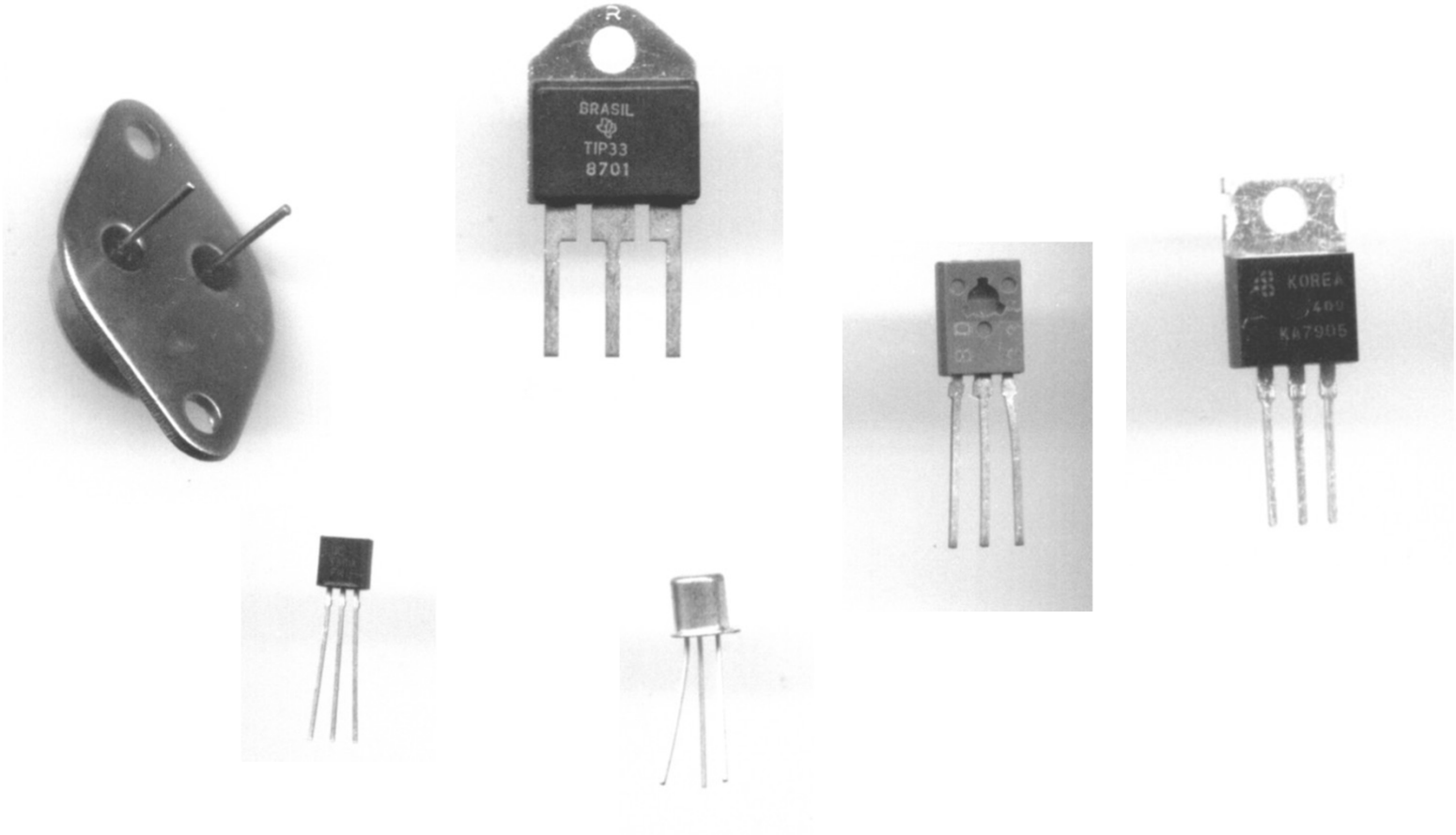
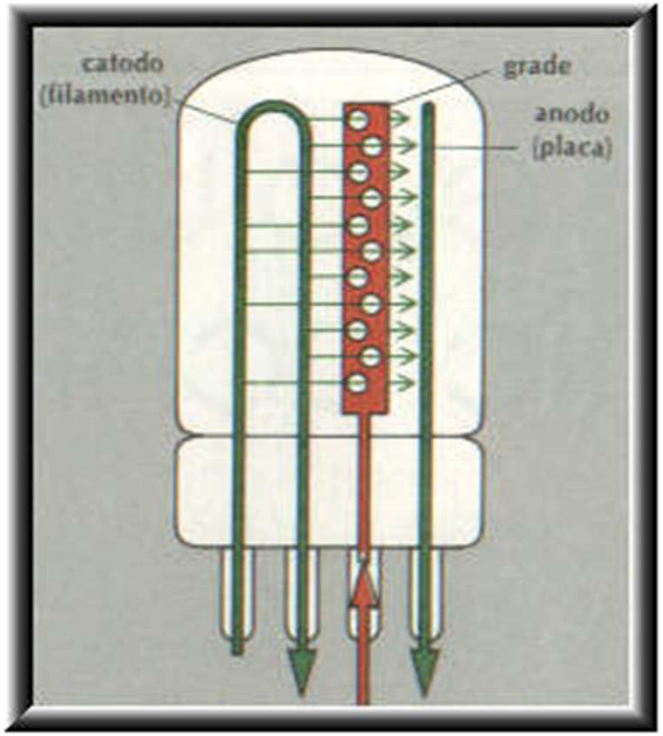
2 – Transistor Bipolar



- Antes de 1950 todo equipamento eletrônico utilizava válvulas;
- O aquecedor de uma válvula típica consumia muitos watts de potência.



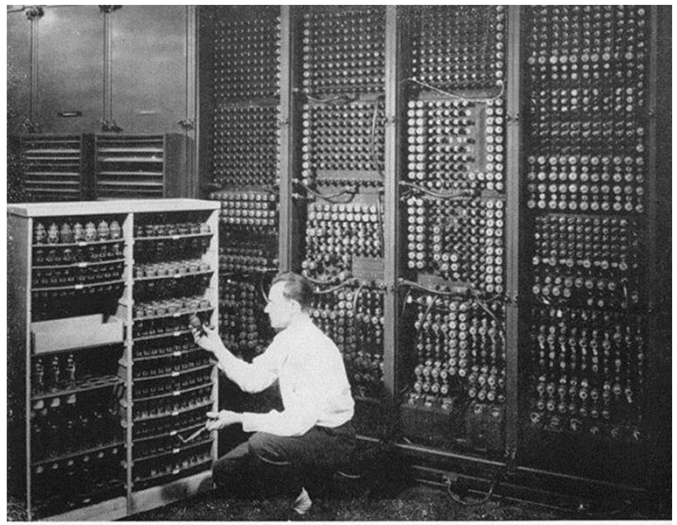
- O transistor projetou a indústria dos semicondutores e todas as invenções relacionadas, como os circuitos integrados, os microprocessadores, os componentes optoeletrônicos, rádios etc. e criou a indústria de computadores.

ENIAC 1946

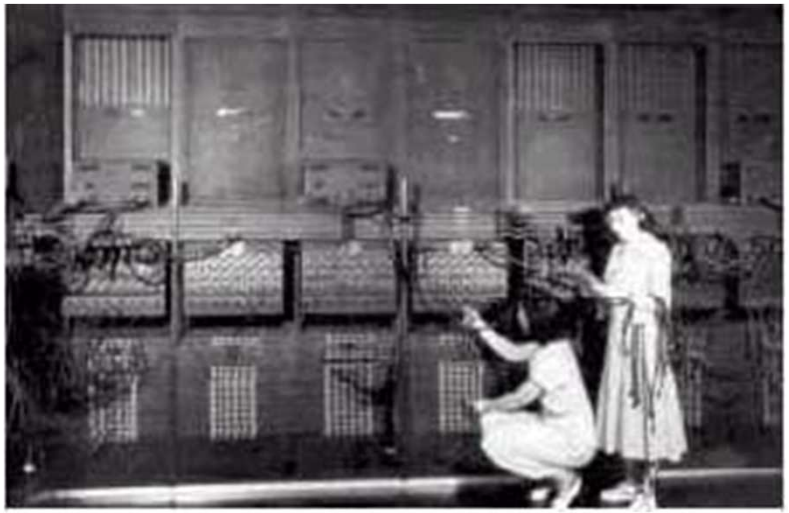
Eletronic Numerical Interpreter and Calculator,

"Na medida em que uma calculadora no ENIAC é equipada com 18 mil tubos de vácuo e pesa 30 toneladas, os computadores do futuro deverão ter apenas mil tubos de vácuo e pesar 1,5 mil toneladas".

Revista Popular Mechanics, em 1949.



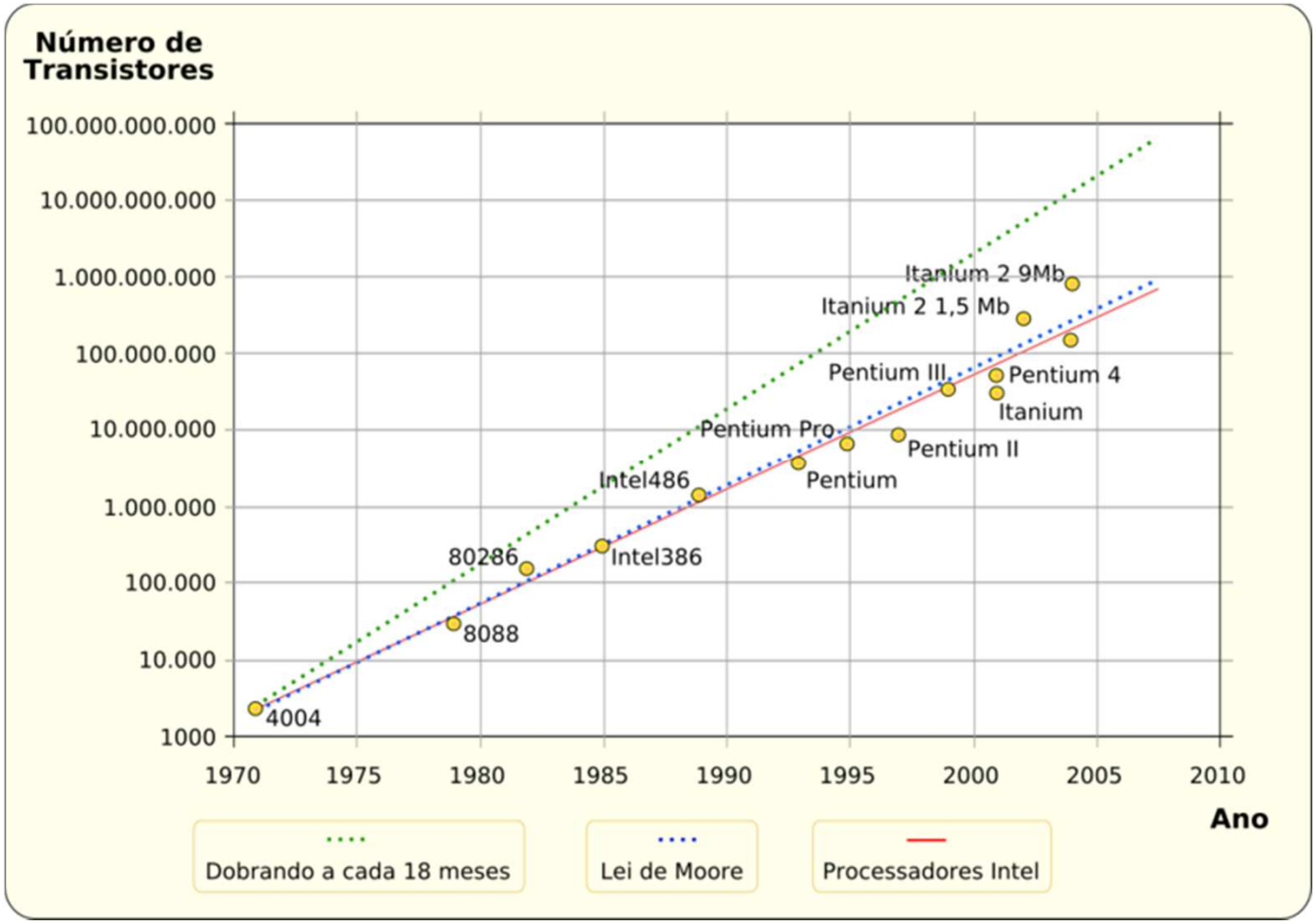
Replacing a bad tube meant checking among ENIAC's 19,000 possibilities.



O ENIAC tinhas as seguintes características:

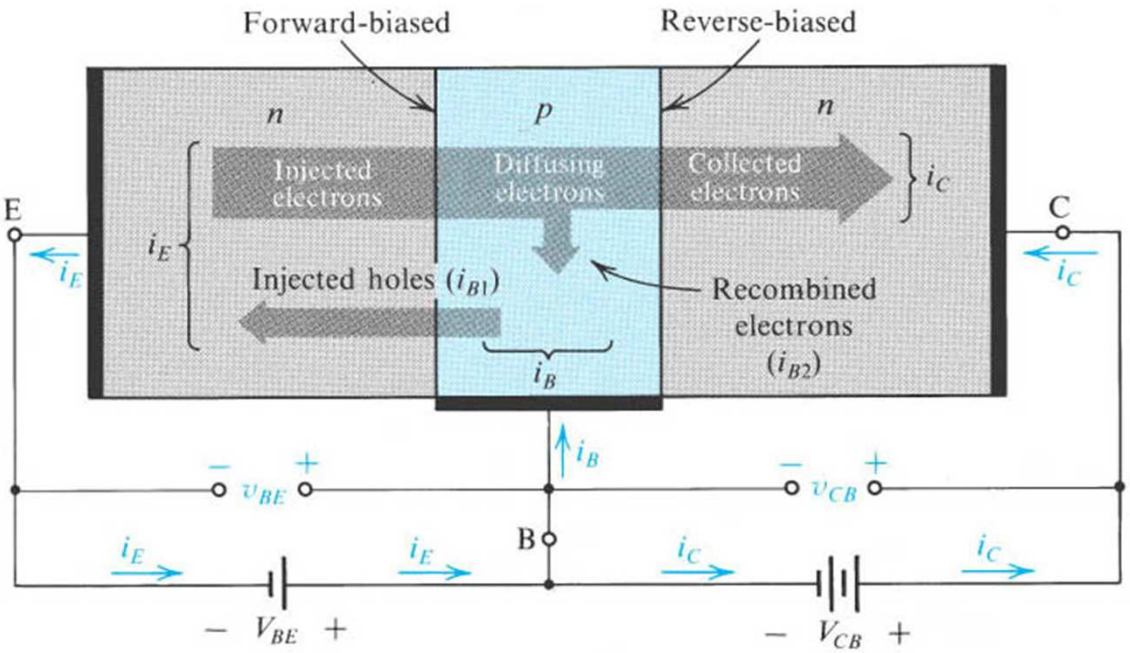
- *totalmente eletrônico*
- *17.468 válvulas*
- *500.000 conexões de solda*
- *30 toneladas de peso*
- *180 m² de área construída*
- *5,5 m de altura*
- *25 m de comprimento*
- *realizava uma soma em 0,2 ms*
- *realizava uma multiplicação em 5ms com números de 10 dígitos*.

- Em 1965 o Dr. Gordon E. Moore apresentou um artigo prevendo que a quantidade de transistores em uma única pastilha dobraria a cada dois anos.



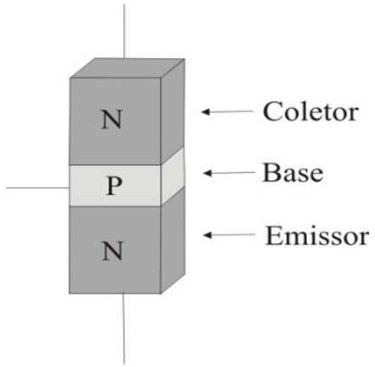
- O transistor bipolar de junção (BJT) foi inventado nos laboratórios da Bell Telephone em 1947.
- O BJT é formado por três regiões dopadas denominadas:

  EMISSOR; BASE e COLETOR

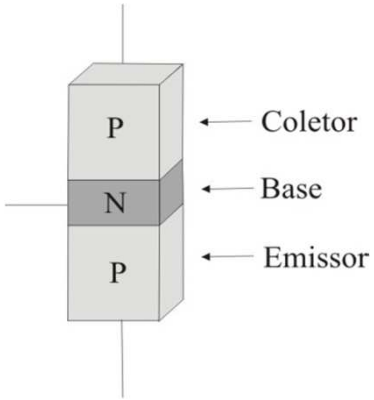


- Tipo de transistor

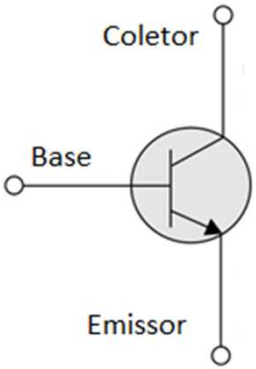
Regiões do transistor NPN

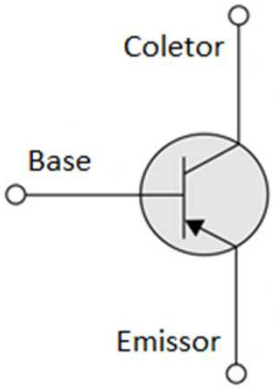


Regiões do transistor PNP



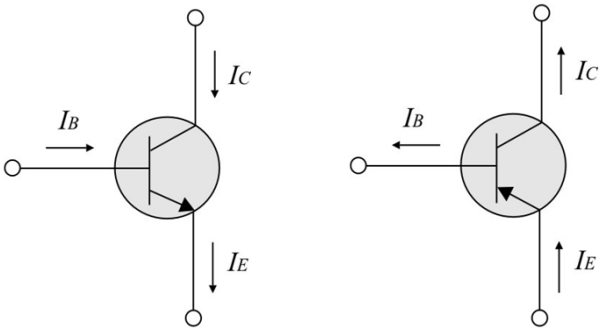
Símbolos





Correntes e tensões no transistor

$$I_E = I_C + I_B$$



A relação entre a corrente do coletor e a da base é dada pelo ganho de corrente do transistor, que em corrente contínua é representado por β ou hFE, e é definido por:

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

As equações anteriores podem ser rearranjadas em diferentes formas:

$$I_C = \beta_{CC} \cdot I_B$$

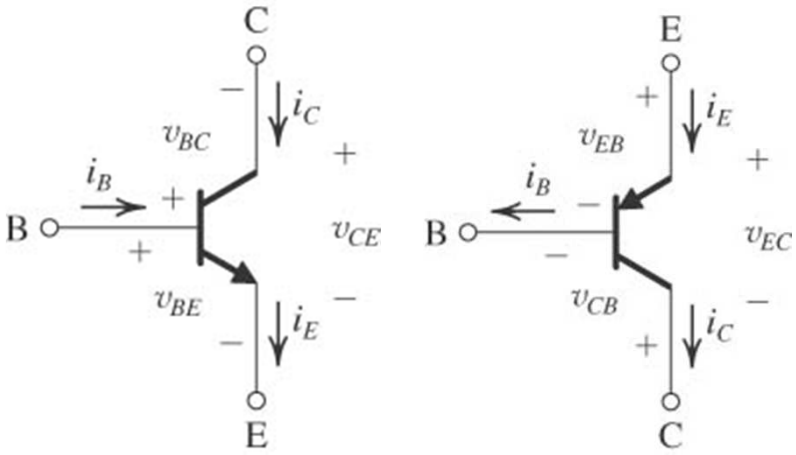
$$I_E = I_B \cdot (\beta_{CC} + 1)$$

Para valores elevados de β (normalmente β>100) :

$$\beta_{CC} + 1 \cong \beta_{CC}$$

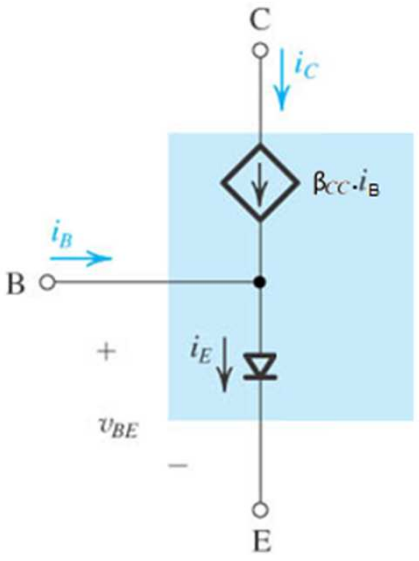
Podendo-se considerar:

$$I_E \cong I_B \cdot \beta_{CC} \cong I_C$$



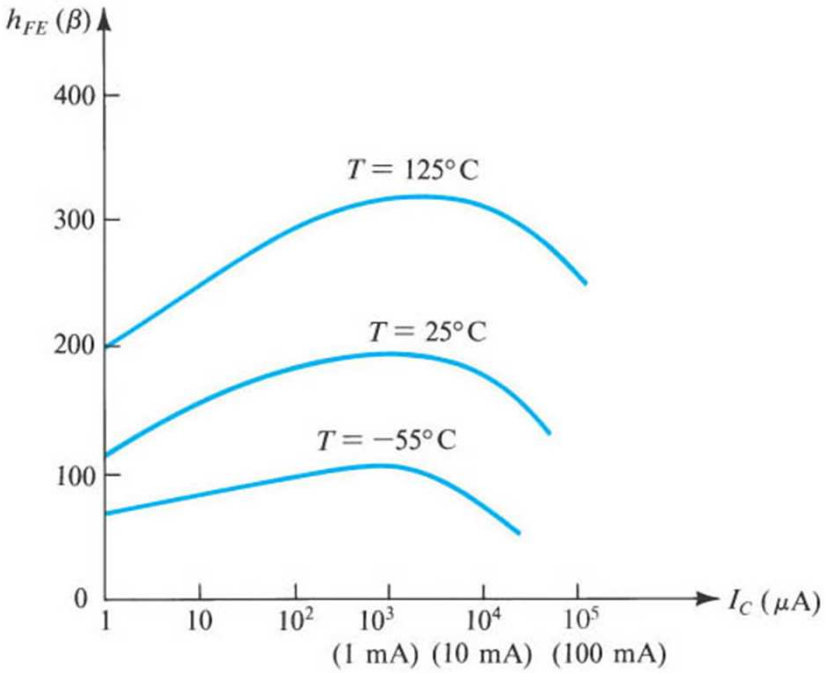
Modelo Equivalente

Existem diversos modelos que podem ser adotados para representar o transistor, um destes modelos foi proposto por Ebers e Moll e está representado de forma simplificada na figura abaixo.

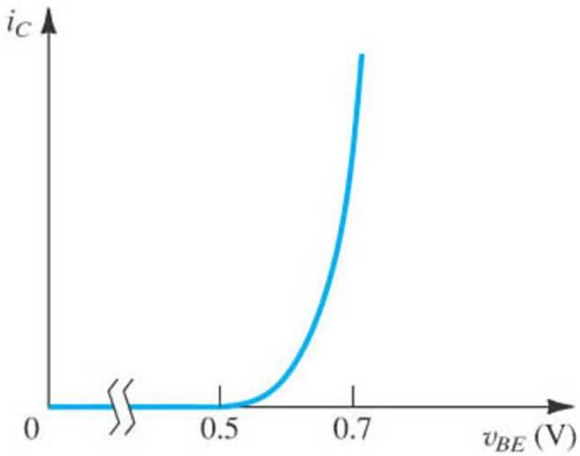


Variações no Ganho

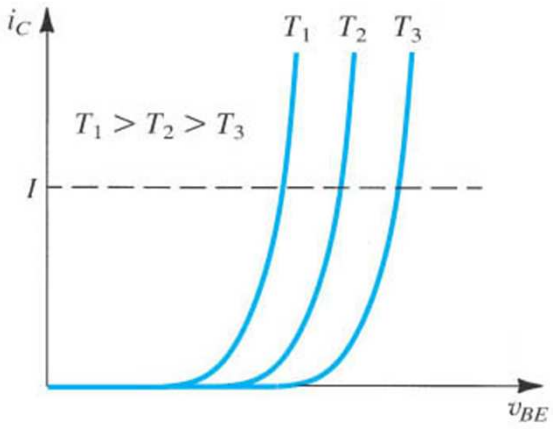
Devido às tolerâncias de fabricação, o ganho de um transistor pode variar numa faixa de até 3:1. Além disso, outros fatores como corrente do coletor e temperatura também afetam o ganho.



Representação Gráfica das Características do Transistor



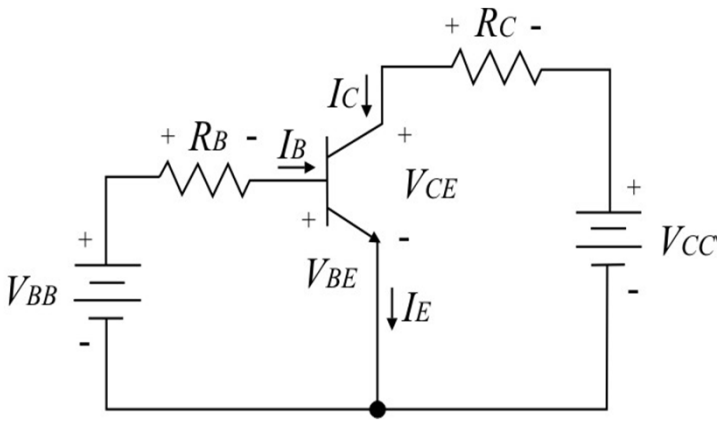
Característica Ic - V_{BE}



Efeito da temperatura sobre a característica Ic - V_{BE} com corrente de emissor constante

A junção base-emissor do transistor é similar à junção PN de um diodo.

Representação Gráfica das Características do Transistor



Circuito emissor comum

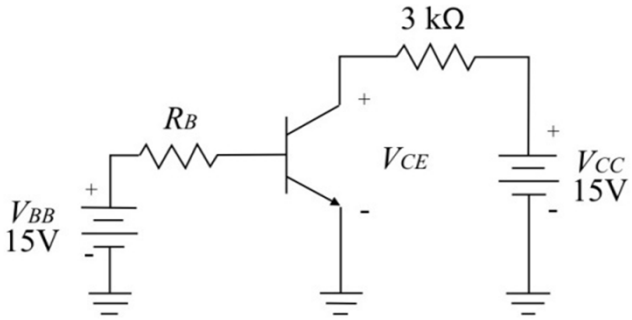
$$I_C = \beta_{CC} \cdot I_B$$

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

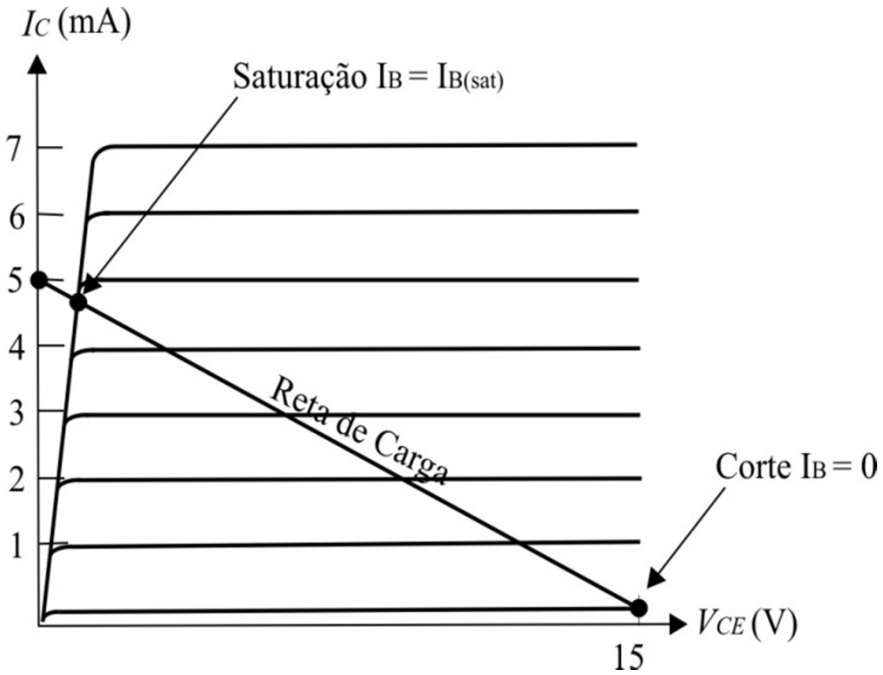
$$V_{CE} = V_{CC} - I_C \cdot R_C$$

Regiões de operação do transistor

Reta de Carga



Circuito emissor comum



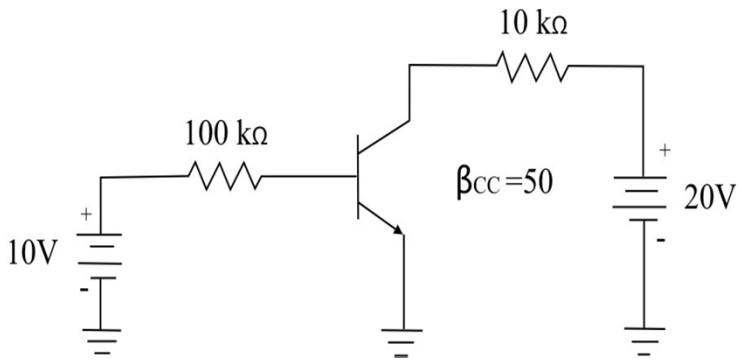
Reta de carga

$$I_C = \beta_{CC} \cdot I_B$$

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

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

Identificando a Saturação



Circuito emissor comum

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B} = \frac{10 - 0{,}7}{100k} = 99{,}3\mu A$$

Considerando operação na RAD:

$$I_C = \beta \cdot I_B = 50 \cdot 99{,}3\mu = 4{,}96\, mA$$

$$V_{CE} = 20 - 4{,}96m \cdot 10k = -29{,}6V$$

Resultado impossível!

O transistor não está operando na RAD.

Considerando operação na SAT:

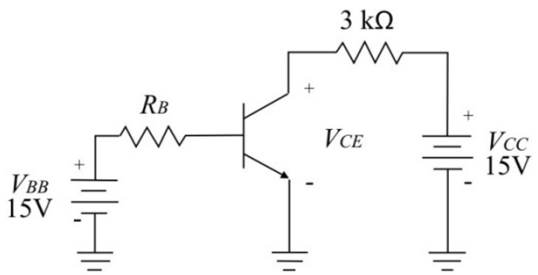
$$V_{CE(Sat)} \approx 0{,}3\, V$$

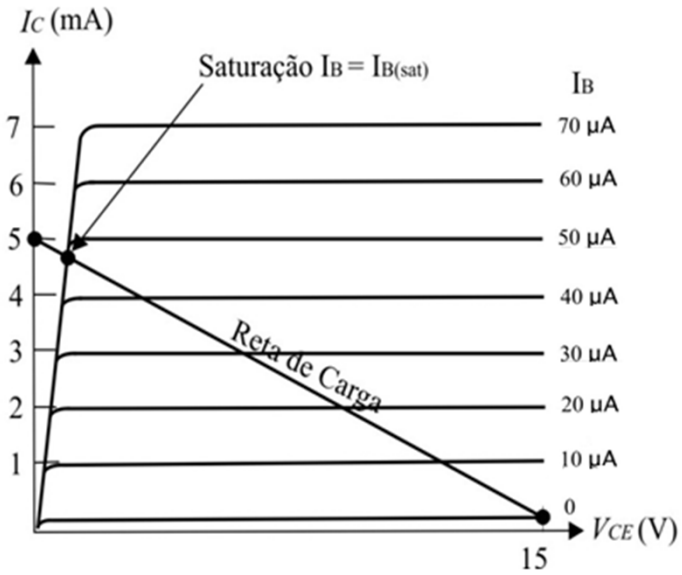
$$I_{C(Sat)} = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C} = \frac{20 - 0{,}3}{10k} = 1{,}97mA$$

O ganho de corrente é menor quando o transistor está operando na saturação:

$$\beta_{CC(Sat)} = \frac{I_{C(Sat)}}{I_B} = \frac{1{,}97m}{99{,}3\mu} = 19{,}84$$

O transistor como chave





O transistor do circuito ao lado funcionando na saturação terá uma corrente do coletor dada por:

$$I_{C(Sat)} = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C} = \frac{15 - 0{,}3}{3k} = 4{,}9mA$$

Antes da saturação tem-se a seguinte equação aproximada:

$$I_{B\,máx} \cong \frac{I_{C\,sat}}{\beta_{CC}} = \frac{4{,}9\,m}{100} = 49\,uA$$

Ou seja, valores de $I_B > 50\,\mu A$ levariam o transistor a funcionar na saturação, como representado na reta de carga.

Devido à possíveis variações no ganho do transistor, é prudente garantir sua saturação projetando a corrente de base entre 2 a 10 vezes o valor da corrente calculada.

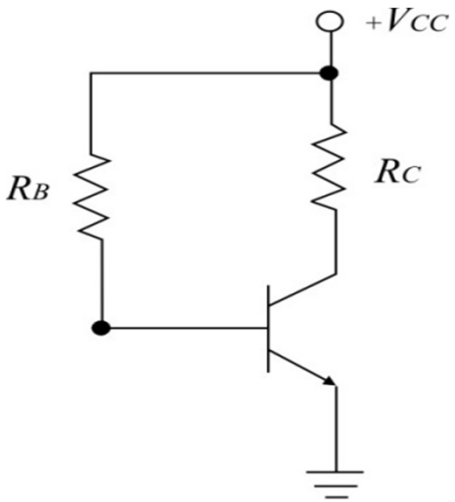
Desta forma: $I_{B\,sat} = 10 \cdot I_{B\,máx} = 10 \cdot 49u = 0{,}49\,mA$

E o resistor de base seria calculado por:

$$R_B = \frac{15 - 0{,}7}{0{,}49m} = 29{,}18\,k\Omega$$

Circuitos de Polarização

Polarização de Base:

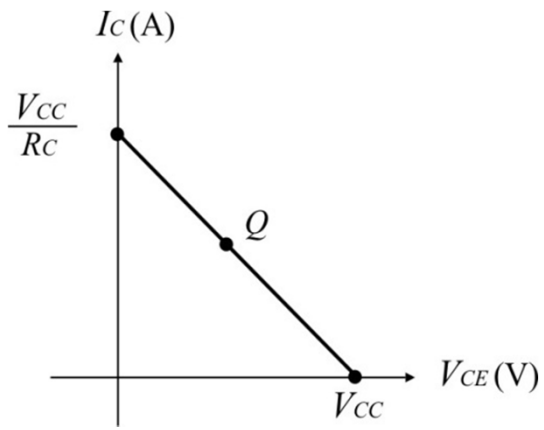


- A fonte de alimentação da base pode ser a mesma que alimenta o coletor.
- Ponto Q instável.

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

$$I_C = \beta_{CC} \cdot I_B$$

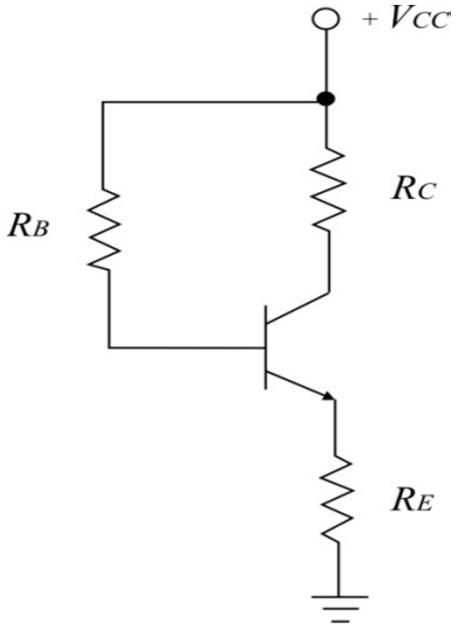
$$V_{CE} = V_{CC} - I_C \cdot R_C$$



Circuitos de Polarização

Polarização por Realimentação do Emissor:

- A fonte de alimentação da base pode ser a mesma que alimenta o coletor.
- Reduz o deslocamento do ponto Q com a variação do ganho

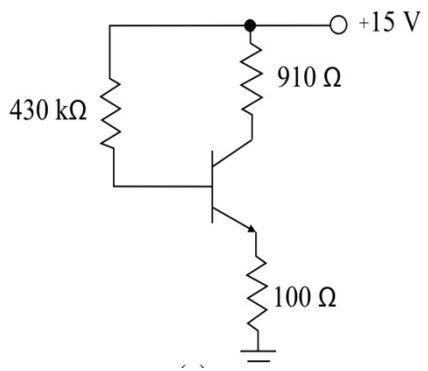


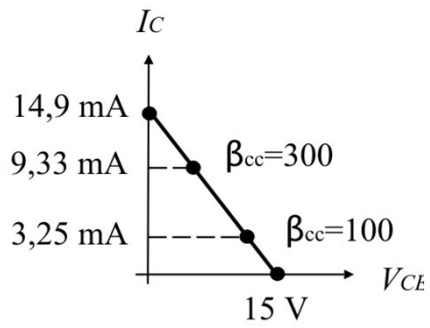
$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C + R_E}$$

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

$$I_C = \beta_{CC} \cdot I_B$$

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_E + R_B / \beta_{CC}}$$

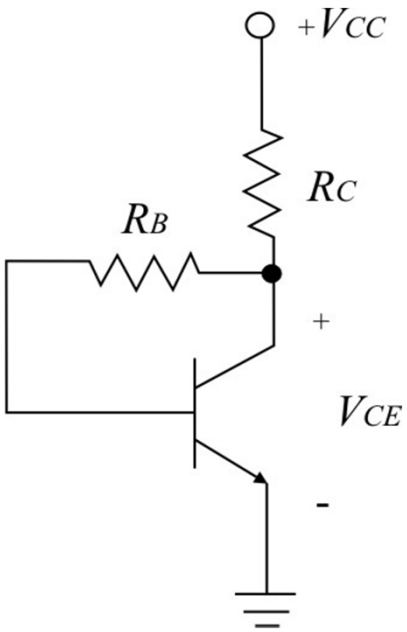




Circuitos de Polarização

Polarização por Realimentação do Coletor:

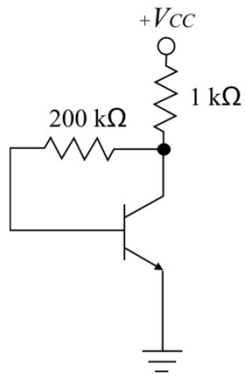
- A fonte de alimentação da base é a mesma que alimenta o coletor.
- É menos sensível à variação do ganho que os circuitos anteriores



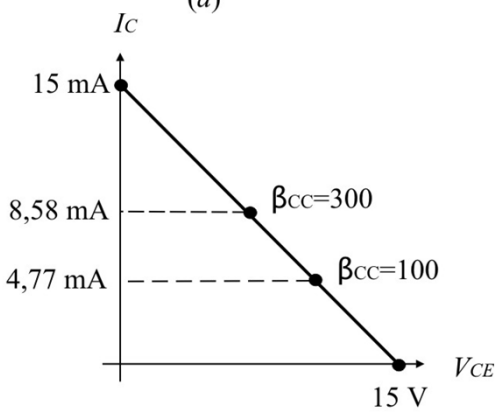
$$V_{CE} - V_{CC} + (I_C + I_B) \cdot R_C = 0$$

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

$$I_C = \beta_{CC} \cdot I_B$$



(a)

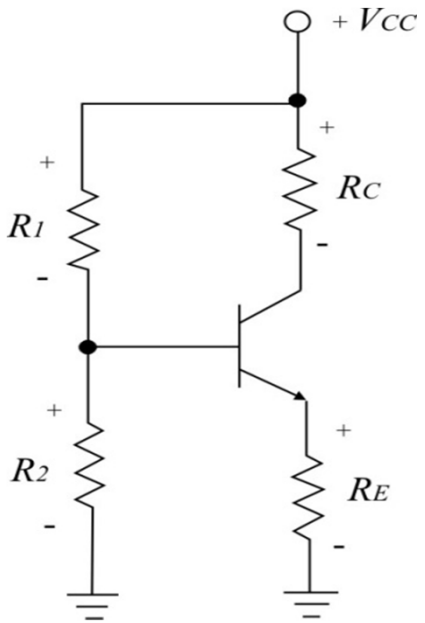


$$Para \quad I_C \approx I_C + I_B$$

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_C + R_B / \beta_{CC}}$$

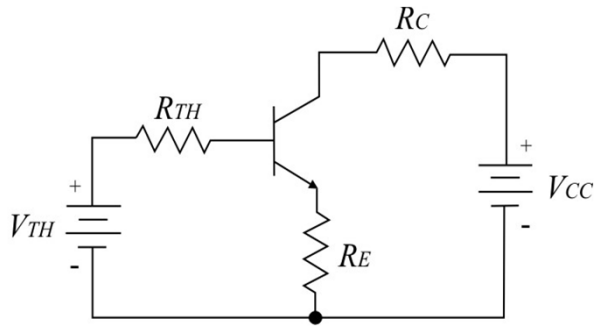
Circuitos de Polarização

Polarização por Divisor de Tensão:



- A fonte de alimentação da base é a mesma que alimenta o coletor.
- É pouco sensível à variação do ganho

Circuito equivalente:



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

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

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

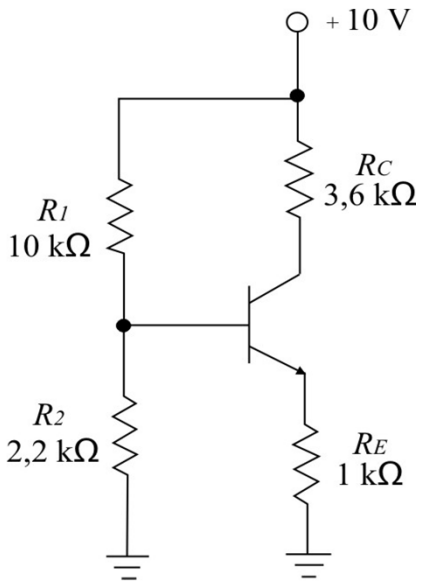
$$I_E = \frac{V_{TH} - V_{BE}}{R_E + R_{TH} / \beta_{CC}}$$

$$I_B \cong \frac{I_E}{\beta_{CC}}$$

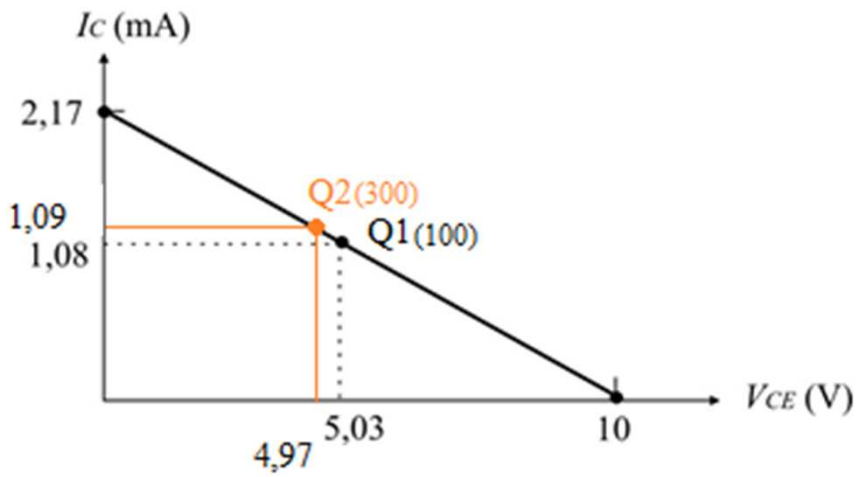
Circuitos de Polarização

Polarização por Divisor de Tensão:

$$I_C = \frac{V_{TH} - V_{BE}}{R_E + R_{TH} / \beta_{CC}}$$



Divisor de tensão firme:

$$R_E > 100 \cdot \frac{R_{TH}}{\beta_{CC}}$$

$$R_{TH} < \frac{\beta_{CC} \cdot R_E}{100}$$