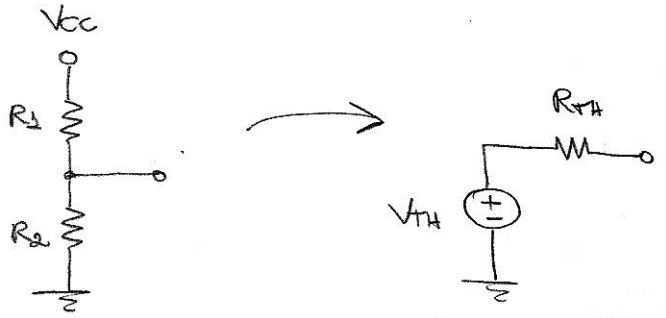
ELETRÔNICA II – 1ª LISTA – GABARITO

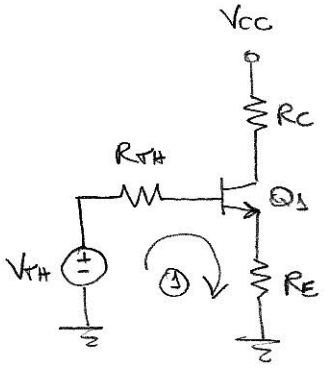
1 (a) Fazendo o circuito equivalente de Thévenin para o divisor resistivo:



$$V_{TH} = \frac{R_2}{R_1+R_2} \cdot V_{CC} = 3{,}6\ V$$

$$R_{TH} = R_1 // R_2 = 11{,}52\ k\Omega$$

Supondo modo ativo:



Malha 1: $V_{TH} - R_{TH} I_B - V_{BE} - R_E I_E = 0$

$$V_{TH} - R_{TH} I_B - V_{BE} - R_E(\beta+1) I_B = 0$$

$$I_B = \frac{V_{TH} - V_{BE}}{R_{TH} + R_E(\beta+1)} = 9{,}54\ \mu A$$

$$I_C = \beta I_B = 0{,}954\ mA$$

$$I_E = I_C + I_B = 0{,}963\ mA$$

Assim:

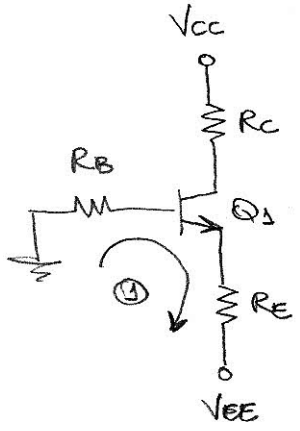
$$V_C = V_{CC} - R_C I_C = 7{,}14\ V$$

$$V_E = R_E I_E = 2{,}89\ V$$

$$V_B = V_E + V_{BE} = 3{,}49\ V$$

Como $V_C > V_B$, a junção BC está reversamente polarizada, confirmando o modo ativo.

(b) Supondo a operação no modo ativo:



Malha 1: $0 - R_B I_B - V_{BE} - R_E I_E = V_{EE}$

$$-R_B I_B - V_{BE} - R_E(\beta+1) I_B = V_{EE}$$

$$I_B = \frac{-V_{EE} - V_{BE}}{R_B + R_E(\beta+1)} = 19{,}89\ \mu A$$

$I_C = \beta I_B = 1{,}99 \text{ mA}$

$I_E = (\beta+1) I_B = 2{,}00 \text{ mA}$

Assim:

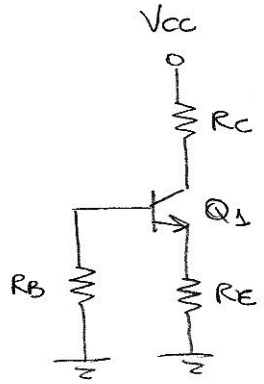
$V_C = V_{CC} - R_C I_C = 5{,}02 \text{ V}$

$V_E = V_{EE} + R_E I_E = -5{,}00 \text{ V}$

$V_B = V_E + V_{BE} = -4{,}4 \text{ V}$

Como $V_C > V_B$, a junção BC estará reversamente polarizada, confirmando o modo ativo.

(c) Supondo o transistor em corte:



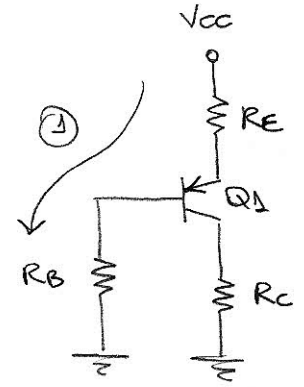
$I_C = I_B = I_E = 0$

Assim: $V_C = V_{CC} = 5 \text{ V}$

$V_B = V_E = 0$

Nesse caso, temos que a junção BC estará reversamente polarizada, pois $V_C > V_B$, e a junção BE estará despolarizada, confirmando o corte.

(d) Supondo o modo ativo:



Malha 1: $V_{CC} - R_E I_E - V_{EB} - R_B I_B = 0$

$V_{CC} - R_E(\beta+1) I_B - V_{EB} - R_B I_B = 0$

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{EB}}{R_B + R_E(\beta+1)} = 19{,}96 \ \mu\text{A}$$

$I_C = \beta I_B \cong 2 \text{ mA}$

$I_E = (\beta+1) I_B = 2{,}02 \text{ mA}$

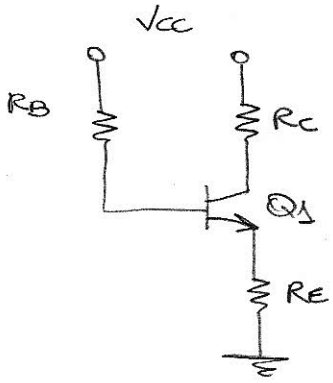
Assim: $V_C = R_C I_C = 4 \text{ V}$

$V_E = V_{CC} - R_E I_E = 7{,}98 \text{ V}$

$V_B = V_E - V_{EB} = 7{,}38 \text{ V}$

Como $V_B > V_C$, então, a junção BC está reversamente polarizada, confirmando o modo ativo.

(e) Supondo saturação:



$$I_E = I_C + I_B$$

$$\frac{V_E}{R_E} = \frac{V_{CC} - V_C}{R_C} + \frac{V_{CC} - V_B}{R_B}$$

$$\frac{V_E}{R_E} = \frac{V_{CC} - (V_E + V_{CE})}{R_C} + \frac{V_{CC} - (V_E + V_{BE})}{R_B}$$

$$V_E \left(\frac{1}{R_E} + \frac{1}{R_C} + \frac{1}{R_B} \right) = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C} + \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B}$$

$$V_E = \frac{\dfrac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C} + \dfrac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B}}{\dfrac{1}{R_E} + \dfrac{1}{R_B} + \dfrac{1}{R_C}} = 2{,}02\ V$$

Então, as correntes serão dadas por:

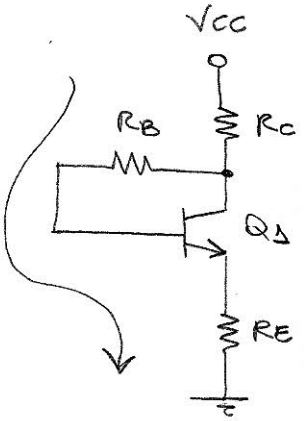
$$\begin{cases} I_E = \dfrac{V_E}{R_E} = 1{,}01\ mA \\ I_B = \dfrac{V_{CC} - (V_E + V_{BE})}{R_B} = 0{,}05\ mA \\ I_C = \dfrac{V_{CC} - (V_E + V_{CE})}{R_C} = 0{,}96\ mA \end{cases}$$

Para as tensões:

$$\begin{cases} V_E = 2{,}02\ V \\ V_C = V_E + V_{CE} = 2{,}22\ V \\ V_B = V_E + V_{BE} = 2{,}62\ V \end{cases}$$

Como $I_C = 1{,}01\ mA < \beta I_B = 5\ mA$, confirma-se a operação no modo de saturação.

(f) Neste circuito, o transistor Q1 certamente estará operando no modo ativo. Então:



Malha ①: $V_{CC} - R_C(I_C + I_B) - R_B I_B - V_{BE} - R_E I_E = 0$

$$V_{CC} - R_C(\beta+1)I_B - R_B I_B - V_{BE} - R_E(\beta+1)I_B = 0$$

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + (R_C + R_E)(\beta+1)} = 19{,}8\ \mu A$$

$$I_C = \beta I_B = 1{,}98\ mA$$

$$I_E = (\beta+1)I_B = 2{,}00\ mA$$

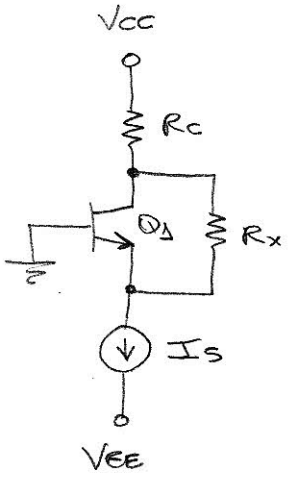
Assim:

$$V_C = V_{CC} - R_C(I_C + I_B) = 6\ V$$

$$V_E = R_E I_E = 3\ V$$

$$V_B = V_E + V_{BE} = 3{,}6\ V$$

(g) Supondo o transistor no modo ativo:



Eq. do nó de coletor:

$$\frac{V_{CC} - V_C}{R_C} = \frac{V_C - V_E}{R_X} + I_C$$

Eq. do nó de emissor:

$$I_E + \frac{V_C - V_E}{R_X} = I_S$$

$$\frac{I_C}{\alpha} + \frac{V_C - V_E}{R_X} = I_S$$

Sabendo-se que $V_E = -V_{BE} = -0{,}6\ V$, as incógnitas do sistema acima são V_C e I_C.

Assim, teremos:

$$I_C = I_C$$

$$\frac{V_{CC} - V_C}{R_C} - \frac{V_C - V_E}{R_X} = \alpha \left[I_S - \frac{V_C - V_E}{R_X} \right]$$

$$\frac{V_{CC} - V_C}{R_C} - (1 - \alpha) \frac{V_C - V_E}{R_X} = \alpha I_S$$

$$\frac{V_{CC} - V_C}{R_C} - \frac{1}{\beta + 1} \cdot \frac{V_C - V_E}{R_X} = \alpha I_S$$

$$\frac{V_{CC}}{R_C} + \frac{V_E}{R_X(\beta+1)} - \alpha I_S = V_C \left(\frac{1}{R_C} + \frac{1}{R_X(\beta+1)} \right)$$

$$V_C = \frac{\frac{V_{CC}}{R_C} + \frac{V_E}{R_X(\beta+1)} - \alpha I_S}{\frac{1}{R_C} + \frac{1}{R_X(\beta+1)}} = 2{,}02 \text{ V}$$

Sendo assim, teremos:

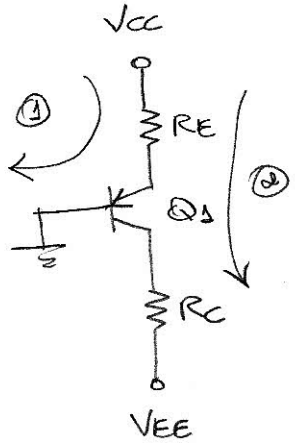
$$I_C = \frac{V_{CC} - V_C}{R_C} - \frac{V_C - V_E}{R_X} = 1{,}48 \text{ mA}$$

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = 14{,}8 \ \mu\text{A}$$

$$I_E = \frac{I_C}{\alpha} = 1{,}49 \text{ mA}$$

Como $V_B = 0$ e $V_C = 2{,}02$ V, temos que $V_C > V_B$ e o transistor está efetivamente no modo ativo.

(h) Supondo o transistor no modo de saturação:



Malha 1: $V_{CC} - R_E I_E - V_{EB} = 0$

$$I_E = \frac{V_{CC} - V_{EB}}{R_E} = 2 \text{ mA}$$

Malha 2: $V_{CC} - R_E I_E - V_{EC} - R_C I_C = V_{EE}$

$$I_C = \frac{V_{CC} - R_E I_E - V_{EC} - V_{EE}}{R_C} = 1{,}93 \text{ mA}$$

$$I_B = I_E - I_C = 2 - 1{,}93 = 0{,}07 \text{ mA}$$

Como $\beta I_B = 7 \text{ mA} > I_C = 1{,}93 \text{ mA}$, então o transistor está efetivamente na saturação.

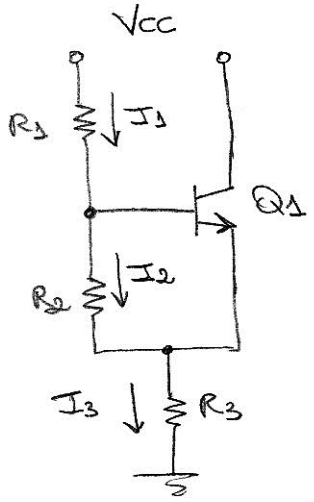
Assim:

$$V_B = 0$$

$$V_E = V_B + V_{EB} = 0{,}6 \text{ V}$$

$$V_C = V_E - V_{EC} = 0{,}4 \text{ V}$$

(i) Neste circuito, teremos que a tensão de coletor será sempre maior que a tensão de base, em virtude da queda de tensão em R_1. Assim, Q_1 deverá operar no modo ativo.



Como $V_{BE} \cong 0{,}6$ V, então:

$$I_2 = \frac{V_{BE}}{R_2} = \frac{0{,}6}{1{,}2} = 0{,}5 \text{ mA}$$

Escrevendo as equações nodais:

$$\begin{cases} \dfrac{V_E}{R_3} - I_2 - I_E = 0 \\[2ex] \dfrac{V_{CC} - V_B}{R_1} = I_B + I_2 \end{cases}$$

Reescrevendo as equações:

$$\begin{cases} \dfrac{V_E}{R_3} - I_2 = (\beta + 1) I_B \\[2ex] \dfrac{V_{CC} - (V_E + 0{,}6)}{R_1} = I_2 = I_B \end{cases}$$

Então:

$$I_B = I_B$$

$$\frac{1}{\beta+1}\left[\frac{V_E}{R_3} - I_2\right] = \frac{V_{CC} - V_E - 0{,}6}{R_1} - I_2$$

$$\frac{V_E}{R_3(\beta+1)} - \frac{I_2}{\beta+1} = \frac{V_{CC} - 0{,}6}{R_1} - I_2 - \frac{V_E}{R_1}$$

$$V_E\left[\frac{1}{R_3(\beta+1)} + \frac{1}{R_1}\right] = \frac{V_{CC} - 0{,}6}{R_1} - \frac{\beta}{\beta+1} I_2$$

$$V_E = \frac{\dfrac{V_{CC} - 0{,}6}{R_1} - \dfrac{\beta}{\beta+1} I_2}{\dfrac{1}{R_3(\beta+1)} + \dfrac{1}{R_1}} = 2{,}97 \text{ V}$$

Dessa forma:

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_E - 0{,}6}{R_1} - I_2 = 9{,}76 \ \mu A$$

$$I_C = \beta I_B = 0{,}976 \text{ mA}$$

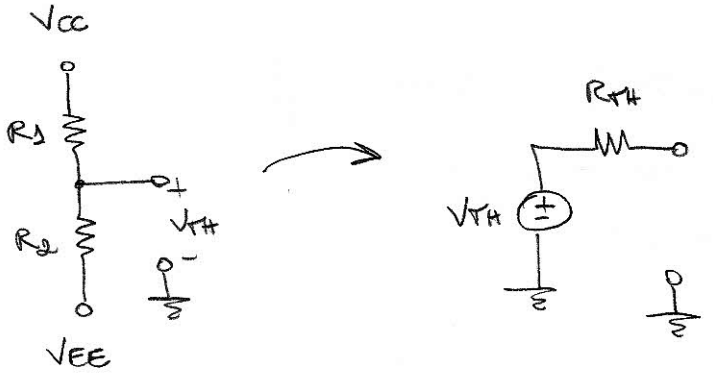
$$I_E = (\beta+1) I_B = 0{,}986 \text{ mA}$$

Com respeito às tensões, teremos:

$$V_B = V_E + 0{,}6 = 3{,}57 \text{ V}$$

$$V_C = V_{CC} = 5 \text{ V}$$

(j) Primeiramente, obtemos o circuito equivalente de Thévenin do divisor resistivo na base de Q_1:



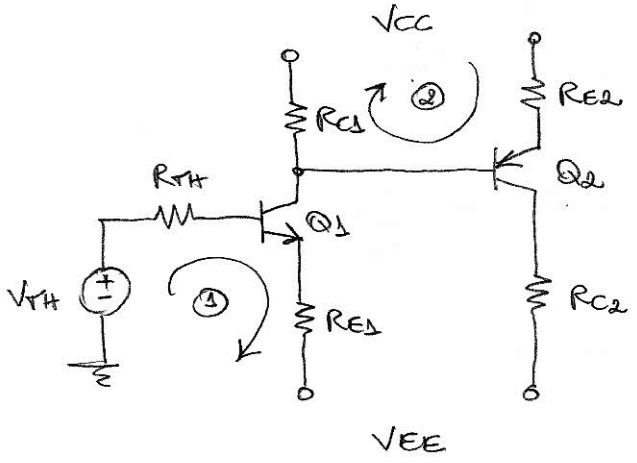
$$V_{TH} = \frac{V_{CC} - V_{EE}}{R_1 + R_2} \cdot R_2 + V_{EE}$$

$$= \frac{R_2}{R_1+R_2} V_{CC} + \frac{R_1}{R_1+R_2} V_{EE}$$

$$V_{TH} = -2{,}43 \text{ V}$$

$$R_{TH} = R_1 // R_2 = 3{,}86 \text{ k}\Omega$$

Substituindo no circuito original:



Supondo Q1 e Q2 no modo ativo, podemos escrever as equações das malhas ① e ②:

Malha ①:

$$V_{TH} - R_{TH} I_{B1} - V_{BE} - R_{E1} I_{E1} = V_{EE}$$

$$V_{TH} - R_{TH} I_{B1} - V_{BE} - R_{E1}(\beta+1) I_{B1} = V_{EE}$$

$$I_{B1} = \frac{V_{TH} - V_{BE} - V_{EE}}{R_{TH} + R_{E1}(\beta+1)} = 18{,}8\ \mu A$$

$$I_{C1} = \beta I_{B1} = 1{,}88\ mA$$

$$I_{E1} = (\beta+1) I_{B1} = 1{,}90\ mA$$

Malha ②:

$$\cancel{V_{CC}} - R_{E2} I_{E2} - V_{EB} = \cancel{V_{CC}} - R_{C1}(I_{C1} - I_{B2})$$

$$-R_{E2}(\beta+1) I_{B2} - V_{EB} = -R_{C1} I_{C1} + R_{C1} I_{B2}$$

$$I_{B2} = \frac{R_{C1} I_{C1} - V_{EB}}{R_{C1} + R_{E2}(\beta+1)} = 8{,}64\ \mu A$$

$$I_{C2} = \beta I_{B2} = 0{,}864\ mA$$

$$I_{E2} = (\beta+1) I_{B2} = 0{,}873\ mA$$

Tensões:

$$V_{C1} = V_{CC} - R_{C1}(I_{C1} - I_{B2}) = 1{,}26\ V$$

$$V_{E1} = V_{EE} + R_{E1} I_{E1} = -3{,}1\ V$$

$$V_{B1} = V_{E1} + 0{,}6 = -2{,}5\ V$$

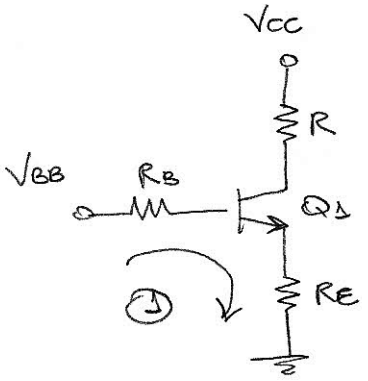
$$V_{B2} = V_{C1} = 1{,}26\ V$$

$$V_{E2} = V_{B2} + V_{EB} = 1{,}86\ V$$

$$V_{C2} = V_{EE} + R_{C2} I_{E2} = -2{,}38\ V$$

Como $V_{C1} > V_{B1}$, o transistor Q1 está no modo ativo. Além disso, como $V_{C2} < V_{B2}$, Q2 também estará no modo ativo.

2 (a) Escrevendo a equação de malha:



$$V_{BB} - R_B I_B - V_{BE} - R_E I_E = 0$$

$$V_{BB} - R_B I_B - V_{BE} - R_E(\beta+1) I_B = 0$$

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B + R_E(\beta+1)} = 19{,}8\ \mu A$$

$$I_C = \beta I_B = 1{,}98\ mA$$

$$I_E = (\beta+1) I_B = 2{,}01\ mA$$

Então:

$$V_E = R_E I_E = 3\ V$$

$$V_B = V_E + V_{BE} = 3{,}6\ V$$

Para que Q1 se mantenha no modo ativo, a junção BC deverá estar reversamente polarizada. Então:

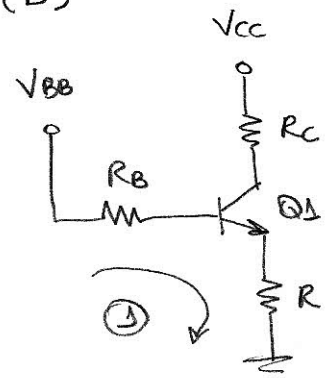
$$V_C > V_B$$

$$V_{CC} - R I_C > V_B$$

$$10 - R \cdot 1{,}98 > 3{,}6$$

$$R < 3{,}23\ k\Omega$$

(b)



Escrevendo a eq. de malha:

$$V_{BB} - R_B I_B - V_{BE} - R I_E = 0$$

$$V_{BB} - R_B I_B - V_{BE} - R(\beta+1) I_B = 0$$

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B + R(\beta+1)}$$

$$I_C = \beta I_B = \beta \cdot \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B + R(\beta+1)}$$

$$I_E = (\beta+1) I_B = (\beta+1) \cdot \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B + R(\beta+1)}$$

Para operar no modo ativo, temos que garantir:

$$V_C > V_B$$

$$V_{CC} - R_C I_C > R I_E + V_{BE}$$

$$V_{CC} - R_C \beta \frac{(V_{BB} - V_{BE})}{R_B + R(\beta+1)} > R(\beta+1) \frac{(V_{BB} - V_{BE})}{R_B + R(\beta+1)} + V_{BE}$$

$$V_{CC} - V_{BE} > \left(R_C \beta + R(\beta+1)\right) \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B + R(\beta+1)}$$

$$(V_{CC} - V_{BE})\left(R_B + R(\beta+1)\right) > \left(R_C \beta + R(\beta+1)\right)(V_{BB} - V_{BE})$$

$$\left[(V_{CC} - V_{BE}) - (V_{BB} - V_{BE})\right](\beta+1) R > \beta R_C (V_{BB} - V_{BE}) - R_B (V_{CC} - V_{BE})$$

$$R > \frac{\beta R_C (V_{BB} - V_{BE}) - R_B (V_{CC} - V_{BE})}{(V_{CC} - V_{BB})(\beta+1)}$$

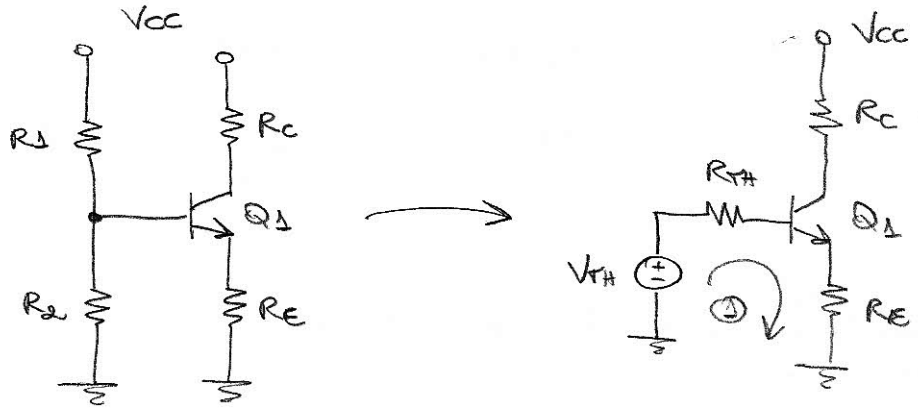
$$R > 1{,}25 \text{ k}\Omega$$

3 Considerando, para efeito de projeto, que: $I_C \approx I_E$, então:

$$R_C = \frac{V_{CC} - V_C}{I_C} = \frac{12 - 7}{1} = 5\,k\Omega = 10k\Omega // 10k\Omega$$

$$R_E = \frac{V_E}{I_E} = \frac{2}{1} = 2\,k\Omega = 1\,k\Omega + 1\,k\Omega$$

Para calcular R_1 e R_2, usamos o equivalente de Thévenin do divisor resistivo:



$$V_{TH} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{CC}$$

$$R_{TH} = R_1 // R_2$$

Malha 1: $V_{TH} - R_{TH} I_B - V_{BE} - R_E I_E = 0$

$$V_{TH} - R_{TH} I_B - V_{BE} - R_E(\beta+1) I_B = 0$$

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

$$I_C = \beta I_B = \beta \cdot \frac{V_{TH} - V_{BE}}{R_{TH} + R_E(\beta+1)}$$

Para obter ± 5% de variação em I_C, pode-se fazer:

$$\begin{cases} 1{,}05 = 800 \cdot \dfrac{V_{TH} - 0{,}6}{R_{TH} + 2 \cdot 801} \\[2ex] 0{,}95 = 100 \cdot \dfrac{V_{TH} - 0{,}6}{R_{TH} + 2 \cdot 101} \end{cases}$$

Resolvendo o sistema, obtém-se:

$$\begin{cases} R_{TH} = 22{,}42\,k\Omega \\ V_{TH} = 2{,}73\,V \end{cases}$$

Então:

$$V_{TH} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC}$$

$$R_{TH} = R_1 // R_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = R_1 \frac{V_{TH}}{V_{CC}} \quad \therefore \quad R_1 = R_{TH} \frac{V_{CC}}{V_{TH}}$$

$$\Rightarrow \quad R_1 = R_{TH} \frac{V_{CC}}{V_{TH}} = 98{,}5\ k\Omega \approx 100\ k\Omega$$

$$V_{TH} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{CC} \quad \therefore \quad V_{TH}(R_1 + R_2) = R_2 V_{CC}$$

$$R_1 V_{TH} = R_2 (V_{CC} - V_{TH})$$

$$R_2 = \frac{R_1 V_{TH}}{V_{CC} - V_{TH}}$$

$$\Rightarrow \quad R_2 = \frac{R_1 V_{TH}}{V_{CC} - V_{TH}} = 29{,}5\ k\Omega \cong 27\ k\Omega + 2{,}2\ k\Omega$$

ELETRÔNICA II
(LISTA 1 – Questão 4)

Os circuitos a serem simulados são apresentados na Figura 3.1.

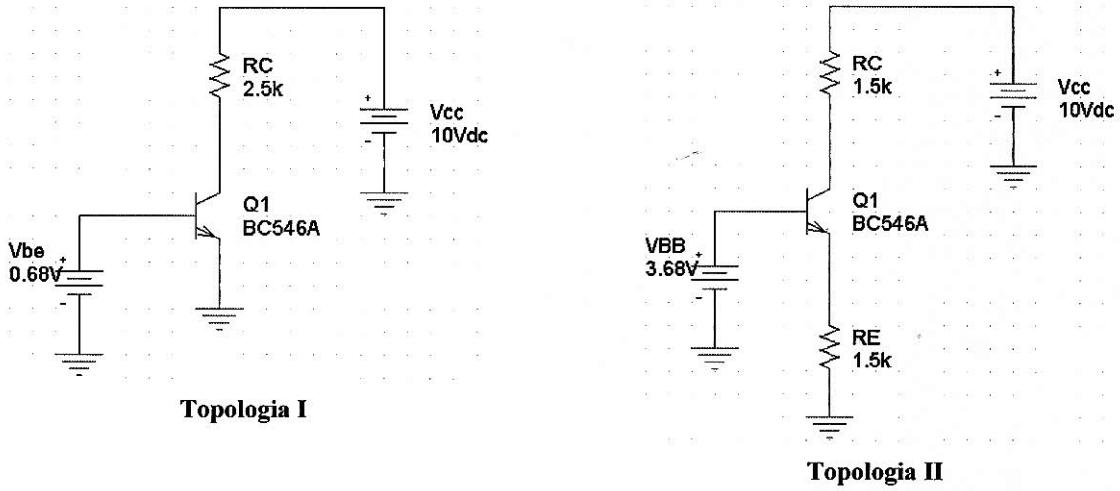


Figura 3.1 – Circuitos da simulação da Questão 3.

Realizando a simulação *Bias Point* de ambos os circuitos da Figura 3.1 para os valores de temperatura especificados no enunciado, obtemos os resultados apresentados nas Tabelas 3.1 e 3.2 para as topologias I e II, respectivamente.

Tabela 3.1 – Resultados da Topologia I.

Temperatura	0°C	20 °C	40 °C	60 °C	80 °C
V_{BE}	0.68 V	0.68 V	0.68 V	0.68 V	0.68 V
I_C	0.593 mA	2.288 mA	3.987 mA	3.993 mA	3.993 mA

Tabela 3.2 – Resultados da Topologia II.

Temperatura	0°C	20 °C	40 °C	60 °C	80 °C
V_{BE}	0.711 V	0.676 V	0.641 V	0.606 V	0.571 V
I_C	1.969 mA	1.991 mA	2.015 mA	2.038 V	2.061 mA

(a) A tensão de joelho da curva I_C x V_{BE} diminui com a temperatura. No circuito da Topologia I, como a tensão V_{BE} está fixa, com o aumento de temperatura, verificou-se um aumento significativo da corrente de coletor, justamente por causa do deslocamento da característica I_C x V_{BE} com a temperatura. Esse efeito também afetou os resultados obtidos para o circuito da Topologia II. No entanto, nesse caso, a corrente de coletor não variou muito, porque a tensão V_{BE} foi significativamente reduzida para compensar o efeito do aumento da temperatura. Além disso, deve ser mencionado que a corrente de coletor no circuito da Topologia I

cresceu muito de 0 até 40 °C. Depois disso, o transistor entrou em saturação, fazendo com que a corrente de coletor não sofresse um aumento significativo de 40 até 80 °C.

(b) O circuito da Topologia II é o mais estável, pois a corrente de coletor variou bem menos ao sofrer a mesma variação de temperatura que o circuito da Topologia I. Isso se deve ao fato da inclusão do resistor R_E no emissor, produzindo um efeito de realimentação negativa sobre o circuito. Assim, para uma dada tensão V_{BE}, com o aumento da temperatura, a corrente I_C tende a aumentar (como verificado no circuito da Topologia I), mas um aumento em I_C fará com que I_E também aumente e a tensão V_E também irá aumentar. Como V_B está fixa, um aumento em V_E produzirá uma redução em V_{BE}. Se V_{BE} é reduzida, então a corrente de coletor I_C também será reduzida, tendendo a voltar ao seu valor normal. Assim, o que verificamos na Tabela 3.2 foi justamente uma redução em V_{BE} para que a corrente de coletor ficasse mais estável frente às variações de temperatura.