponto) Coloque nos quadros 7 e 8 os valores numéricos das concentrações solicitadas.

$$7: \quad n_p(-x_p) = n_{p0}\, e^{V/V_t} = 10^4 \times 1{,}5\times10^{12} = 1{,}5\times10^{16}\ cm^{-3}$$

$$8: \quad p_n(x_n) = p_{n0}\, e^{V/V_t} = 10^5 \times 1{,}5\times10^{12} = 1{,}5\times10^{17}\ cm^{-3}$$

e) (0,5 ponto) Coloque nos quadros 9 e 10 os valores numéricos das distâncias solicitadas.

$$\begin{cases} x_n + x_p = W = 0{,}33\,\mu m & (1) \\ x_n/x_p = N_A/N_D = 10^{16}/10^{15} = 10 \rightarrow N_A = 10N_D & (2) \end{cases}$$

$$\underline{x_n = 10\,x_p}$$

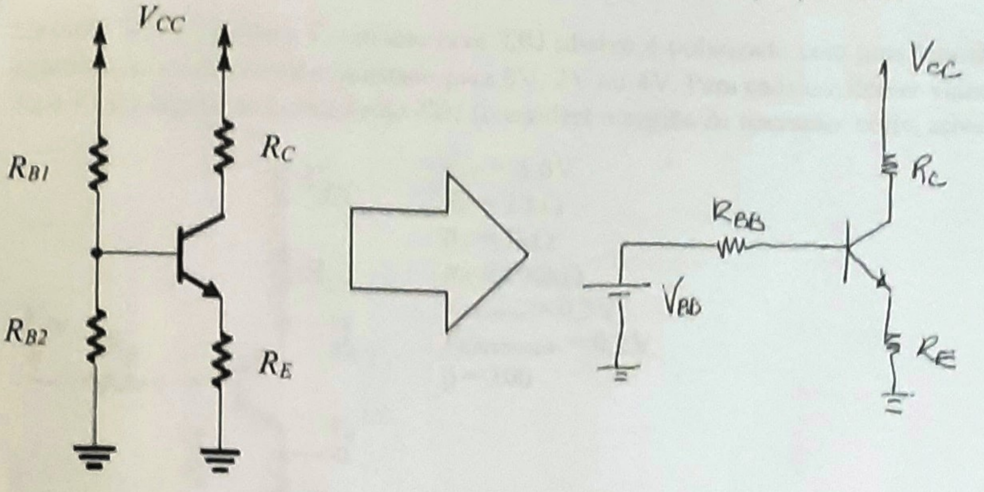
SUBSTITUINDO (2) EM (1):

$$10x_p + x_p = 0{,}33\,\mu m \rightarrow x_p = 0{,}33\,\mu m/\underline{11} = \underline{\underline{0{,}03\,\mu m}}$$

SUBSTITUINDO x_p EM (1):

$$x_n = W - x_p = 0{,}33\,\mu m - 0{,}03\,\mu m = 0{,}3\,\mu m$$

Questão 2) (2,5 pontos) Para o circuito abaixo, considere sempre $\beta = 100$.



a) (1,0 ponto) Desenhe o circuito equivalente de Thevenin visto da base do transistor com os respectivos valores de tensão e resistência equivalentes considerando $V_{CC} = 15V$ e adotando $R_{B1} = 150K\Omega$ $R_{B2} = 75K\Omega$.

$$R_{BB} = 150k \parallel 75k = \underline{50k\Omega} \qquad \boxed{R_{BB} = 50k\Omega}$$

$$V_{BB} = \frac{R_{B2}}{R_{B1}+R_{B2}} \times V_{CC} = \frac{75k}{150k+75k} \times 15 = \underline{5V} \qquad \boxed{V_{BB} = 5V}$$

b) (1,0 ponto) Projete o circuito, determinando os valores de R_C e R_E para $V_C = 10V$ e a corrente I_C de 1 mA, onde $V_{BE} = 0,7V$ para 25°C

$V_{cc} = 15V$

$$R_C = \frac{V_{cc} - V_C}{I_C} = \frac{15-10}{1mA} = 5k\Omega$$

$$V_{RE} = V_{BB} - R_{BB}I_B - V_{BE} = 5 - \overbrace{50k\left(\frac{1m}{100}\right)}^{0,5V} - 0,7V = \underline{3,8V}$$

c) (0,5 ponto) Para o Gráfico I_CxV_{CE}, desenhe a **reta de carga** da malha V_{cc}, R_C, R_E, V_{CE} e o **ponto de polarização** I_C, V_{CE} considerando os valores do seu projeto. Dica, trace uma reta os pontos extremos dos eixos I_C e V_{CE}

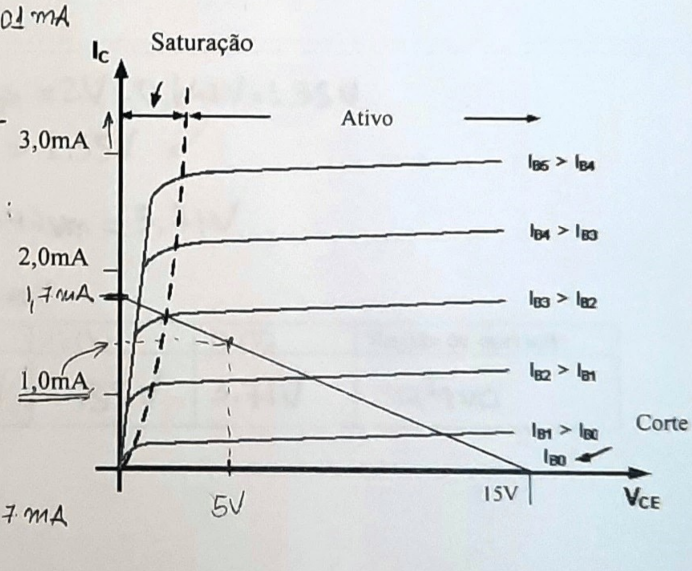
$$I_E = \frac{\beta+1}{\beta} \cdot I_C = \frac{101}{100} \times 1m = 1,01\,mA$$

$$R_E = \frac{V_{RE}}{I_E} = \frac{3,8V}{1,01mA} = \underline{3,76k\Omega} \cong \underline{3,8k\Omega}$$

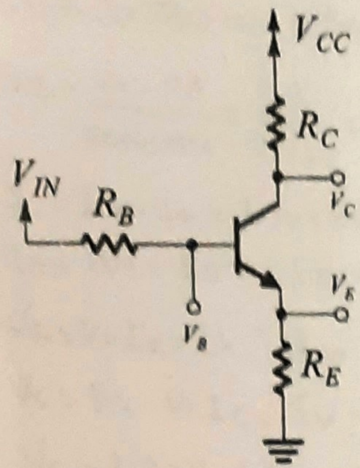
EQUAÇÃO DA RETA DE CARGA:

$$V_{CE} \cong V_{cc} - (R_C + R_E)I_C$$
$$= 15 - 8,8 \times I_C(mA)$$

$$\begin{cases} P/\ I_C = 0 \rightarrow V_{CE} = 15V \\ P/\ V_{CE} = 0 \rightarrow I_C = \frac{15}{8,8k} \cong 1,7\,mA \end{cases}$$



Questão 3) (2,5 pontos) O circuito com TBJ abaixo é polarizado com uma tennsão de entrada V_{IN} contínua que tem seu valor ajustado para 0V, 2V ou 4V. Para cada um desses valores, determine V_E, V_B e V_C e a região de operação do TBJ (considere a região de operação: corte, ativa ou saturação).



$V_{CC} = 5{,}0V$
$R_C = 2\ k\Omega$
$R_E = 1k\Omega$
$R_B = 100k\Omega$
$V_{BE\ ativa} = 0{,}7V$
$V_{CEsaturação} = 0{,}2V$
$\beta = 100$

a) (0,25 ponto) $V_{IN} = 0V$ Se $V_{IN}=0$, J_{BE} e J_{BC} rev. pol. Logo $I_C = I_B = I_E = 0$ e o TR cortado

$\therefore V_E = R_E I_E = 0V$; $V_B = V_{IN} - R_B I_B = 0 - 0 = 0V$ e $V_C = V_{CC} - R_C I_C = 5 - 0 = 5V$

V_{IN}	V_E (V)	V_B (V)	V_C (V)	Região de operação
0V	0V	0V	0V	corte

b) (1,0 ponto) $V_{IN} = 2V$

Supondo TBJ na ativa. $V_{BE} = 0{,}7V$. $V_{IN} = R_B I_B + V_{BE} + R_E \overset{(\beta+1)I_B}{I_E}$

$$I_B = \frac{V_{IN} - V_{BE}}{R_B + R_E(\beta+1)} = \frac{2-0{,}7}{100k + 101k} = 6{,}47\mu A \Rightarrow \begin{cases} I_C = 6{,}47\mu A \cdot \beta = 0{,}647 mA \\ I_E = 6{,}47\mu A(\beta+1) = 0{,}653 mA \end{cases}$$

$V_E = R_E I_E = 1k \cdot 0{,}653m = 0{,}65V$

$V_B = V_{IN} - R_B I_B = 2V - 100k \cdot 6{,}47\mu = 2V - 0{,}647V = 1{,}35V$

ou $V_B = V_E + 0{,}7V = 0{,}65 + 0{,}7 = 1{,}35V$ ✓

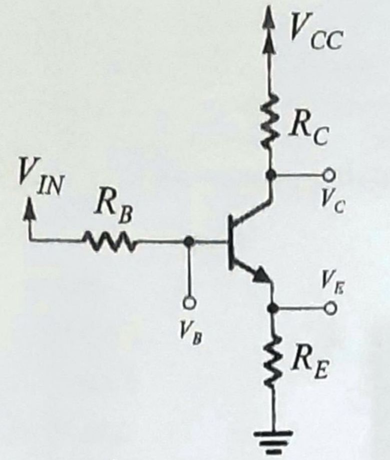
$V_C = V_{CC} - R_C I_C = 5V - 2k \cdot 0{,}647m = 3{,}71V$

Como $V_C > V_B > V_E$ TBJ na ativa!

V_{IN}	V_E (V)	V_B (V)	V_C (V)	Região de operação
2V	0,65V	1,35V	3,71V	ativa

c) (1,25 ponto) $V_{IN} = 4V$

(figura reproduzida para facilitar)



$V_{CC} = 5{,}0V$

$R_C = 2\ k\Omega$

$R_E = 1k\Omega$

$R_B = 100k\Omega$

$V_{BE\ ativa} = 0{,}7V$, Sat: 0,5V)

$V_{CEsaturação} = 0{,}2V$

$\beta = 100$

Mesmo Procedimento

Supondo TBJ na ativa, $V_{BE} = 0{,}7V$

$I_B = \frac{V_{IN} - 0{,}7}{100K + 101K} = \frac{3{,}3}{201K} = 16{,}4\mu A$

$I_C = 100 \cdot I_B = 1{,}64mA$

$I_E = 101 \cdot I_B = 1{,}66mA$

$V_E = R_E I_E = 1k \cdot 1{,}66m = 1{,}66V \Rightarrow V_B = V_{RE} + 0{,}7 = 2{,}36V$

$V_C = V_{CC} - R_C I_C = 5V - 2k \cdot 1{,}64m = 1{,}72V$

$\underline{V_C = 1{,}72V < V_B = 2{,}36V} \Rightarrow$ TR SATURADO!!

NA SATURAÇÃO $V_{BE} = 0{,}7V$ e $V_{CE} = 0{,}2V$

$V_{IN} = R_B I_B + 0{,}7 + R_E I_E$ ← I_E ñ é $I_B(\beta+1)$

$V_{CC} = R_E I_E + V_{CEsat} + R_C I_C = R_E I_E + R_C I_C + 0{,}2V$

$\underline{I_E = I_C + I_B}$

$V_{CC} = R_E I_E + R_C(I_E - I_B) + 0{,}2V$ e $I_B = \frac{V_{IN} - 0{,}7 - R_E I_E}{R_B}$

$V_{CC} = R_E I_E + R_C I_E - \frac{R_C}{R_B}(V_{IN} - 0{,}7 - R_E I_E) + 0{,}2V$

$V_{CC} = (R_E + R_C) I_E - \frac{R_C}{R_B}(V_{IN} - 0{,}7) + \frac{R_E R_C}{R_B} I_E + 0{,}2V$

$5V = 3K I_E - \frac{2k}{100k} 3.3 + \frac{1k \cdot 2K}{100K} I_E + 0{,}2 \Rightarrow 4{,}8 - 0{,}066 = 3030 I_E$

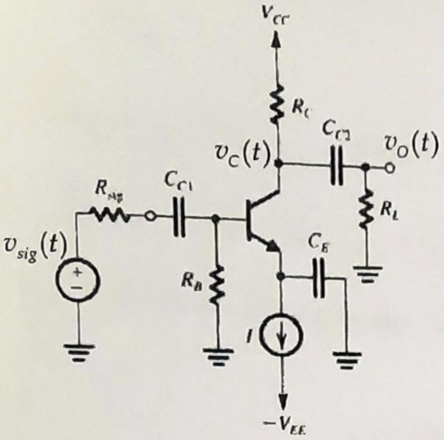
$I_E = 1{,}56mA$

$V_E = 1{,}56mA \times R_E = 1{,}56V$; $V_B = V_E + 0{,}7 = 2{,}26V$ e $V_C = V_E + 0{,}2V = 1{,}76V$

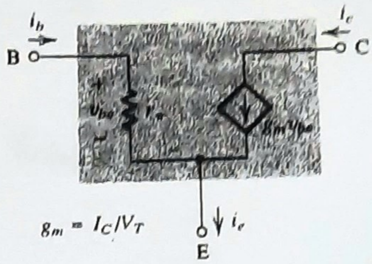
TBJ Saturado!!

V_{IN}	V_E (V)	V_B (V)	V_C (V)	Região de operação
4V	1,56V	2,26V	1,76V	saturado!

Questão 4: (2,5 pontos) Hoje em dia os amplificadores de tensão de baixa potência são fabricados na forma de circuitos integrados. Em circuitos integrados é muito fácil fazer fontes de corrente, como veremos no próximo semestre. Em função disso, um tipo de amplificador de tensão, chamado de emissor comum, implementado em circuitos integrados, é o visto na figura abaixo. Os capacitores C_{C1}, C_{C2} e C_E podem ser considerados abertos para análises CC e curtos para análises CA. Considerando que o transistor TBJ está operando na região ativa, pergunta-se:



$V_{CC} = -V_{EE} = 10{,}0\text{V}$
$R_C = 5\ \text{k}\Omega$
$R_B = 100\text{k}\Omega$
$R_{sig} = 100\Omega$
$R_L = 10\text{k}\Omega$
$I = 1{,}01\text{mA}$
$\beta = 99$



a) (0,25 ponto) Quais os valores numéricos de I_C e de V_C contínuos ?

Em CC, C_E e C_{C2} são abertos, logo $I_E = I$ e $I_C = I \cdot \frac{\beta}{\beta+1} = 1{,}01\text{mA} \times \frac{99}{100} = 1\text{mA}$

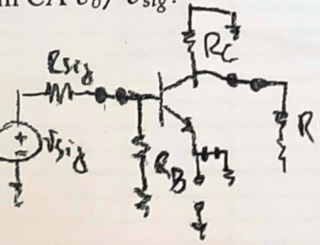
$V_C = V_{CC} - R_C I_C = 10 - 5\text{k} \cdot 1\text{mA} = 5$ ✓

$I_C =$	1 mA
$V_C =$	5V ✓

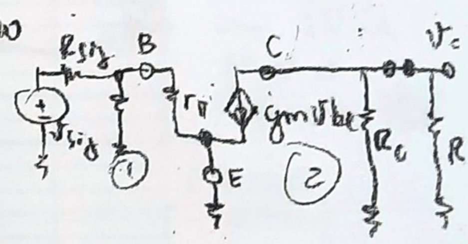
b) (1,25 pontos) Considerando o modelo para pequenos sinais apresentado, qual a expressão literal do ganho de tensão em CA v_o/v_{sig}?

$\frac{v_o}{v_{sig}} = ?$

Circuito CA:
Caps = curtos
Fontes de tensão = 0
Fontes de I = abertas



modelo ⇒



de (2) $v_o(t) = -(R_C // R_L) g_m v_{be}$

de (1) $v_{be} = v_{sig} \dfrac{r_\pi // R_B}{R_{sig} + R_B // r_\pi}$

$v_o(t) = -(R_C // R_L) g_m \cdot \dfrac{r_\pi // R_B}{R_{sig} + R_B // r_\pi} \cdot v_{sig}(t)$

$v_o/v_{sig} =$	$-(R_C // R_L) g_m \cdot \dfrac{r_\pi // R_B}{R_{sig} + R_B // r_\pi}$

c) (1,0 ponto) Considerando um ganho de tensão em módulo $|v_o / v_{sig}|$ = 100 V/V, e $v_{sig}(t)$ = 10mV triangular, desenhe a forma de onda da tensão $v_C(t)$ instantânea (CC e CA) e fase com $v_{sig}(t)$. Cote os valores de tensão relevantes. $V_C(cc) = 5V$

$\left|\frac{v_o}{v_{sig}}\right| = 100 \Rightarrow$ p/ o circuito em questão $\frac{v_o}{v_{sig}} = -100$ V/V

logo, p/ $v_{sig_{pico}} = 10mV \Rightarrow v_{o_{pico}} = -1{,}0V$

Como $v_C(t) = V_{C(CC)} + v_c(t)$ e $v_c(t) = v_o(t) \Rightarrow v_C(t) = 5V - v_o(t)$

$v_C(t)$ está desenhado abaixo.