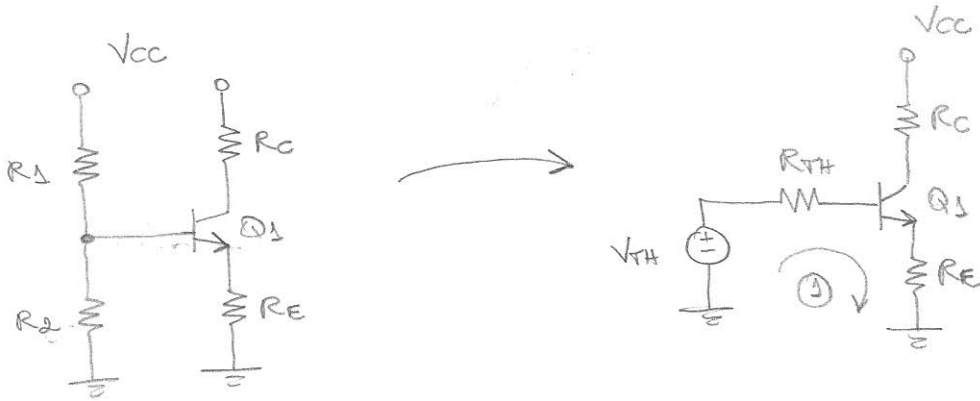


1 (a) Fazendo o equivalente de Thévenin:



onde:

$$\begin{cases} V_{TH} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{CC} = 3,6 \text{ V} \\ R_{TH} = R_1 // R_2 = 4,6 \text{ k}\Omega \end{cases}$$

Supondo modo ativo e escrevendo a eq. da malha 1:

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

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

$$I_B = \frac{V_{TH} - V_{BE}}{R_{TH} + R_E (\beta + 1)} = 19,2 \mu\text{A}$$

então:

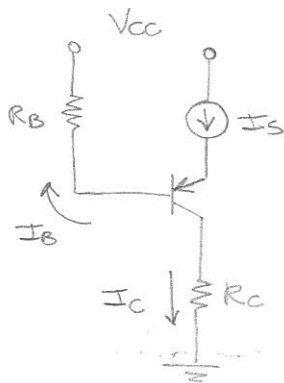
$$\begin{cases} I_C = \beta I_B = 1,92 \text{ mA} \\ I_E = I_C + I_B = 1,94 \text{ mA} \end{cases}$$

Portanto, temos:

$$\begin{cases} V_C = V_{CC} - R_C I_C = 11,12 \text{ V} \\ V_E = R_E I_E = 2,95 \text{ V} \\ V_B = V_E + V_{BE} = 3,55 \text{ V} \end{cases}$$

Como $V_B < V_C$, temos SBC rev. esp., o que confirma o modo ativo.

② Supondo o modo ativo, teremos:



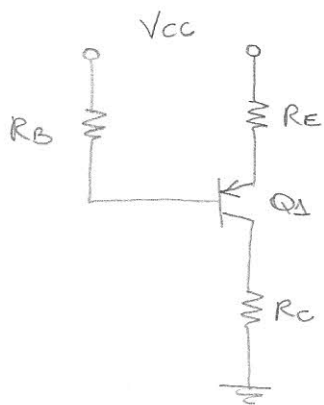
$$\left\{ \begin{aligned} I_E &= I_S = 1 \text{ mA} \\ I_B &= \frac{I_E}{\beta + 1} = 9,9 \mu\text{A} \\ I_C &= \frac{\beta}{\beta + 1} \cdot I_E = 0,99 \text{ mA} \end{aligned} \right.$$

Então:

$$\left\{ \begin{aligned} V_C &= R_C I_C = 0,99 \text{ V} \\ V_B &= V_{CC} + R_B I_B = 6,98 \text{ V} \\ V_E &= V_B + V_{EB} = 7,58 \text{ V} \end{aligned} \right.$$

Portanto, teremos $V_B > V_C$, o que faz com que JBC esteja rev. pol., o que confirma o modo ativo.

③ Supondo a operação em corte:



$$I_B = I_C = I_E = 0$$

Então:

$$\left\{ \begin{aligned} V_E &= V_{CC} - R_E I_E = 5 \text{ V} \\ V_C &= R_C I_C = 0 \text{ V} \\ V_B &= V_{CC} + R_B I_B = 5 \text{ V} \end{aligned} \right.$$

Com esses resultados, temos:

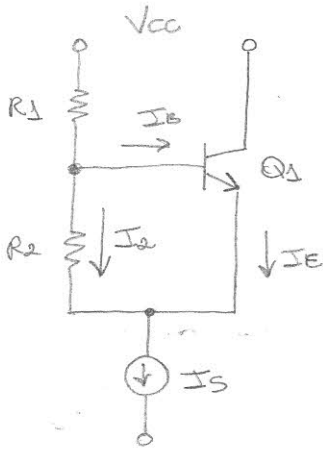
$$V_E = V_B \longrightarrow \text{JBE despolarizada}$$

$$V_C < V_B \longrightarrow \text{JBC rev. pol.}$$

Portanto, Q1 está em corte.

d) Supondo a operação em modo ativo;

2



$$I_E = \frac{V_{BE}}{R_2} = 0,5 \text{ mA}$$

$$I_E = I_S - I_B = 1 \text{ mA}$$

Portanto:

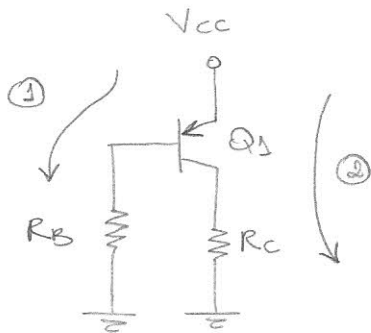
$$\begin{cases} I_C = \frac{\beta}{\beta+1} I_E = 0,99 \text{ mA} \\ I_B = \frac{I_C}{\beta} = 9,9 \mu\text{A} \end{cases}$$

Finalmente, temos:

$$\begin{cases} V_C = V_{CC} = 5 \text{ V} \\ V_B = V_{CC} - R_1 (I_E + I_B) = 2,96 \text{ V} \\ V_E = V_B - V_{BE} = 2,36 \text{ V} \end{cases}$$

Como $V_C > V_B$, então temos JBC rev. pol., o que confirma a operação no modo ativo.

e) Supondo Q1 no saturação, temos:



Malha ①:

$$V_{CC} - V_{EB} - R_B I_B = 0$$

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{EB}}{R_B} = 0,08 \text{ mA}$$

Malha ②:

$$V_{CC} - V_{EC} - R_C I_C = 0$$

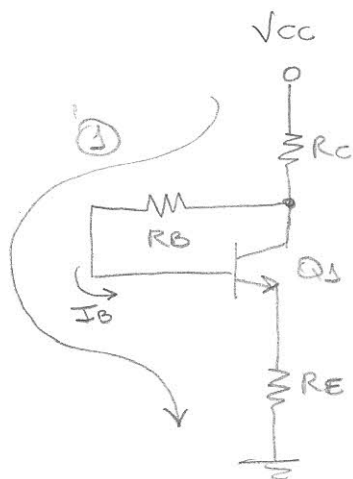
$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{EC}}{R_C} = 2 \text{ mA}$$

Como $I_C = 2 \text{ mA} < \beta I_B = 8 \text{ mA}$, Q1 está saturado.

Então:

$$\begin{cases} I_C = 2 \text{ mA} \\ I_B = 0,08 \text{ mA} \\ I_E = 2,08 \text{ mA} \end{cases} \quad \begin{cases} V_C = V_{CC} - V_{EC} = 4,8 \text{ V} \\ V_B = V_{CC} - V_{EB} = 4,4 \text{ V} \\ V_E = V_{CC} = 5 \text{ V} \end{cases}$$

(f) Essa topologia certamente estará no modo ativo, pois a corrente I_B fará com que $V_C > V_B$ tornando o JBC rev. pol. Assim:



Malha (1):

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

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

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + (R_C + R_E) (\beta + 1)} = 39,8 \mu\text{A}$$

Então:

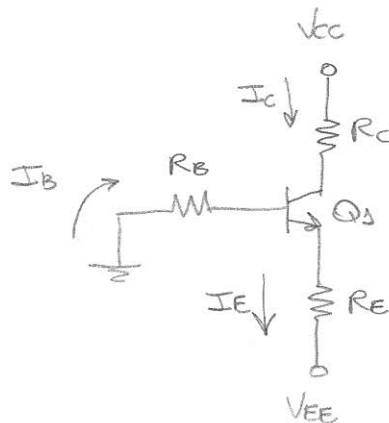
$$\begin{cases} I_C = \beta I_B = 3,98 \text{ mA} \\ I_E = I_C + I_B = 2,03 \text{ mA} \end{cases}$$

Portanto, teremos:

$$\begin{cases} V_C = V_{CC} - R_C (I_B + I_C) = 5,98 \text{ V} \\ V_E = R_E I_E = 2,03 \text{ V} \\ V_B = V_E + V_{BE} = 2,63 \text{ V} \end{cases}$$

(g) Supondo Q_1 operando na saturação, teremos:

$$\begin{cases} V_{CE} = 0,2 \text{ V} \\ V_{BE} = 0,6 \text{ V} \end{cases}$$



Escrevendo as equações de corrente:

3

$$I_E = I_C + I_B$$

$$\frac{V_E - V_{EE}}{R_E} = \frac{V_{CC} - V_C}{R_C} + \frac{0 - V_B}{R_B}$$

Expressando V_C e V_B em função de V_E , teremos:

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

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

$$V_E = \frac{\frac{V_{EE}}{R_E} + \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C} - \frac{V_{BE}}{R_B}}{\frac{1}{R_E} + \frac{1}{R_C} + \frac{1}{R_B}} = -2,04 \text{ V}$$

Nessa forma, as demais tensões são dadas por:

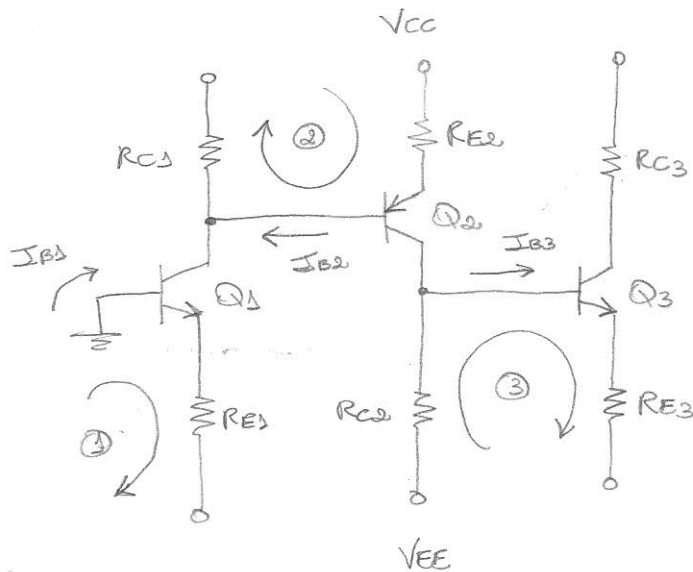
$$\begin{cases} V_C = V_E + V_{CE} = -1,84 \text{ V} \\ V_B = V_E + V_{BE} = -1,44 \text{ V} \end{cases}$$

Já as correntes, são dadas por:

$$\begin{cases} I_C = \frac{V_{CC} - V_C}{R_C} = 1,01 \text{ mA} \\ I_B = \frac{0 - V_B}{R_B} = 0,05 \text{ mA} \\ I_E = I_C + I_B = 1,06 \text{ mA} \end{cases}$$

Como $I_C = 1,01 \text{ mA} < \beta I_B = 5 \text{ mA}$, o transistor Q1 está mesmo operando na saturação.

①) Supondo todos os transistores no modo ativo:



Malha ①:

$$0 - V_{BE} - R_{E1} I_{E1} = V_{EE}$$

$$I_{E1} = - \frac{V_{EE} + V_{BE}}{R_{E1}}$$

$$I_{E1} = 2 \text{ mA}$$

Então, as correntes de Q1 são:

$$\begin{cases} I_{C1} = \frac{\beta}{\beta+1} \cdot I_{E1} = 1,98 \text{ mA} \\ I_{B1} = \frac{I_{C1}}{\beta} = 19,8 \mu\text{A} \end{cases}$$

Malha ②:

$$\begin{aligned} V_{CC} - R_{E2} \cdot I_{E2} - V_{BE} + R_{C1} (I_{C1} - I_{B2}) &= V_{CC} \\ - R_{E2} (\beta+1) I_{B2} - V_{BE} + R_{C1} I_{C1} - R_{C1} I_{B2} &= 0 \end{aligned}$$

$$I_{B2} = \frac{R_{C1} I_{C1} - V_{BE}}{R_{C1} + R_{E2} (\beta+1)} = 9,17 \mu\text{A}$$

Então, as correntes de Q2 são:

$$\begin{cases} I_{C2} = \beta I_{B2} = 0,917 \text{ mA} \\ I_{E2} = (\beta+1) I_{B2} = 0,98 \text{ mA} \end{cases}$$

Malha ③:

$$\begin{aligned} V_{EE} + R_{C2} (I_{C2} - I_{B3}) - V_{BE} - R_{E3} I_{E3} &= V_{EE} \\ R_{C2} I_{C2} - R_{C2} I_{B3} - V_{BE} - R_{E3} (\beta+1) I_{B3} &= 0 \end{aligned}$$

$$I_{B3} = \frac{R_{C2} I_{C2} - V_{BE}}{R_{C2} + R_{E3} (\beta + 1)} = 18,7 \mu A$$

Então, as demais correntes de Q_3 são:

$$\begin{cases} I_{C3} = \beta I_{B3} = 1,87 \text{ mA} \\ I_{E3} = (\beta + 1) I_{B3} = 1,88 \text{ mA} \end{cases}$$

Com todas as correntes calculadas, podemos obter as tensões nos terminais de todos os transistores:

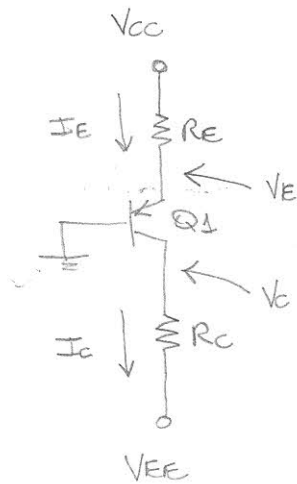
$$Q_1 \begin{cases} V_{C1} = V_{CC} - R_{C1} (I_{C1} - I_{E2}) = 2,04 \text{ V} \\ V_{B1} = 0 \text{ V} \\ V_{E1} = V_{B1} - V_{BE} = -0,6 \text{ V} \end{cases}$$

$$Q_2 \begin{cases} V_{C2} = V_{EE} + R_{C2} (I_{C2} - I_{B3}) = -1,19 \text{ V} \\ V_{B2} = V_{C1} = 2,04 \text{ V} \\ V_{E2} = V_{B2} + V_{EB} = 2,64 \text{ V} \end{cases}$$

$$Q_3 \begin{cases} V_{C3} = V_{CC} - R_{C3} I_{C3} = 3,13 \text{ V} \\ V_{B3} = V_{C2} = -1,19 \text{ V} \\ V_{E3} = V_{B3} - V_{BE} = -1,79 \text{ V} \end{cases}$$

De acordo com os resultados acima, verifica-se que a junção BC de todos os três transistores está rev. pol. Dessa forma, todos os três estão operando no modo ativo.

② Como $V_B = 0$ e deseja-se $V_E = -2V$, a JBC de Q_1 estará rev. pdl. Assim, Q_1 deverá ser projetado para operar no modo ativo.



Pela corrente de emissor:

$$R_E = \frac{V_{CC} - V_E}{I_E} = \frac{V_{CC} - (V_B + V_{EB})}{I_E}$$

$$R_E = \frac{5 - 0,6}{1} = \frac{4,4}{1} = 4,4 \text{ k}\Omega$$

Pode ser implementado por dois resistores de $2,2 \text{ k}\Omega$ em série.

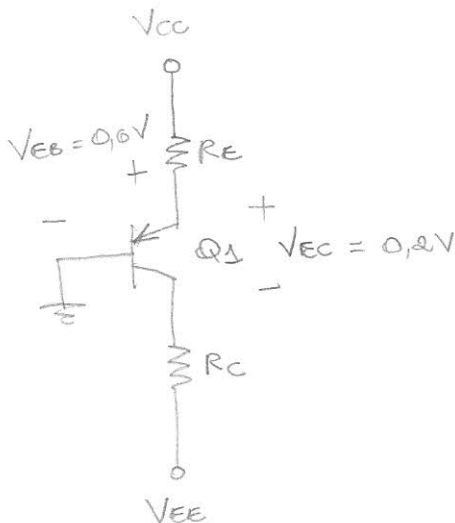
A corrente de coletor pode ser aproximadamente dada por: $I_C = \alpha I_E \approx I_E = 1 \text{ mA}$.

Então:

$$R_C = \frac{V_C - V_{EE}}{I_C} = \frac{-2 + 5}{1} = 3 \text{ k}\Omega$$

Este resistor pode ser implementado por dois de $1,5 \text{ k}\Omega$ em série.

Enquanto Q_1 estiver no modo ativo, R_C pode variar, causando variações em V_C que não afetará muito a corrente I_C . Para que I_C passe a variar com variações em R_C , Q_1 deve operar na saturação:



$$\begin{cases} V_B = 0 \\ V_E = V_B + V_{EB} = 0,6 \text{ V} \\ V_C = V_E - V_{EC} = 0,4 \text{ V} \end{cases}$$

Assim, para que I_C se mantenha constante, devemos ter:

$$V_C < 0,4 \text{ V}$$

$$V_{EE} + R_C \cdot I_C < 0,4$$

$$R_C < \frac{0,4 - V_{EE}}{I_C}$$

Enquanto Q_1 estiver no modo ativo: $I_C = \alpha I_E \cong I_E$.
Então:

$$R_C < \frac{0,4 - (-5)}{1} = 5,4 \text{ k}\Omega$$

O valor máximo que R_C pode assumir sem que Q_1 sature é $5,4 \text{ k}\Omega$.

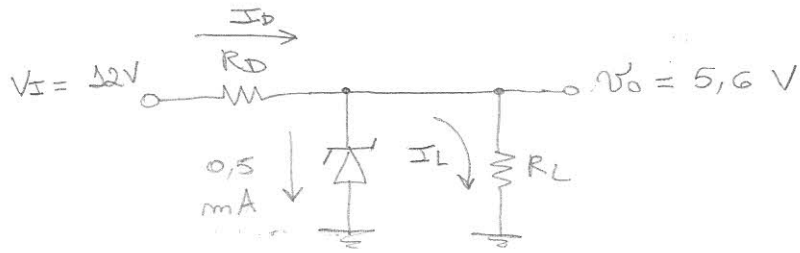
Se aumentarmos R_C além do limite máximo, Q_1 estará saturado. Dessa forma:

$$\begin{cases} I_E = \frac{V_{CC} - V_E}{R_E} = \frac{V_{CC} - V_{EB}}{R_E} & \text{(i)} \\ I_C = \frac{V_C - V_{EE}}{R_C} = \frac{V_{EB} - V_{EC} - V_{EE}}{R_C} & \text{(ii)} \\ I_B = I_E - I_C & \text{(iii)} \end{cases}$$

Como, na saturação, $V_{EB} = 0,6 \text{ V}$ e $V_{EC} = 0,2 \text{ V}$, teremos que I_E permanecerá constante.

Ao aumentar R_C , (ii) indica que I_C irá diminuir. Como I_E não muda, (iii) indica que I_B aumentará com a redução de I_C . Assim, cada vez mais $I_C < \beta I_B$, o que caracteriza a saturação.

- ③ (a) Como o diodo zener necessita de, no mínimo, 0,5 mA para atuar como regulador, a corrente máxima na carga será:



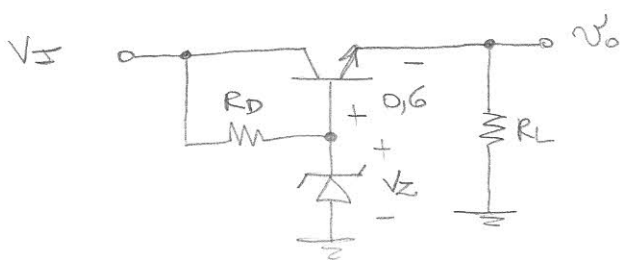
$$I_D = \frac{V_I - V_Z}{R_D} = \frac{12 - 5,6}{0,22} = 29 \text{ mA}$$

$$I_{L \text{ MÁX}} = I_D - I_{Z \text{ MÍN}} = 28,5 \text{ mA}$$

Então, a carga mínima será:

$$R_L = \frac{V_O}{I_{L \text{ MÁX}}} = \frac{5,6}{28,5} = 0,196 \text{ k}\Omega = 196 \Omega$$

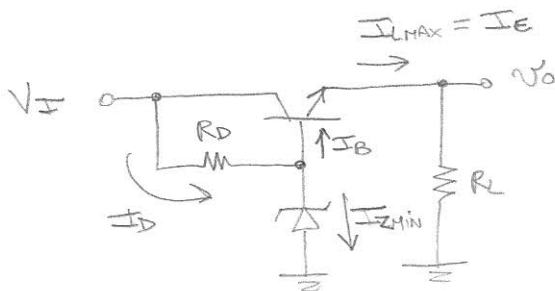
- (b) Por causa da queda de tensão em R_D , a polaridade da JBC será sempre reversa. Logo, o transistor estará no modo ativo. Assim:



$$V_O = V_Z - V_{BE} = 5,6 - 0,6$$

$$V_O = 5V$$

- (c) Da mesma forma, $I_{Z \text{ MÍN}} = 0,5 \text{ mA}$. dessa forma:



$$I_D = \frac{V_I - V_Z}{R_D} = \frac{12 - 5,6}{0,22}$$

$$I_D = 29 \text{ mA}$$

$$I_B = I_D - I_{CHIN} = 28,5 \text{ mA}$$

Como Q_2 está no modo ativo:

$$I_{LMAX} = I_E = (\beta + 1) I_B = 174 \text{ mA}$$

Então, o mínimo valor de R_E será:

$$R_{LMIN} = \frac{V_o}{I_{LMAX}} = \frac{5}{174} = 0,0287 \text{ k}\Omega = 28,7 \Omega$$

(d) O efeito de amplificação de corrente do transistor bipolar permite que uma corrente maior seja entregue à carga sem que o diodo zener deixe de atuar como regulador. Isso permite alimentar cargas bem pequenas.

④ Para conseguir um erro de $\pm 5\%$ em I_C , devemos ter:

$$\beta_1 = 500 \longrightarrow I_{CHIN} = 1,9 \text{ mA}$$

$$\beta_2 = 800 \longrightarrow I_{CHMAX} = 2,1 \text{ mA}$$

Assim:

$$\begin{cases} I_{CHIN} = \beta_1 \cdot \frac{V_{TH} - V_{BE}}{R_{TH} + R_E(\beta_1 + 1)} \\ I_{CHMAX} = \beta_2 \cdot \frac{V_{TH} - V_{BE}}{R_{TH} + R_E(\beta_2 + 1)} \end{cases}$$

Para resolver esse sistema, precisamos do valor de R_E , o qual pode ser obtido a partir das outras especificações:

$$R_E = \frac{V_E}{I_E} \approx \frac{V_E}{I_C} = \frac{3}{2} = 1,5 \text{ k}\Omega$$

dessa forma, o sistema acima fica:

$$\begin{cases} 1,9 = 100 \cdot \frac{V_{TH} - 0,6}{R_{TH} + 100 \cdot 1,5} \\ 2,1 = 800 \cdot \frac{V_{TH} - 0,6}{R_{TH} + 800 \cdot 1,5} \end{cases}$$

Resolvendo, temos:

$$\begin{cases} R_{TH} = 16,82 \text{ k}\Omega \\ V_{TH} = 3,8 \text{ V} \end{cases}$$

Com esses valores, podemos calcular R_1 e R_2 :

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

$$R_1 = R_{TH} \cdot \frac{V_{CC}}{V_{TH}}$$

$$R_1 = 44,26 \text{ k}\Omega$$

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

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

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

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

$$R_2 = 27,13 \text{ k}\Omega$$

Finalmente, obtemos o valor de R_C :

$$R_C = \frac{V_{CC} - V_C}{I_C} = \frac{10 - 7}{2} = 1,5 \text{ k}\Omega$$

ELETRÔNICA II (LISTA 1 – Questão 5)

Os circuitos a serem simulados são apresentados na Figura 3.1.

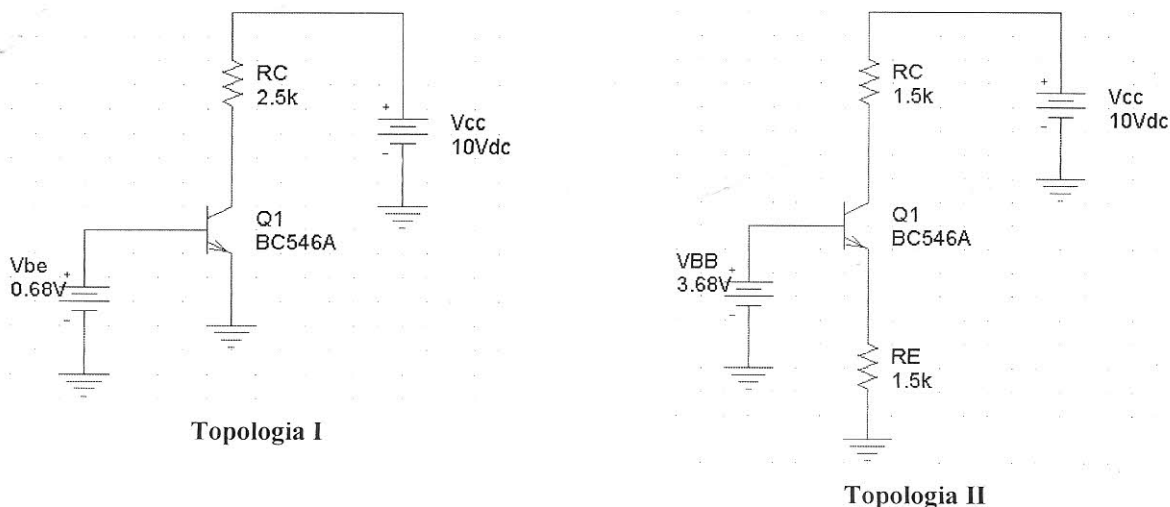


Figura 3.1 – Circuitos da simulação da Questão 3.

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 $I_C \times V_{BE}$ 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 $I_C \times V_{BE}$ 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.