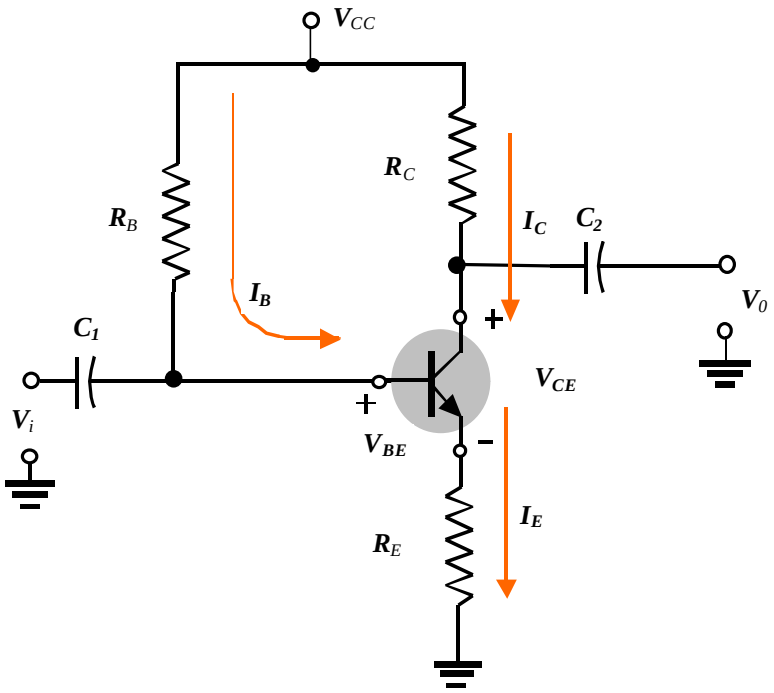
2. Circuito com polarização com resistor no emissor



Para análise DC, $X_{C1} = X_{C2} \rightarrow \propto$

Da malha base-emissor temos

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

$$I_E = (b + 1) I_B$$

$$V_{CC} - R_B I_B - V_{BE} - R_E (b + 1) I_B$$

$$I_B = (V_{CC} - V_{BE}) / [R_B + (b + 1) R_E]$$

$$I_B \approx (V_{CC} - V_{BE}) / [R_B + b R_E]$$

$$I_C \approx b (V_{CC} - V_{BE}) / [R_B + b R_E]$$

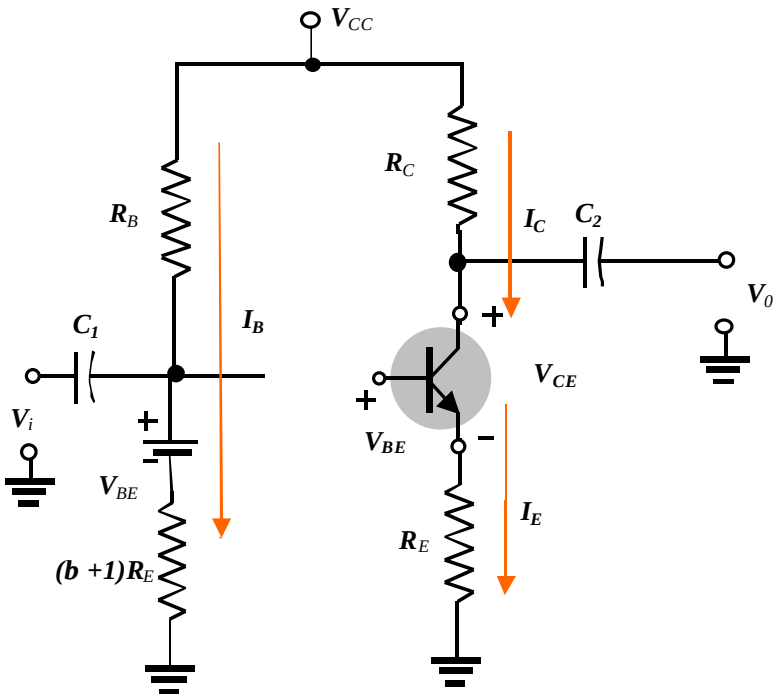
Se

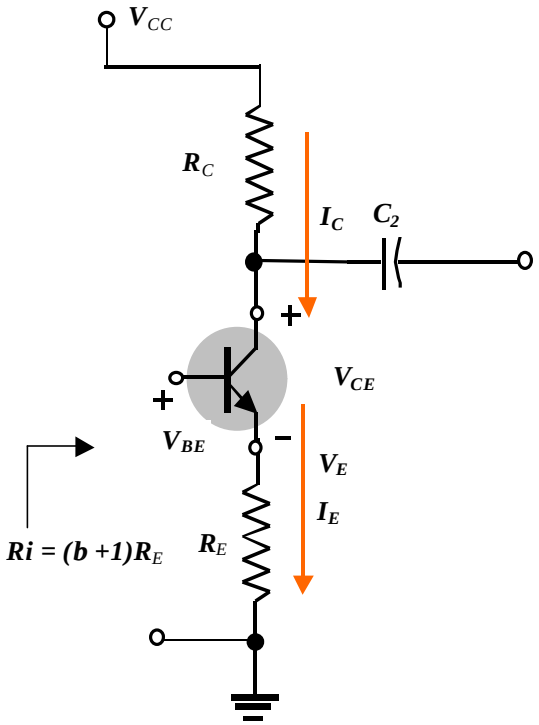
$$b R_E >> R_B \rightarrow I_B \approx (V_{CC} - V_{BE}) / b R_E$$

$$I_C \approx (V_{CC} - V_{BE}) / R_E$$

Independe de *b*

Circuito equivalente





Da malha coletor-emissor temos

$$V_{CC} - R_C I_C - V_{CE} - R_E I_E = 0 \xrightarrow{I_C \,»\, I_E} V_{CE} \,»\, V_{CC} - (R_C + R_E)\, I_C$$

$$V_E = R_E I_E \xrightarrow{I_C \,»\, I_E} V_E \,»\, R_E I_C$$

$$V_C = V_{CE} + V_E$$

E ainda,

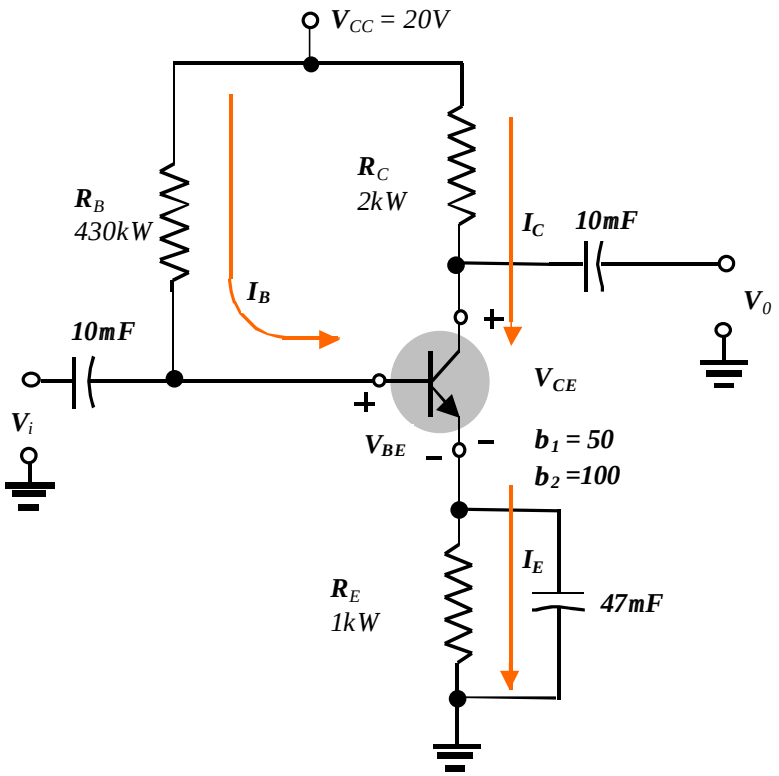
$$V_B = V_E + V_{BE} \xrightarrow{V_{BE} \,»\, 0{,}7V} V_B = V_E + 0{,}7V$$

- **Exercício**

Para o circuito abaixo, determine:

a) I_B **b)** I_C **c)** V_{CE} **d)** V_C **e)** V_E **f)** V_B

Para $b_1 = 50$ *e* $b_2 = 100$



Solução

a) Para $b_1 = 50$

I_B » $(V_{CC} - V_{BE})/[R_B + b\,R_E] = (20V - 0{,}7V)/[430kW + 50*1kW] =$ ***40,2mA***

Note que $b\,R_E << R_B$

$I_C = b_1\,I_B = (50)(40{,}2mA) =$ ***2,01mA ****

$V_{CE} = V_{CC} - (R_C + R_E)I_C = 20V - (2kW + 1kW)(2{,}01mA) =$ ***13,97V ****

V_E » $R_E I_C = 1kW\,(2{,}01mA) =$ ***2,01V***

$V_B = V_E + 0{,}7V = 2{,}01V + 0{,}7V =$ ***2,71V***

b) Para $b_2 = 100$

I_B » $(V_{CC} - V_{BE})/[R_B + b\,R_E] = (20V - 0{,}7V)/[430kW + 100*1kW] =$ ***36,4mA***

Note que $b\,R_E < R_B$

$I_C = b_1\,I_B = (100)(36{,}4mA) =$ ***3,64mA ****

$V_{CE} = V_{CC} - (R_C + R_E)I_C = 20V - (2kW + 1kW)(3{,}64mA) =$ ***9,08V ****

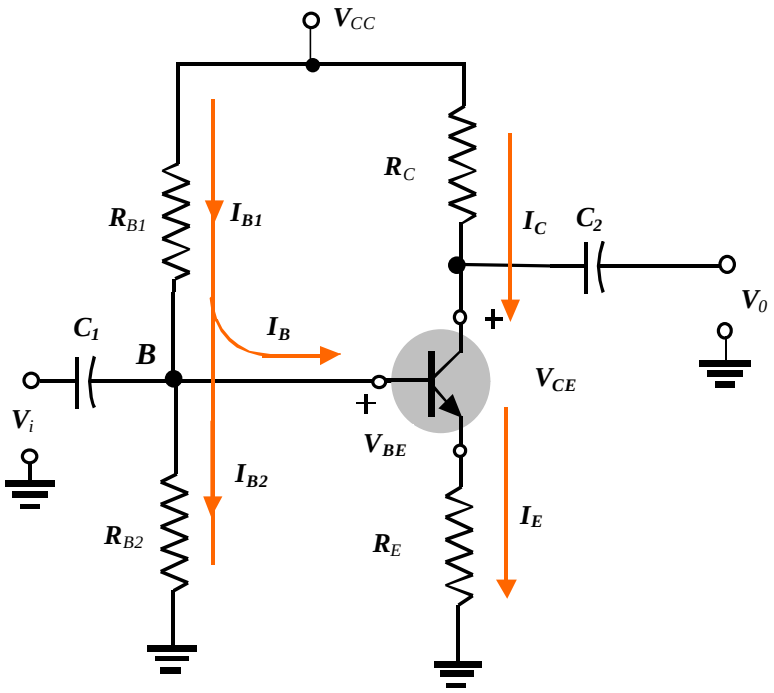
V_E » $R_E I_C = 1kW\,(3{,}64mA) =$ ***3,64V***

$V_B = V_E + 0{,}7V = 3{,}64V + 0{,}7V =$ ***4,34V***

Comentário: Uma variação de 100% em ***b*** produz cerca de 81% de variação em I_{CE}, apesar da condição $b\,R_E >> R_B$ não ser satisfeita.

- ***Existe um compromisso entre satisfazer a condição $b\,R_E >> R_B$ e o valor da tensão no emissor do transistor (V_E).***

3. Circuito com polarização por divisor de tensão



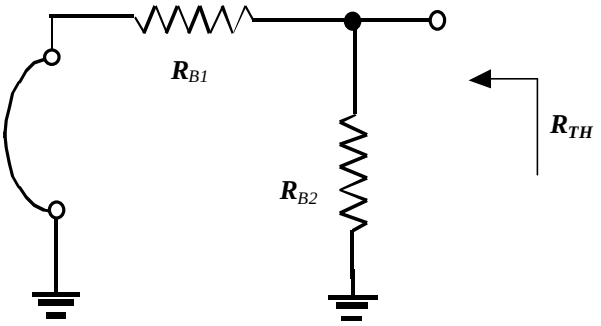
Para análise DC, $X_{C1} = X_{C2} \rightarrow \propto$

- ***Condição ideal**: Se I_{B1} » I_{B2} >> I_B, a tensão no ponto **B** do divisor resistivo R_{B1} - R_{B2}, não dependerá de I_B e conseqüentemente de b. Nesta condição, a corrente de coletor será definida pela tensão do emissor (V_B –0,7V) e o resistor R_E.*

Determinando a condição ideal

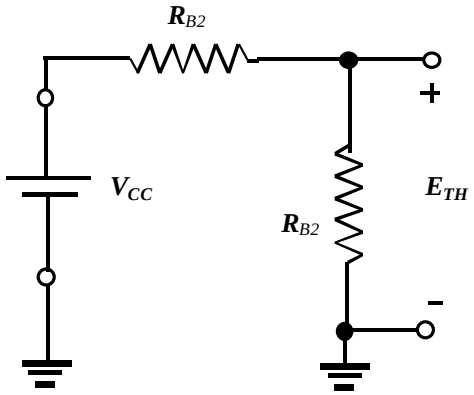
Para fins de simplificação, aqui é interessante utilizarmos o circuito equivalente de Thévenin para o circuito à esquerda do terminal de base.

Determinando R_{TH} : A fonte de tensão é substituída por um curto circuito, como mostra a figura abaixo.



$$R_{TH} = R_{B1} // R_{B2}$$

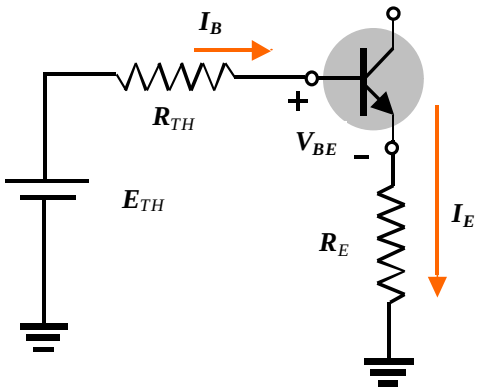
Determinando E_{TH} : A fonte de tensão retorna ao circuito, e a tensão de Thévenin de circuito aberto e determinada.



$$E_{TH} = V_{CC} \; R_{B1} \; / \; (R_{B2} + R_{B1})$$

Circuito equivalente

Da malha base-emissor temos



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

$$I_E = (b+1) I_B$$

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

Note a semelhança com as equações anteriores para determinação de I_B . As outras quantidades do circuito podem ser determinada do mesmo modo que o circuito de polarização com resistor no emissor.

Isto é,

$$I_C \;\text{»}\; \frac{b\,(E_{TH} - V_{BE})}{R_{TH} + b\,R_E}$$

$$V_E \;\text{»}\; R_E I_C$$

$$V_B = V_E + 0{,}7V$$

$$V_C = V_{CE} + V_E$$

$$V_{CE} \;\text{»}\; V_{CC} - (R_C + R_E)\,I_C$$

A condição que torna I_C_ fracamente dependente de I_B é obtida pela observação da equação , fazendo-se

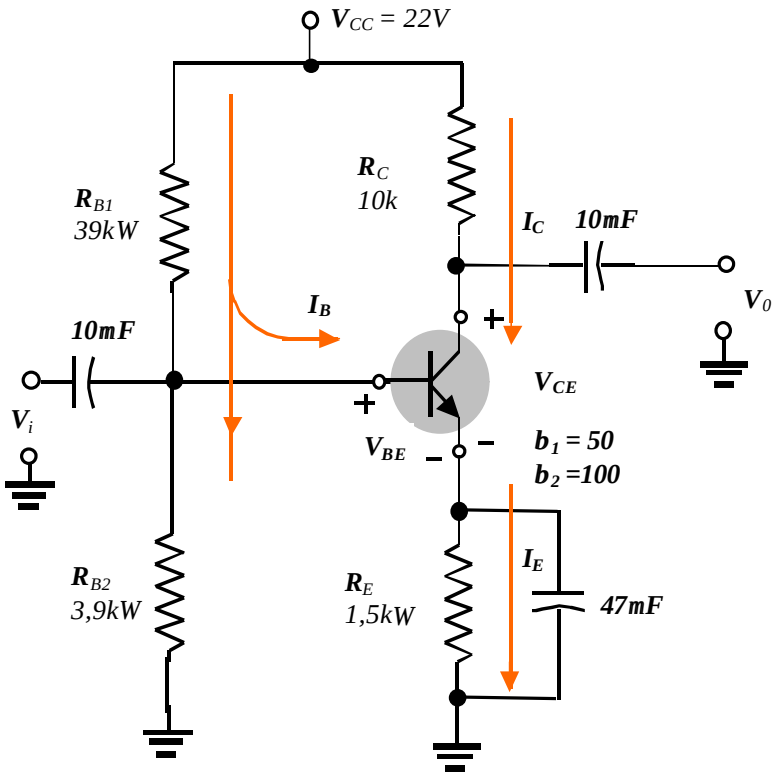
$$bR_E >> R_{TH}$$

- **Exercício**

Para o circuito abaixo, determine:

a) I_C **b)** V_{CE}

Para $b_1 = 50$ **e** $b_2 = 100$



Solução

a) Para $b_1 = 50$

$R_{TH} = R_{B1} // R_{B2} = [(39kW)(3,9kW)]/[39kW + 3,9kW] = 3,55kW$

$E_{TH} = V_{CC}\ R_{B1} / (R_{B2} + R_{B1}) = (22V)(39kW)/(39kW + 3,9kW) = 2V$

$I_C \approx b[(E_{TH} - V_{BE})] / [R_{TH} + b\ R_E] = 50[(2V - 0,7V) / [3,55kW + (50)(1,5kW)] =$

$= \mathbf{0,83\ mA}$

$V_{CE} = V_{CC} - (R_C + R_E)I_C = 22V - (10kW + 1,5kW)0,83mA = \mathbf{12,45V}$

Note que $b\ R_E >> R_{TH}$

b) Para $b_2 = 100$

$R_{TH} = R_{B1} // R_{B2} = [(39kW)(3,9kW)]/[39kW + 3,9kW] = 3,55kW$

$E_{TH} = V_{CC}\ R_{B1} / (R_{B2} + R_{B1}) = (22V)(39kW)/(39kW + 3,9kW) = 2V$

$I_C \approx b[(E_{TH} - V_{BE})] / [R_{TH} + b\ R_E] = 100[(2V - 0,7V) / [3,55kW + (100)(1,5kW)]$
$=$

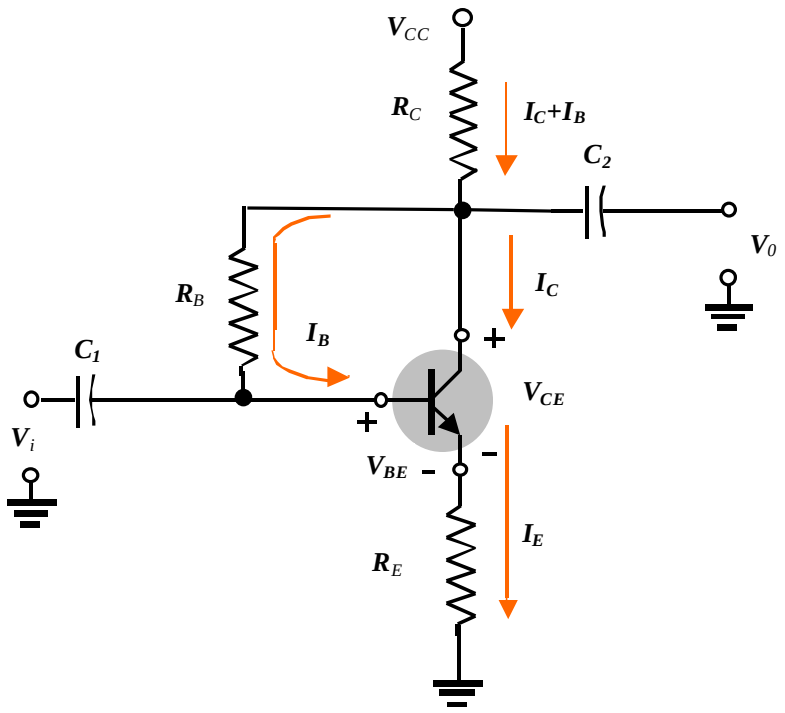
$= \mathbf{0,85\ mA}$

$V_{CE} = V_{CC} - (R_C + R_E)I_C = 22V - (10kW + 1,5kW)0,85mA = \mathbf{12,45V}$

Note que $b\ R_E >> R_{TH}$

Comentário: Uma variação de 100% em ***b*** produz apenas de 2,5% de variação em I_C, devido a condição $b\ R_E >> R_B$ ser satisfeita.

4. Circuito de polarização com realimentação de tensão



Para análise DC, $X_{C1} = X_{C2} \longrightarrow \propto$

Da malha base-emissor temos

$I_E = I_C + I_B$

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

$$\downarrow$$

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

$$\downarrow$$

$$I_E = (b+1) I_B \longrightarrow I_B = (V_{CC} - V_{BE})/[R_B + (b+1)(R_E + R_C)]$$

$$\downarrow$$

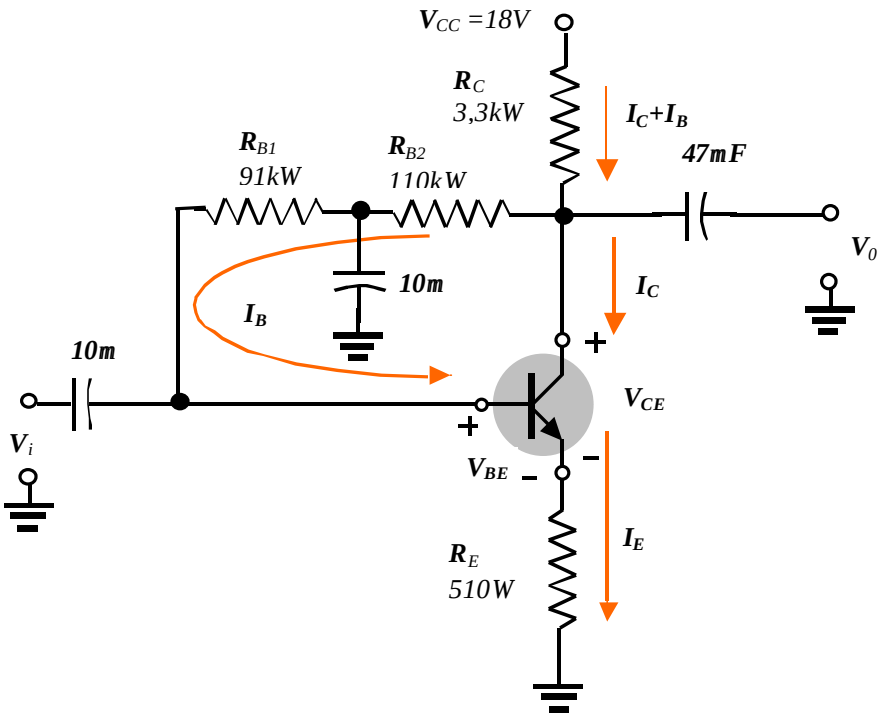
$$I_B = (V_{CC} - V_{BE})/[R_B + b(R_E + R_C)]$$

- **Exercício**

Para o circuito abaixo, determine:

a) I_B **b)** I_C **c)**V_{CE} **c)**V_E **d)**V_B

Para $b_1 = 50$ *e* $b_2 = 100$



Solução

a) Para $b_1 = 50$

$$R_B = R_{B1} + R_{B2}$$

$I_B \approx (V_{CC} - V_{BE})/[R_B + b(R_E + R_C)] = (18V - 0{,}7V)/[201kW + 50(510W + 3{,}3kW]$

$= \mathbf{44{,}1mA}$

Note que $b\,R_E < R_B$

$I_C = b_1 I_B = (50)(44{,}1mA) = \mathbf{2{,}21mA}$

$V_{CE} = V_{CC} - (R_C + R_E)I_C = 18V - (3{,}3kW + 510W)(2{,}21mA) = \mathbf{9{,}57V}$

$V_E \approx R_E I_C = 510W\,(2{,}21mA) = \mathbf{1{,}12V}$

$V_B = V_E + 0{,}7V = 1{,}12V + 0{,}7V = \mathbf{1{,}82V}$

b) Para b_2 = 100

$$R_B = R_{B1} + R_{B2}$$

I_B » $(V_{CC} - V_{BE})/[R_B + b(R_E + R_C)] = (18V - 0,7V)/[201kW + 100(510W + 3,3kW]$

$= \mathbf{29,7mA}$

Note que $b\,R_E < R_B$

$I_C = b_1 I_B = (100)(29,7mA) = \mathbf{2,97mA}$

$V_{CE} = V_{CC} - (R_C + R_E)I_C = 18V - (3,3kW + 510W)(2,97mA) = \mathbf{6,68V}$

V_E » $R_E I_C = 510W\,(2,97mA) = \mathbf{1,51V}$

$V_B = V_E + 0,7V = 1,51V + 0,7V = \mathbf{2,21V}$

$½DI_C½ = ½I_C(\mathbf{b_2 = 100}) - I_C(\mathbf{b_2 = 100})\,½ = 0,76mA$

$100*½LI_C½/I_C = 25\%$

Comentário: Uma variação de 100% em ***b*** produz cerca de 25% de variação em I_C, mesmo com bR_E *da ordem de* R_B .

➢ Fatores de Estabilidade (Sensibilidade)

Parâmetros do transistor

- I_{C0} --- *dobra de valor para cada 10°C de aumento na temperatura*
- b --- *aumenta com a temperatura e varia com a troca do mesmo componente*
- V_{BE} --- *diminui aproximadamente 2,5mV por grau centrígado de aumento de temperatura*

$S(I_{C0}) = DI_C/DI_{C0}$ $S(V_{BE}) = DI_C/DV_{BE}$ $S(b) = DI_C/Db$

$$DI_C = S(I_{C0})\, DI_{C0} + S(V_{BE})DV_{BE} + S(b)Db$$

Tabela de dos fatores de estabilidade para as configurações estudadas

Configuração	**Fatores de Estabilidade**		
	$S(I_{C0})$	$S(V_{BE})$	$S(b)$
Resistor no emissor	$(b+1)\dfrac{1+R_B/R_E}{(b+1)+R_B/R_E}$	$\dfrac{-b}{R_B+(b+1)R_E}$	$\dfrac{I_{C1}\left(1+R_B/R_E\right)}{b_1\left(1+b_2+R_B/R_E\right)}$
Fixa	$(b+1)$	$\dfrac{-b}{R_B}$	$\dfrac{I_{C1}}{b_1}$
Divisor resistivo	$(b+1)\dfrac{1+R_{TH}/R_E}{(b+1)+R_{TH}/R_E}$	$\dfrac{-b}{R_{TH}+(b+1)R_E}$	$\dfrac{I_{C1}\left(1+R_{TH}/R_E\right)}{b_1\left(1+b_2+R_{TH}/R_E\right)}$
Realimentação de tensão (R_E =0)	$(b+1)\dfrac{1+R_B/R_C}{(b+1)+R_B/R_C}$	$\dfrac{-b}{R_B+(b+1)R_C}$	$\dfrac{I_{C1}(R_C+R_B)}{b_1(R_B+R_C(1+b_1))}$