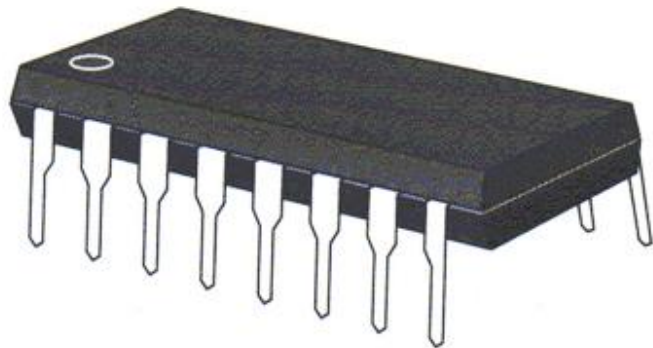


TRANSÍSTOR BIPOLAR

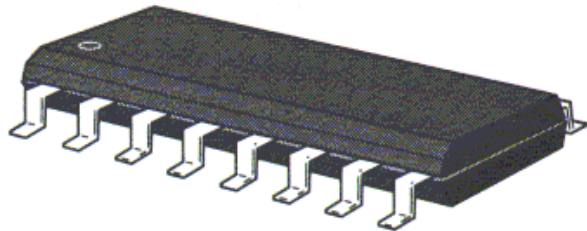
Transístor Bipolar

■ Tipos de Transístores

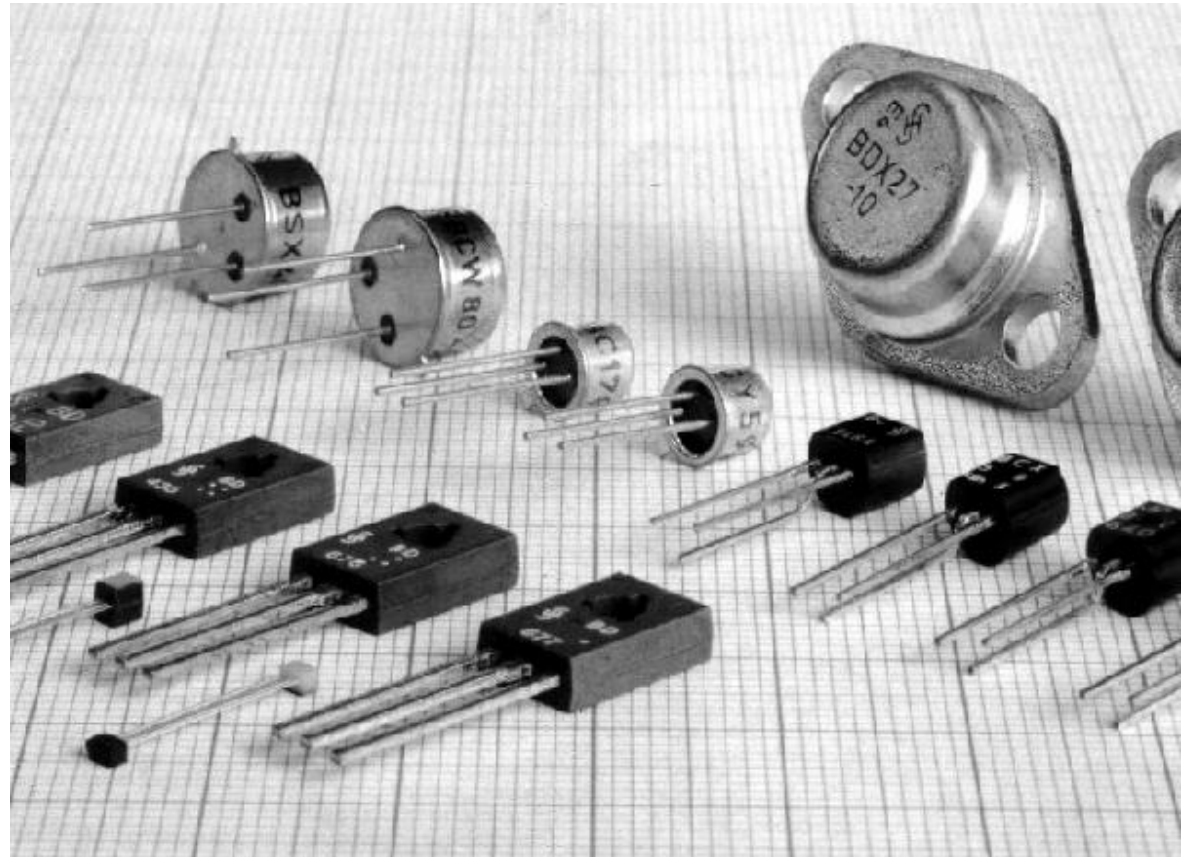
- Bipolares (BJT)
- Efeito de Campo (FET)



(a) Dual-in-line package (DIP)



(b) Small-outline IC (SOIC)



Transistor Bipolar

The Nobel Prize in Physics 1956

"for their researches on semiconductors and their discovery of the transistor effect"



William Bradford Shockley

USA

Semiconductor Laboratory of Beckman
Instruments, Inc.
Mountain View, CA, USA

b. 1910 (in London, United Kingdom)
d. 1989



John Bardeen

USA

University of Illinois
Urbana, IL, USA

b. 1908
d. 1991



Walter Houser Brattain

USA

Bell Telephone Laboratories
Murray Hill, NJ, USA

b. 1902
d. 1987

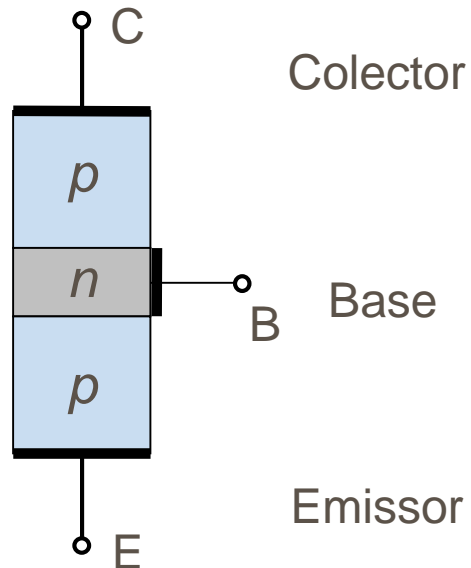
Transístor Bipolar



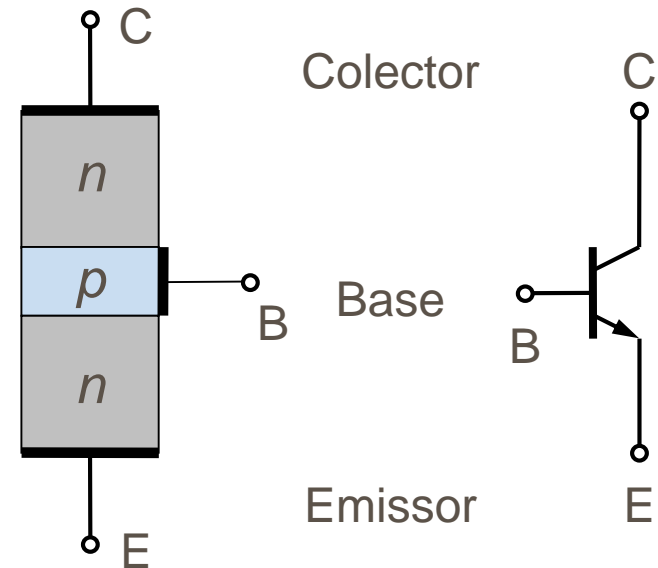
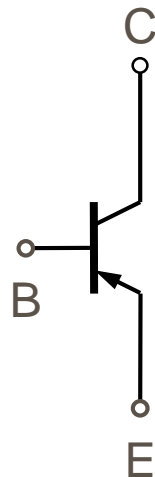
Réplica do primeiro transístor

Transístor Bipolar

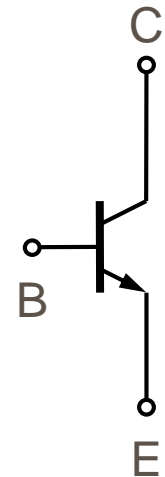
■ Construção e Funcionamento do Transístor Bipolar



PNP

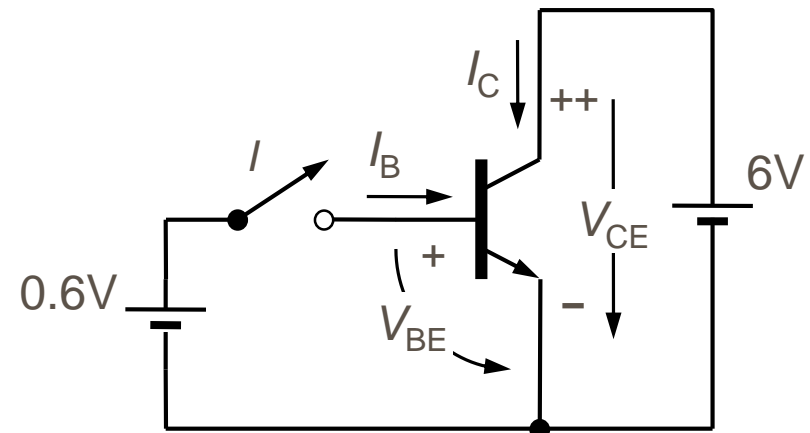
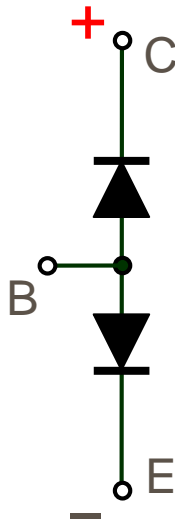
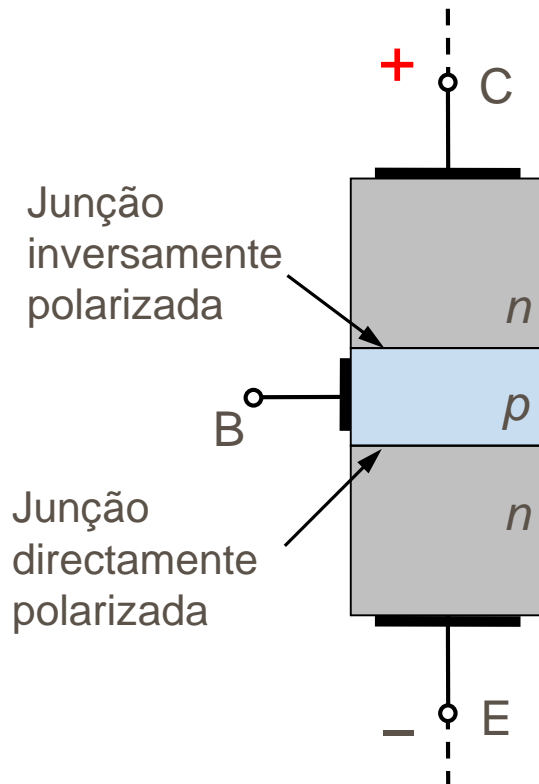


NPN



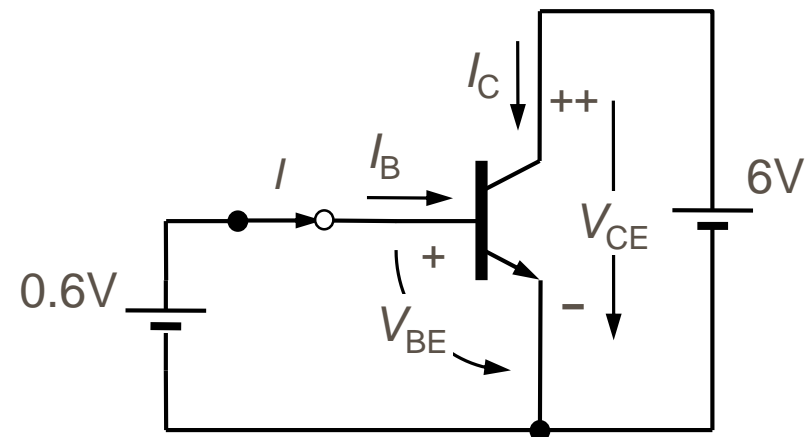
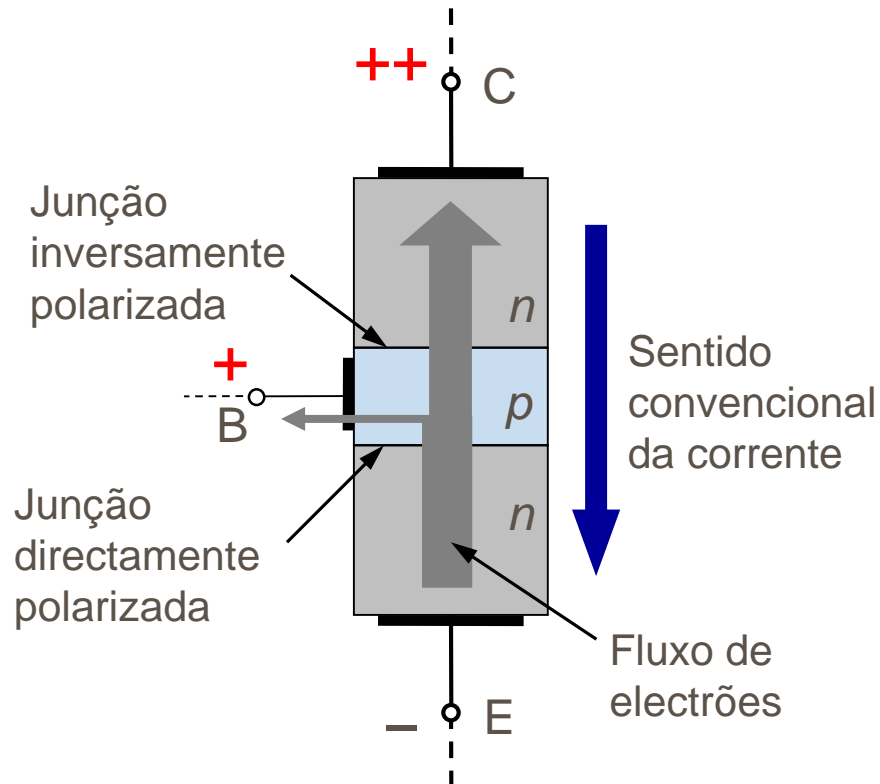
Transístor Bipolar

■ Construção e Funcionamento do Transístor Bipolar



Transístor Bipolar

■ Construção e Funcionamento do Transístor Bipolar



Transístor Bipolar

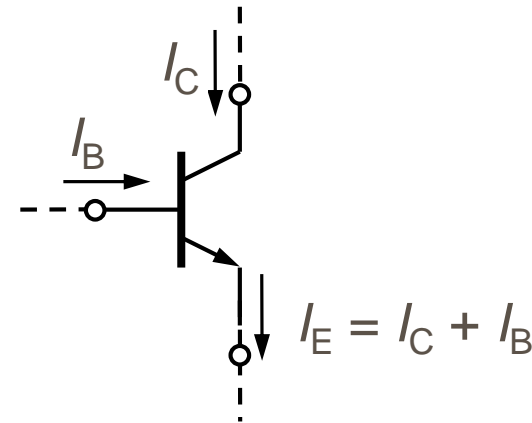
■ Construção e Funcionamento do Transístor Bipolar

... O transístor bipolar é, basicamente (pelo seu princípio de funcionamento), um amplificador de corrente ...

$$h_{FE} = \frac{I_C}{I_B}, \quad (I_C = h_{FE} \cdot I_B)$$

$h_{FE} \rightarrow$ **Ganho em corrente contínua**
(também designado por β)

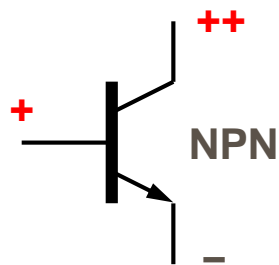
$$I_E = I_C + I_B \cong I_C \quad (\text{uma vez que } I_C \gg I_B)$$



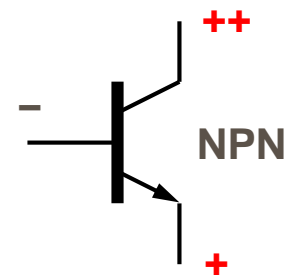
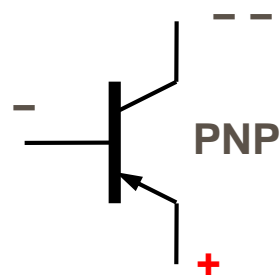
Transístor Bipolar

■ Construção e Funcionamento do Transístor Bipolar

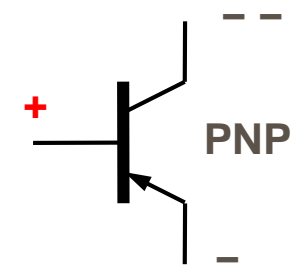
... O comportamento do transístor **PNP** é idêntico ao do **NPN** (apenas se inverte a polaridade das tensão e o sentido das correntes)...



Conduz



Não conduz



Transístor Bipolar

■ Polarização do Transístor

$$V_{BB} = R_B I_B + V_{BE}$$

$$1V \approx 10k\Omega \times I_B + 0.6V$$

$$\rightarrow I_B = \frac{1V - 0.6V}{10k\Omega} = \mathbf{40\mu A}$$

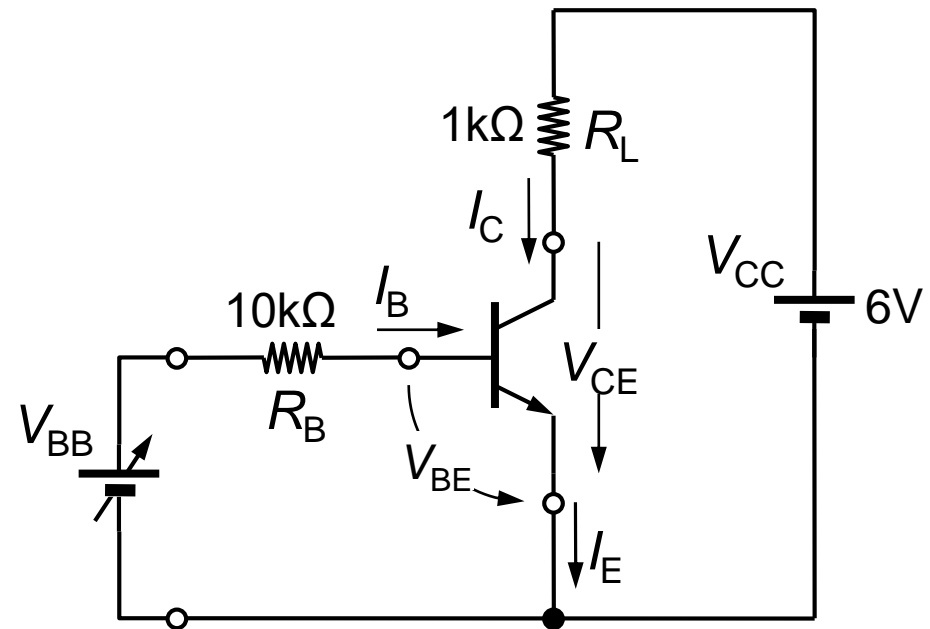
$$I_C = h_{FE} I_B = 100 \times 40\mu A = \mathbf{4mA}$$

$$I_E = I_C + I_B = \mathbf{4.04mA} \ (\approx 4mA)$$

$$V_{CC} = R_L I_C + V_{CE}$$

$$6V = 1k\Omega \times 4mA + V_{CE}$$

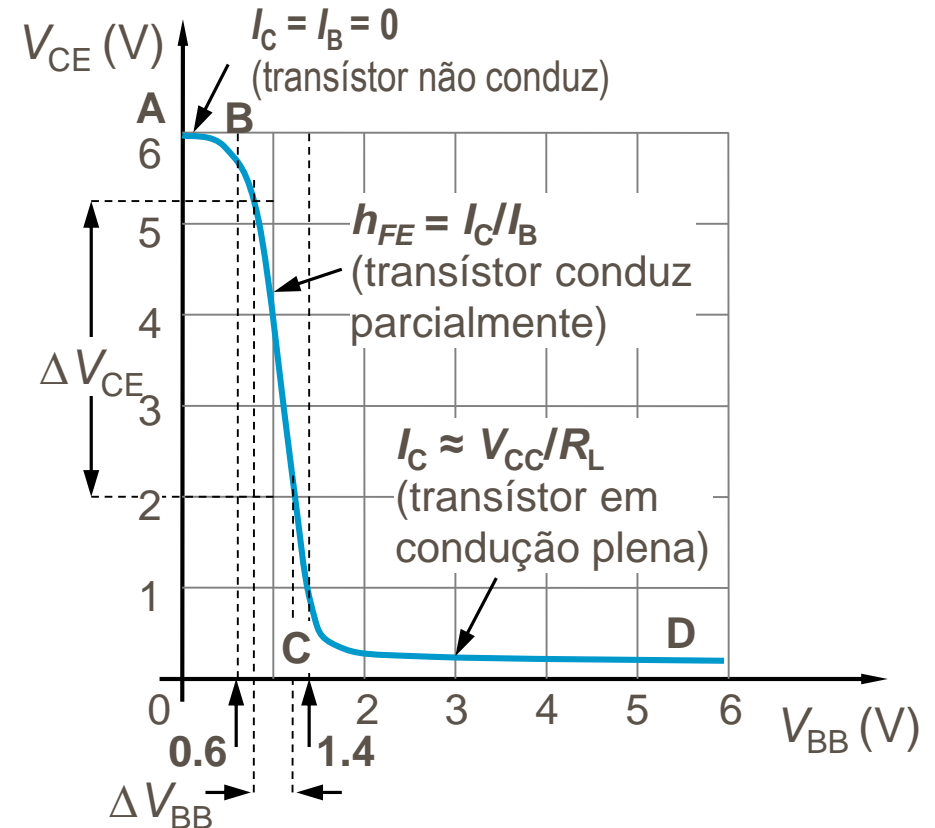
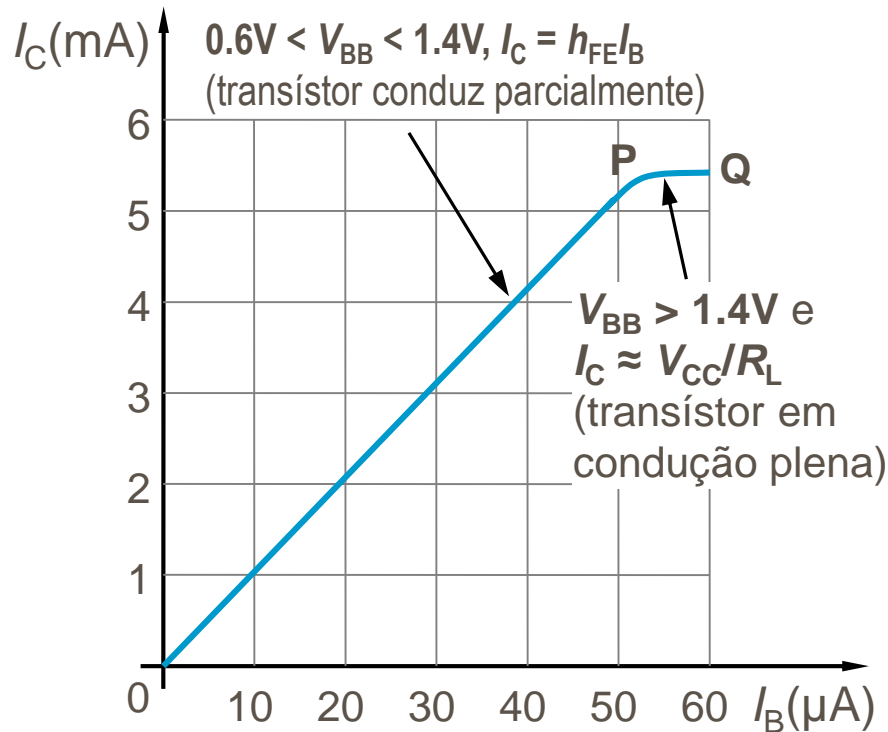
$$\rightarrow V_{CE} = \mathbf{2V}$$



$$V_{BB} \uparrow \rightarrow I_B \uparrow \rightarrow I_C \uparrow \rightarrow \downarrow V_{CE} = V_{CC} - R_L I_C \uparrow$$

Transistor Bipolar

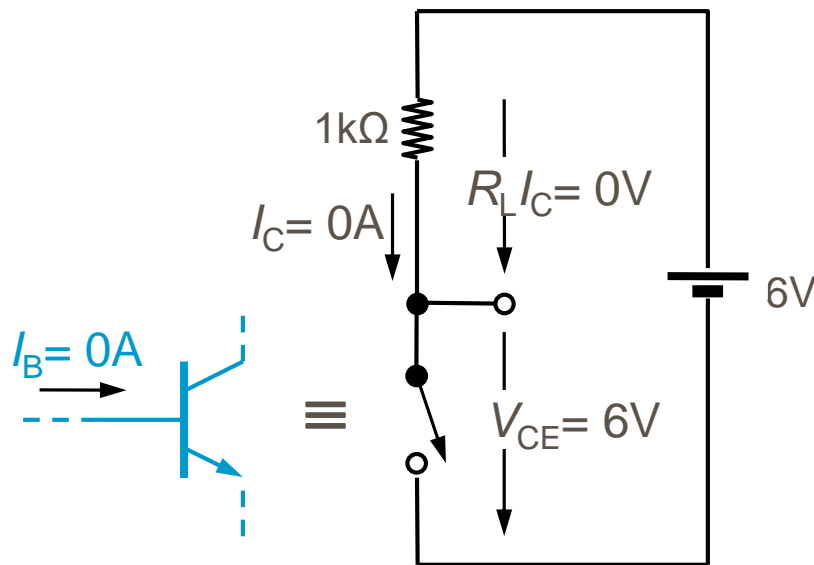
■ Polarização do Transistor



$$V_{BB} \uparrow \rightarrow I_B \uparrow \rightarrow I_C \uparrow \rightarrow \downarrow V_{CE} = V_{CC} - R_L I_C \uparrow$$

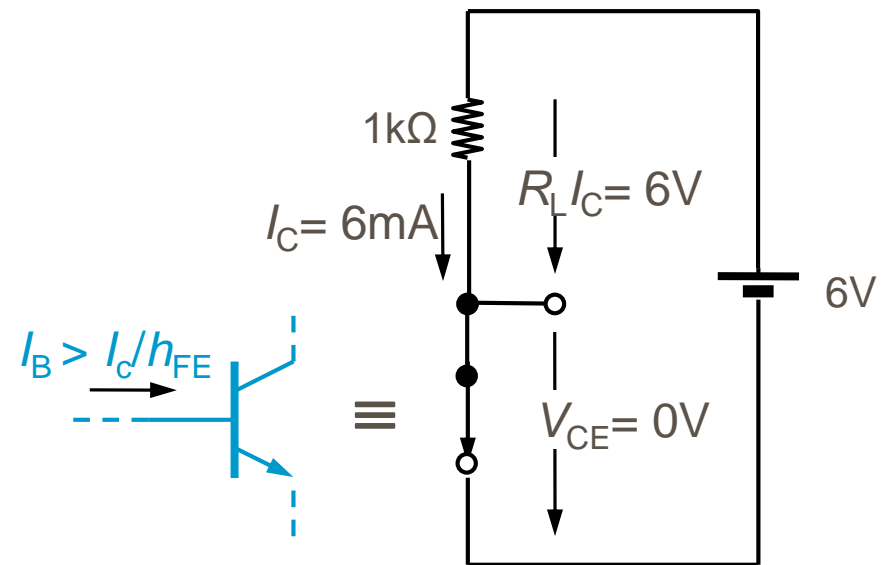
Transistor Bipolar

■ Funcionamento como Interruptor Electrónico



Transistor desligado

$$I_B = 0, \quad I_C = 0, \quad V_{CE} = V_{CC}$$

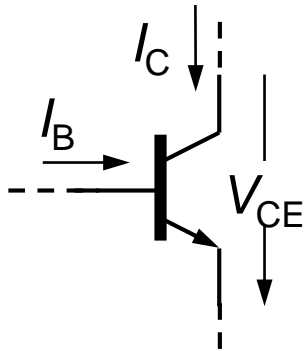


Transistor ligado

$$I_B > \frac{V_{CC}}{h_{FE} R_L}, \quad V_{CE} \approx 0, \quad I_C \approx \frac{V_{CC}}{R_L}$$

Transístor Bipolar

■ Características entrada Entrada-Saída



Região de saturação :

$$V_{CE} < 0,2 \text{ V}$$

$$I_C = \text{Max}$$

$$V_{BE} = 0,7 \text{ V}$$

Região ativa :

$$0,2 < V_{CE} \leq V_{CC}$$

$$I_C > 0 \text{ A}$$

$$V_{BE} = 0,6 \text{ a } 0,7 \text{ V}$$

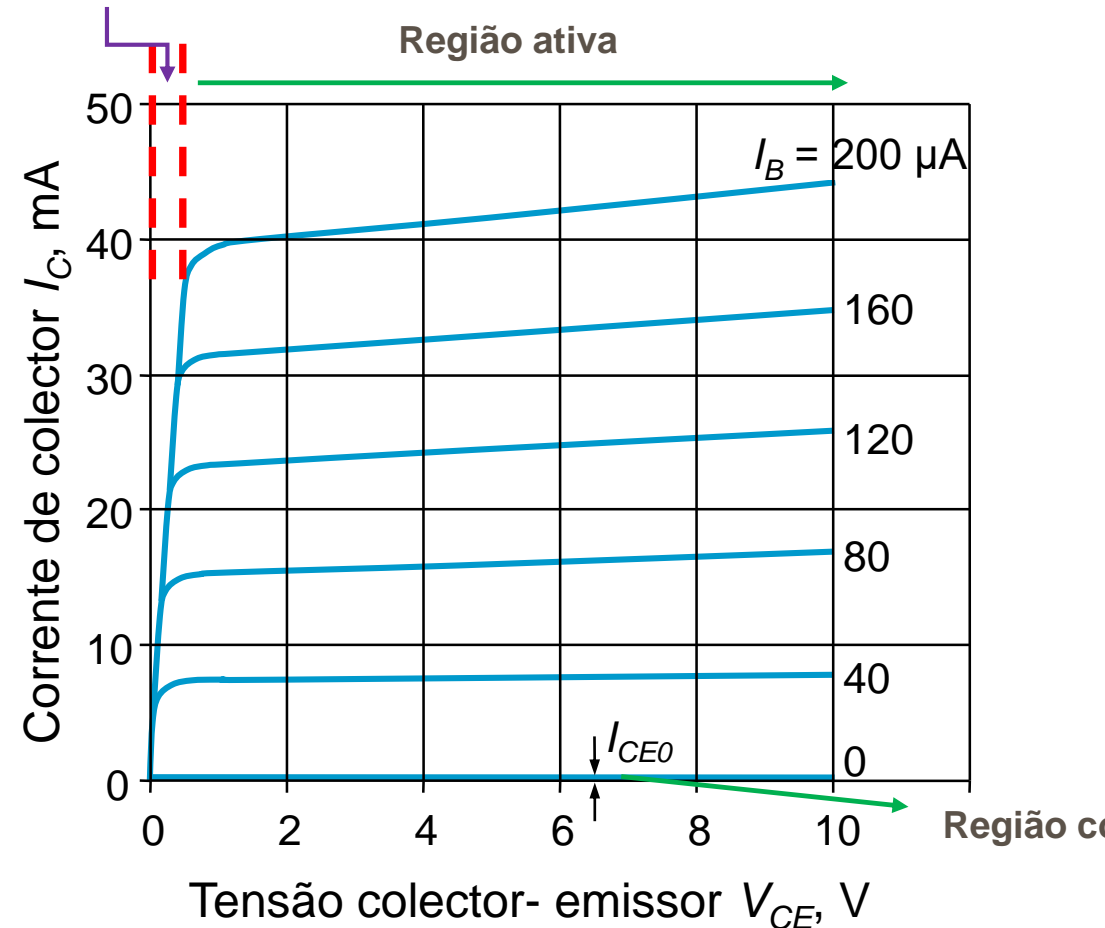
Região Corte :

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

$$I_B = I_C = I_E = 0 \text{ A}$$

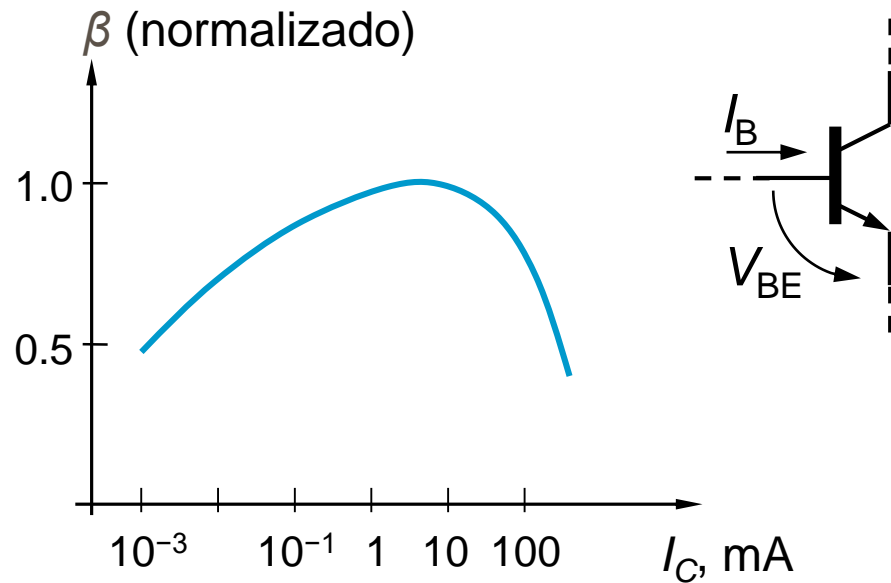
Região saturação

Região ativa

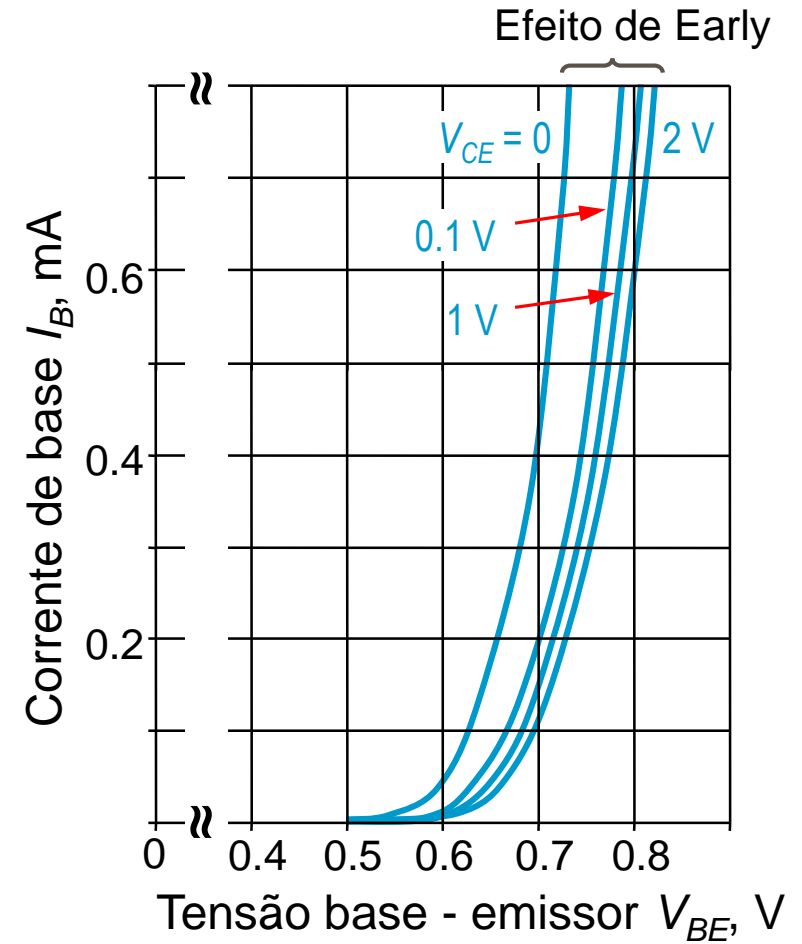


Transístor Bipolar

■ Características entrada Entrada-Saída

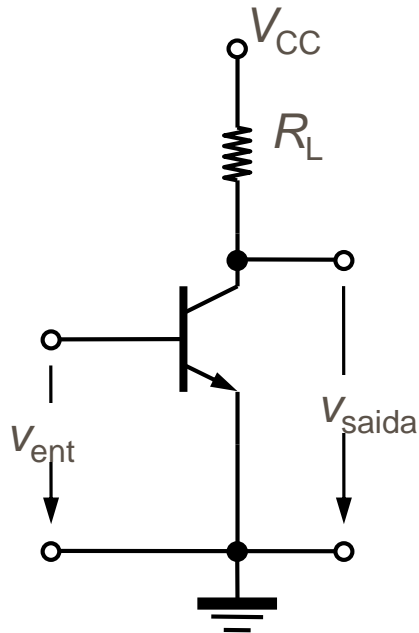


- O ganho (β) depende também da temperatura
- V_{BE} diminui cerca de $2\text{mV}/^\circ\text{C}$

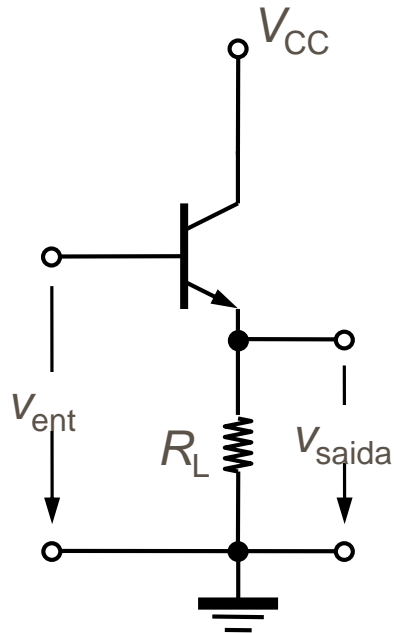


Transístor Bipolar

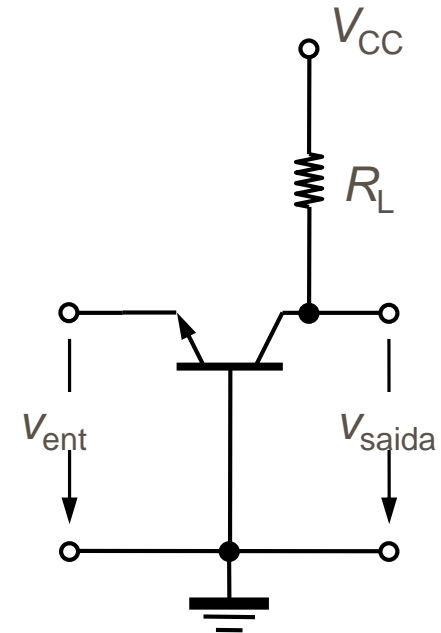
■ Configurações Básicas



Emissor Comum



Colector Comum



Base Comum

O ganho β do transístor bipolar pode ter variações até 9:1 (!) em função da corrente de colector e da temperatura

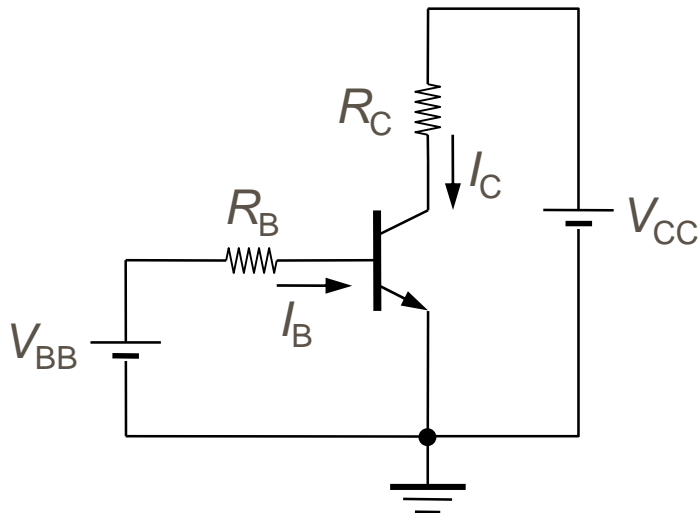
Qualidade do circuito de polarização



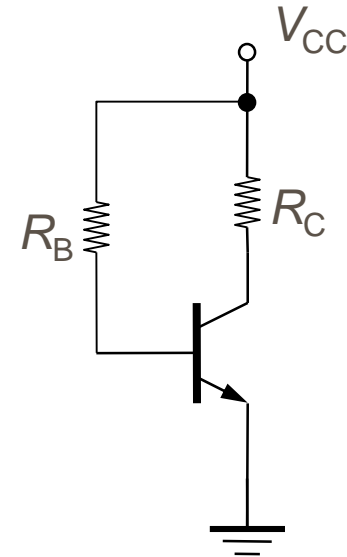
**Insensibilidade do ponto de funcionamento
relativamente ao ganho**

Circuitos de Polarização de Transístores

■ Polarização Fixa



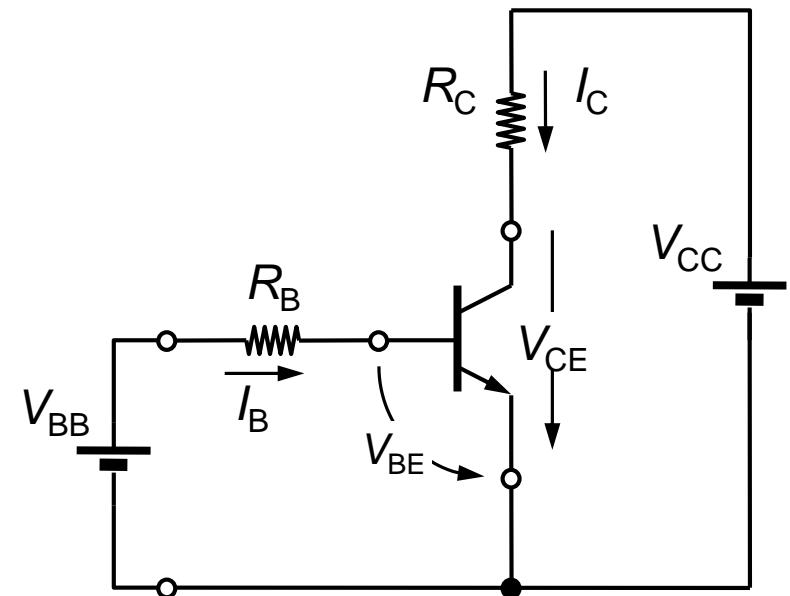
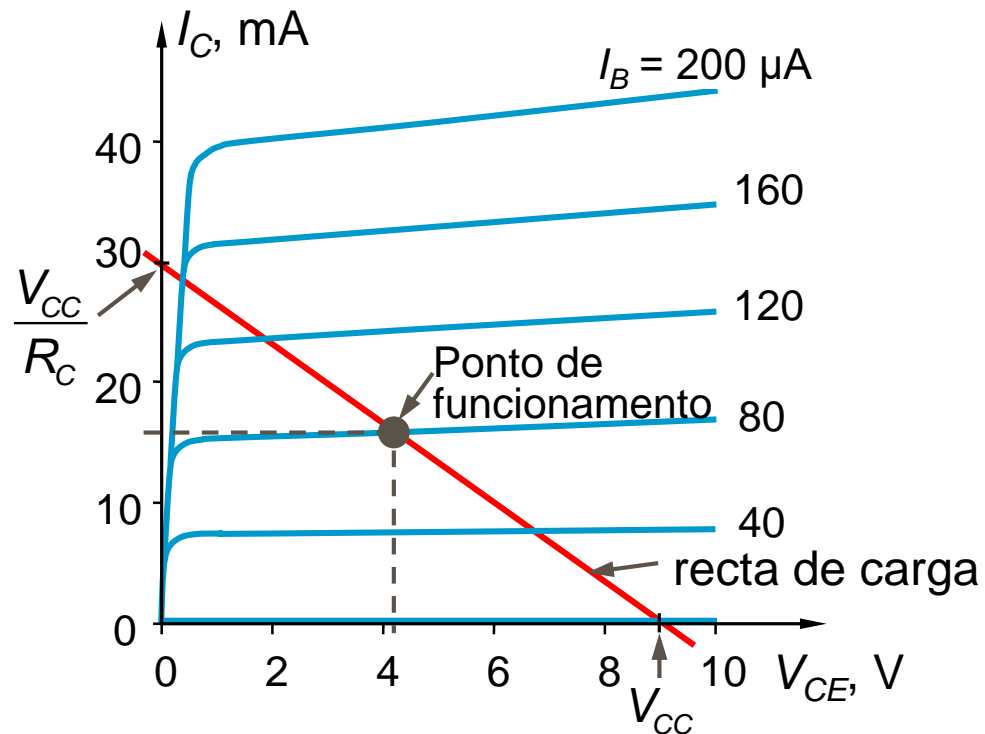
Duas fontes de alimentação



Uma fonte de alimentação

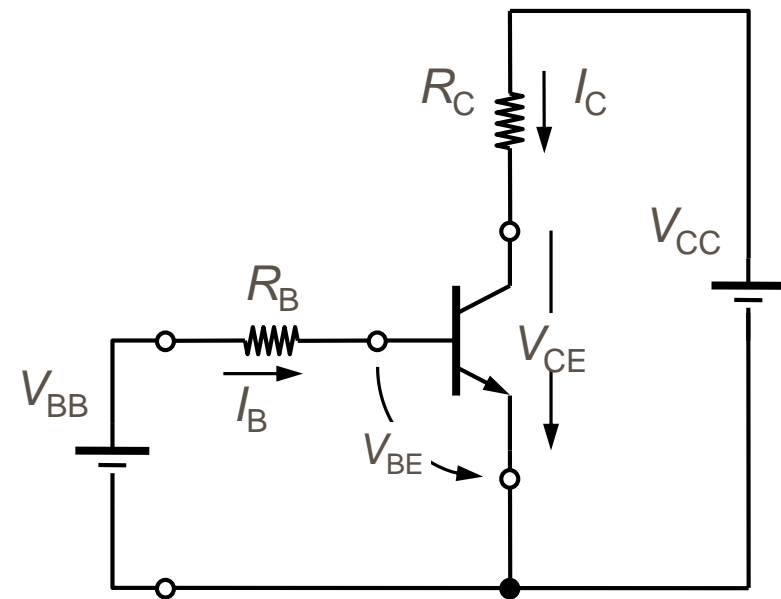
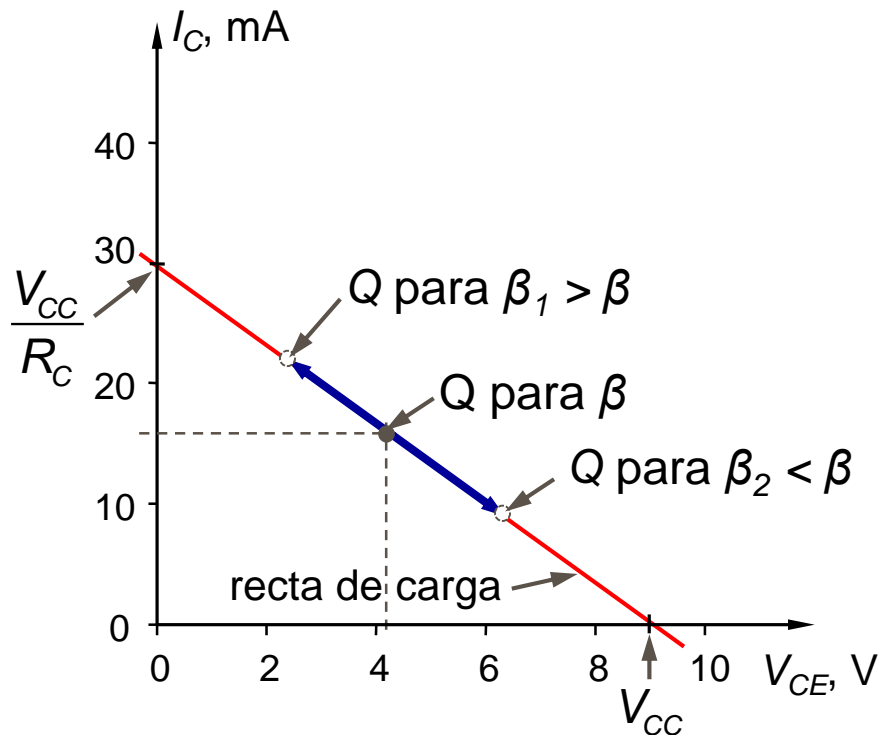
Circuitos de Polarização de Transístores

■ Reta de carga



$$V_{CC} = R_C I_C + V_{CE} \rightarrow \text{Recta de carga}$$

■ Efeito da variação do Ganho β



$$V_{CC} = R_C I_C + V_{CE} \rightarrow \text{Recta de carga}$$

■ Polarização Fixa

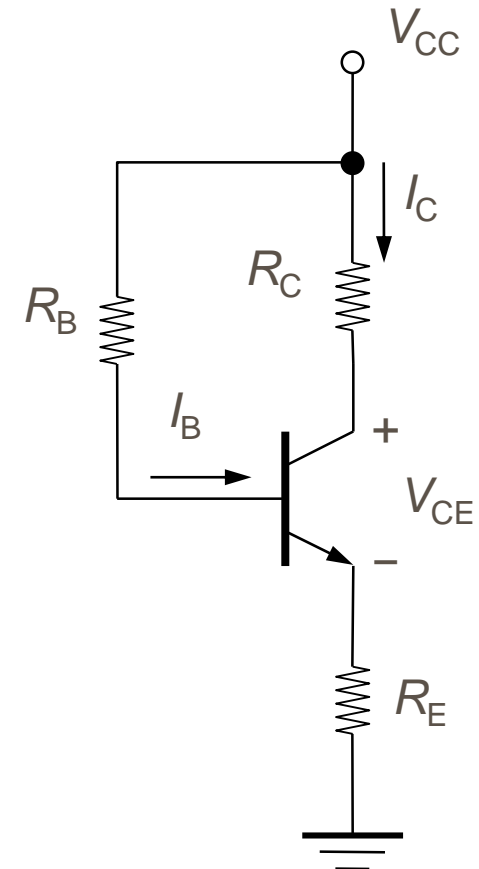
- Ponto de funcionamento muito sensível a variações de ganho
→ é impossível garantir um ponto de funcionamento estável
- Não é utilizado em circuitos lineares (amplificadores)
- Pela sua simplicidade é utilizado nos circuitos digitais com o transístor fortemente saturado para se acomodar a variação do ganho β)

Circuitos de Polarização de Transístores

■ Polarização com realimentação de emissor

- A variação de β é parcialmente compensada devido ao efeito da realimentação:

Se β aumenta \Rightarrow a corrente colector aumenta
 \Rightarrow tensão de emissor aumenta \Rightarrow tensão na
resistência de base diminui \Rightarrow a corrente de
base diminui.



Circuitos de Polarização de Transístores

■ Polarização com realimentação de emissor

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

$$I_C \approx I_E \Rightarrow V_{CC} \approx (R_C + R_E) I_C + V_{CE}$$

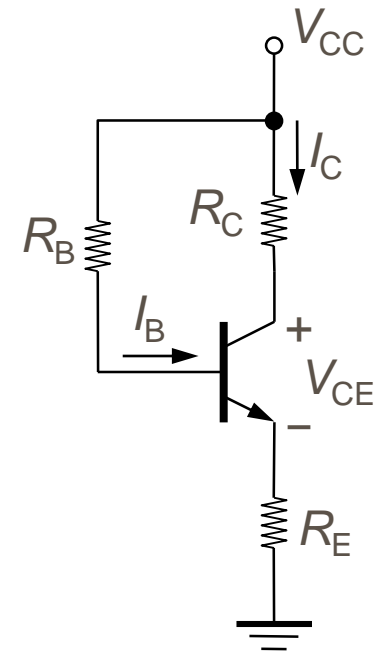
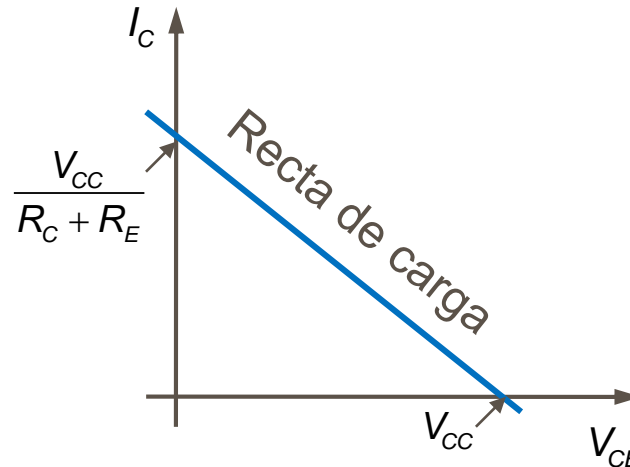
$$V_{CC} = R_B I_B + V_{BE} + R_E I_E$$

$$I_C \approx I_E, I_B = \frac{I_C}{\beta}$$

$$\Rightarrow I_C \approx \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_E + R_B / \beta}$$

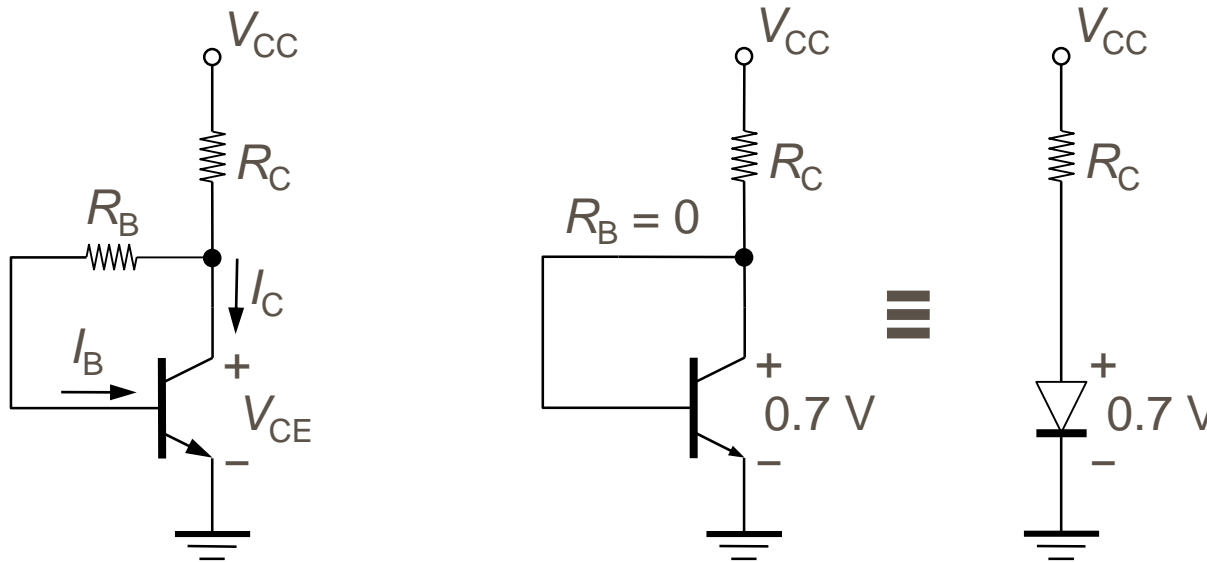
$$\text{para } R_E \gg R_B / \beta \Rightarrow I_C \approx \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_E} \quad (\text{depende pouco de } \beta)$$

→ Mas R_E elevado facilita o corte do transístor pelo que esta solução pode levar a compromissos difíceis de satisfazer...



■ Polarização com realimentação de colector

Se β aumenta $\Rightarrow I_C$ aumenta $\Rightarrow V_{CE}$ diminui \Rightarrow a tensão em R_B diminui
 \Rightarrow a corrente de base diminui.



→ Não é possível saturar o transístor uma vez que mesmo com $R_B = 0$,
 $V_{CE} = V_{BE} = 0.7\text{ V}$ ($>$ do V_{CEsat})

Circuitos de Polarização de Transístores

■ Polarização com realimentação de colector

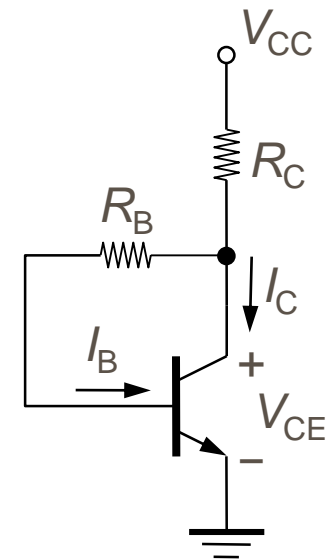
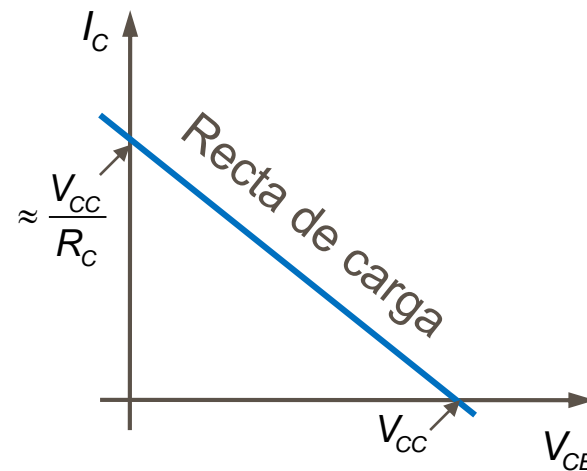
$$V_{CC} = R_C(I_C + I_B) + V_{CE}$$
$$\approx R_C I_C + V_{CE}$$

$$V_{CC} = R_C(I_C + I_B) + R_B I_B + V_{BE}$$

Uma vez que $I_B = \frac{I_C}{\beta} \ll I_C$,

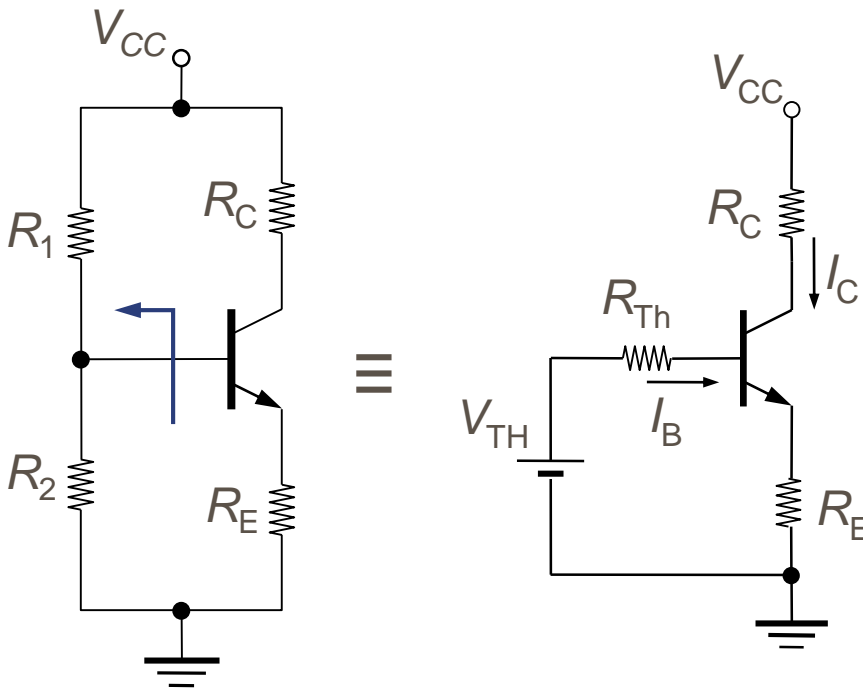
$$\Rightarrow I_C \approx \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_C + R_B/\beta}$$

para $R_C \gg \frac{R_B}{\beta} \Rightarrow I_C \approx \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_C} \approx cte$



Circuitos de Polarização de Transístores

■ Polarização por divisor de Tensão



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

→ É a solução mais utilizada em circuitos lineares

■ Polarização por divisor de Tensão

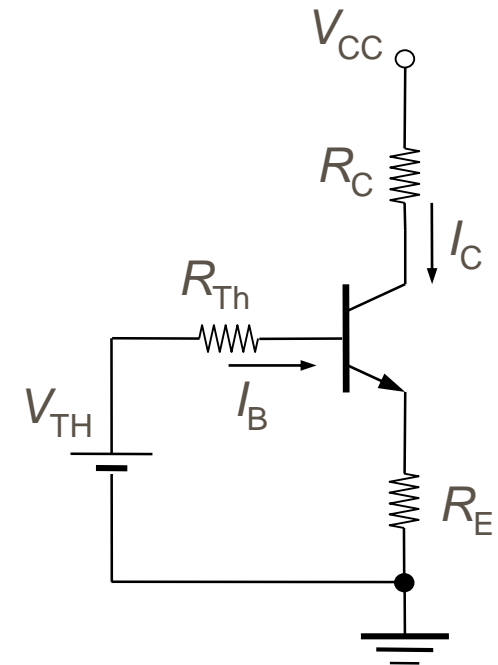
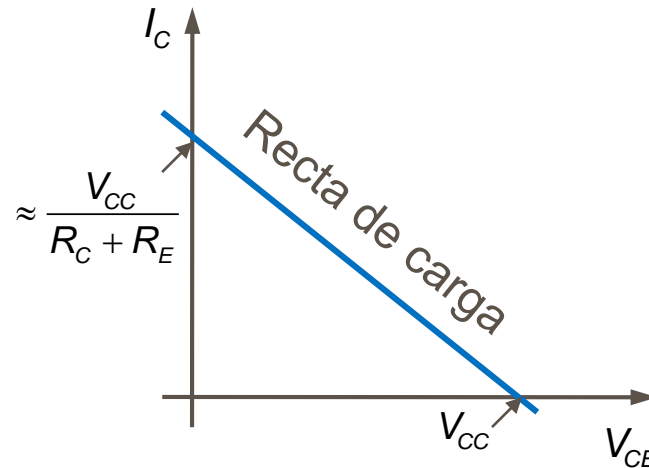
$$V_{CC} \approx (R_C + R_E)I_C + V_{CE}$$

$$V_{Th} = R_{Th}I_B + V_{BE} + R_E I_E$$
$$\approx R_{Th} \frac{I_C}{\beta} + V_{BE} + R_E I_C$$

$$\Rightarrow I_C \approx \frac{V_{Th} - V_{BE}}{R_E + R_{Th}/\beta}$$

Para $R_E \gg R_{Th}/\beta$

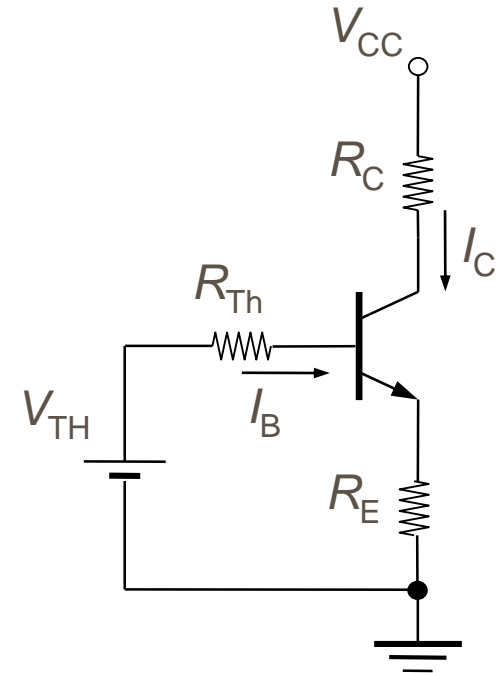
$$\Rightarrow I_C \approx \frac{V_{Th} - V_{BE}}{R_E} \approx cte.$$



■ Polarização por divisor de Tensão

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{se } R_E = 100 R_{Th} / \beta_{MIN} \\ \Rightarrow I_C \approx \frac{V_{Th} - V_{BE}}{R_E} \quad (I_C \text{ praticamente independente de } \beta) \\ \rightarrow \text{Polarização com divisor de tensão estabilizado} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{se } R_E = 10 R_{Th} / \beta_{MIN} \\ \Rightarrow I_C \text{ é mais sensível às variações de } \beta \\ \quad (\text{os valores de } R_1 \text{ e } R_2 \text{ são mais elevados}) \\ \rightarrow \text{Polarização com divisor de tensão firme} \end{array} \right.$$



■ Polarização por divisor de Tensão (dicas para o projecto)

$$V_{CE} = 0.5 \cdot V_{CC}$$

$$V_{RE} = 0.1 \cdot V_{CC} \quad (\approx R_E I_C)$$

$$V_{RC} = 0.4 \cdot V_{CC} \quad (= R_C I_C)$$

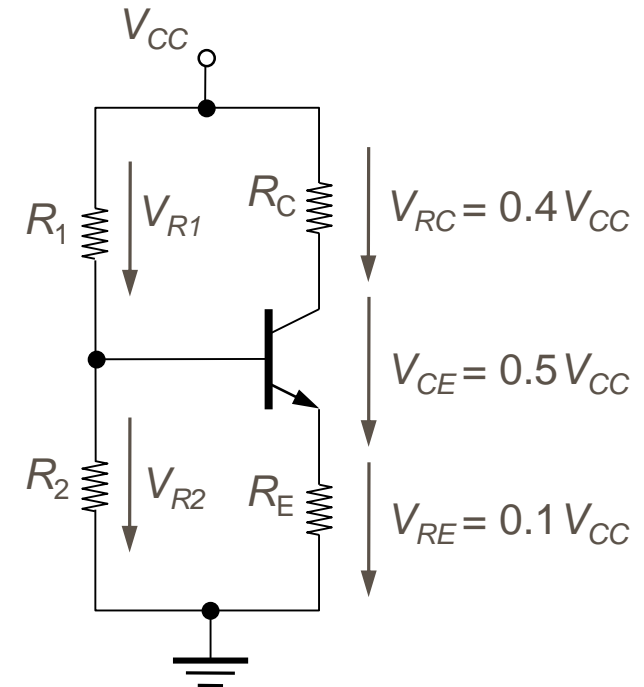
$$\Rightarrow \frac{V_{RC}}{V_{RE}} \approx 4 \Rightarrow R_C = 4 \times R_E$$

$$V_{R2} \approx V_{RE} + 0.6V \approx 0.1 \cdot V_{CC}$$

$$\Rightarrow R_2 \ll R_1 \Rightarrow R_{Th} = R_1 // R_2 \approx R_2$$

$$\text{Ou } \begin{cases} R_2 \leq 0.01\beta R_E \rightarrow \text{divisor de tensão quase ideal} \\ \updownarrow \\ R_2 \leq 0.1\beta R_E \rightarrow \text{divisor de tensão firme} \end{cases}$$

$$R_1 \approx \frac{V_{R1}}{V_{R2}} R_2 = 9R_2$$



■ Polarização do Emissor

$$V_{CC} + V_{EE} \approx (R_C + R_E)I_C + V_{CE}$$

$$V_{EE} = R_B I_B + V_{BE} + R_E I_E$$

$$\approx R_B \frac{I_C}{\beta} + V_{BE} + R_E I_C$$

$$\Rightarrow I_C \approx \frac{V_{EE} - V_{BE}}{R_E + R_B/\beta}$$

para $R_E \gg R_B/\beta$

$$\Rightarrow I_C \approx \frac{V_{EE} - V_{BE}}{R_E} \approx \text{cte. (Q pouco sensível às variações de } \beta)$$

→ Solução utilizada quando se dispõe de uma alimentação dividida

