LOM3221 – LABORATÓRIO DE ELETRÔNICA
AULA 4

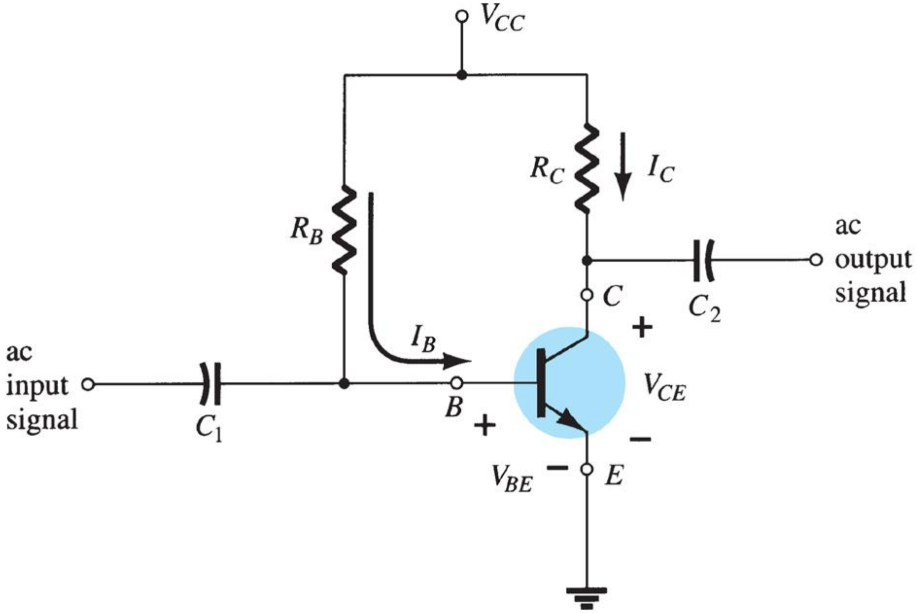
Prof. Dr. Emerson G. Melo

Sumário

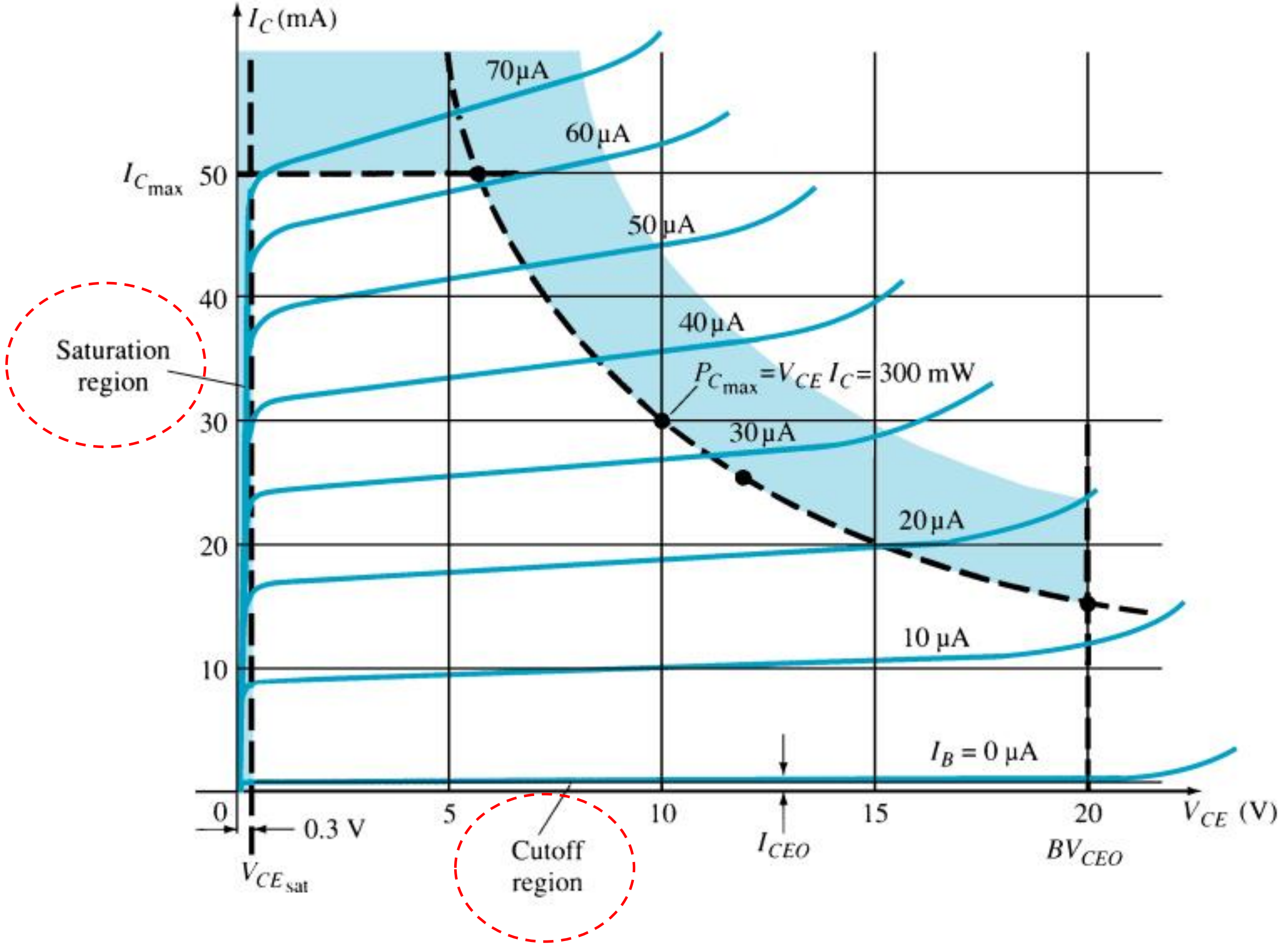
- ☐ Transistor;
- ☐ Polarização Fixa;
- ☐ Polarização Estável de Emissor;
- ☐ Polarização por Divisor de Tensão;
- ☐ Transistor como Chave.

Transistor

- ❑ Dispositivo eletrônico de três terminais: base, coletor e emissor; que permite amplificar corrente.

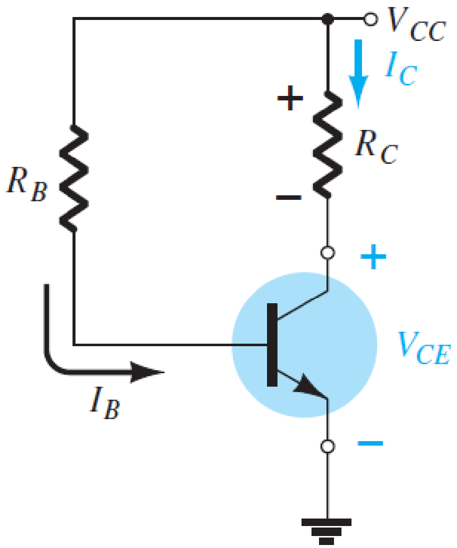


$$I_C = \beta I_B$$

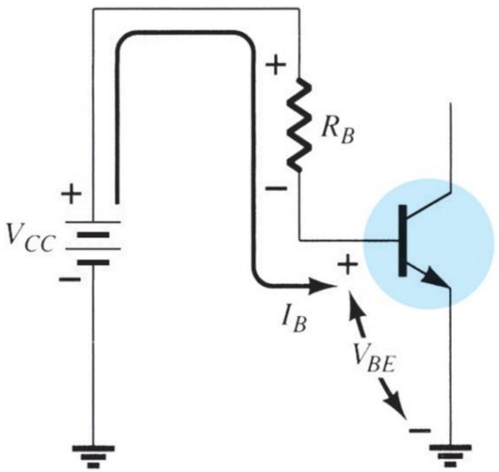


Polarização

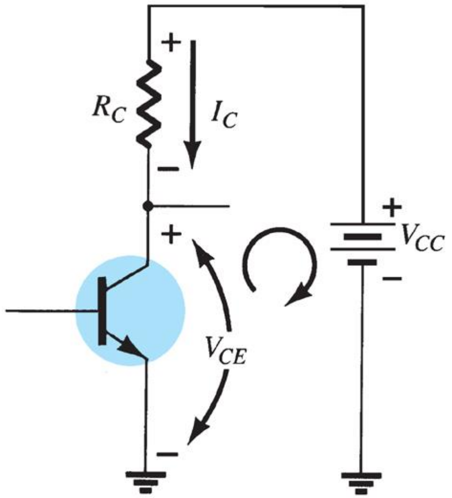
- O circuito básico de polarização de um transistor possui duas malhas: malha de base-emissor e malha de coletor-emissor.
- Para projetar um circuito de polarização primeiro é necessário definir a corrente de coletor e a tensão entre coletor e emissor, depois define-se a corrente de base e os resistores de polarização da malha base-emissor.



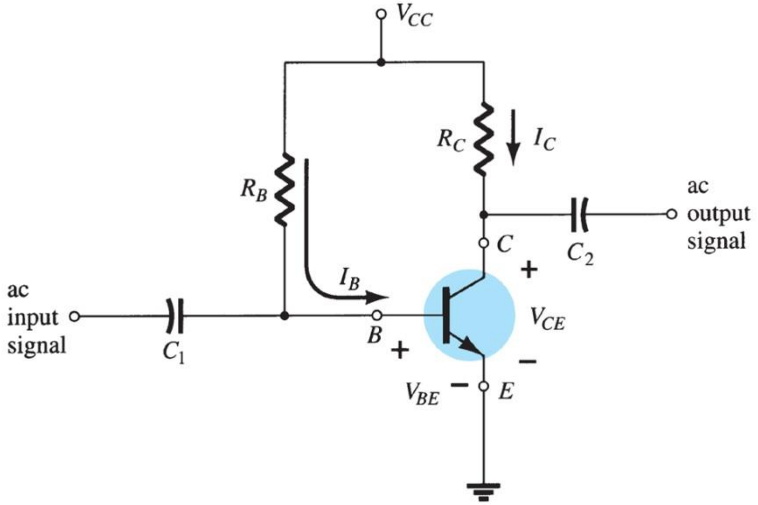
Malha Base-Emissor



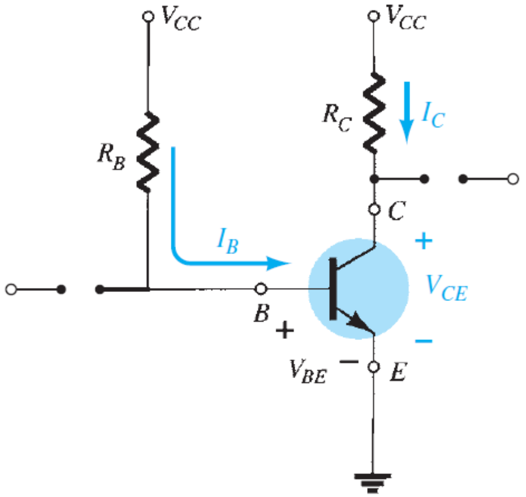
Malha Coletor-Emissor



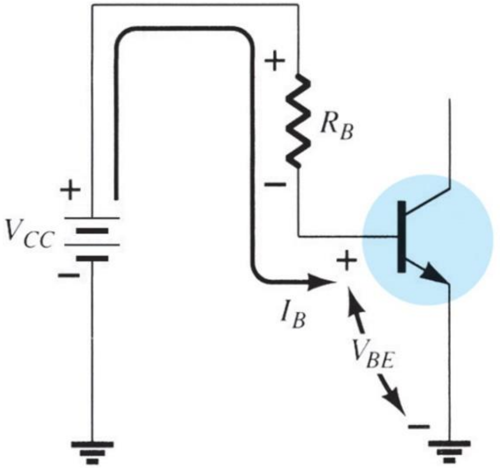
Polarização Fixa



Vale o Principio da Superposição



Malha Base-Emissor

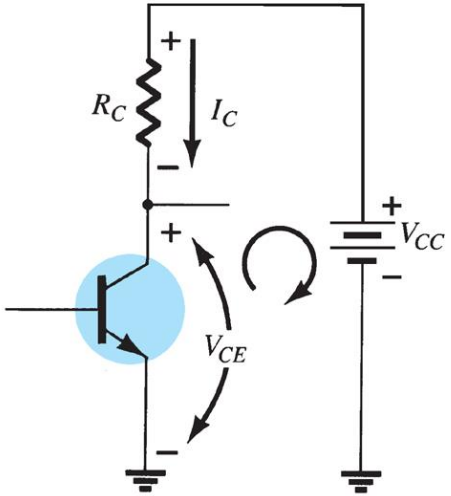


Lei de Kirchhoff das Tensões:

$$+V_{CC} - I_B R_B - V_{BE} = 0$$

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B}$$

Malha Coletor-Emissor

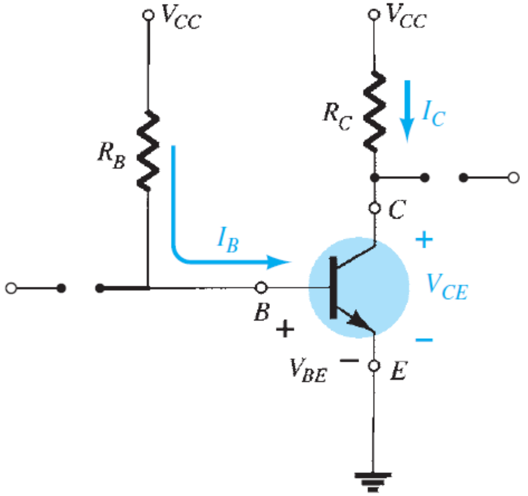


$$I_C = \beta I_B$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$$

Polarização Fixa

Região Linear



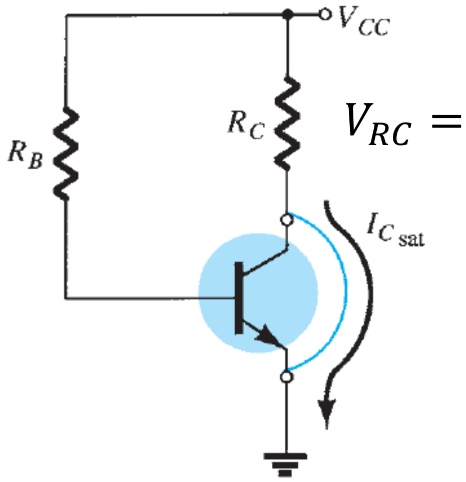
$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$$

$$I_C = \beta I_B$$

Saturação

Aproximando a resistência entre coletor e emissor (R_{CE}) por um curto-circuito:



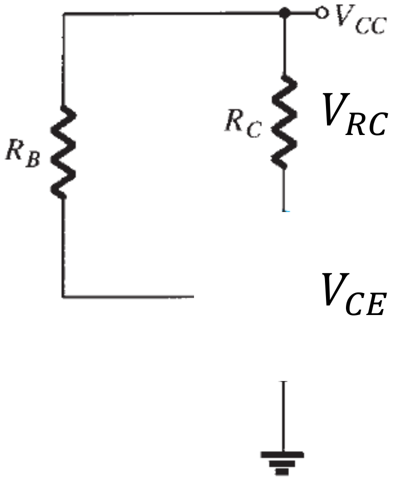
$$V_{RC} = V_{CC}$$

$$V_{CE} = 0\ V$$

$$I_{Csat} = \frac{V_{CC}}{R_C}$$

Corte

Aproximando a resistência entre coletor e emissor (R_{CE}) por um circuito aberto:



$$V_{RC} = 0\ V$$

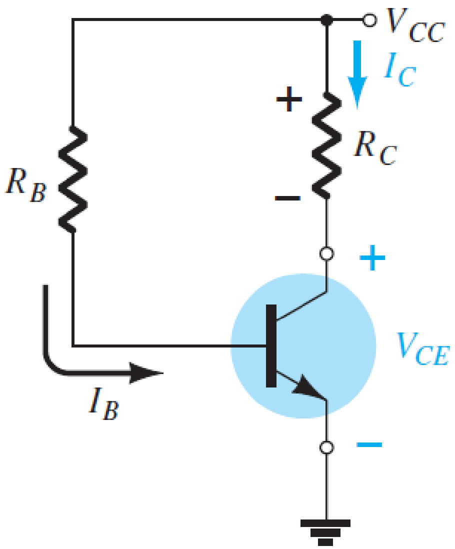
$$V_{CE} = V_{CC}$$

$$V_{CE} = V_{CC}$$

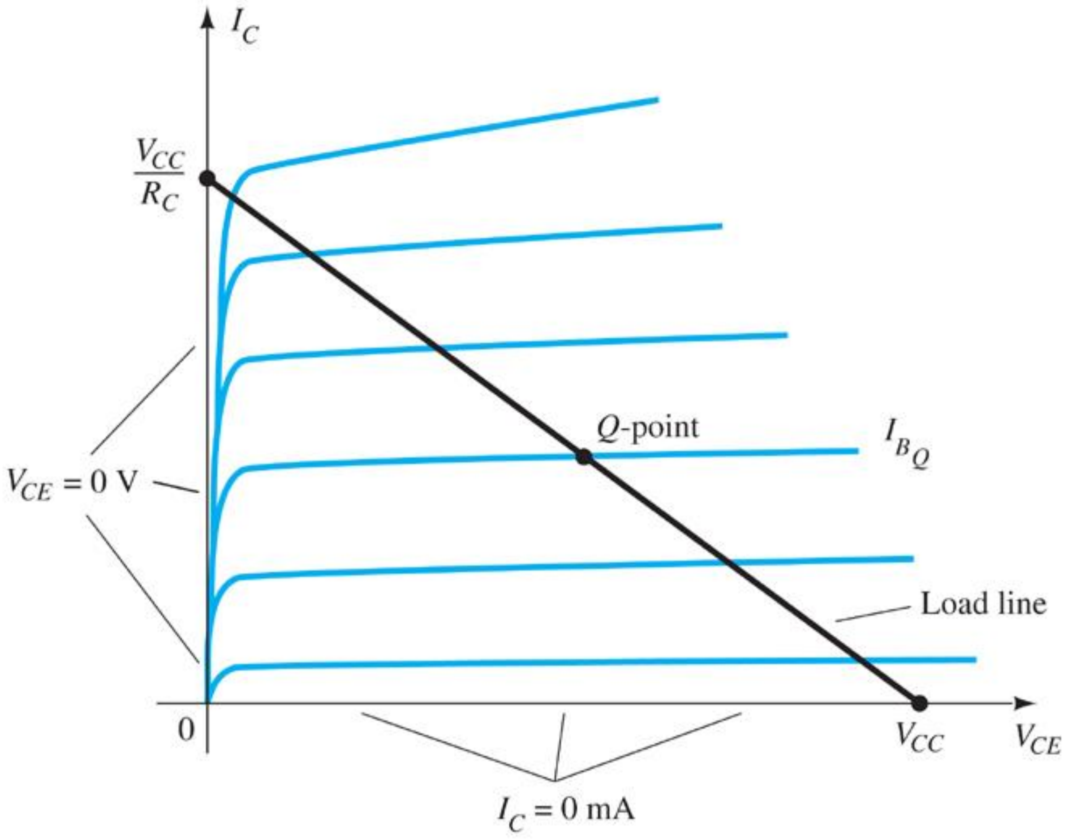
$$I_C = 0\ A$$

Polarização Fixa

- ❑ Análise por reta de carga: O ponto de operação ou ponto Q (quiescente) do circuito é definido pelo circuito e pela curva característica do transistor.



R_B ajusta o valor da corrente de base I_B, que controla a tensão entre coletor e emissor V_{CE} e a corrente de coletor I_C .



Os pontos necessários para traçar a reta de carga são:

$I_{C\text{-saturação}}$

$I_C = V_{CC} / R_C$

$V_{CE} = 0$ V

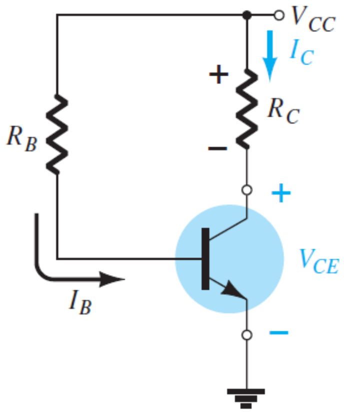
$V_{CE\text{-corte}}$

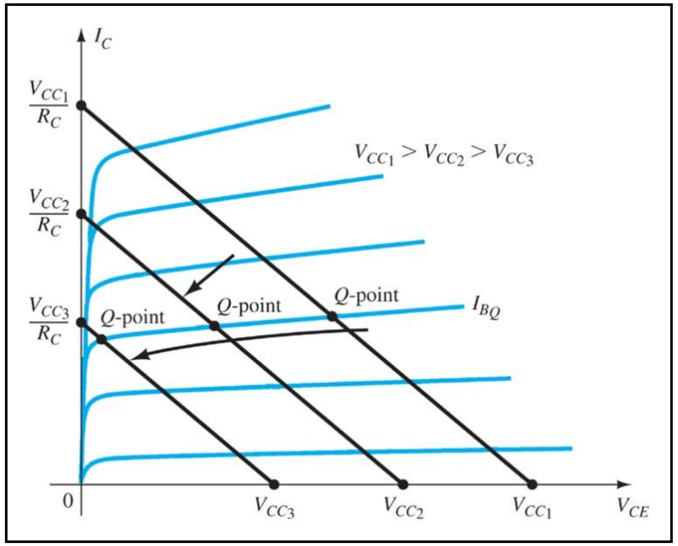
$V_{CE} = V_{CC}$

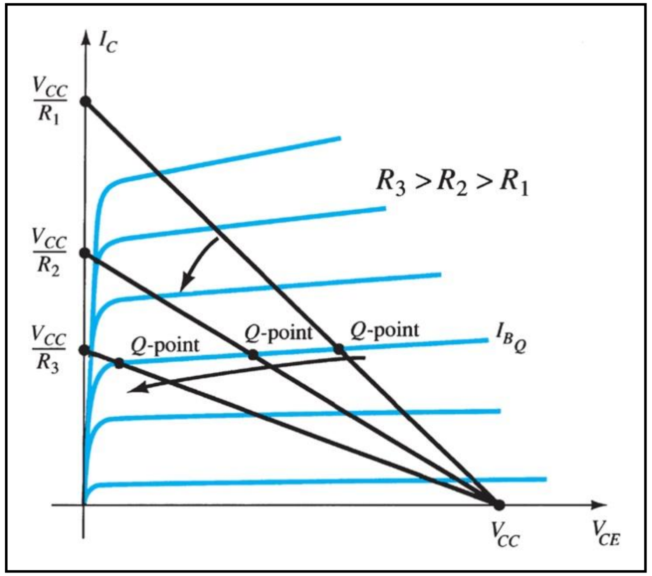
$I_C = 0$ mA

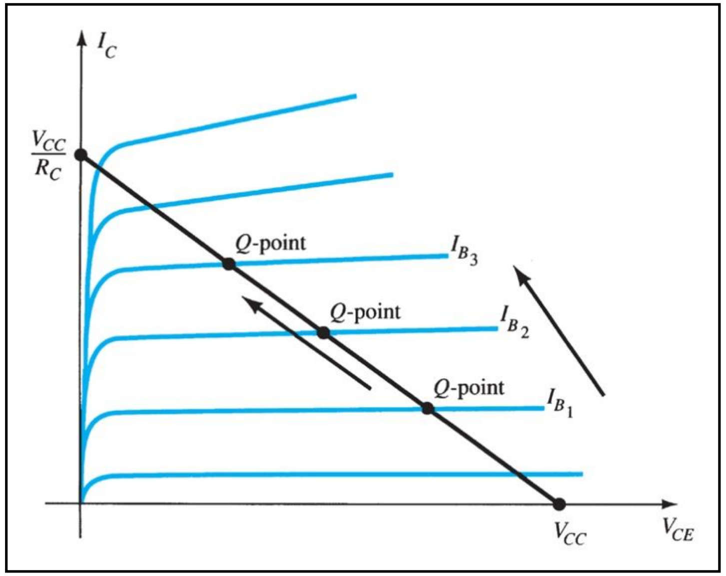
Polarização Fixa

❑ Efeito dos parâmetros do circuito sobre o ponto Q.




Efeito de V_{CC}


Efeito de R_C

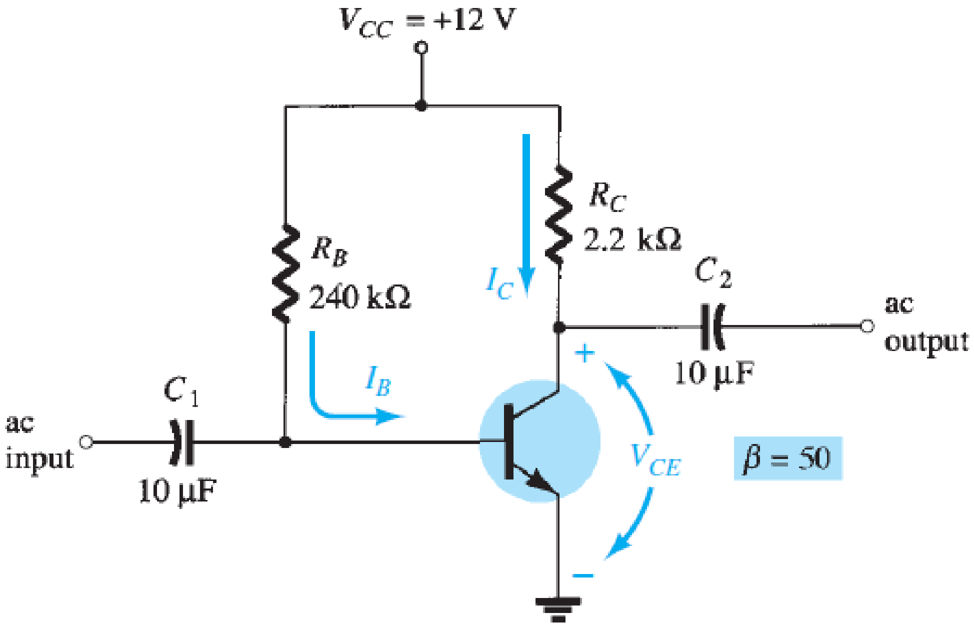

Efeito de I_B

$$\beta_{dc} = \frac{I_C}{I_B}$$

Para amplificação de pequenos sinais é necessário ajustar o ponto de operação DC para manter o ganho aproximadamente constante e assim evitar a distorções de sinais.

Polarização Fixa

- ☐ Análise 1: Determinar $I_B, I_C, V_{CE}, V_B, V_C$ e V_{BC}.



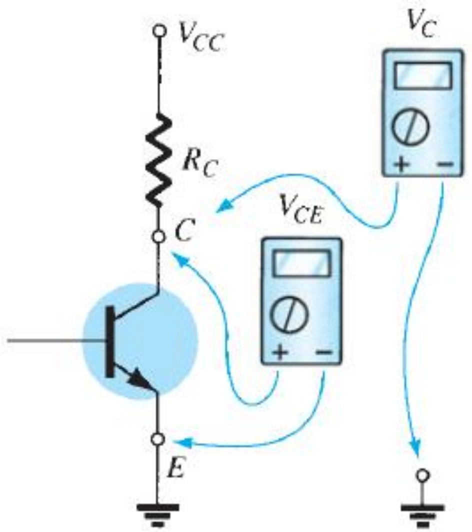
$$I_{B_Q} = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} = \frac{12\ \text{V} - 0.7\ \text{V}}{240\ \text{k}\Omega} = \mathbf{47.08\ \mu A}$$

$$I_{C_Q} = \beta I_{BQ} = (50)(47.08\ \mu\text{A}) = \mathbf{2.35\ mA}$$

$$\begin{aligned} V_{CE_Q} &= V_{CC} - I_C R_C \\ &= 12\ \text{V} - (2.35\ \text{mA})(2.2\ \text{k}\Omega) \\ &= \mathbf{6.83\ V} \end{aligned}$$

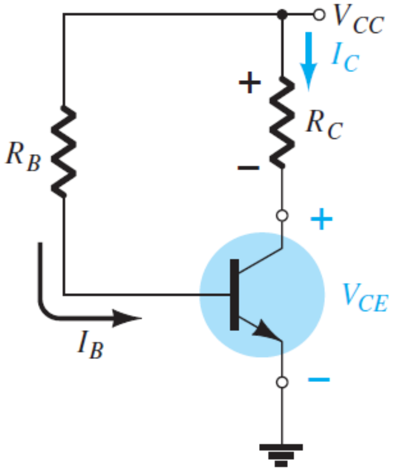
$$V_B = V_{BE} = \mathbf{0.7\ V}$$
$$V_C = V_{CE} = \mathbf{6.83\ V}$$

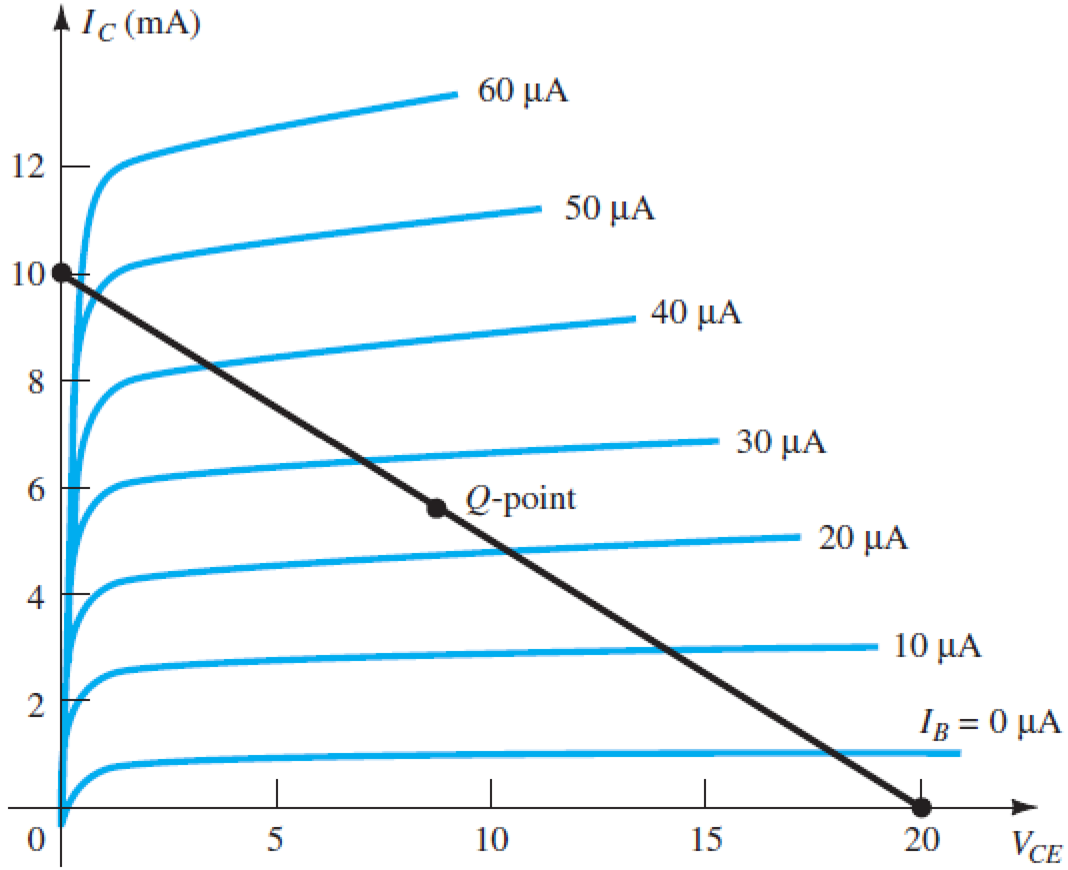
$$\begin{aligned} V_{BC} &= V_B - V_C = 0.7\ \text{V} - 6.83\ \text{V} \\ &= \mathbf{-6.13\ V} \end{aligned}$$



Polarização Fixa

❑ Análise 2: Determinar V_{CC}, R_B e R_C.





$$V_{CE} = V_{CC} = \mathbf{20\ V} \text{ at } I_C = 0 \text{ mA}$$

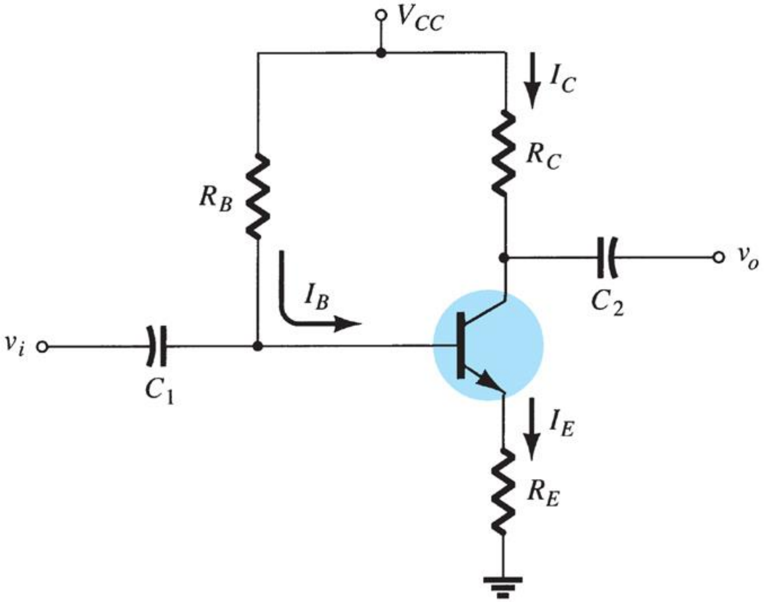
$$I_C = \frac{V_{CC}}{R_C} \text{ at } V_{CE} = 0 \text{ V}$$

$$R_C = \frac{V_{CC}}{I_C} = \frac{20 \text{ V}}{10 \text{ mA}} = \mathbf{2\ k\Omega}$$

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B}$$

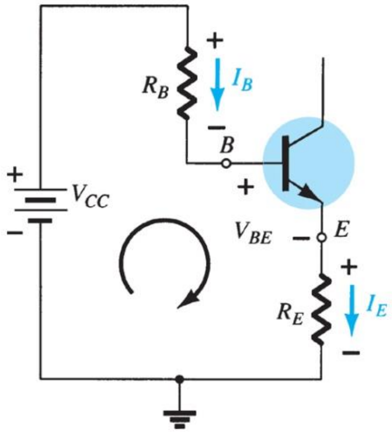
$$R_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{I_B} = \frac{20 \text{ V} - 0.7 \text{ V}}{25\ \mu\text{A}} = \mathbf{772\ k\Omega}$$

Polarização Estável de Emissor



O resistor de emissor R_E aumenta a estabilidade do circuito de polarização, tornando-o mais estável quanto a variações de ganho e temperatura.

Malha Base-Emissor



Lei de Kirchhoff das Tensões:

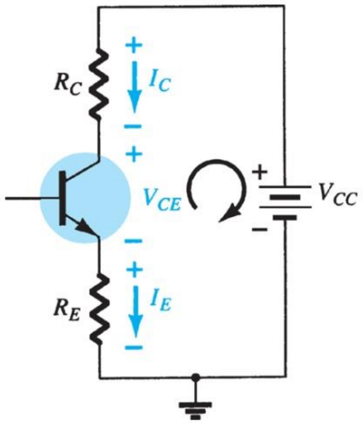
$$+V_{CC} - I_E R_E - V_{BE} - I_E R_E = 0$$

Uma vez que $I_E = (\beta + 1)I_B$:

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

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

Malha Coletor-Emissor



Lei de Kirchhoff das Tensões:

$$I_E R_E + V_{CE} + I_C R_C - V_{CC} = 0$$

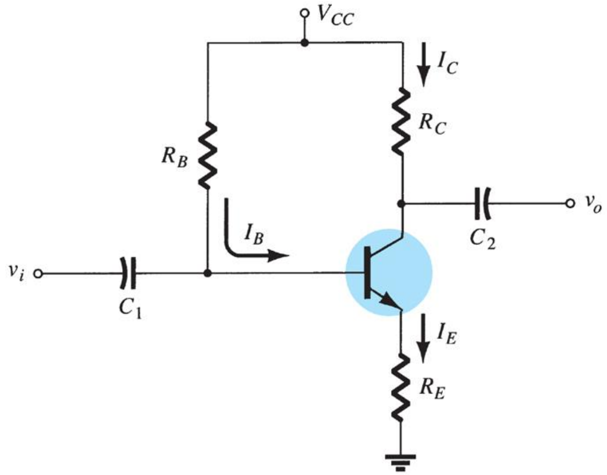
Uma vez que $I_E \cong I_C$:

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C (R_C + R_E)$$

$$V_E = I_E R_E$$
$$V_C = V_{CE} + V_E = V_{CC} - I_C R_C$$
$$V_B = V_{CC} - I_R R_B = V_{BE} + V_E$$

Polarização Estável de Emissor

Região Linear



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

$$I_C = \beta I_B$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C(R_C + R_E)$$

$$V_E = I_E R_E$$
$$V_C = V_{CE} + V_E = V_{CC} - I_C R_C$$
$$V_B = V_{CC} - I_R R_B = V_{BE} + V_E$$

Saturação

Aproximando a resistência entre coletor e emissor (R_{CE}) por um curto-circuito:

$$I_{Csat} = \frac{V_{CC}}{R_C + R_E}$$

Corte

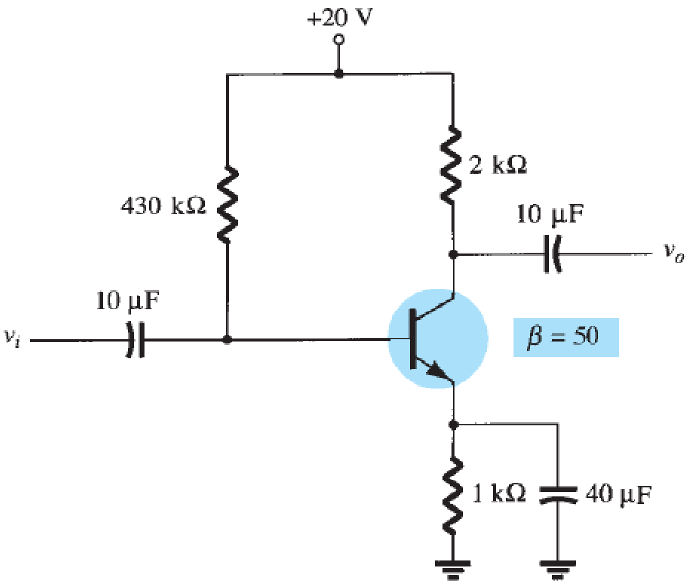
Aproximando a resistência entre coletor e emissor (R_{CE}) por um circuito aberto:

$$V_{CE} = V_{CC}$$

$$I_C = 0\,A$$

Polarização Estável de Emissor

☐ Análise 1: Determinar $I_B, I_C, V_{CE}, V_C, V_E, V_B$ e V_{BC}.



$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + (\beta + 1)R_E} = \frac{20\text{ V} - 0.7\text{ V}}{430\text{ k}\Omega + (51)(1\text{ k}\Omega)}$$
$$= \frac{19.3\text{ V}}{481\text{ k}\Omega} = \mathbf{40.1\ \mu A}$$

$$I_C = \beta I_B$$
$$= (50)(40.1\ \mu\text{A})$$
$$\cong \mathbf{2.01\ mA}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C(R_C + R_E)$$
$$= 20\text{ V} - (2.01\text{ mA})(2\text{ k}\Omega + 1\text{ k}\Omega) = 20\text{ V} - 6.03\text{ V}$$
$$= \mathbf{13.97\ V}$$

$$V_C = V_{CC} - I_C R_C$$
$$= 20\text{ V} - (2.01\text{ mA})(2\text{ k}\Omega) = 20\text{ V} - 4.02\text{ V}$$
$$= \mathbf{15.98\ V}$$

$$V_E = V_C - V_{CE}$$
$$= 15.98\text{ V} - 13.97\text{ V}$$
$$= \mathbf{2.01\ V}$$

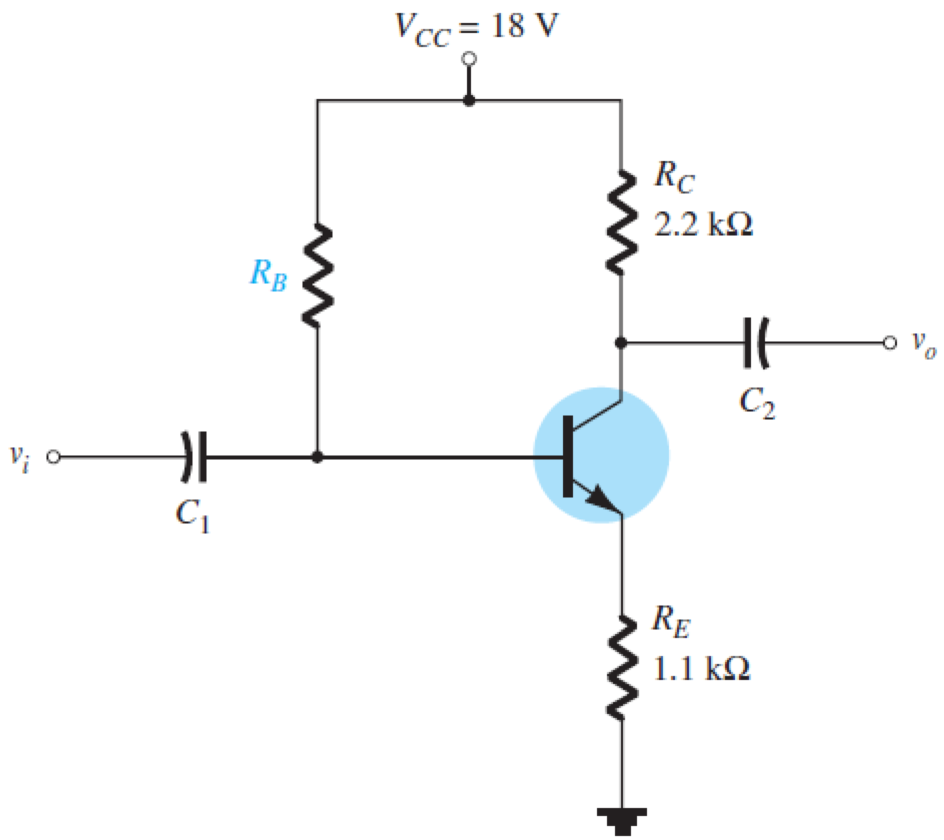
$$V_E = I_E R_E \cong I_C R_E$$
$$= (2.01\text{ mA})(1\text{ k}\Omega)$$
$$= \mathbf{2.01\ V}$$

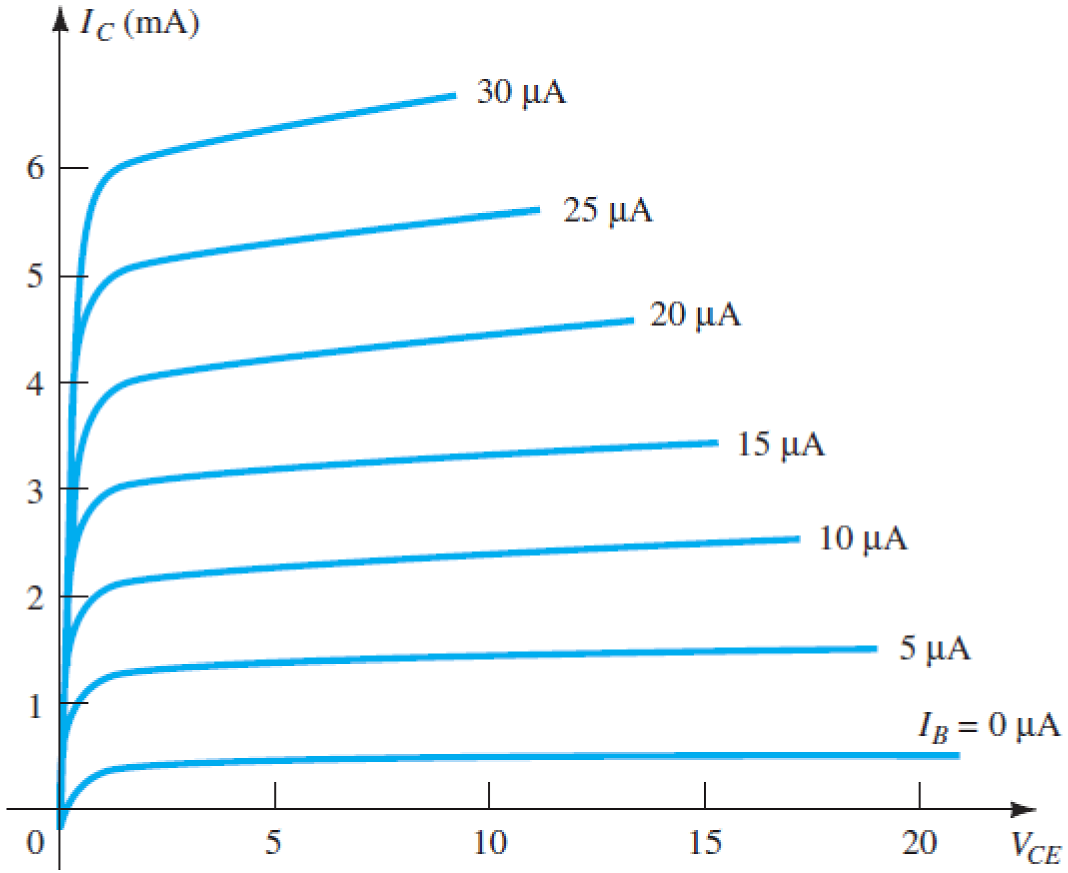
$$V_B = V_{BE} + V_E$$
$$= 0.7\text{ V} + 2.01\text{ V}$$
$$= \mathbf{2.71\ V}$$

$$V_{BC} = V_B - V_C$$
$$= 2.71\text{ V} - 15.98\text{ V}$$
$$= \mathbf{-13.27\ V}\ \text{(reverse-biased as required)}$$

Polarização Estável de Emissor

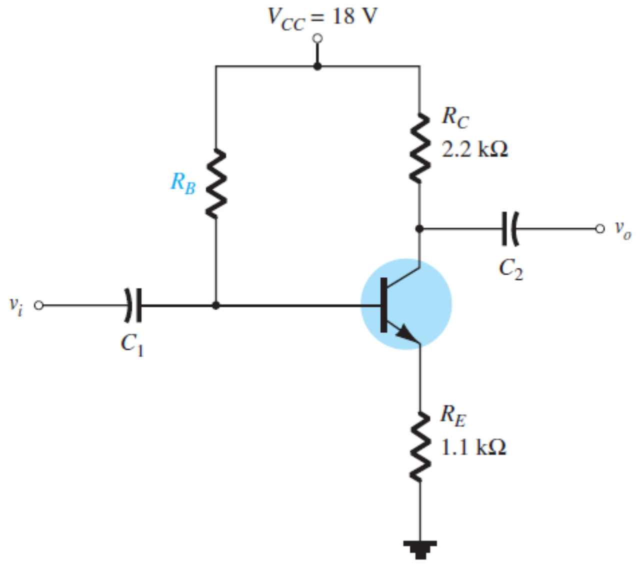
- Análise 2: Traçar a reta de carga, determinar I_C, V_{CE}, β_{DC} e R_B.

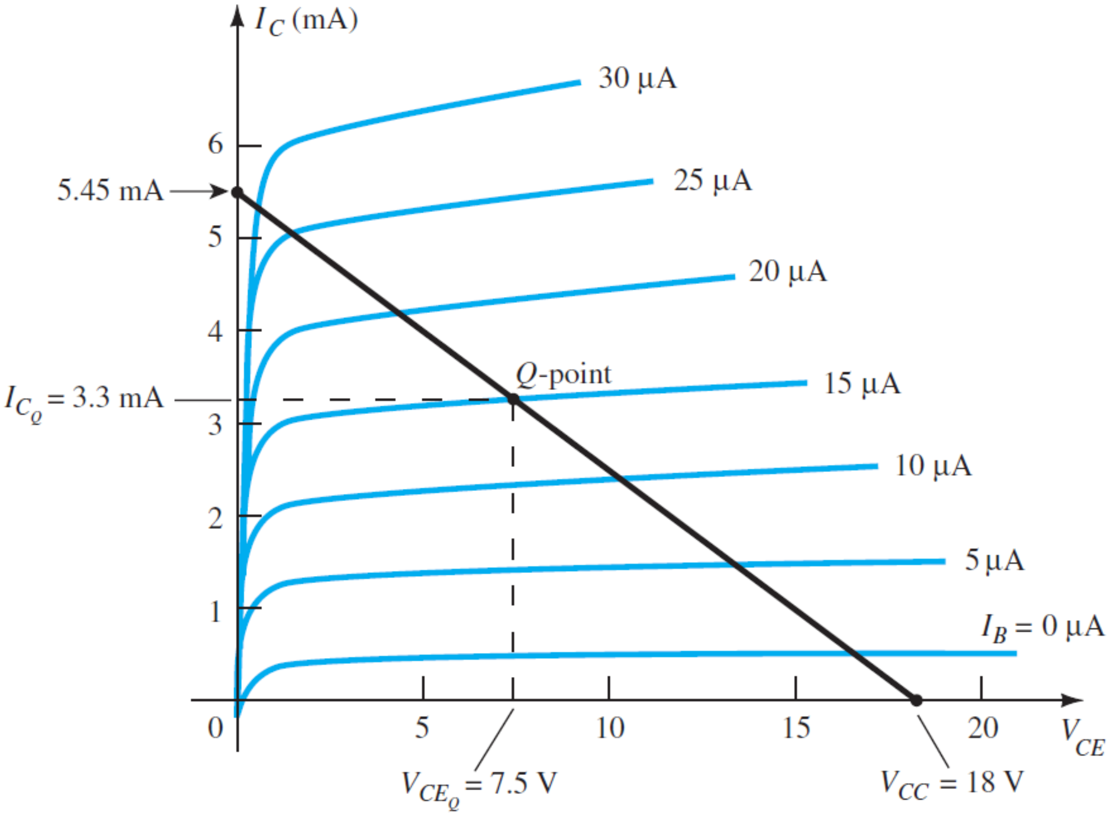




Polarização Estável de Emissor

- Análise 2: Traçar a reta de carga, determinar I_C, V_{CE}, β e R_B.



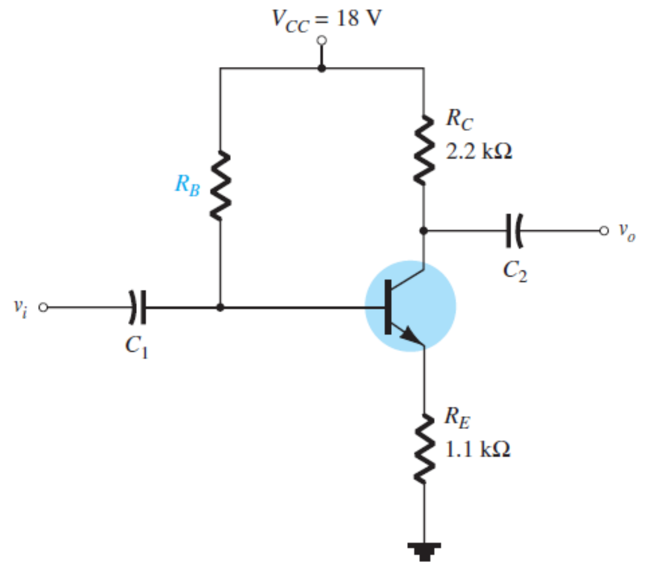


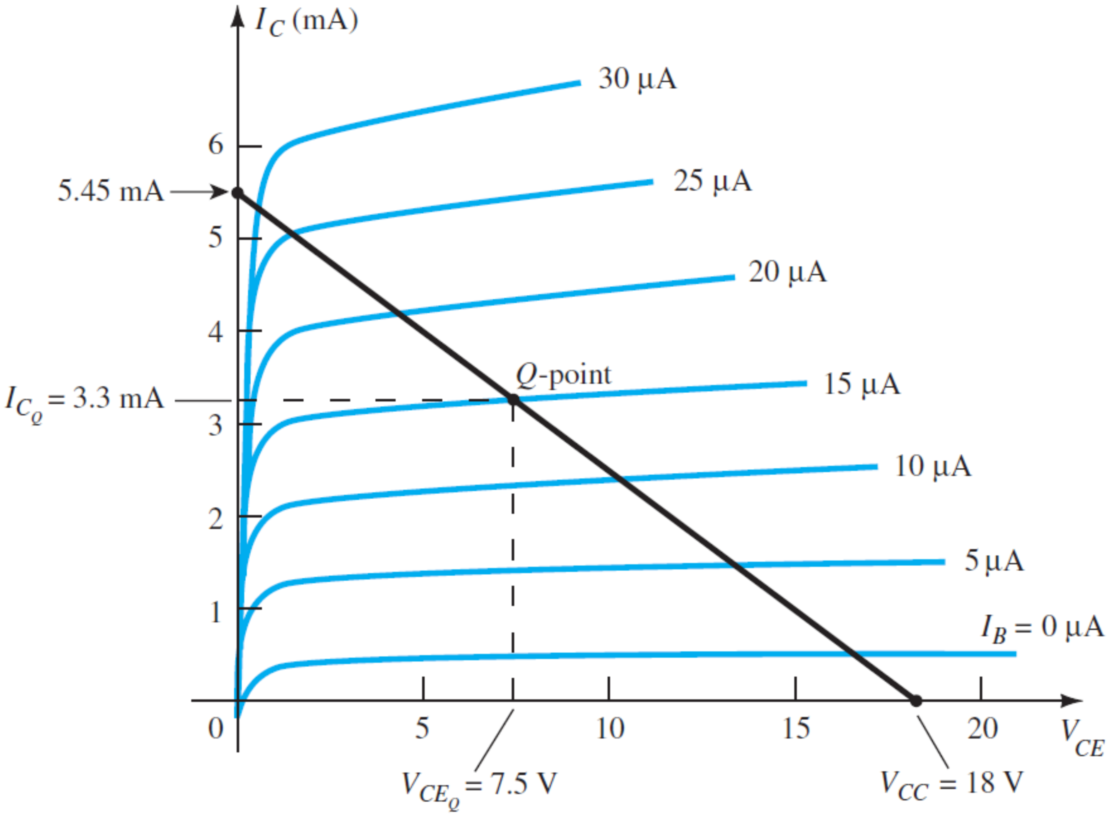
$$I_C = \frac{V_{CC}}{R_C + R_E} = \frac{18\text{ V}}{2.2\text{ k}\Omega + 1.1\text{ k}\Omega} = \frac{18\text{ V}}{3.3\text{ k}\Omega} = 5.45\text{ mA}$$

$$V_{CE} = V_{CC} = 18\text{ V}$$

Polarização Estável de Emissor

- ☐ Análise 2: Traçar a reta de carga, determinar I_C, V_{CE}, β e R_B.



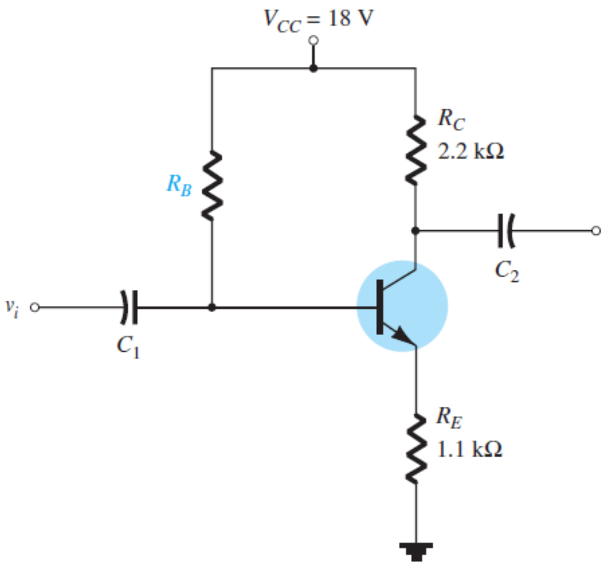


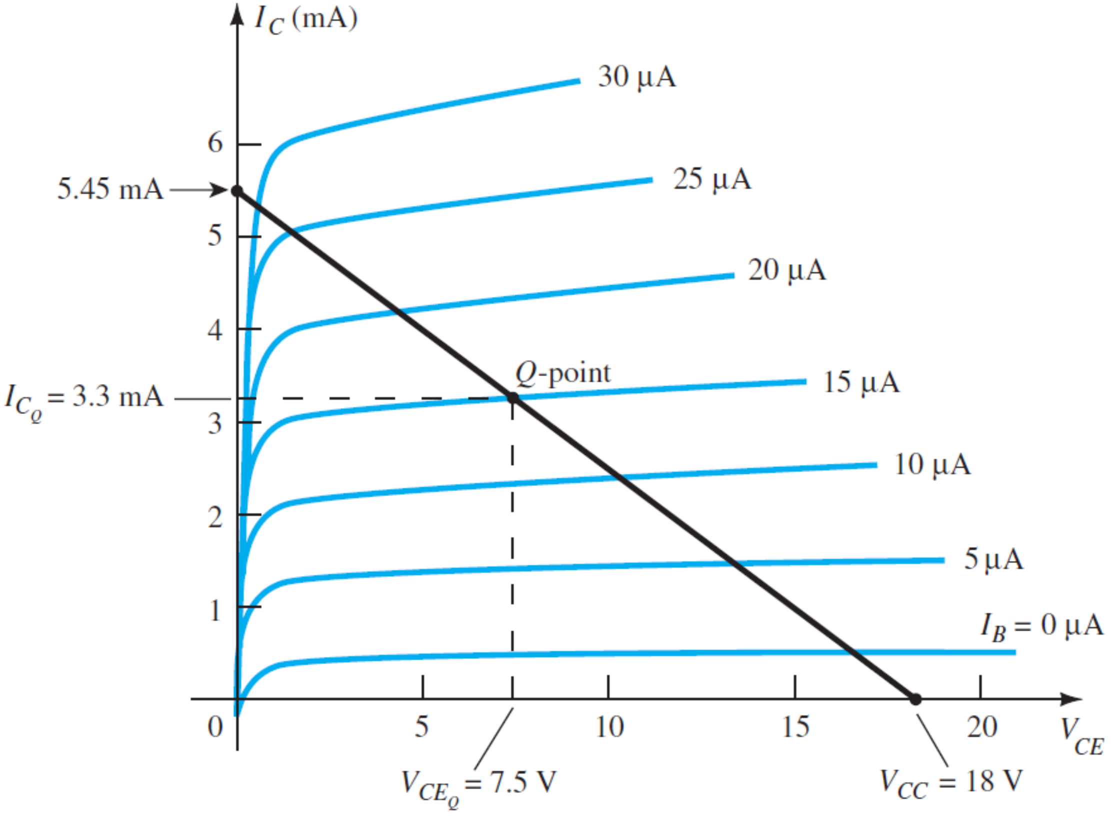
$$V_{CE_Q} \cong \mathbf{7.5\ V},\ I_{C_Q} \cong \mathbf{3.3\ mA}$$

$$\beta = \frac{I_{C_Q}}{I_{B_Q}} = \frac{3.3\ \text{mA}}{15\ \mu\text{A}} = \mathbf{220}$$

Polarização Estável de Emissor

☐ Análise 2: Traçar a reta de carga, determinar I_C, V_{CE}, β e R_B.





$$V_{CE_Q} \cong \mathbf{7.5\ V}, I_{C_Q} \cong \mathbf{3.3\ mA}$$

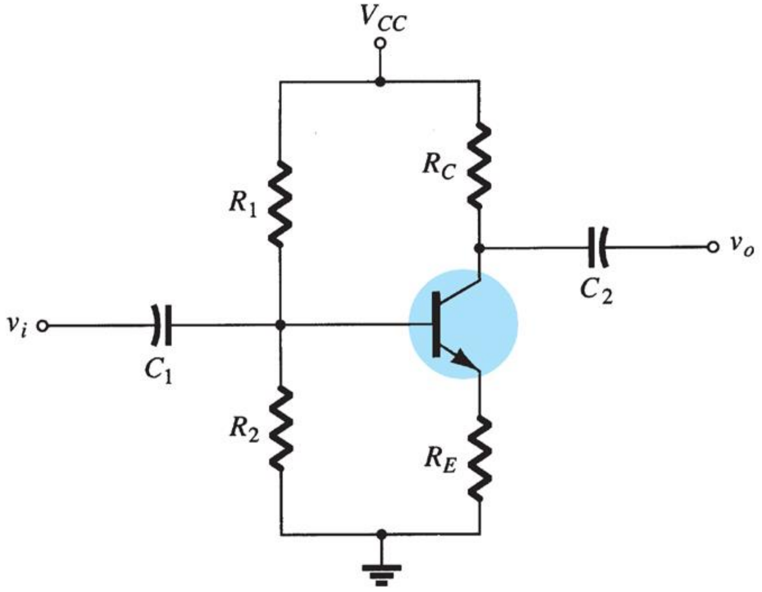
$$\beta = \frac{I_{C_Q}}{I_{B_Q}} = \frac{3.3\ \text{mA}}{15\ \mu\text{A}} = \mathbf{220}$$

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

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

$$R_B = 910{,}2\ k\Omega$$

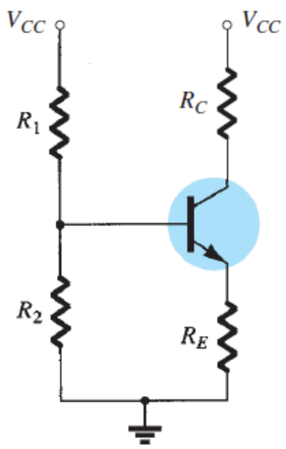
Polarização por Divisor de Tensão

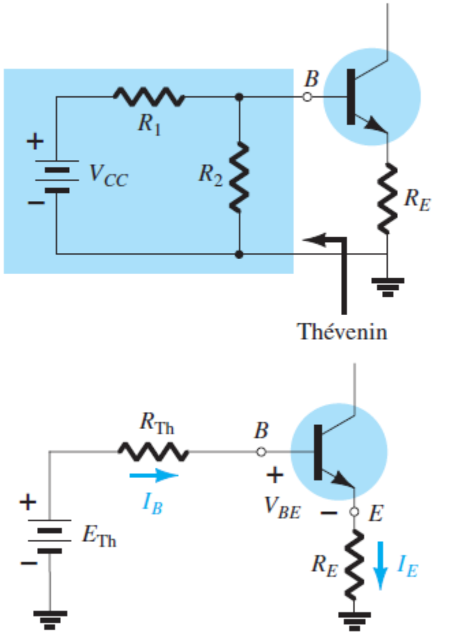


Garante ainda mais estabilidade ao circuito quanto a variações de ganho e temperatura.

Malha Base-Emissor

Análise Exata





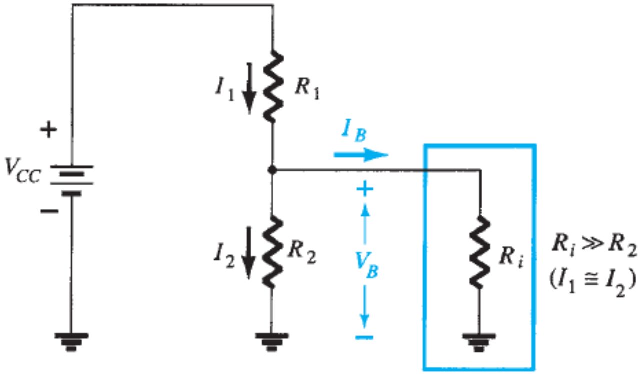
$$R_{Th} = R_1 \| R_2$$

$$E_{Th} = V_{R_2} = \frac{R_2 V_{CC}}{R_1 + R_2}$$

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

Análise Aproximada

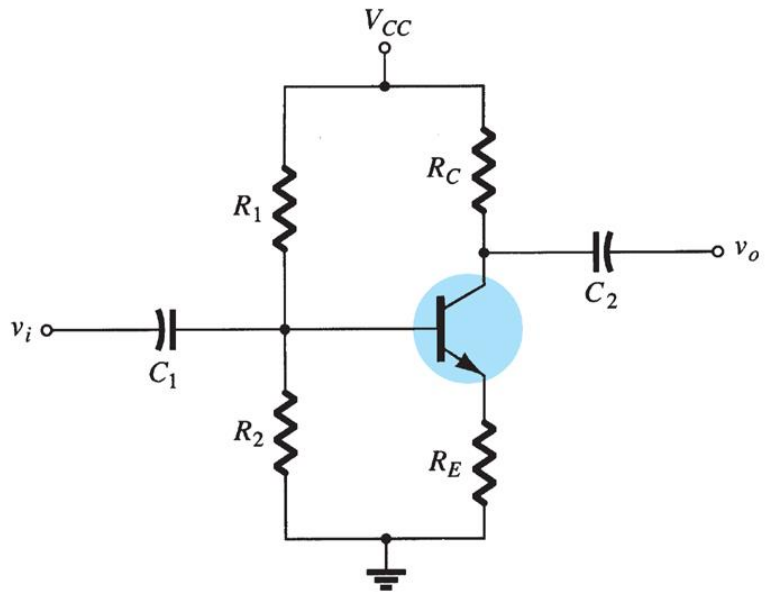
$$\beta R_E \geq 10 R_2$$



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

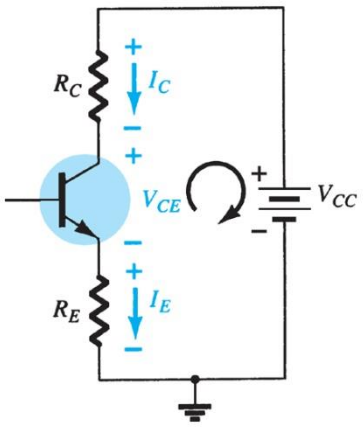
$$V_E = V_B - V_{BE}$$

Polarização por Divisor de Tensão



Garante ainda mais estabilidade ao circuito quanto a variações de ganho e temperatura.

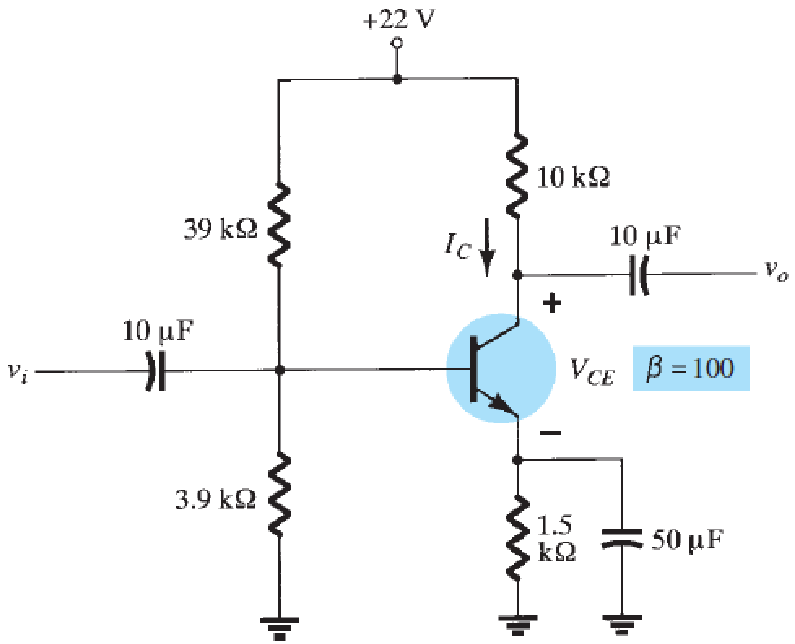
Malha Coletor-Emissor



$$V_{CE} = V_{CC} - I_C(R_C + R_E)$$

Polarização por Divisor de Tensão

☐ Análise 1: Determinar I_C e V_{CE}.



$$
\begin{aligned}
R_{\text{Th}} &= R_1 \| R_2 \\
&= \frac{(39\ \text{k}\Omega)(3.9\ \text{k}\Omega)}{39\ \text{k}\Omega + 3.9\ \text{k}\Omega} = 3.55\ \text{k}\Omega \\
E_{\text{Th}} &= \frac{R_2 V_{CC}}{R_1 + R_2} \\
&= \frac{(3.9\ \text{k}\Omega)(22\ \text{V})}{39\ \text{k}\Omega + 3.9\ \text{k}\Omega} = 2\ \text{V} \\
I_B &= \frac{E_{\text{Th}} - V_{BE}}{R_{\text{Th}} + (\beta + 1)R_E} \\
&= \frac{2\ \text{V} - 0.7\ \text{V}}{3.55\ \text{k}\Omega + (101)(1.5\ \text{k}\Omega)} = \frac{1.3\ \text{V}}{3.55\ \text{k}\Omega + 151.5\ \text{k}\Omega} \\
&= 8.38\ \mu\text{A} \\
I_C &= \beta I_B \\
&= (100)(8.38\ \mu\text{A}) \\
&= \mathbf{0.84\ mA}
\end{aligned}
$$

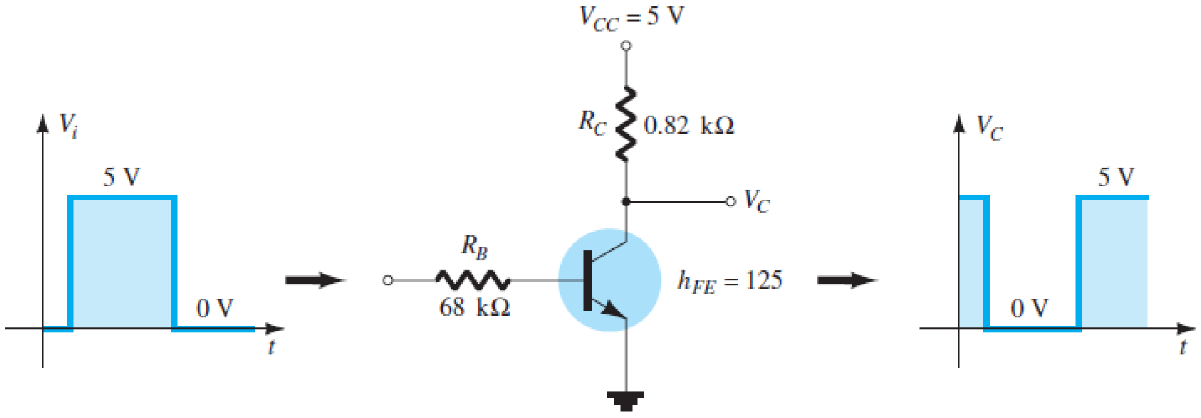
$$
\begin{aligned}
V_{CE} &= V_{CC} - I_C(R_C + R_E) \\
&= 22\ \text{V} - (0.84\ \text{mA})(10\ \text{k}\Omega + 1.5\ \text{k}\Omega) \\
&= 22\ \text{V} - 9.66\ \text{V} \\
&= \mathbf{12.34\ V}
\end{aligned}
$$

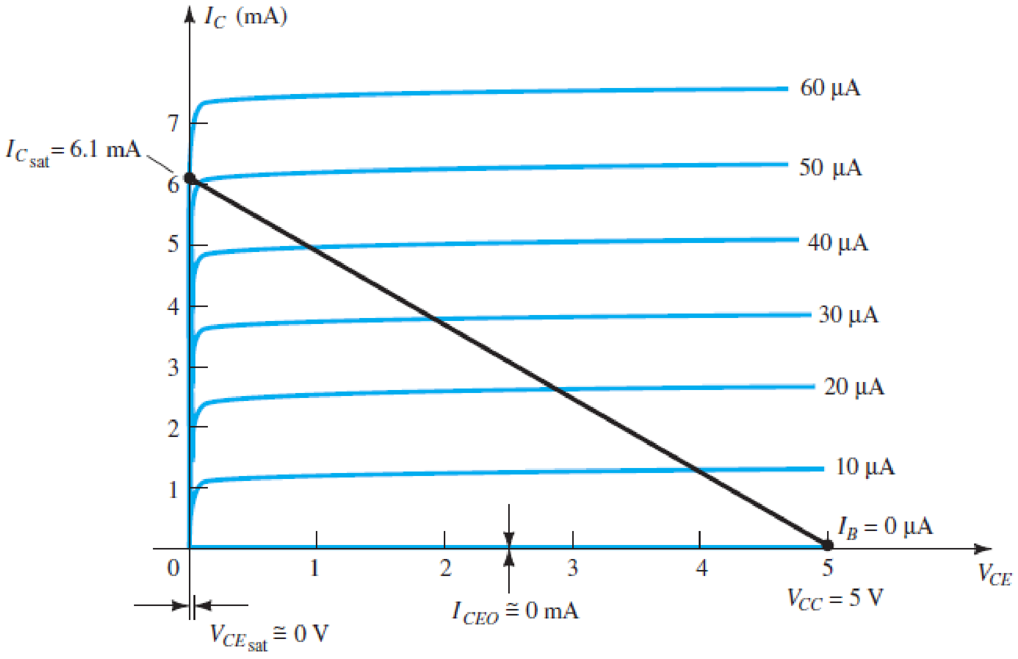
Transistor como Chave

O resistor de base é calculado para garantir que o ponto de operação seja deslocado para a região de saturação quando for aplicada tensão na entrada.

$$\boxed{I_{C_{\text{sat}}} = \frac{V_{CC}}{R_C}}$$

$$\boxed{I_B > \frac{I_{C_{\text{sat}}}}{\beta_{\text{dc}}}}$$





$$I_B = \frac{V_i - 0.7\ \text{V}}{R_B} = \frac{5\ \text{V} - 0.7\ \text{V}}{68\ \text{k}\Omega} = 63\ \mu\text{A}$$

$$I_{C_{\text{sat}}} = \frac{V_{CC}}{R_C} = \frac{5\ \text{V}}{0.82\ \text{k}\Omega} \cong 6.1\ \text{mA}$$

Referências

- ❑Boylestad, Robert L.; Nashelsky, Louis “Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos”, 6 ed., Rio de Janeiro, LTC (1998
- ❑Boylestad, Robert L.; Nashelsky, Louis “Electronic Devices and Circuit Theory”, 11 ed., Boston, Pearson (2013).