



3. Transistor bipolar



4.1 – Transistor de junção bipolar.

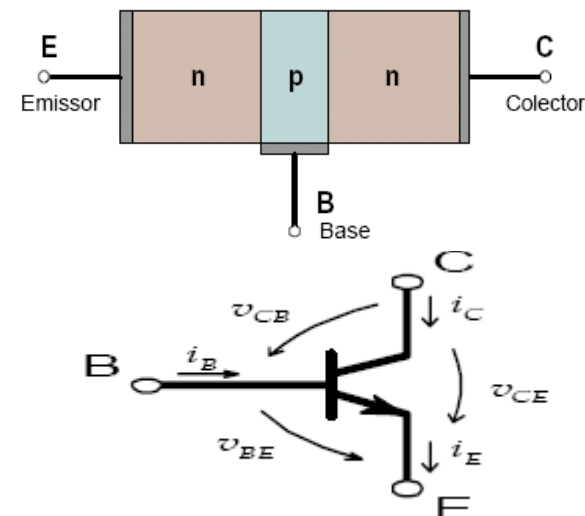
O **transistor de junção bipolar (TJB)** é formado por duas junções PN partilhando uma camada semicondutora comum.

É um dispositivo bipolar, porque a corrente no transistor é devida ao movimento de dois tipos cargas, electrões e buracos.

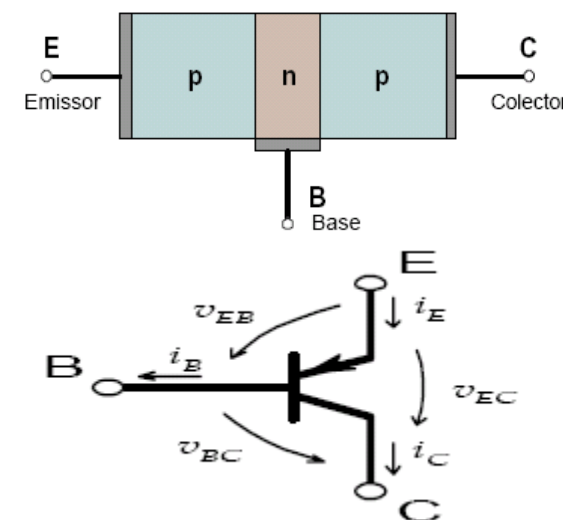
Podem ser do tipo NPN ou PNP consoante a camada comum seja tipo P ou tipo N, respectivamente.

Possuem três terminais designados por base, emissor e colector, e representam -se pelos símbolos indicados. A seta no emissor indica o sentido da corrente quando a junção base-emissor está polarizada directamente.

NPN

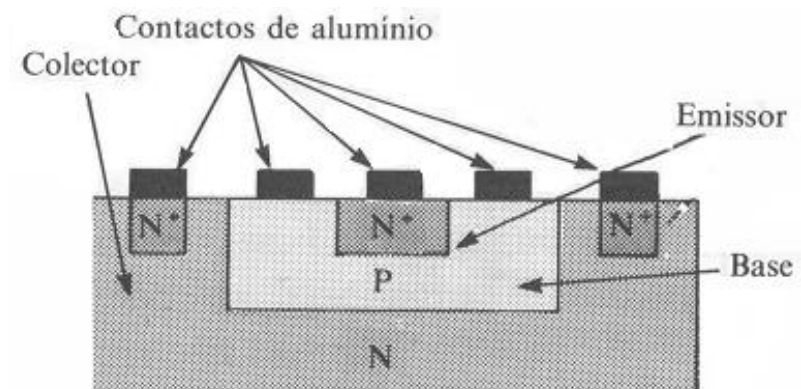
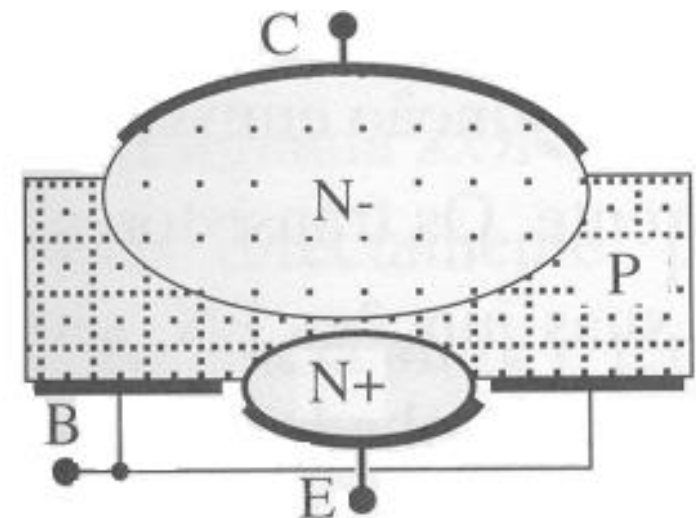


PNP



A estrutura de um transistor real não é simétrica, a nível de dimensões nem em termos de dopagem:

- O emissor serve como fonte de cargas móveis, sendo por isso uma região fortemente dopada, de modo a reforçar a capacidade de originar muitos portadores.
- A área do emissor é muito menor que a área do colector, de modo a facilitar a passagem dos portadores da base para o colector e a dissipação de potência.
- A zona da base tem uma espessura muito pequena e está menos dopada do que o emissor, de modo a reduzir a probabilidade de recombinação nesta zona dos portadores de carga provenientes do emissor.





4.2 – Princípio de funcionamento do TJB

- Cada uma das junções do transistor bipolar pode ser polarizada directa ou inversamente.
- O transistor pode assim operar em quatro zonas de funcionamento distintas consoante o tipo de polarização.

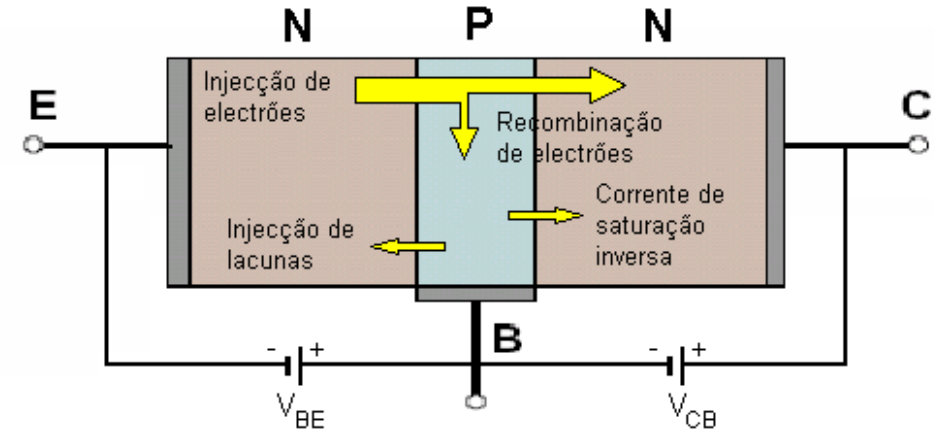
Zona de funcionamento	Polarização da junção		Aplicação
	Base-Emissor	Colector-Base	
Saturação	Directa	Directa	Comutador
Corte	Inversa	Inversa	
Activa - directa	Directa	Inversa	Amplificador
Activa - inversa	Inversa	Directa	-----



- Na **zona de saturação** as duas junções estão polarizadas directamente, pelo que as correntes no colector e emissor são apreciáveis. A queda de tensão V_{ce} é muito pequena ($\sim 0V$), podendo-se em primeira aproximação representar o transístor por um interruptor fechado (curto-circuito).
- Na **zona de corte**, as duas junções estão polarizadas inversamente. As correntes no colector e emissor são muito pequenas ($\sim 0 A$), podendo-se representar o transístor por um interruptor aberto (circuito-aberto).
- O funcionamento do TJB nas zonas de corte e de saturação é utilizado quando se pretende usar o transístor como comutador (saturação \rightarrow ligado; corte \rightarrow desligado).



- Na **zona activa directa** a junção base-emissor está polarizada directamente, sendo facilitada a difusão dos electrões (NPN) do emissor para a base, onde se tornam portadores minoritários.



- Na base, os electrões vindos do emissor difundem em direcção ao colector. Uma pequena fracção destes electrões recombina-se com as lacunas da base, constituindo uma parte da corrente de base.
- Os electrões que chegam à junção colector-base, são removidos pela acção do campo eléctrico pelo facto desta junção estar polarizada inversamente. Nestas condições a corrente injectada no emissor é praticamente toda recolhida no colector ($I_c \sim I_e$).
- Existe uma outra contribuição (pequena) para a corrente de colector, designada por corrente de saturação inversa, e é devida aos portadores minoritários gerados termicamente na base (electrões) e no colector (lacunas) e que são capazes de atravessar a junção quando esta está polarizada inversamente.

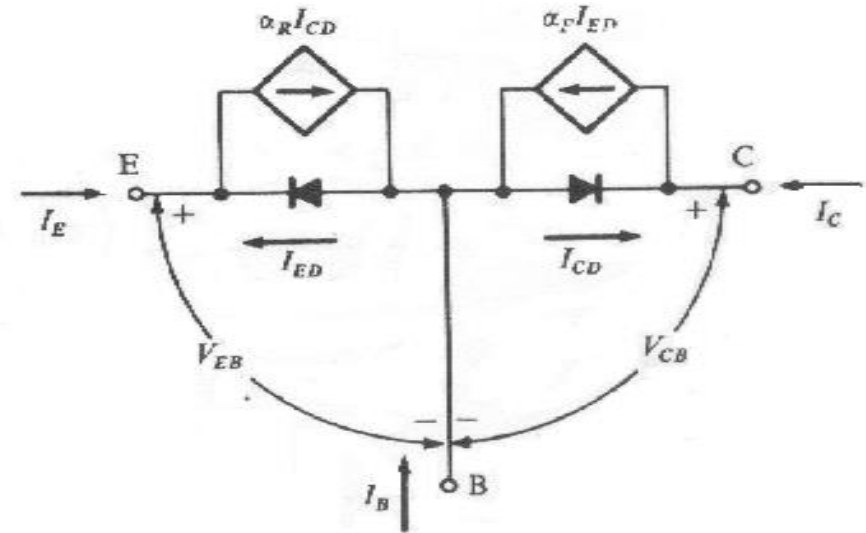
4.3 – Modelo de Ebers-Moll do TJB.

Como $I_C + I_E + I_B = 0$ obtém-se

$$I_C = \beta_F I_B + I_{CEO} \left(1 - e^{-\frac{V_{CB}}{V_T}} \right)$$

se $V_{CB} \gg V_T$ então $I_C = \beta_F I_B + I_{CEO}$,

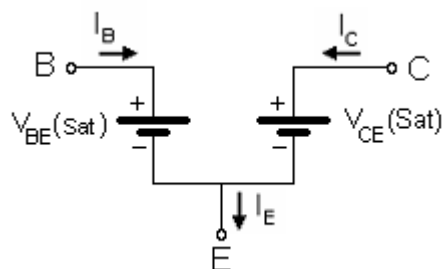
onde $\beta_F = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$ é o ganho em corrente contínua e $I_{CEO} = I_{CBO}(1 + \beta_F)$.



Modelo do TJB para grandes sinais (Modelo DC ou estático)

A partir das equações de Ebers-Moll podemos obter um modelo para cada zona de funcionamento do transistor NPN:

Zona de saturação

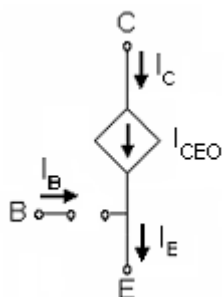


$$V_{BE}(\text{Sat})=0.8\text{V}$$

$$V_{CE}(\text{Sat})=0.2\text{V}$$

$$I_C < \beta \cdot I_B$$

Zona de corte

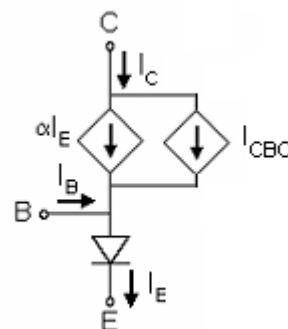


$$I_C = I_{CEO} \sim 0\text{A}$$

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

Zona activa directa

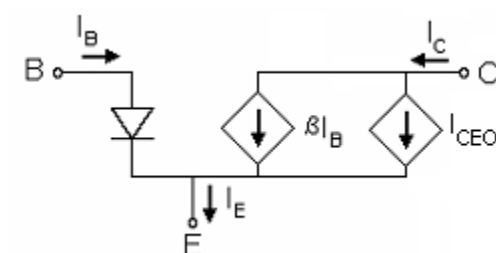
Modelo T



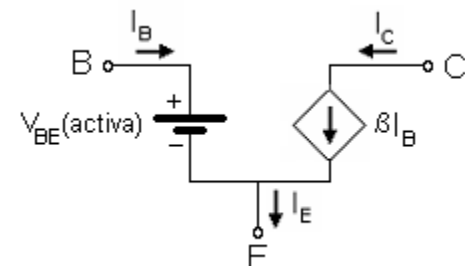
$$V_{BE}(\text{activa})=0.7\text{V}$$

$$I_C = \beta \cdot I_B$$

Modelo π



Modelo Simplificado



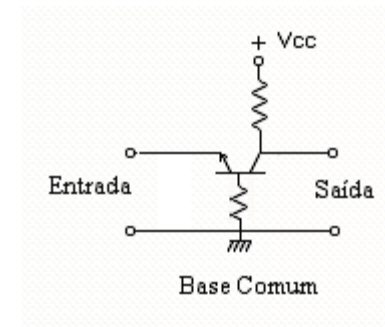


4.4 – Configurações básicas de circuitos transístores

Os transístores podem ser montados em três configurações distintas:

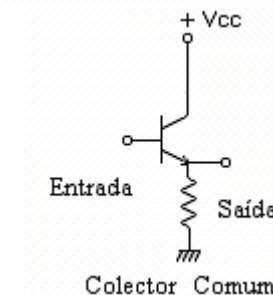
- **Configuração em base comum**

O terminal de base é comum à entrada (emissor) e à saída (colector) do circuito.



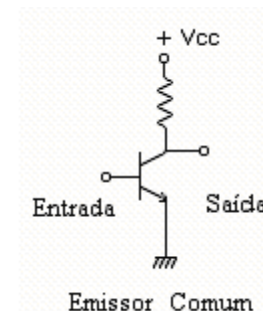
- **Configuração em colector comum**

O colector é comum à entrada (base) e à saída (emissor) do circuito.



- **Configuração em emissor comum**

O emissor é comum à entrada (base) e à saída (colector) do circuito.

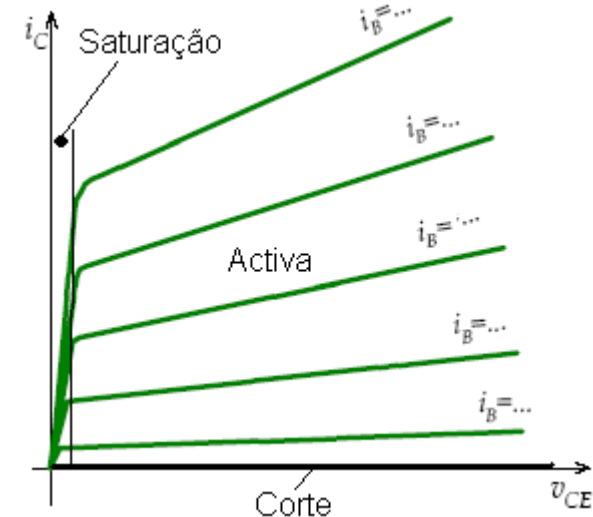
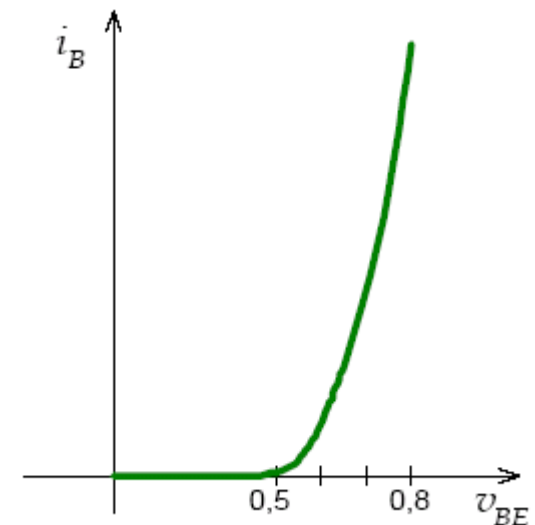


Configuração em Emissor Comum de um TJB NPN.

A **característica de entrada** por sua vez, traduz a dependência da corrente de entrada (I_B) com a tensão de entrada (V_{BE}) e com a tensão de saída.

A **característica de saída** da montagem em emissor comum traduz a dependência da corrente de colector com a corrente de entrada (I_B) e a tensão de saída (V_{CE}).

A dependência de I_C e I_B com V_{CE} deve-se à redução da largura de base com o aumento da polarização inversa (**efeito de Early**), que se traduz por uma menor probabilidade de recombinação na base, logo I_B menor e I_E , I_C , β_F maiores.



4.5 – Circuitos de polarização de TJB

• Recta de carga. Ponto de funcionamento em repouso

Da malha de saída tem-se:

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

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C} \quad \text{ou} \quad I_C = -\frac{V_{CE}}{R_C} + \frac{V_{CC}}{R_C}$$

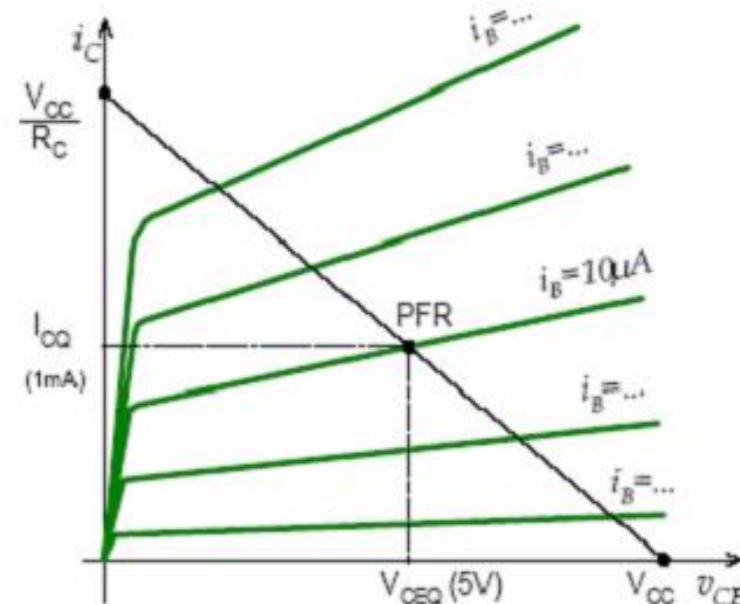
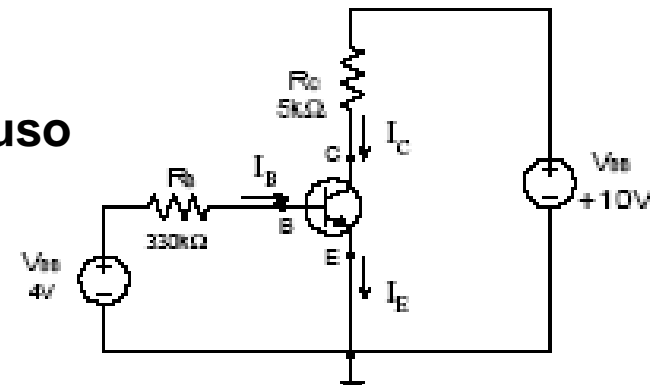
Equação de uma recta, em que:

$$\text{para } I_C = 0 \implies V_{CE} = V_{CC}$$

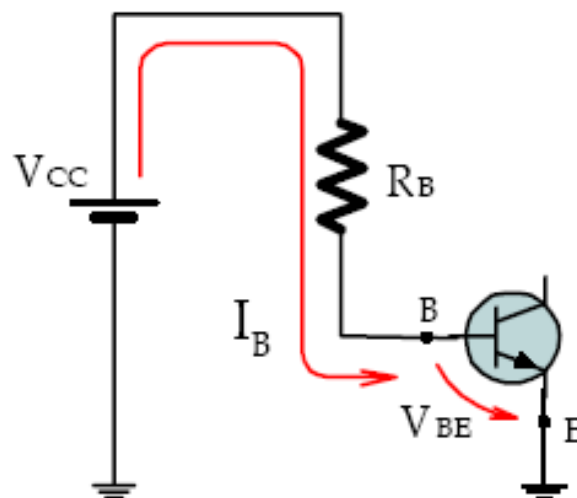
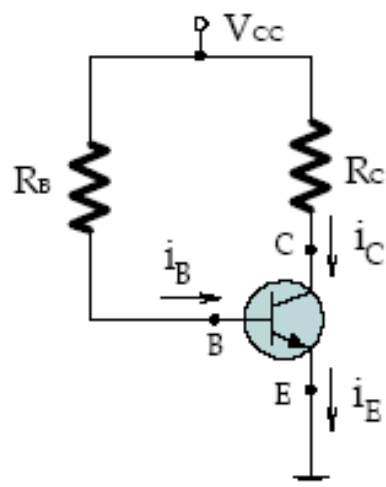
$$\text{para } V_{CE} = 0 \implies I_C = \frac{V_{CC}}{R_C}$$

PFR - ponto de funcionamento em repouso

$$\text{PFR}(V_{CEQ}, I_{CQ})$$



• Polarização fixa.

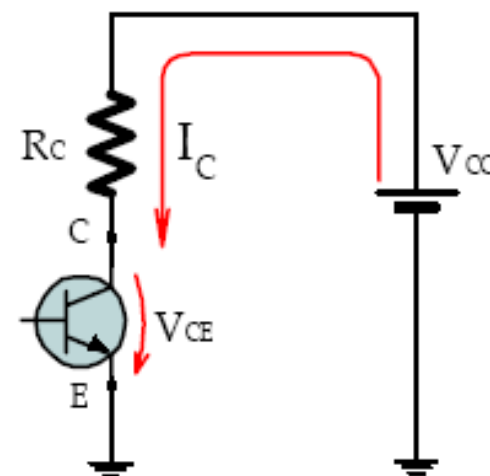


Malha Base-Emissor

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

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

$$I_C = \beta I_B$$

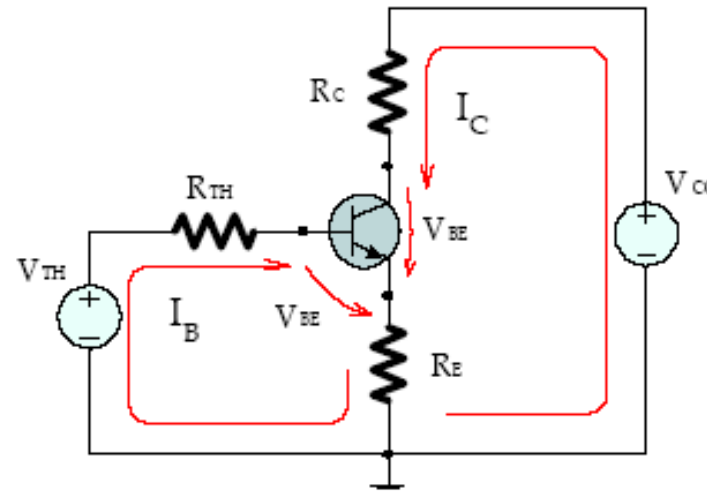
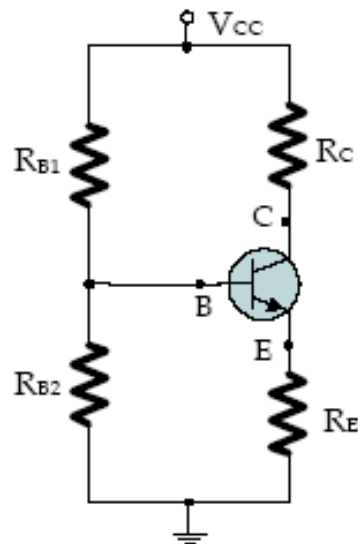


Malha Colector-Emissor

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

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

Polarização por divisor de tensão e resistência no Emissor



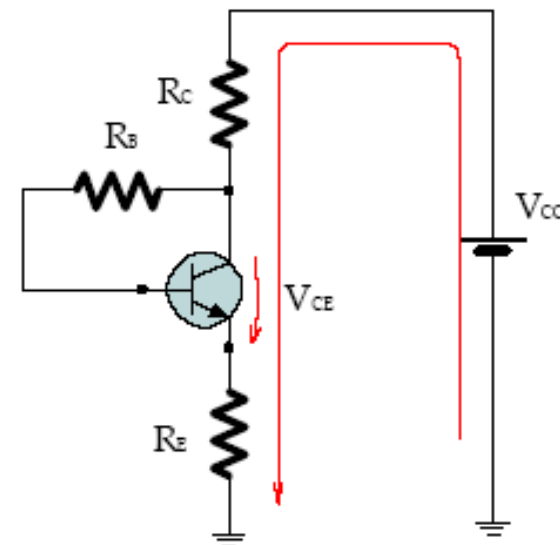
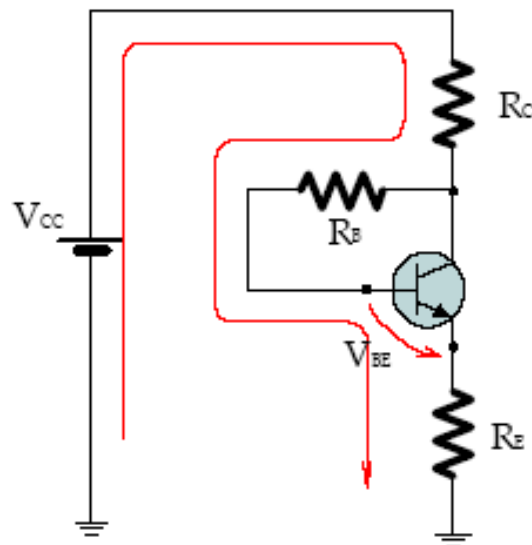
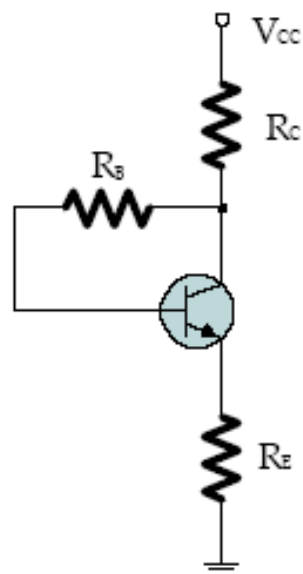
A introdução de uma resistência no emissor traduz-se em circuitos com boa estabilidade do seu ponto de funcionamento em repouso (PFR) e faz com que a corrente I_C seja praticamente independente do valor de β .

$$\begin{aligned}
 -V_{TH} + R_{TH}I_B + V_{BEon} + R_E I_E &= 0 \\
 -V_{TH} + R_{TH}I_B + V_{BEon} + (\beta + 1)R_E I_B &= 0 \\
 I_B &= \frac{V_{TH} - V_{BEon}}{R_{TH} + (\beta + 1)R_E}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I_C &= \beta I_B \\
 I_E &= (\beta + 1)I_B
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 -V_{CC} + R_C I_C + V_{CE} + R_E I_E &= 0 \\
 V_{CE} &= V_{CC} - R_C I_C - R_E I_E \\
 V_{CE} &\cong V_{CC} - (R_C + R_E)I_C
 \end{aligned}$$

Polarização com resistência de rectroacção colector-base e resistência no emissor



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

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

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

$$I_C = \beta I_B$$

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

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

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

4.6 – Análise de circuitos amplificadores com TJB

Modelo do TJB para sinais fracos. Modelo para baixas frequências.

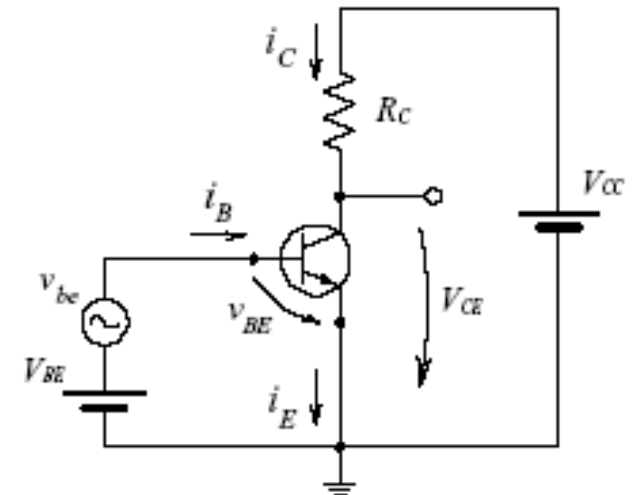
Na maior parte das aplicações as correntes e tensões variam no tempo, pelo que interessa conhecer o comportamento do TJB nesta situação.

Vamos supôr que à polarização (V_{BE}) do transístor é adicionado um pequeno sinal variável no tempo (v_{be})

$$v_{BE} = V_{BE} + v_{be}$$

Se a junção base emissor está polarizada directamente, a corrente no emissor é

$$i_E \approx I_0 e^{\frac{v_{BE}}{V_T}} = I_0 e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} e^{\frac{v_{be}}{V_T}} = I_E e^{\frac{v_{be}}{V_T}}$$



Usando a aproximação $e^x \approx (1+x)$ se $x \ll 1$, então para $v_{be} \ll V_T$ temos

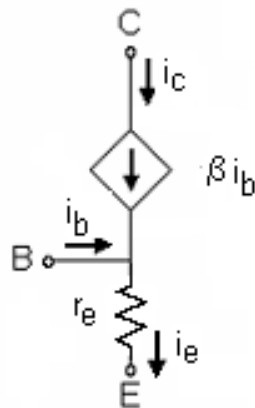
$$i_E = I_E e^{\frac{v_{be}}{V_T}} = I_E \left(1 + \frac{v_{be}}{V_T} \right) = I_E + \frac{I_E}{V_T} v_{be}$$

A corrente total de emissor possui uma componente, I_E , devido à polarização e uma componente variável no tempo i_e dada por

$$i_e = \frac{I_E}{V_T} v_{be} = \frac{v_{be}}{r_e} \quad \text{onde} \quad r_e = \frac{v_{be}}{i_e} = \frac{V_T}{I_E} \approx \frac{1}{40I_E}$$

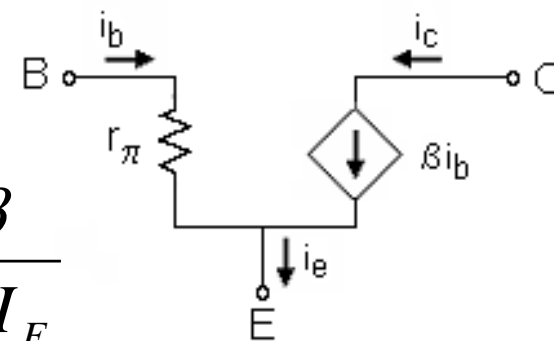
Podemos agora definir o modelo de Ebers-Moll do TJB no regime de sinais fracos

Modelo T



Modelo π híbrido

$$r_\pi = \frac{v_{be}}{i_b} = \frac{V_T}{I_B} \approx \frac{\beta}{40I_E}$$





Análise em CA de um amplificador com TJB.

- ✓ Determinar o ponto de funcionamento em repouso, em particular o valor de I_C . Esta análise é feita considerando apenas as fontes de tensão e corrente DC e substituindo os condensadores por circuitos abertos.
- ✓ Calcular o valor dos parâmetros necessários para o modelo de pequenos sinais

$$r_e = \frac{V_T}{I_E} \quad r_\pi = \frac{V_T}{I_B} = (1 + \beta)r_e$$

- ✓ Representar o esquema equivalente do circuito amplificador para sinais fracos, substituindo as fontes de tensão DC independentes por curto-circuitos e as fontes de corrente independentes por circuitos abertos e
 - substituir os condensadores de bloqueio e contorno por curto-circuitos.
 - substituir o transístor por um dos modelos equivalentes para sinais fracos.

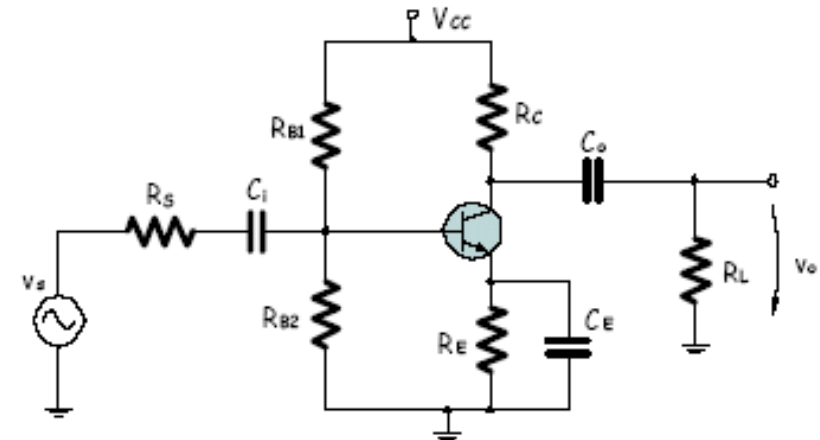
Amplificador em Emissor-Comum

C_i , C_o – condensadores de acoplamento (bloqueiam as componentes contínuas na entrada e na saída)

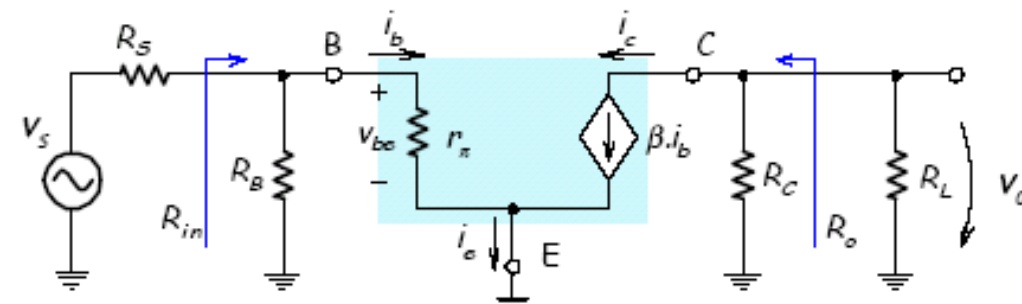
C_E – condensador de contorno (*bypass*)

A capacidade dos condensadores de acoplamento e de contorno é suficientemente elevada para que a sua reactância se possa considerar como um curto-circuito perante as restantes impedâncias do circuito para as frequências de interesse.

O circuito equivalente para pequenos sinais obtém-se substituindo o BJT pelo seu modelo equivalente π -híbrido, eliminando as fontes de tensão *DC* e curtocircuitando os condensadores C_i , C_o e C_E .



a) Configuração típica do amplificador monoestágio em Emissor – Comum com componentes discretos



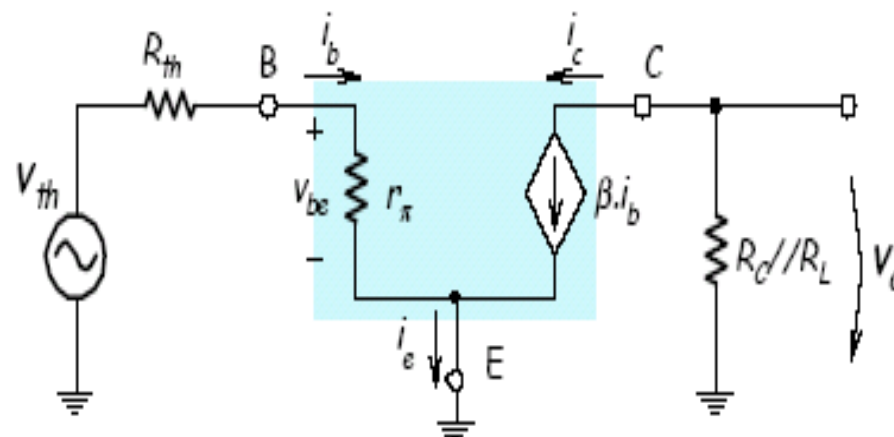
b) Circuito equivalente para pequenos sinais do amplificador em Emissor – Comum do circuito a), desprezando r_o face a R_C e R_L .

- **Ganho de tensão** quando se substitui a malha constituída por v_s , R_s e R_B pelo seu equivalente de Thévenin

$$R_{th} = R_B // R_s \quad \wedge \quad v_{th} = \frac{R_B}{R_B + R_s} \cdot v_s$$

$$v_o = -\beta i_b R_C // R_L \quad \wedge \quad i_b = \frac{v_{th}}{r_\pi + R_{th}}$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_s} = -\frac{\beta \cdot R_C // R_L}{r_\pi + R_{th}} \cdot \frac{R_B}{R_B + R_s}$$



a) Circuito equivalente para pequenos sinais substituindo a malha constituída por v_s , R_s e R_B pelo seu equivalente de Thévenin

- **Resistência de entrada**

$$R_i = R_B // \frac{v_b}{i_b} = r_\pi // R_B$$

- **Resistência de saída** ($v_s = 0V$ $R_L = \infty$)

$$R_o = R_C \quad \text{ou} \quad R_o = r_o // R_C$$

4.7 – Limites de operação do TJB

• Corrente máxima de colector

Existe uma corrente máxima que o colector pode suportar, associada à área da junção e à secção dos fios que ligam aos terminais do transistor.

• Potência máxima

A junção colector-base tem uma capacidade máxima de dissipar potência, que depende da temperatura de funcionamento do transistor. A curva de potência máxima do transistor é dada pela hipérbole $V_{CE} \cdot I_C = P_{max}$.

• Tensão máxima de saída

Há um limite superior para a tensão entre o colector e o emissor, devido a possibilidade de disrupção da junção CB ou à perfuração da base (efeito de Early).

• Tensão máxima de entrada

Existe uma tensão inversa máxima admissível entre a base e o emissor.

