

Fundamentos de Electrónica

O transistor bipolar

P1

O transistor bipolar de junções

O transistor bipolar de junções (TBJ) foi o primeiro dispositivo de semiconductor desenvolvido tecnologicamente capaz de amplificação de potencia.

O principio de funcionamento baseia-se no comportamento de junção p-n.

Foi inventado em 1948 by Bardeen, Brattain and Shockley.

Contém três regiões adjacentes, representadas por semicondutores dopados de forma diferente:
Emissor (E), Base (B), and Colector (C).

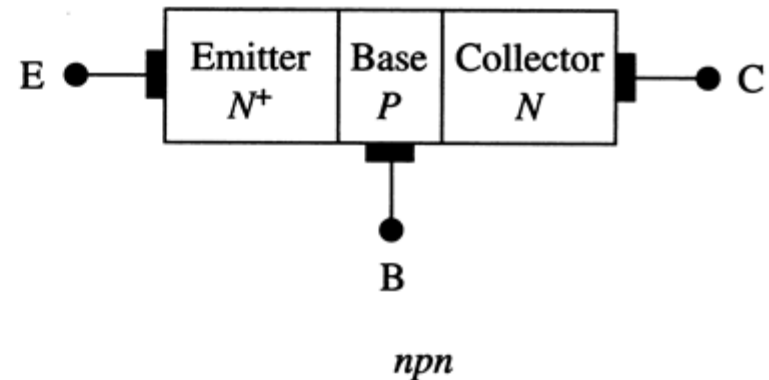
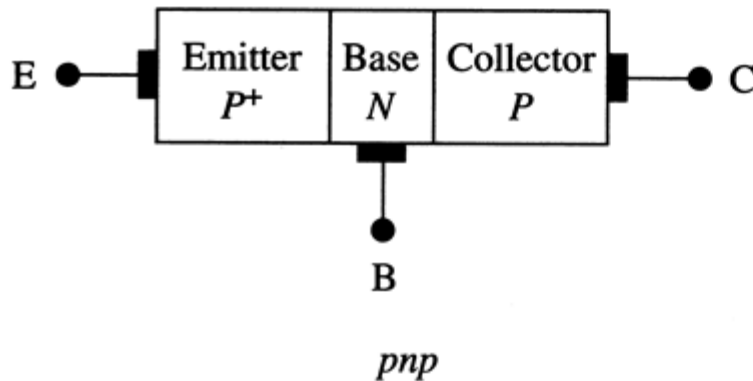
Os TBJ são de tipo: pnp e npn

O transistor bipolar de junções

O transistor bipolar de junções (TBJ) apresenta:

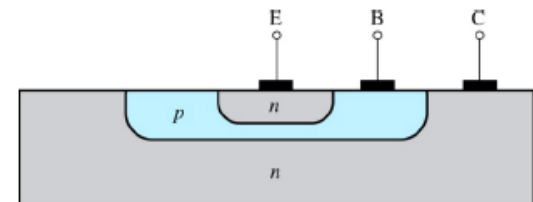
- Velocidade de comutação elevada
- Nível baixo de ruído
- Potência de saída elevada
- Porque bipolar? Dois tipos de cargas eléctricas : Os electrões e as lacunas são envolvidos no funcionamento do TBJ

Representação das junções pnp e npn do TBJ

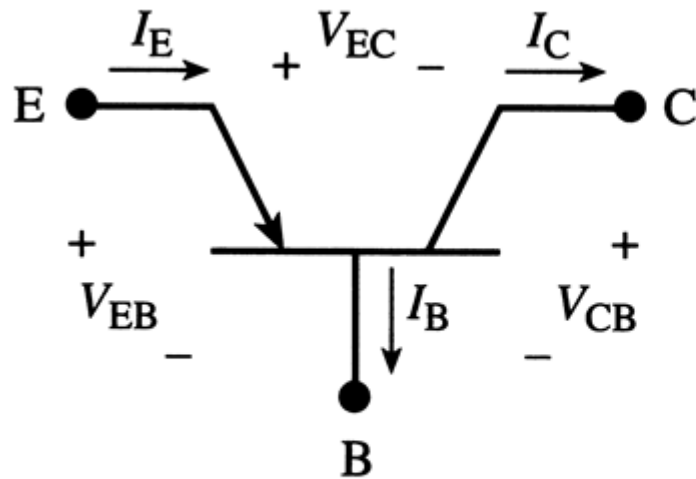


O emissor é dopado de forma significativa (P^+ ou N^+) em relação ao colector, ou seja o emissor não pode ser substituído pelo colector. Não há simetria como indique as denominações pnp ou npn.

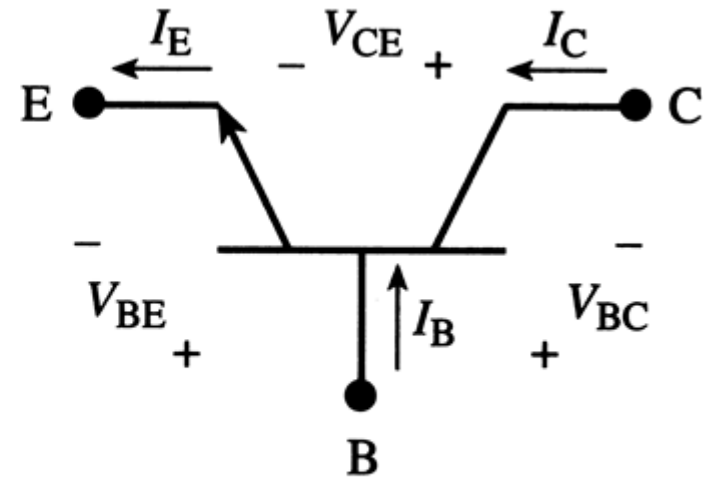
A base tem uma largura mais reduzida em relação a largura de difusão dos portadores minoritários. No caso contrario a estrutura semiconductora poderia ser substituída por um conjunto de dois díodos.



Simbolos dos TBJ e equações



(a) *pn*p



(b) *n*p*n*

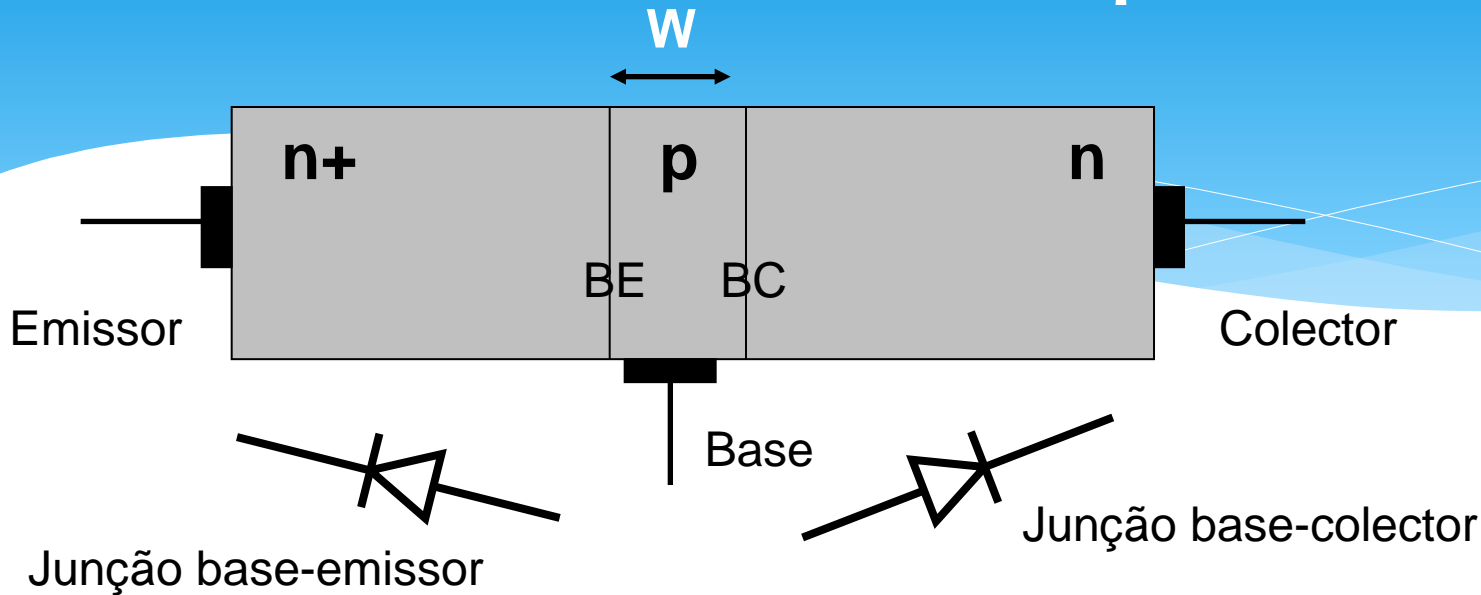
$$I_E = I_B + I_C$$

e

$$V_{EB} + V_{BC} + V_{CE} = 0$$

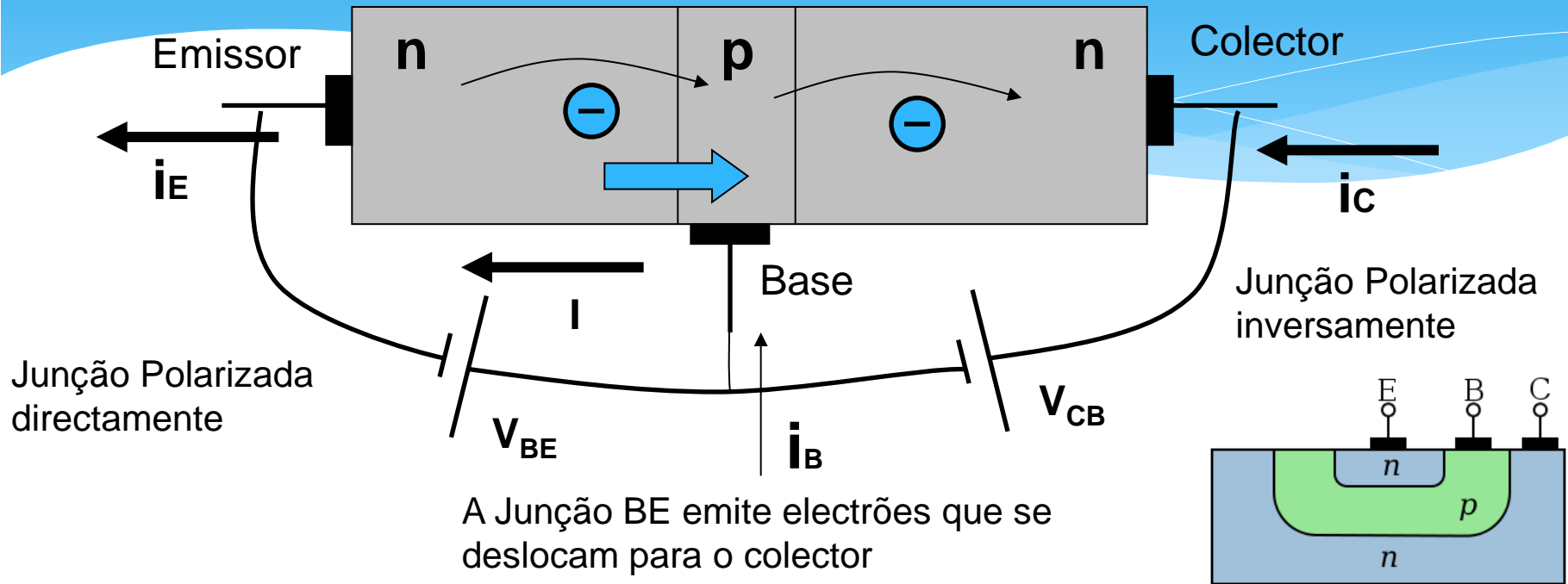
$$V_{CE} = -V_{EC}$$

Transistor n-p-n



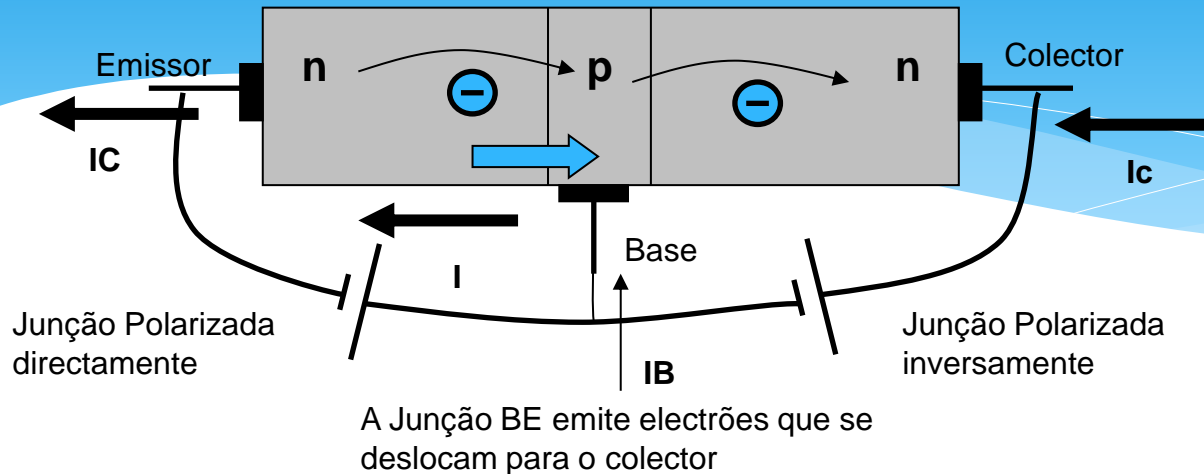
- * Semelhante a dois díodos costas as costas, largura de base, **W**, é muito pequena em relação com a distancia de difusão → comportamento diferente do conjunto dos dois díodos.
- * **Três zonas típicas de operação**
 - Zona de corte – Ambas as junções ao corte (B-E- off, B-C-off);
 - Zona activa** – Junção B-E ON Junção B-C OFF;
 - Zona de saturação – Ambas as junções ON;

Funcionamento na Zona Activa



- * Na **zona activa temos** a junção BE tem a polarização directa e a junção BC tem polarização inversa;
- * Os electrões responsáveis pela condução de corrente na junção base emissor atravessam a pequena base e são recolhidos no colector;
- * A corrente de colector corresponde a movimentação das lacunas, e depende da V_{BE} , maior $V_{BE} \rightarrow$ maior i_C ;

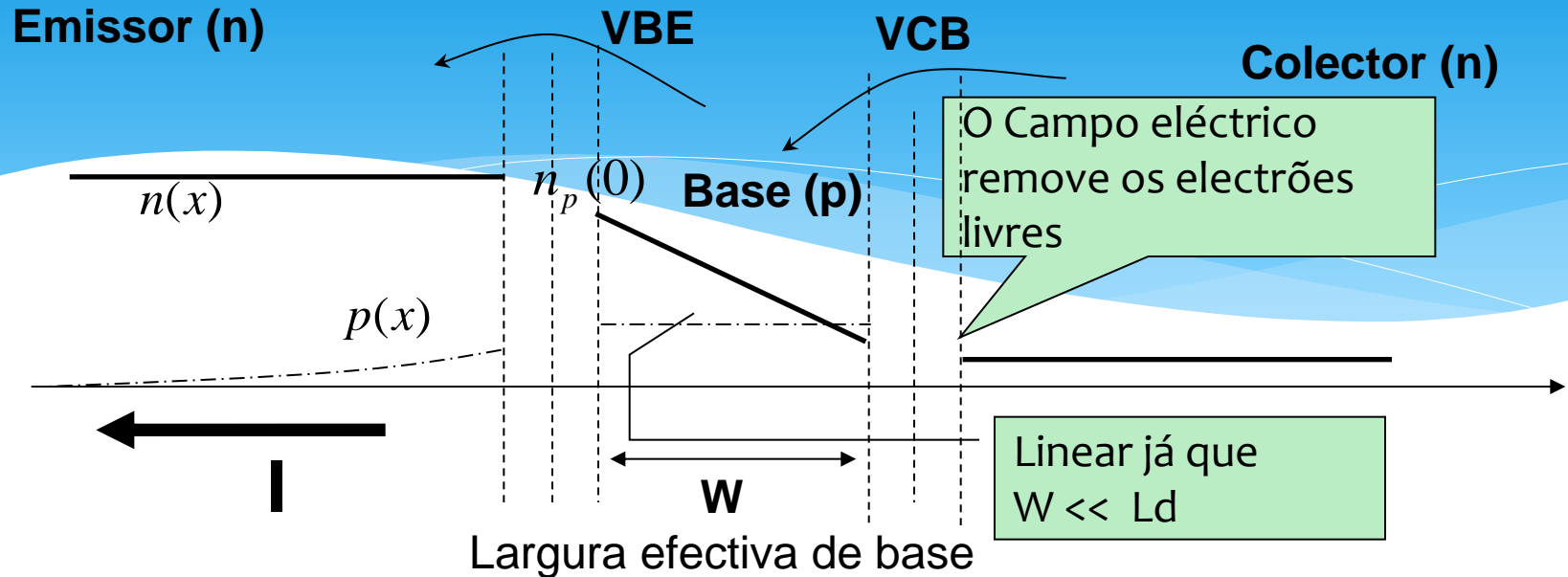
Funcionamento na Zona Activa



* Porque é que os electrões não são bloqueados pela junção base colector?

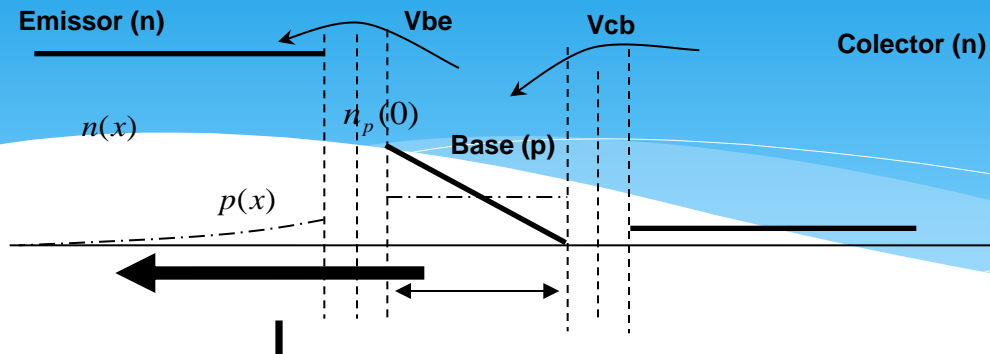
- * Porque como a base é muito fina a velocidade dos electrões é suficiente para que os electrões cheguem ao lado *n* antes de colidirem com outras partículas (núcleos ou lacunas).
- * Os que ficam pelo caminho vão formar **parte** da corrente na base.
- * Assim temos que a corrente no colector será aproximadamente igual à corrente no emissor ($I_C \approx I_E$) e que a corrente a base será muito pequena ($I_B \ll I_C$)
- * De facto temos que I_C é proporcional a I_B , $I_C = \beta I_B$, com $\beta \gg 1$

Perfil da Densidade de Portadores



- * A densidade de electrões livres decresce na base.
- * **No colector os electrões livres são removidos pelo campo eléctrico E .**
- * Como a base tem um comprimento **W** bastante inferior ao comprimento de difusão **L_d** este decréscimo é linear.
- * A base (tipo-p) é bastante menos dopada que o emissor (tipo-n) logo a concentração de lacunas é bastante inferior à concentração de electrões livres.

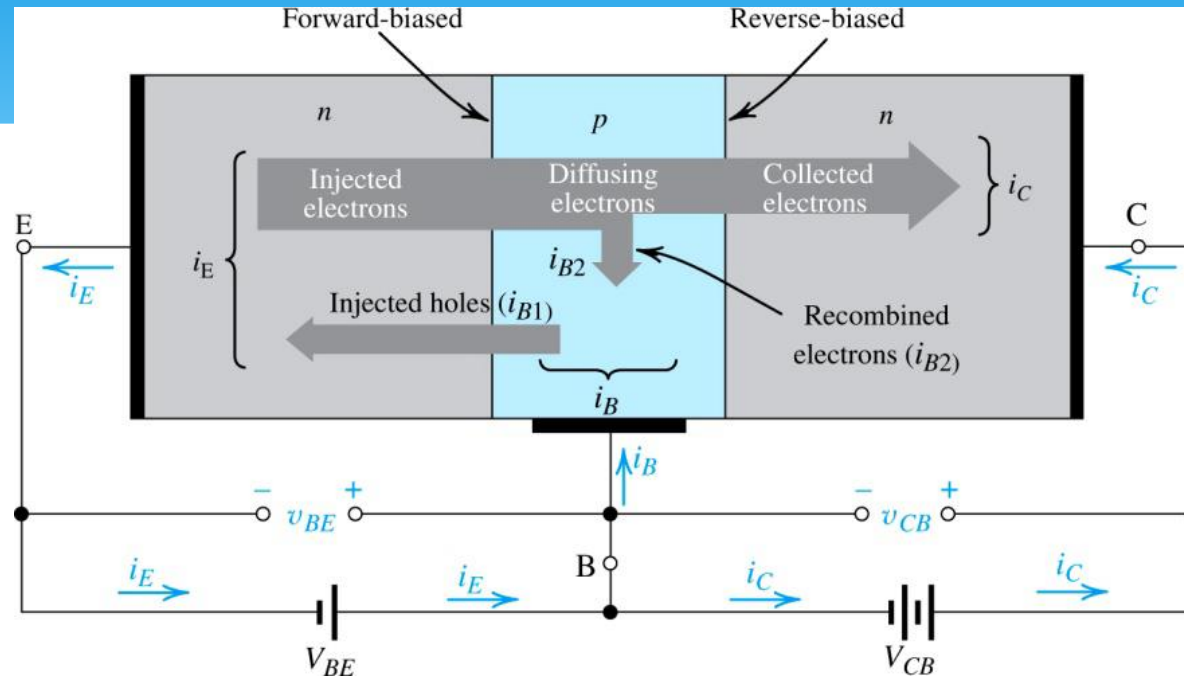
Corrente maioritária



$$i_C = I_S e^{v_{BE} / v_T}$$

- * O emissor (tipo-n) é muito mais dopado que a base (tipo-p) de onde resulta que a corrente é maioritariamente formada por electrões livres, que se deslocam directamente do emissor para o colector!
- * O Transístor na zona activa comporta-se como um díodo polarizado directamente com uma corrente de saturação dada por “ I_S ”, mas em que corrente flui num terceiro terminal denominado de colector!

Corrente na base do TBJ



* A corrente da base tem duas componentes:

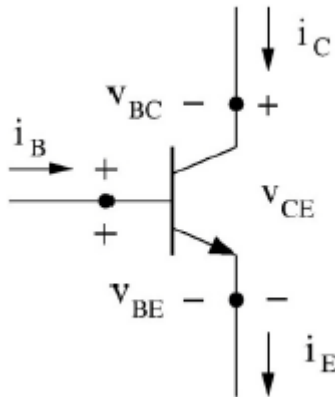
- * i_{B1} = Corrente minoritária devido às lacunas que se deslocam da base para o emissor.
- * i_{B2} = Corrente de reposição dos elétrons que se recombina com as lacunas ao atravessarem a base.

$$i_B = i_{B1} + i_{B2}$$

Características e equações para as correntes (zona activa)

- * As características do transistor bipolar são dadas utilizando as um conjunto de 3 correntes e 3 tensões

$$i_C = \beta i_B \quad i_E = i_B + i_C \quad i_C = I_S e^{v_{BE}/v_T}$$



$$i_E = i_B + \beta i_B = (\beta + 1) i_B$$

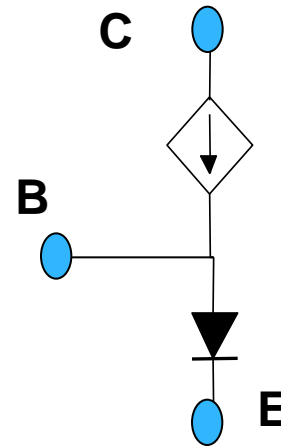
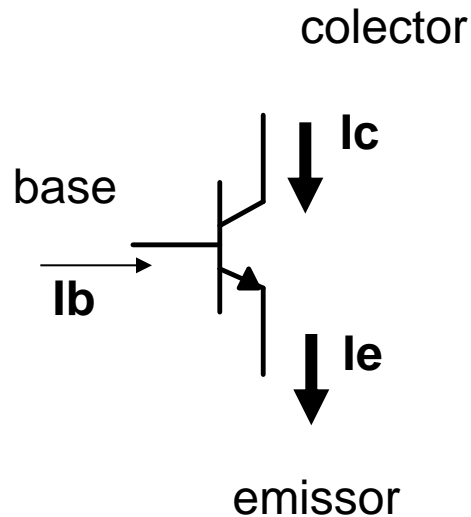
$$\alpha = \frac{\beta}{\beta + 1} \quad i_C = \alpha i_E$$

$$v_{BC} = v_{BE} - v_{CE} \quad v_{CE} = v_C - v_E$$

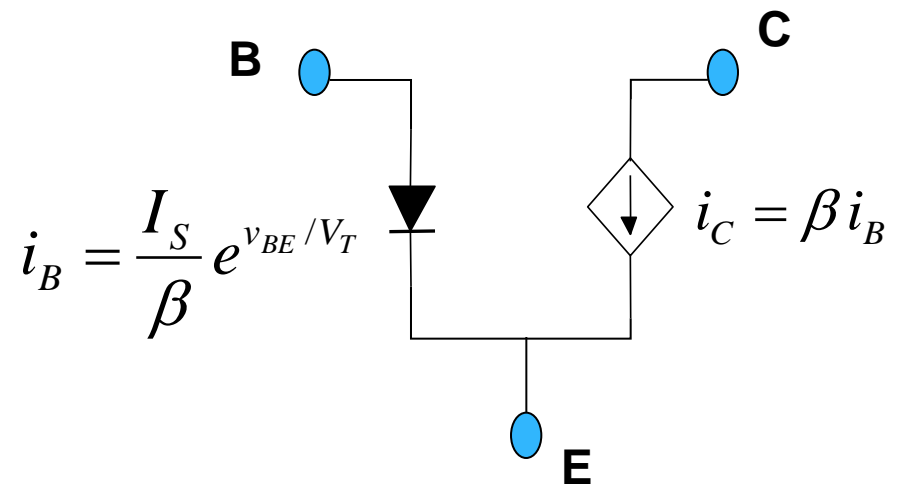
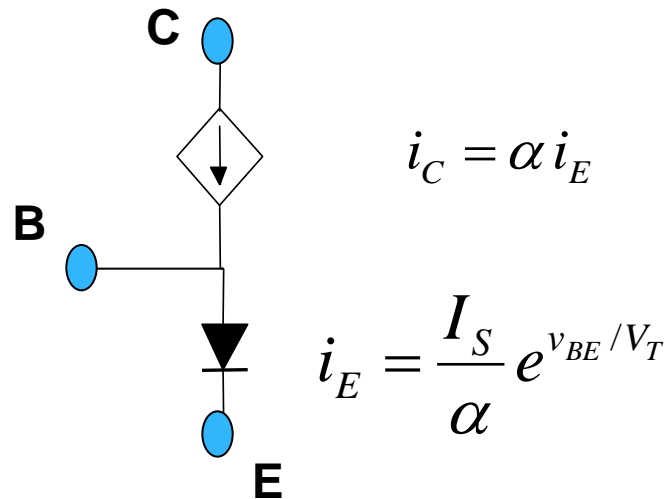
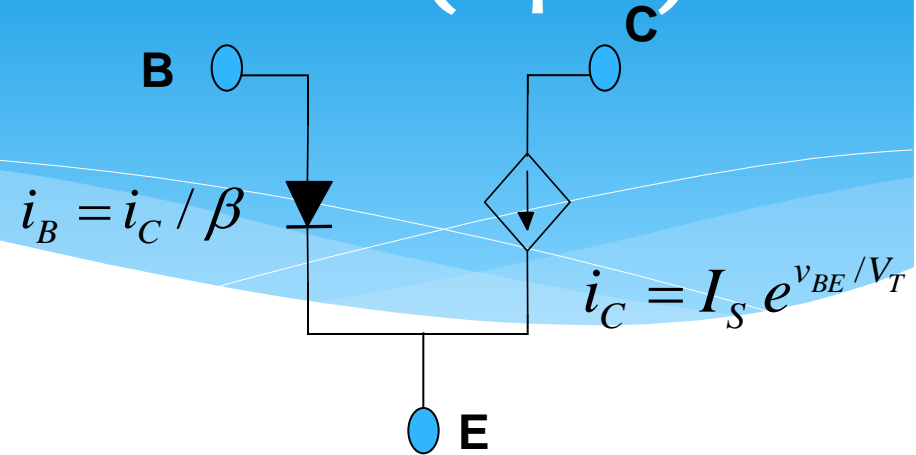
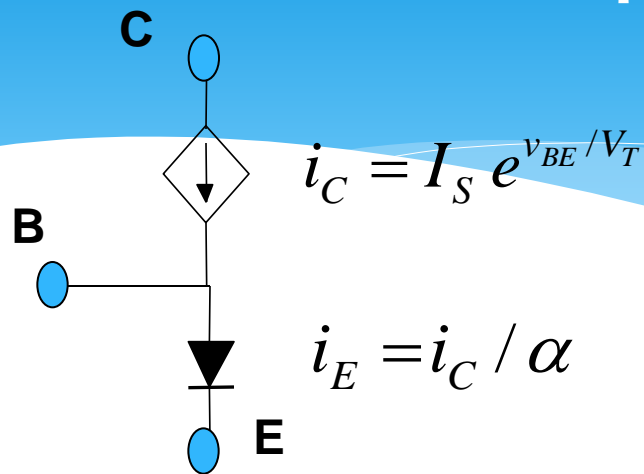
$$V_{CE} = V_{CB} + V_{BE}$$

Símbolo e o modelo equivalente

- * O símbolo do transistor npn é baseado no seu modelo equivalente que inclui uma fonte de corrente e um díodo



Modelos equivalentes (npn)



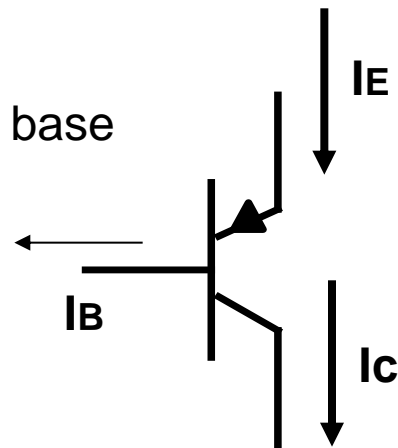
Modelo em T

Modelo em Π

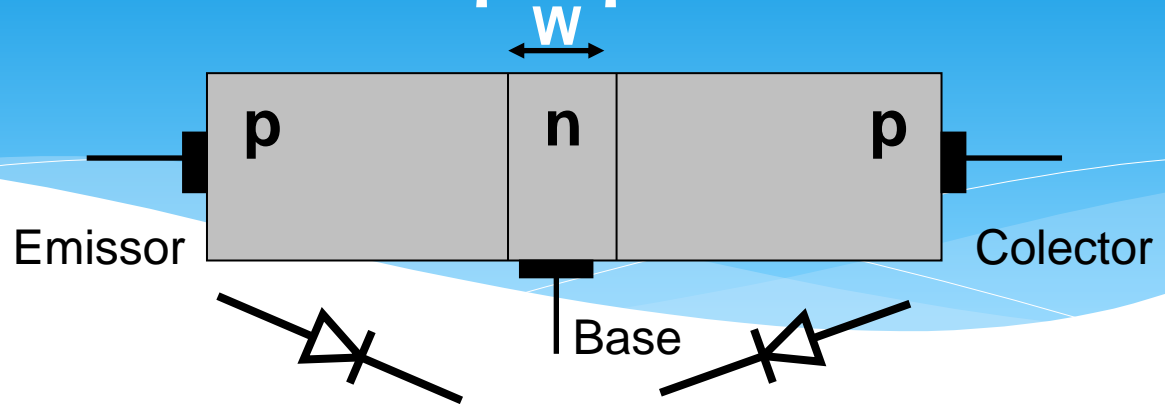
Transistor pnp

$$i_C = \beta i_B$$

emissor



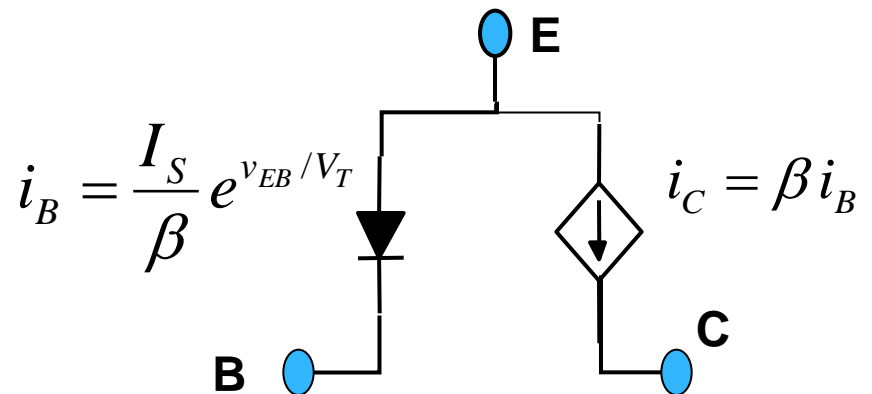
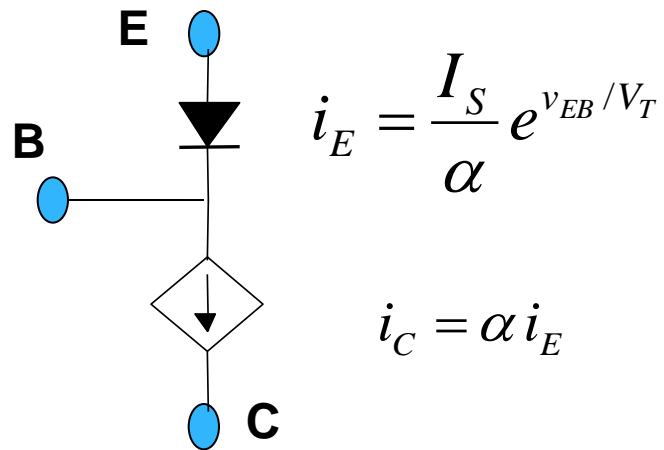
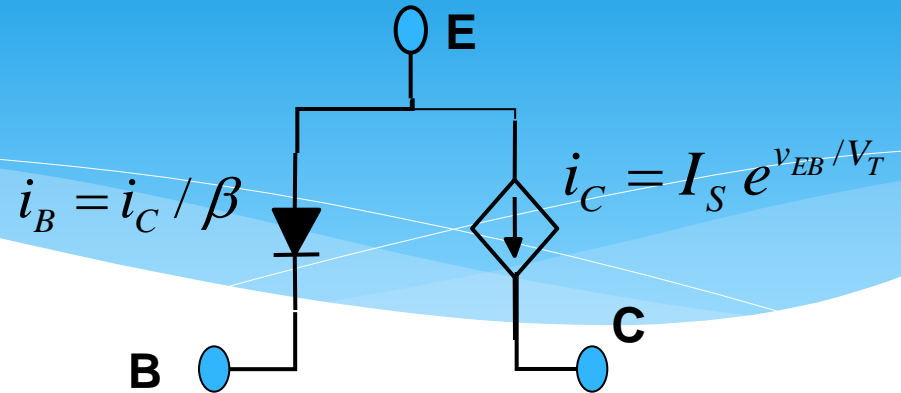
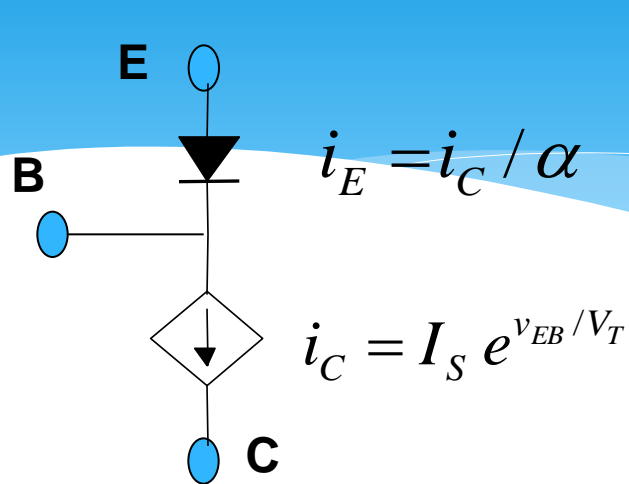
colector



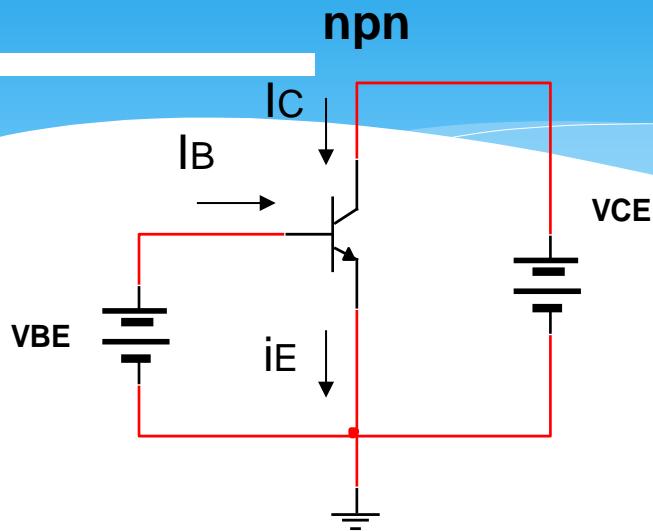
- * O emissor injecta lacunas na base que passam directamente para o colector.
- * As equações são semelhantes às do transistor npn mas mudam os sentidos das correntes e troca-se V_{BE} por V_{EB} .

$$i_C = I_S e^{v_{EB} / v_T}$$

Modelos equivalentes (pnp)



Funcionamento na Zona Activa



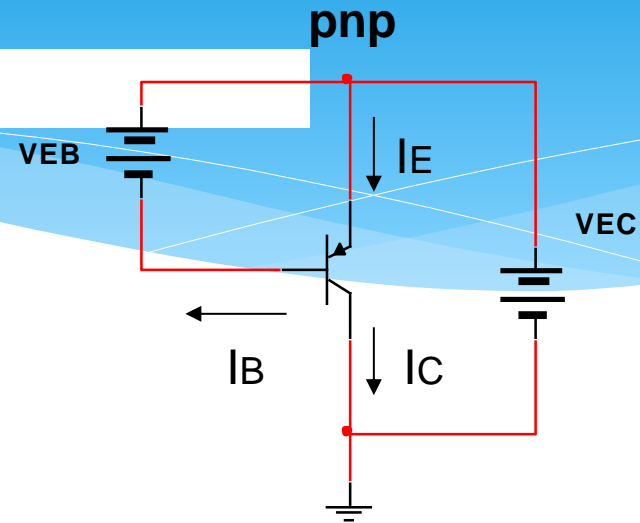
$$V_{CE} > 0.2V$$

J_{BE} ON

$$i_C = I_S e^{v_{BE}/V_T}$$

$$\alpha = \beta / (\beta + 1)$$

$$i_C = \beta i_B$$



$$V_{EC} > 0.2V$$

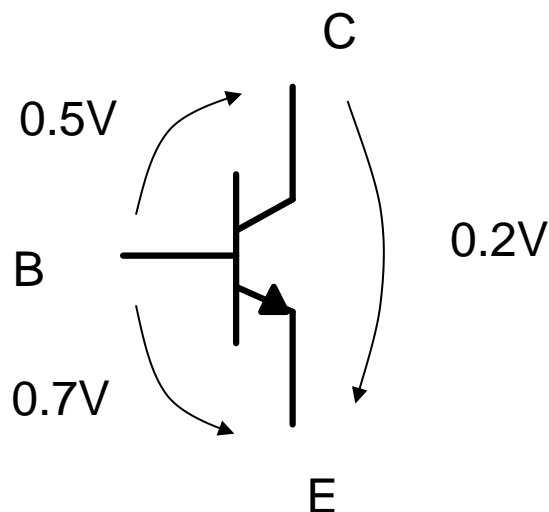
J_{EB} ON

$$i_C = I_S e^{v_{EB}/V_T}$$

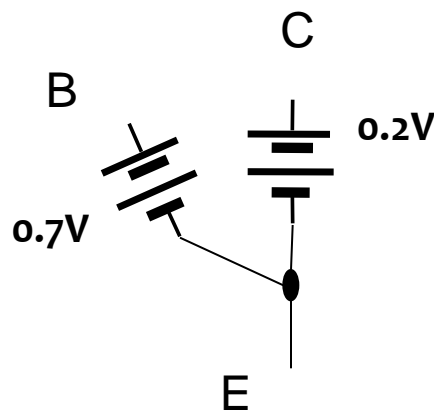
$$i_C = \alpha i_E$$

Zona de Saturação

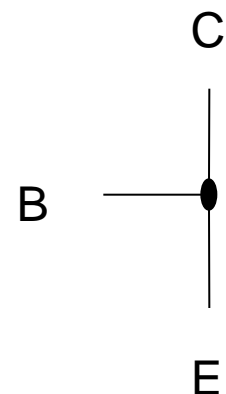
- * A junção Base-Colector começa a conduzir para $V_{BC}=0.5V$ donde resulta que na entrada na **zona de saturação** podemos considerar $V_{CE}=0.2V$



$$V_{CE} = V_{CB} + V_{BE}$$



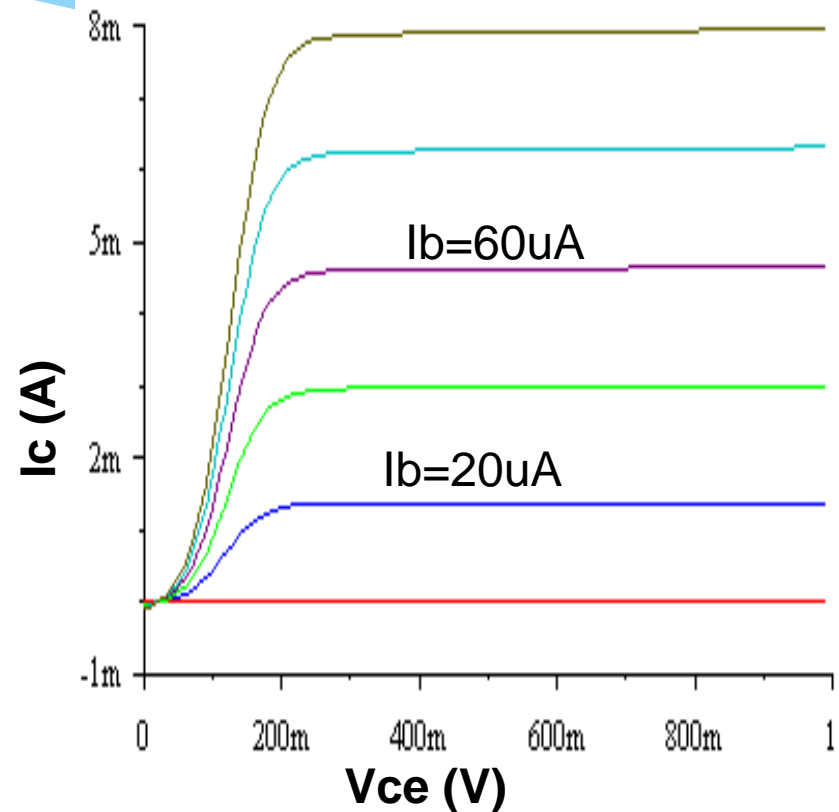
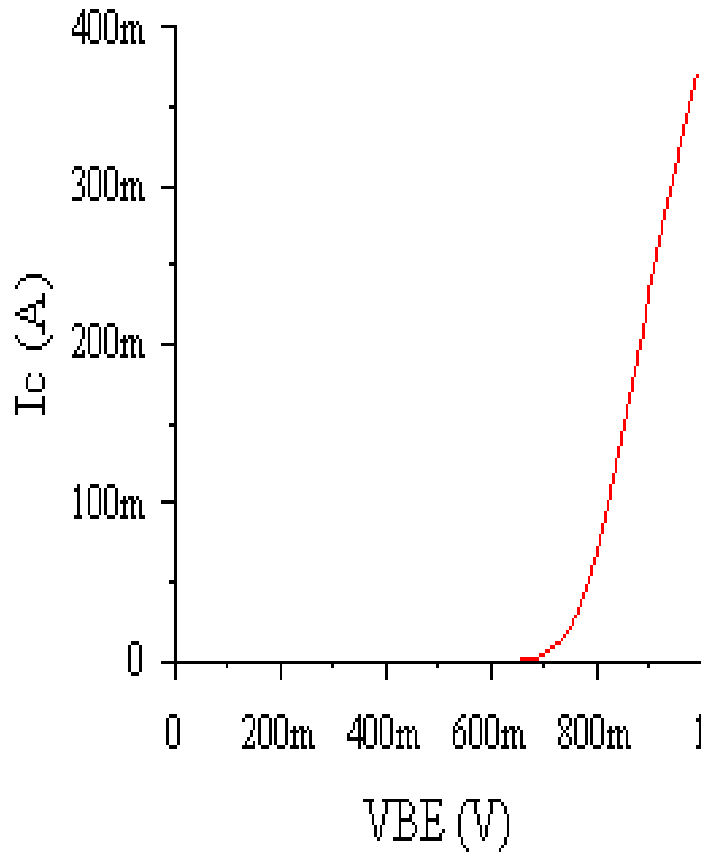
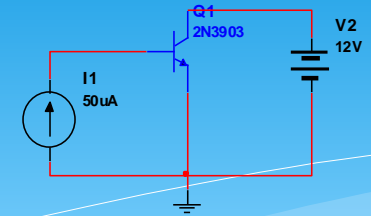
Modelo simplificado



Modelos para o transístor na zona de saturação

Curvas Características dos Transístores

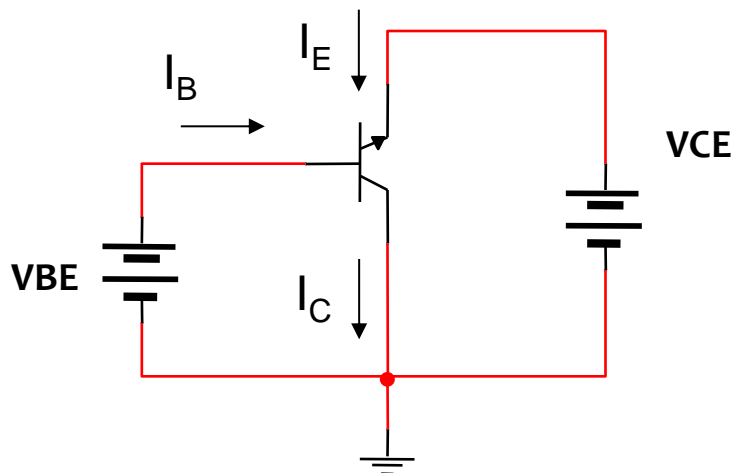
* Zona Activa



Zona Activa Inversa

- * Zona Activa Inversa

- * Se trocarmos o emissor com o colector obtemos um novo dispositivo, que continua a funcionar como um transístor.
- * No entanto o colector é em geral menos dopado que o emissor, donde resulta que o novo β (β_R) é bastante mais pequeno.
- * Trocar o emissor com o colector corresponde utilizar um valor de V_{CE} negativo.



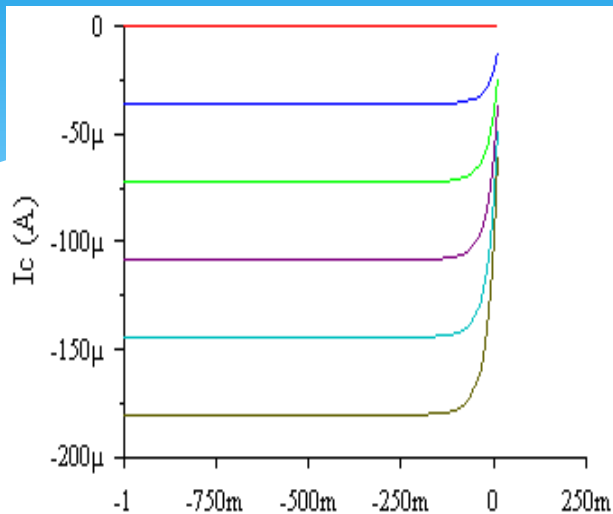
$$V_{EC} > 0.2V$$

JBC ON

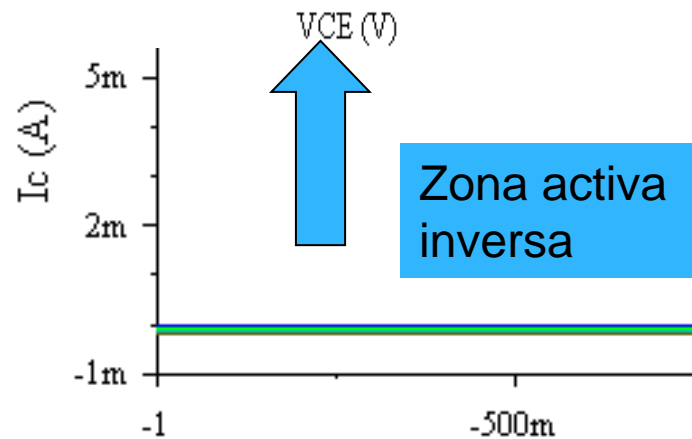
$$i_E = I_S e^{v_{BC}/V_T}$$

$$i_E = \beta_R i_B \quad i_E = \alpha_R i_C$$

Curvas Características



$$\beta_R \ll \beta$$



Cruva I_c vs V_{ce}

Zona activa

Zona saturação

V_{ce} (V)

Modelo de Ebers Moll

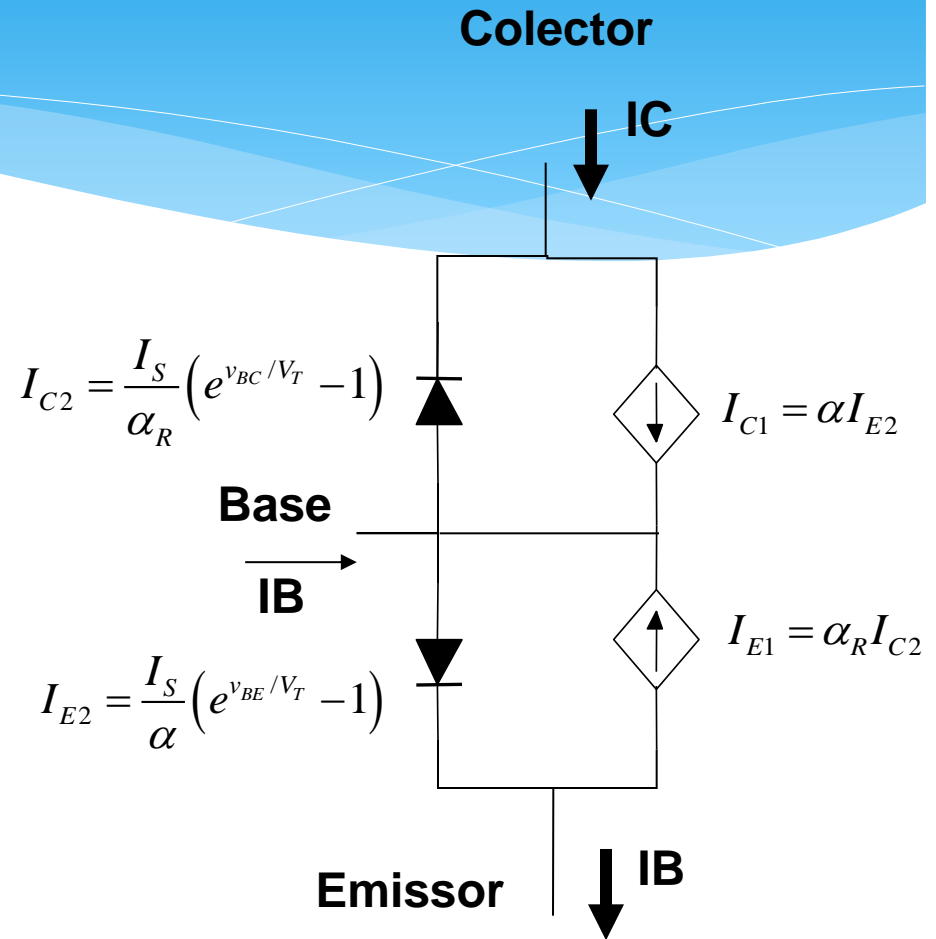
$$I_E = \frac{I_S}{\alpha} \left(e^{v_{BE}/V_T} - 1 \right) - I_S \left(e^{v_{BC}/V_T} - 1 \right)$$

$$I_C = I_S \left(e^{v_{BE}/V_T} - 1 \right) - \frac{I_S}{\alpha_R} \left(e^{v_{BC}/V_T} - 1 \right)$$

→

$$I_B = \frac{I_S}{\beta_F} \left(e^{v_{BE}/V_T} - 1 \right) + \frac{I_S}{\beta_R} \left(e^{v_{BC}/V_T} - 1 \right)$$

Modelo global de funcionamento do transistor



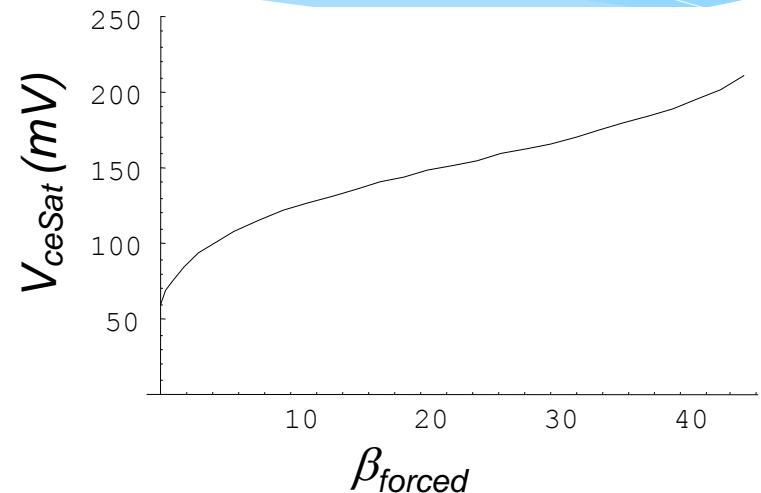
Zona de Saturação

Utilizando o modelo de Ebers Moll podemos chegar a seguinte fórmula para a região de saturação.

$$V_{CESat} = V_T \ln \frac{1 + (\beta_{forced} + 1) / \beta_R}{1 - \beta_{forced} / \beta_F}$$

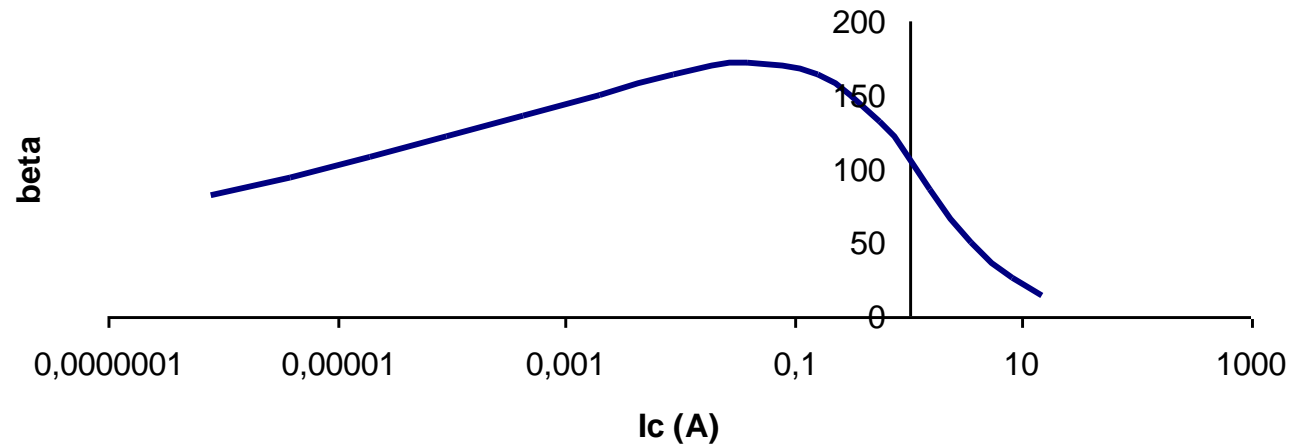
$$\beta_{forced} = \frac{I_C}{I_B} \quad \beta_{forced} < \beta_F$$

Exemplo: $\beta=50$



β_{forced}	50	48	45	40	30	20	10	1	0
$V_{cesat} \text{ (mV)}$	∞	235	211	191	166	147	123	76	60

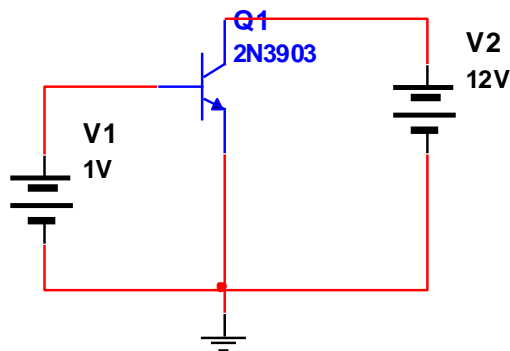
Variação de beta com a corrente



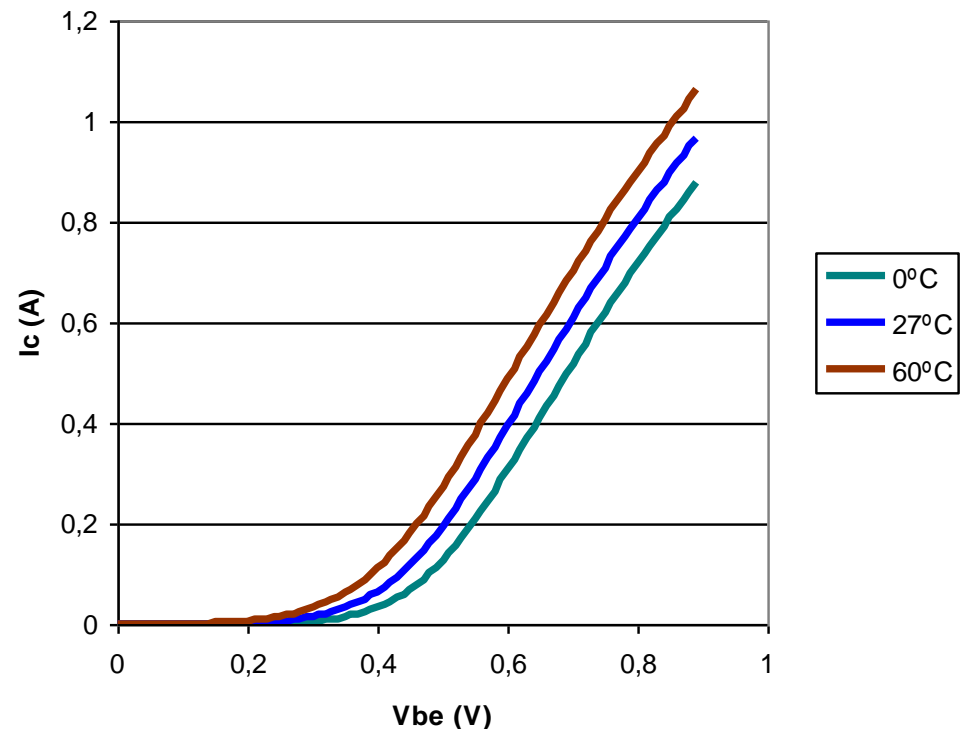
grandes variações de corrente provocam variações do beta

O Efeito da Temperatura

- * V_{BE} varia cerca de $-2\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ para valores semelhantes de I_C
- * *Beta do transístor tipicamente aumenta com a temperatura*



Sensibilidade á Temperatura



Efeito de Early

Mesmo na zona activa existe uma pequena dependência de I_C com V_{CE} . Tal deve-se a uma diminuição da largura efectiva da região de base, devido ao alargamento da região de depleção da junção CB denominado o efeito de Early.

