

TE 046

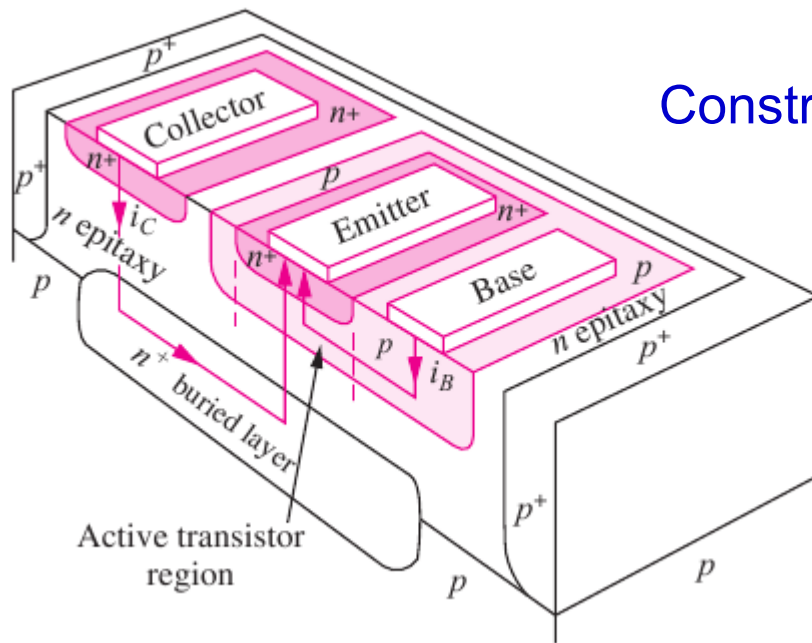
DISPOSITIVOS ELETRÔNICOS

Oscar C. Gouveia Filho
Departamento de Engenharia Elétrica
UFPR

URL:
www.eletrica.ufpr.br/ogouveia/te046
E-mail: ogouveia@eletrica.ufpr.br

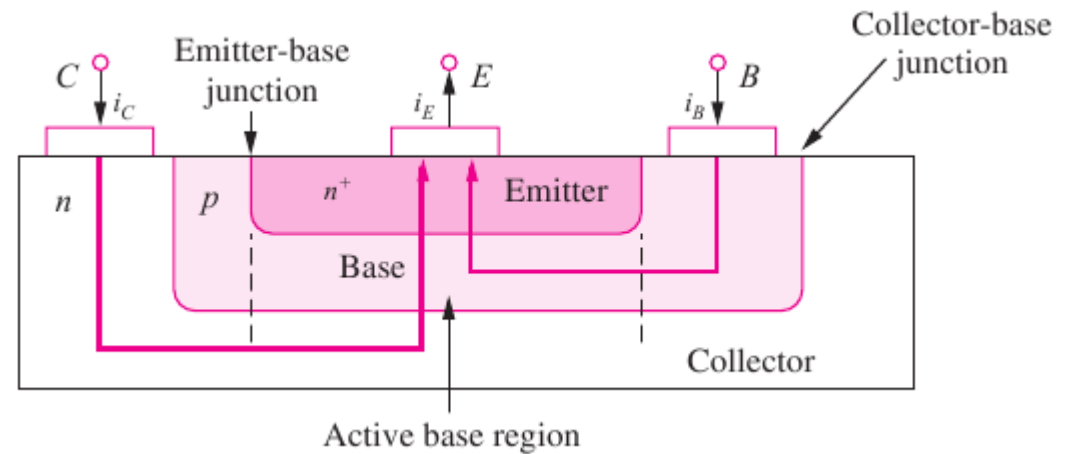
CAPÍTULO 5 - TRANSISTOR BIPOLAR DE JUNÇÃO (TBJ)

5.1 ESTRUTURA FÍSICA DO TRANSISTOR BIPOLAR

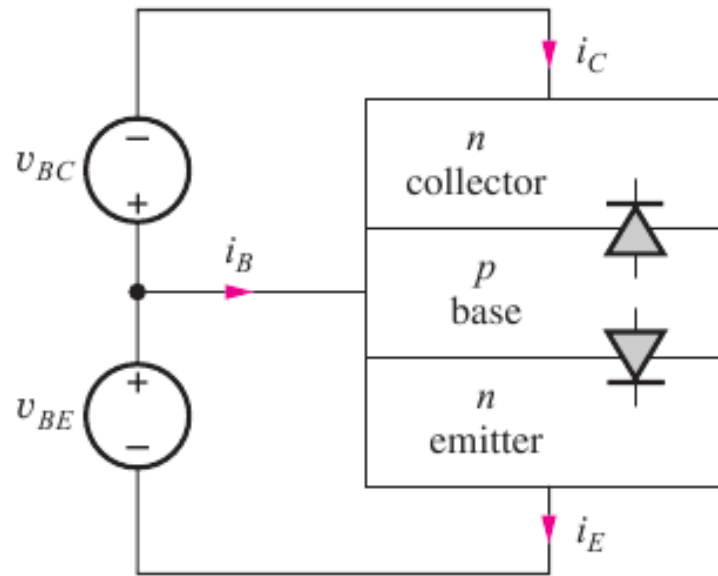


Construção em circuito integrado

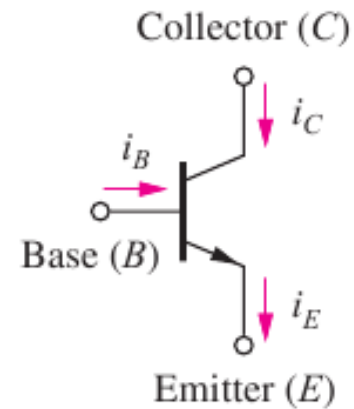
Seção transversal simplificada



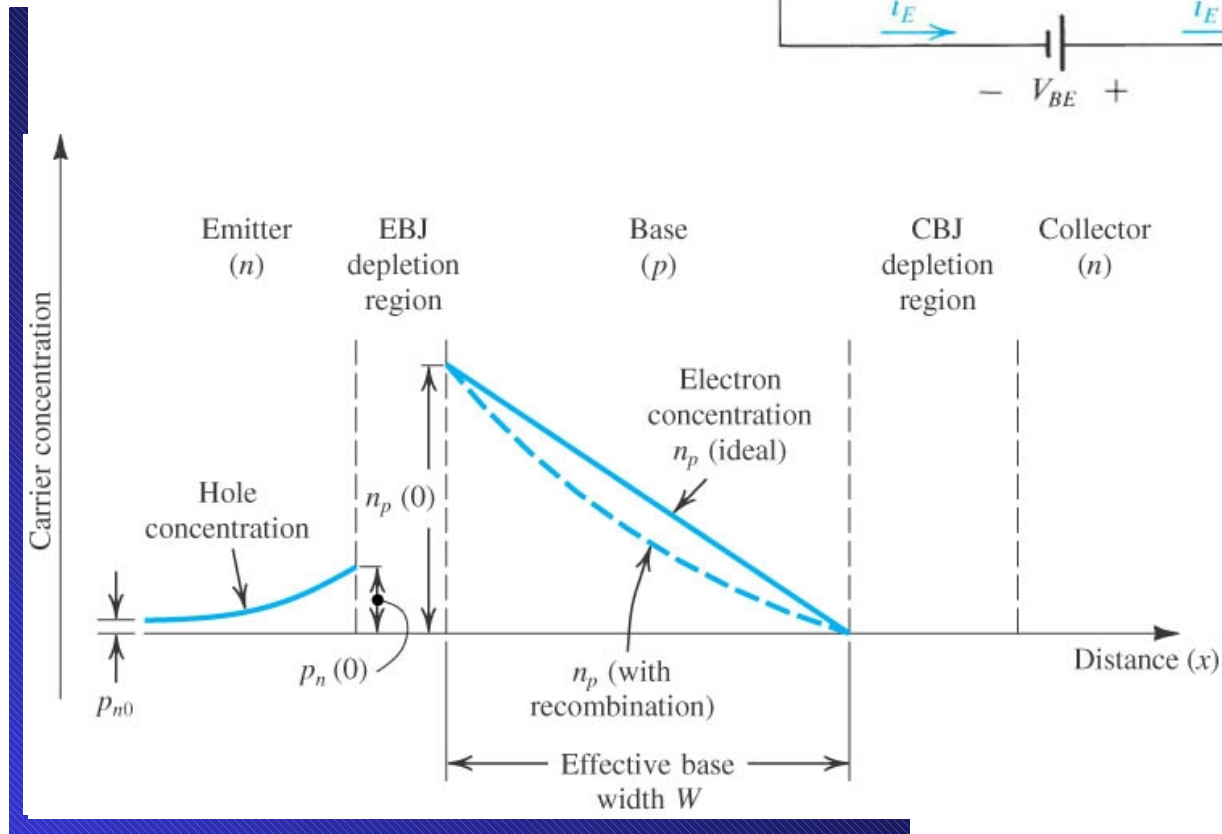
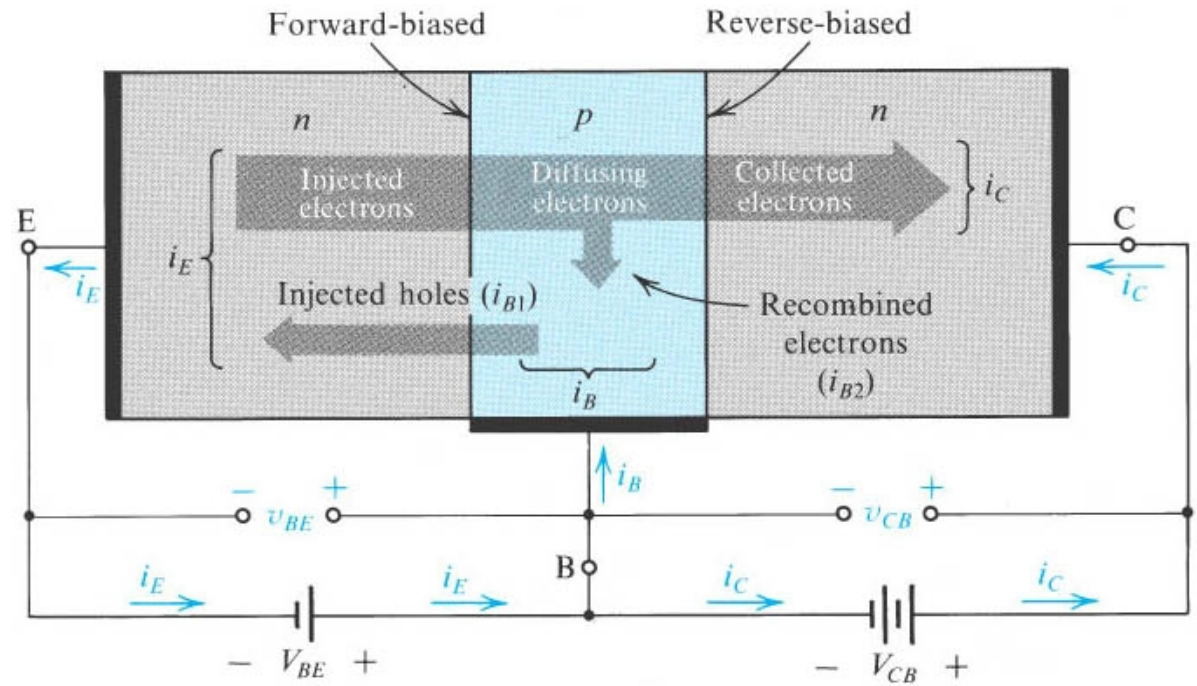
5.2 OPERAÇÃO DO TRANSISTOR BIPOLAR



Estrutura idealizada para uma polarização arbitrária



Símbolo



5.2.1 Operação direta

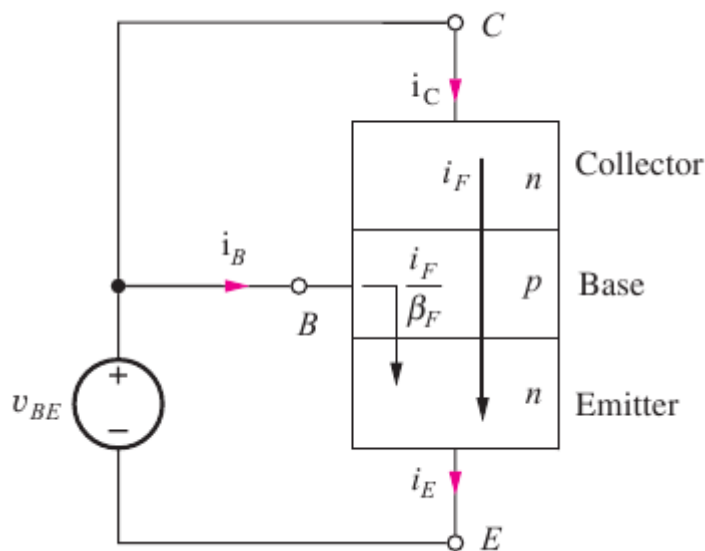
Diodo base emissor diretamente polarizado

$$i_C = i_F = I_S \left[\exp \left(\frac{v_{BE}}{V_T} \right) - 1 \right]$$

Lembrando I_S da junção pn

$$I_S = Aqn_i^2 \left(\frac{D_n}{N_A L_n} + \frac{D_p}{N_D L_p} \right)$$

$$i_B = \frac{i_F}{\beta_F} = \frac{I_S}{\beta_F} \left[\exp \left(\frac{v_{BE}}{V_T} \right) - 1 \right]$$



$$10 \leq \beta_F \leq 500$$

Ganho de corrente em emissor comum

A corrente de emissor é:

$$i_C + i_B = i_E$$

$$i_E = \left(I_S + \frac{I_S}{\beta_F} \right) \left[\exp \left(\frac{v_{BE}}{V_T} \right) - 1 \right]$$

Que pode ser reescrita como

$$i_E = I_S \left(\frac{\beta_F + 1}{\beta_F} \right) \left[\exp \left(\frac{v_{BE}}{V_T} \right) - 1 \right] = \frac{I_S}{\alpha_F} \left[\exp \left(\frac{v_{BE}}{V_T} \right) - 1 \right]$$

$$0.95 \leq \alpha_F < 1.0$$

Ganho de corrente em base comum

$$\alpha_F = \frac{\beta_F}{\beta_F + 1} \quad \text{or} \quad \beta_F = \frac{\alpha_F}{1 - \alpha_F}$$

Relações entre as correntes

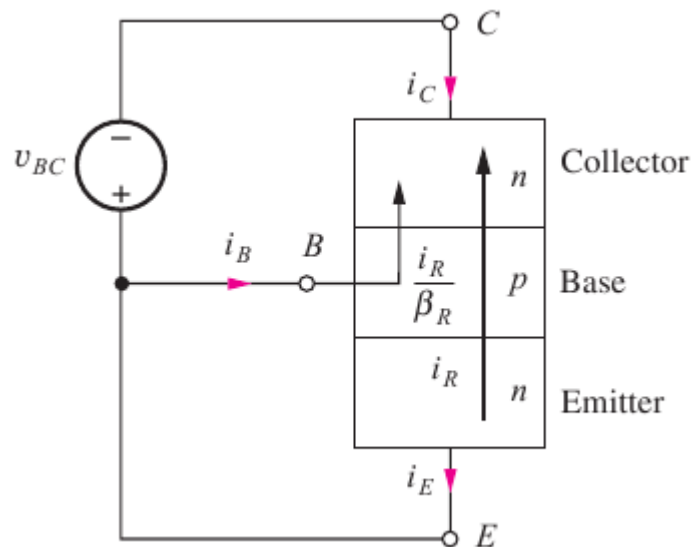
$$\frac{i_C}{i_B} = \beta_F \quad \text{or} \quad i_C = \beta_F i_B \quad \text{and} \quad i_E = (\beta_F + 1)i_B$$

$$\frac{i_C}{i_E} = \alpha_F \quad \text{or} \quad i_C = \alpha_F i_E$$

A situação descrita corresponde ao transistor operando numa região de alto ganho de corrente. REGIÃO ATIVA DIRETA.

5.2.2 Operação reversa

Diodo base coletor diretamente polarizado



$$i_R = I_S \left[\exp \left(\frac{v_{BC}}{V_T} \right) - 1 \right] \quad i_E = -i_R$$

$$i_B = \frac{i_R}{\beta_R} = \frac{I_S}{\beta_R} \left[\exp \left(\frac{v_{BC}}{V_T} \right) - 1 \right]$$

$$0 < \beta_R \leq 10$$

Ganho de corrente reverso em emissor comum

A corrente de coletor é:

$$i_C = -\frac{I_S}{\alpha_R} \left[\exp\left(\frac{v_{BC}}{V_T}\right) - 1 \right]$$

$$\alpha_R = \frac{\beta_R}{\beta_R + 1} \quad \text{or} \quad \beta_R = \frac{\alpha_R}{1 - \alpha_R}$$

$$0 < \alpha_R \leq 0.95$$

Ganho de corrente reverso em base comum

5.2.3 Conjunto Completo de Equações para o BJT

$$i_C = I_S \left[\exp \left(\frac{v_{BE}}{V_T} \right) - \exp \left(\frac{v_{BC}}{V_T} \right) \right] - \frac{I_S}{\beta_R} \left[\exp \left(\frac{v_{BC}}{V_T} \right) - 1 \right]$$

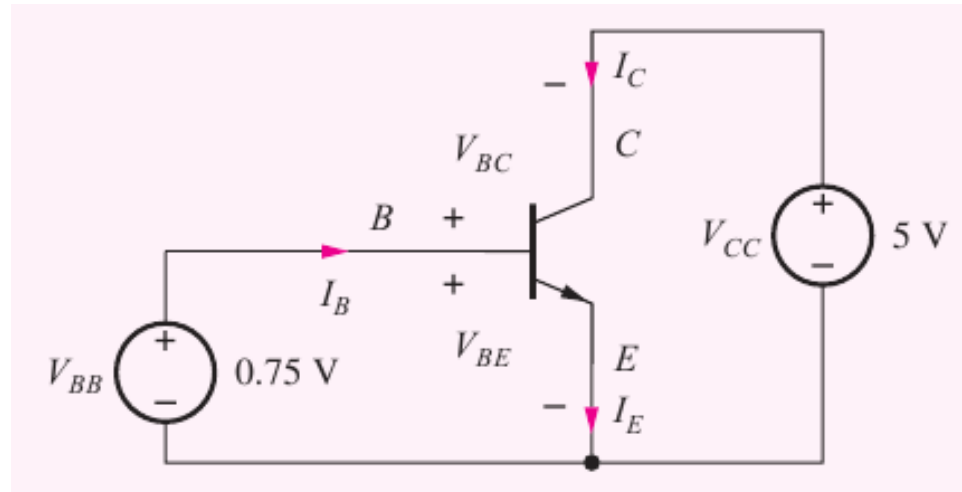
$$i_E = I_S \left[\exp \left(\frac{v_{BE}}{V_T} \right) - \exp \left(\frac{v_{BC}}{V_T} \right) \right] + \frac{I_S}{\beta_F} \left[\exp \left(\frac{v_{BE}}{V_T} \right) - 1 \right]$$

$$i_B = \frac{I_S}{\beta_F} \left[\exp \left(\frac{v_{BE}}{V_T} \right) - 1 \right] + \frac{I_S}{\beta_R} \left[\exp \left(\frac{v_{BC}}{V_T} \right) - 1 \right]$$

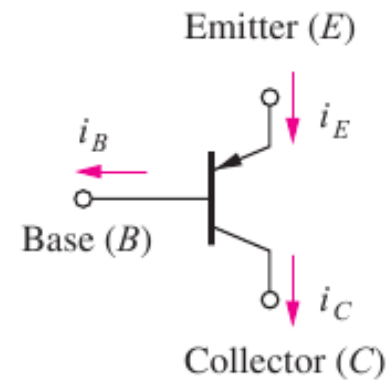
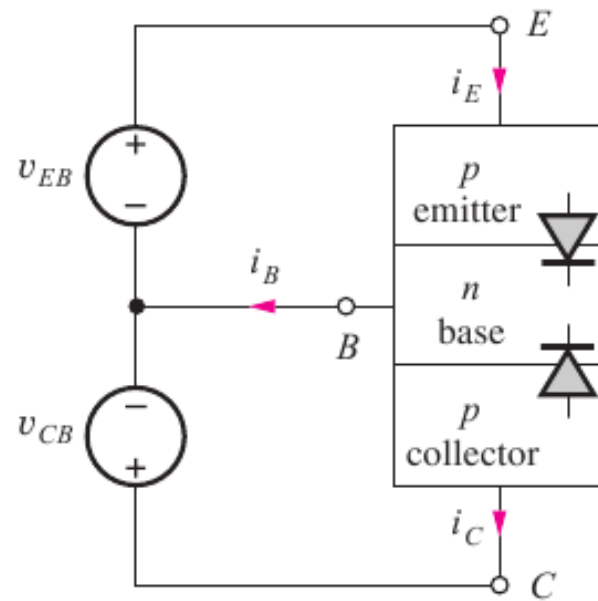
Corrente total transportada através da base

$$i_T = I_S \left[\exp \left(\frac{v_{BE}}{V_T} \right) - \exp \left(\frac{v_{BC}}{V_T} \right) \right]$$

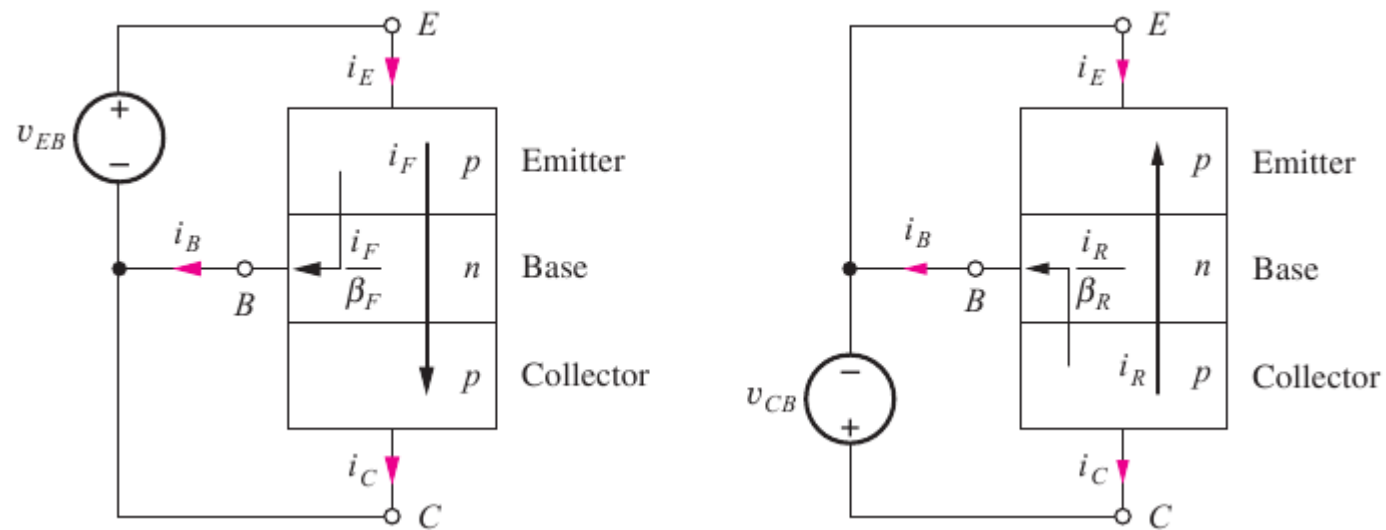
Exemplo: Determine as corrente e tensões no transistor do circuito abaixo.



5.3 O TRANSISTOR pnp



O mesmo procedimento aplicado ao transistor npn pode ser usado para o transistor pnp, invertendo-se os sinais das correntes e tensões.



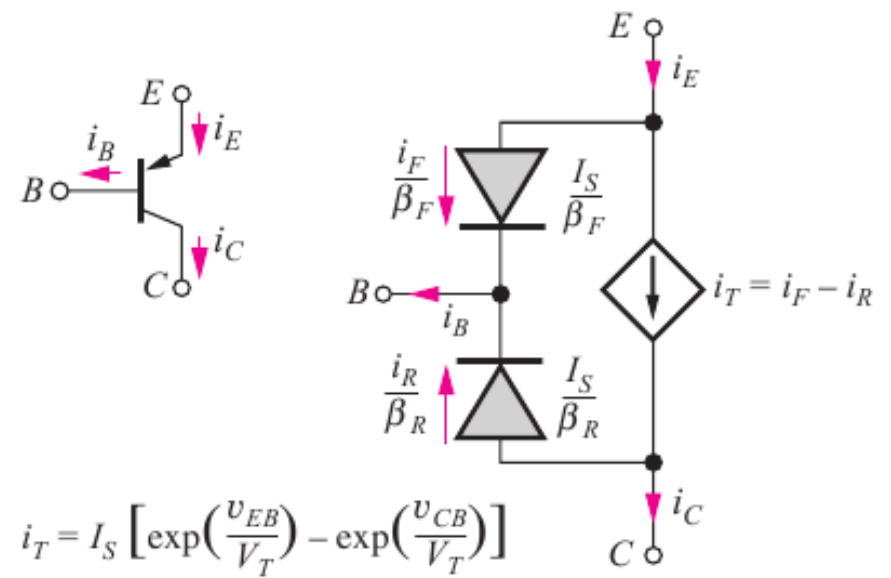
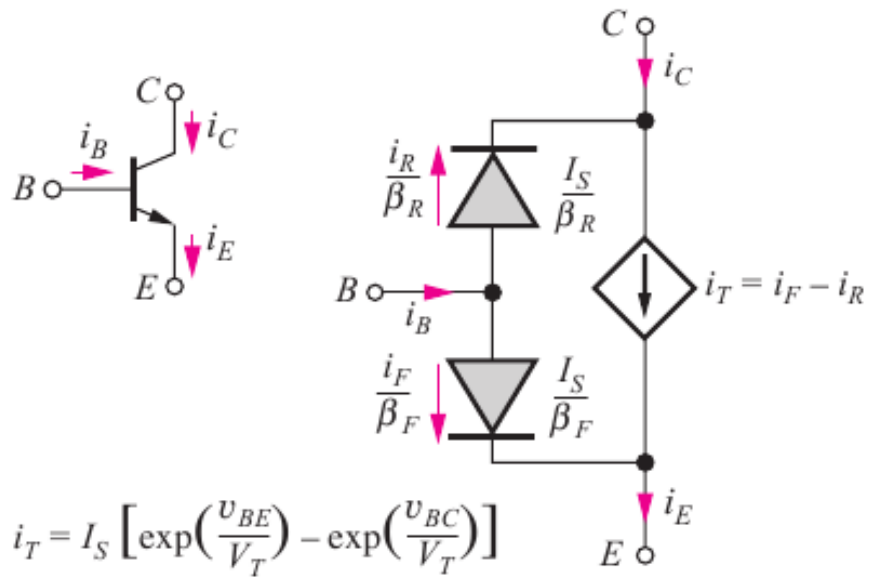
Conjunto Completo de Equações para o Transistor pnp

$$i_C = I_S \left[\exp \left(\frac{v_{EB}}{V_T} \right) - \exp \left(\frac{v_{CB}}{V_T} \right) \right] - \frac{I_S}{\beta_R} \left[\exp \left(\frac{v_{CB}}{V_T} \right) - 1 \right]$$

$$i_E = I_S \left[\exp \left(\frac{v_{EB}}{V_T} \right) - \exp \left(\frac{v_{CB}}{V_T} \right) \right] + \frac{I_S}{\beta_F} \left[\exp \left(\frac{v_{EB}}{V_T} \right) - 1 \right]$$

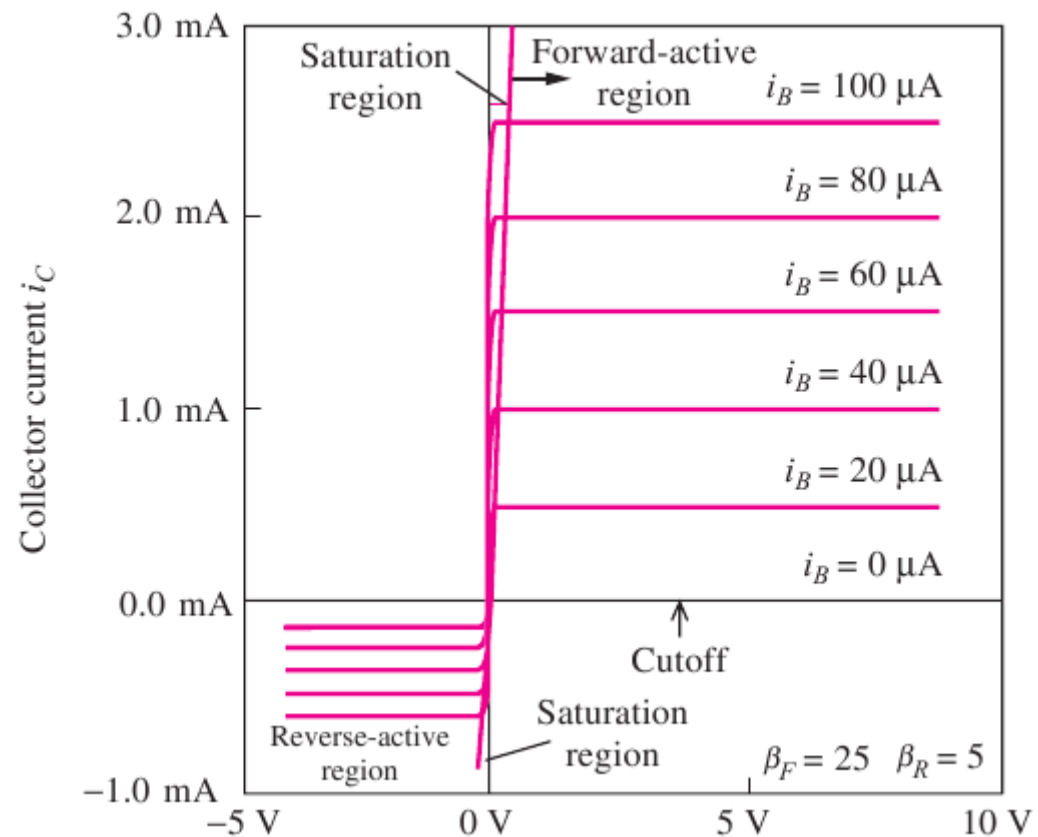
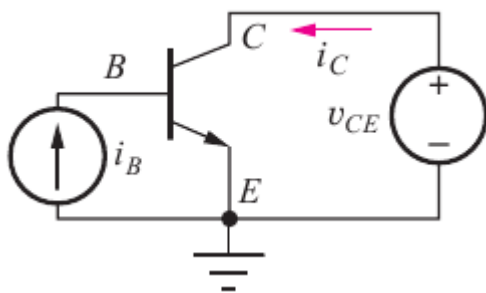
$$i_B = \frac{I_S}{\beta_F} \left[\exp \left(\frac{v_{EB}}{V_T} \right) - 1 \right] + \frac{I_S}{\beta_R} \left[\exp \left(\frac{v_{CB}}{V_T} \right) - 1 \right]$$

5.4 Circuito Equivalente para os Transistores Bipolares

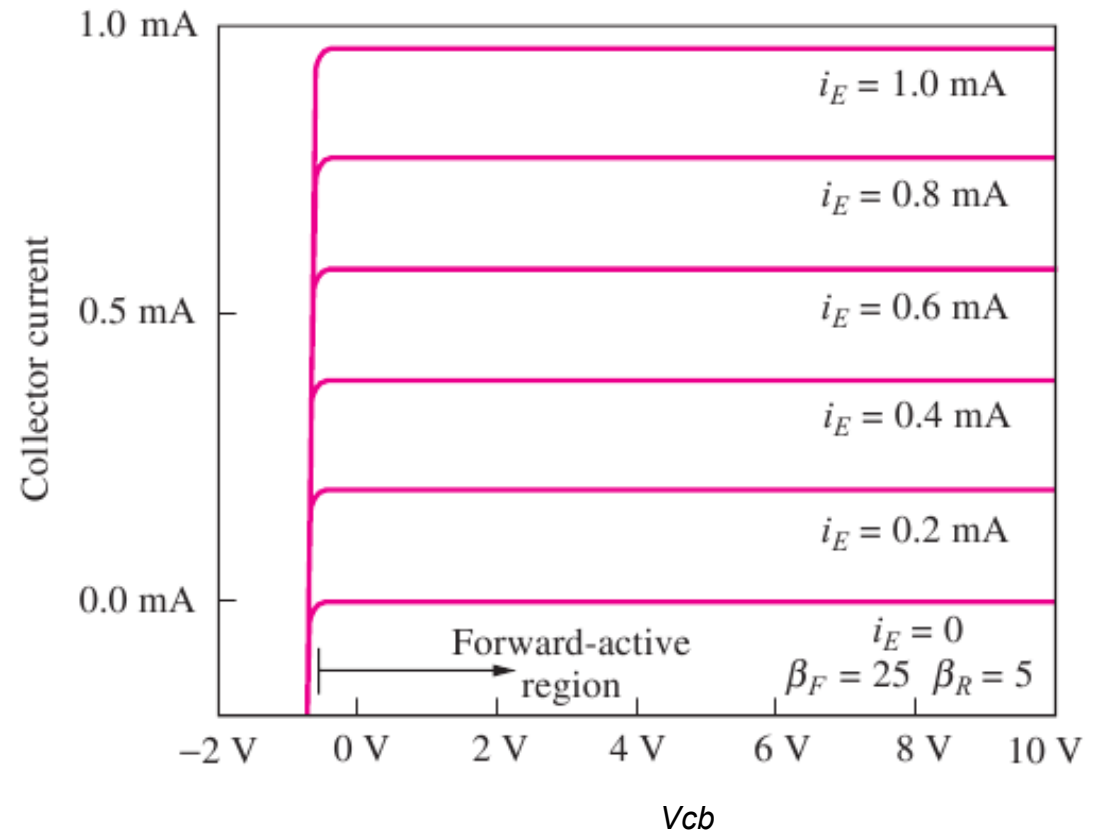
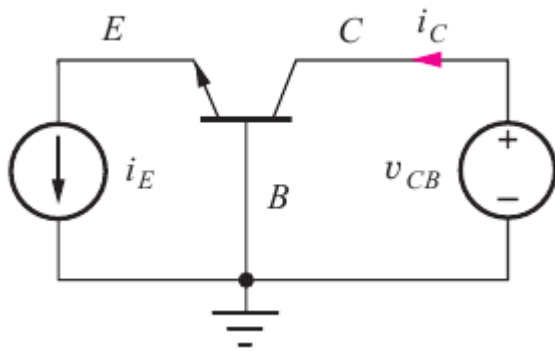


5.5 Característica $i \times v$

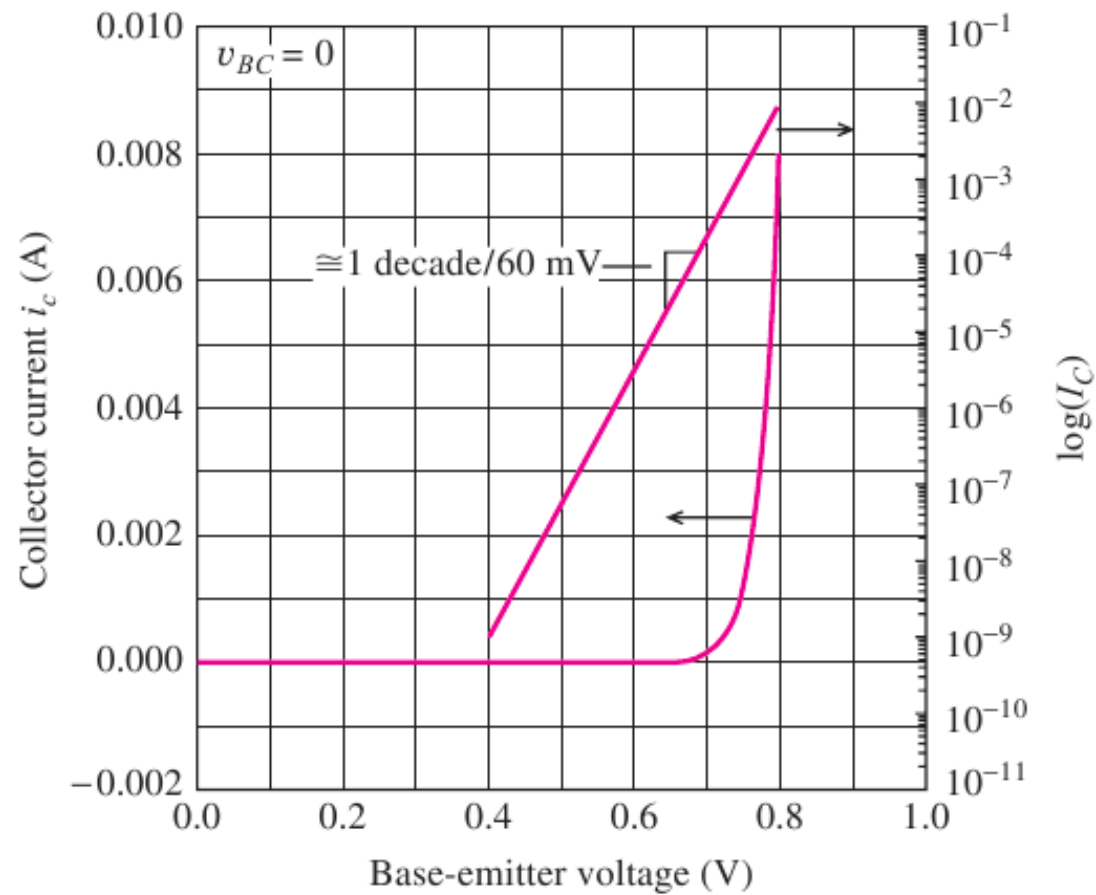
5.5.1 Característica de saída em emissor comum



5.5.2 Característica de saída em base comum



5.5.3 Característica de transferência na região ativa direta



5.6 Regiões de Operação do TBJ

Modo de Operação	Junção EB	Junção CB
Corte	Reversa	Reversa
Ativo direto	Direta	Reversa
Ativo reverso	Reversa	Direta
Saturação	Direta	Direta

5.7 Simplificações do Modelo de Transporte

5.7.1 Região de corte

Condições para v_{BE} e v_{BC}

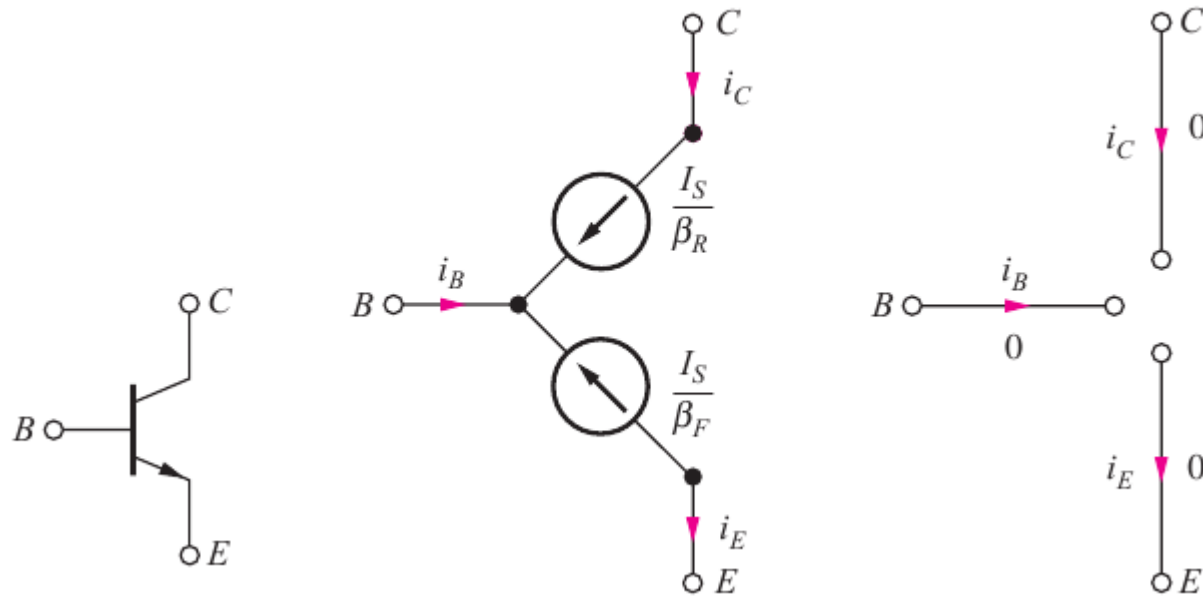
$$v_{BE} < -\frac{4kT}{q} \quad v_{BC} < -4\frac{kT}{q} \quad -4\frac{kT}{q} = -0.1V$$

Ou seja, ambas as junções estão reversamente polarizadas

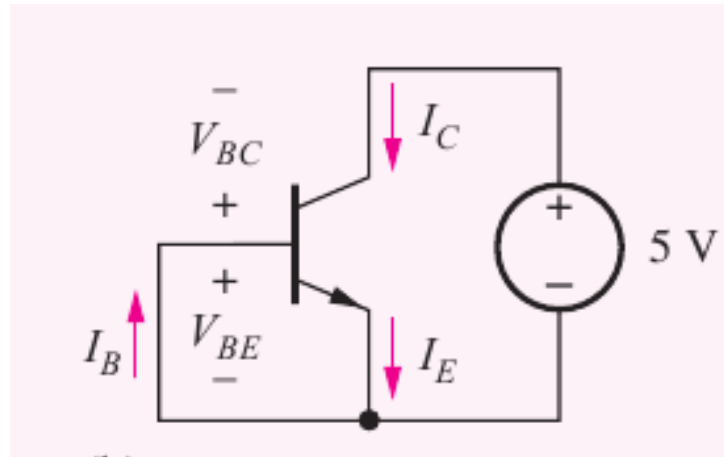
Essas condições permitem desprezar os termos exponenciais nas equações do modelo, resultando em:

$$i_C = +\frac{I_S}{\beta_R} \quad i_E = -\frac{I_S}{\beta_F} \quad i_B = -\frac{I_S}{\beta_F} - \frac{I_S}{\beta_R}$$

Modelo na região de corte



Exemplo: Determine as corrente e tensões no transistor do circuito abaixo.



5.7.2 Região ativa direta

Condições para v_{BE} e v_{BC}

$$v_{BE} > 4 \frac{kT}{q} = 0.1 \text{ V} \quad \text{and} \quad v_{BC} < -4 \frac{kT}{q} = -0.1 \text{ V}$$

As exponenciais em v_{BC} podem ser desprezadas

$$i_C = I_S \exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right) + \frac{I_S}{\beta_R}$$

$$i_E = \frac{I_S}{\alpha_F} \exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right) + \frac{I_S}{\beta_F}$$

$$i_B = \frac{I_S}{\beta_F} \exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right) - \frac{I_S}{\beta_F} - \frac{I_S}{\beta_R}$$

Os termos exponenciais são muito grandes comparados aos outros termos. Portanto as expressões podem ser simplificadas, resultando em:

$$i_C = I_S \exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right) \quad i_E = \frac{I_S}{\alpha_F} \exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right) \quad i_B = \frac{I_S}{\beta_F} \exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right)$$

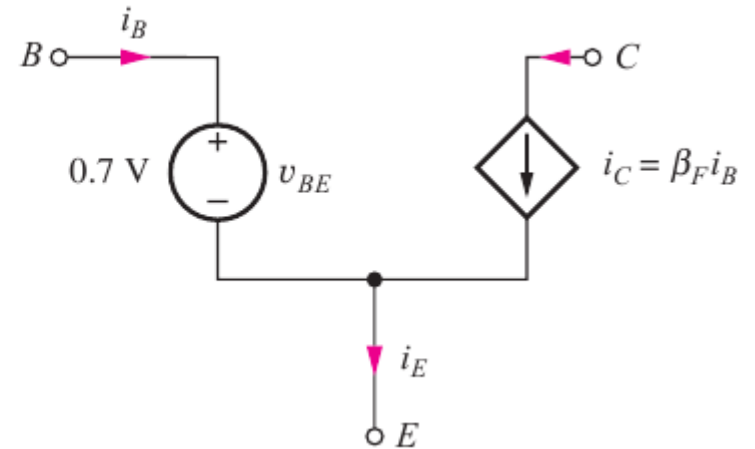
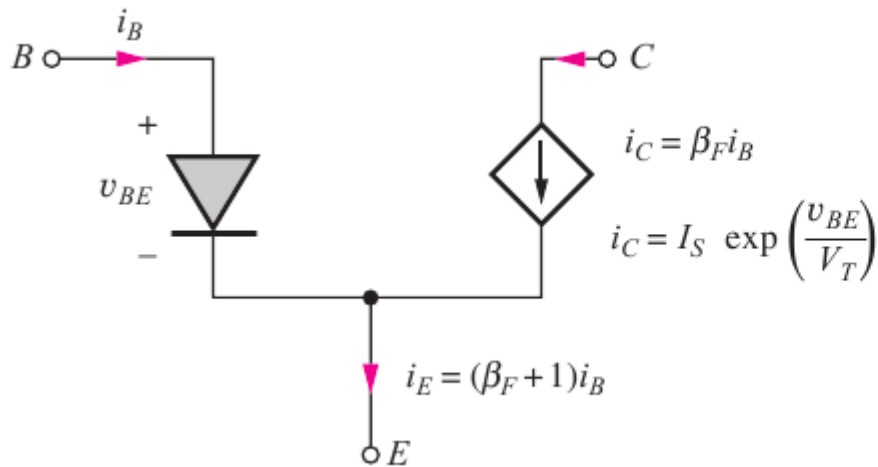
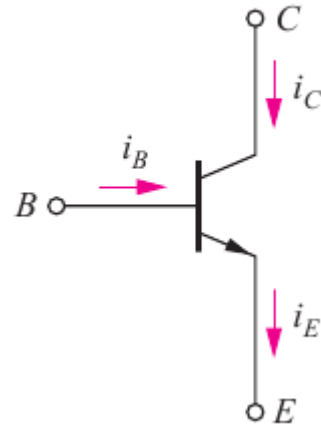
Fazendo relações entre as correntes nos terminais, encontra-se:

$$i_C = \alpha_F i_E \quad \text{and} \quad i_C = \beta_F i_B$$

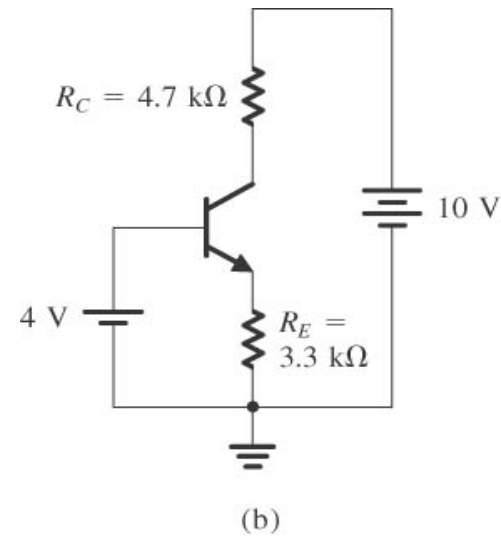
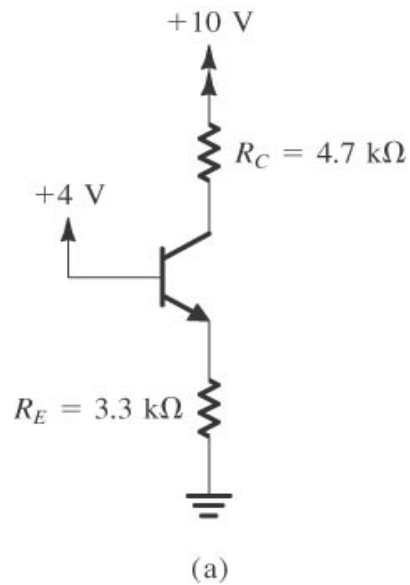
Como $i_E = i_B + i_C$

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

Modelo simplificado para o BJT

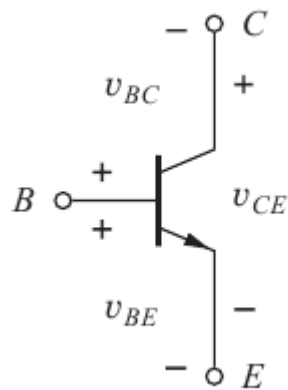


Exemplo: Determine as tensões e correntes e correntes no circuito abaixo. Considere que o transistor tem β igual a 100.



5.7.3 Região de saturação

Ambas as junções estão diretamente polarizadas



$$i_C = I_S \exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right) - \frac{I_S}{\alpha_R} \exp\left(\frac{v_{BC}}{V_T}\right)$$
$$i_B = \frac{I_S}{\beta_F} \exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right) + \frac{I_S}{\beta_R} \exp\left(\frac{v_{BC}}{V_T}\right)$$

Resolvendo para v_{BE} e v_{BC}

$$v_{BE} = V_T \ln \frac{i_B + (1 - \alpha_R)i_C}{I_S \left[\frac{1}{\beta_F} + (1 - \alpha_R) \right]}$$

$$v_{BC} = V_T \ln \frac{i_B - \frac{i_C}{\beta_F}}{I_S \left[\frac{1}{\alpha_R} \right] \left[\frac{1}{\beta_F} + (1 - \alpha_R) \right]}$$

$$V_{CE} = V_{BE} - V_{BC}$$

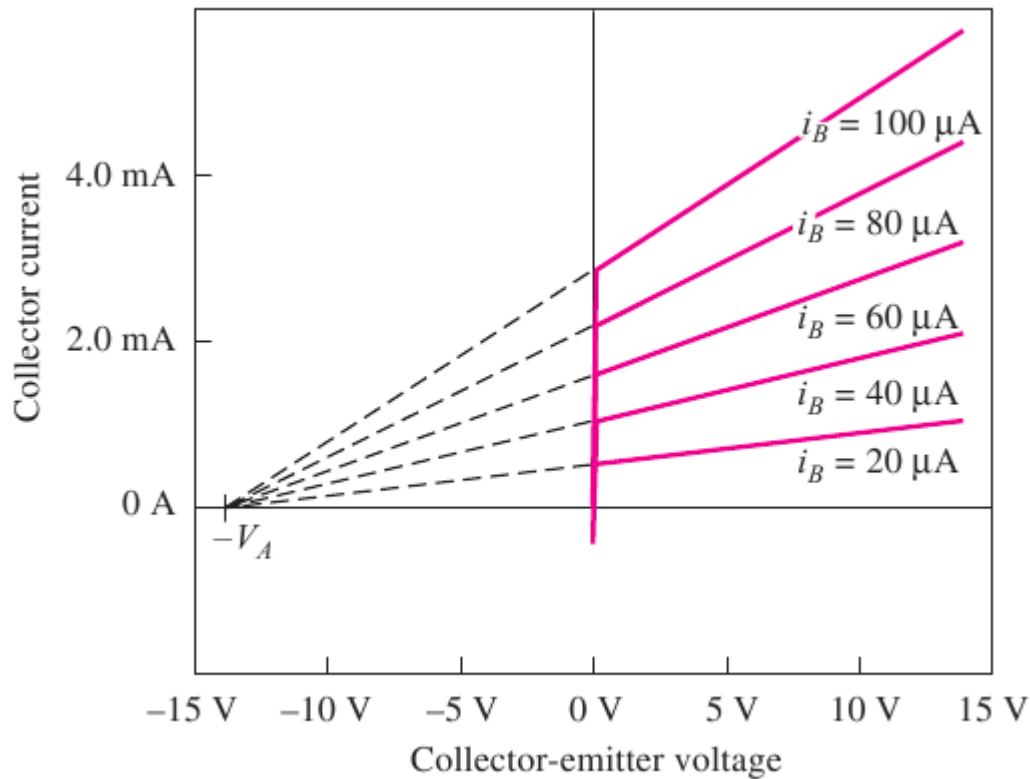
$$V_{CESAT} = V_T \ln \left[\left(\frac{1}{\alpha_R} \right) \frac{1 + \frac{i_C}{(\beta_R + 1)i_B}}{1 - \frac{i_C}{\beta_F i_B}} \right] \quad \text{para}$$

$i_B > \frac{i_C}{\beta_F}$ É o valor de i_B para manter o transistor na região ativa direta

Se a corrente de base ultrapassa esse valor o transistor entra na saturação. O valor real da relação i_C/i_B é chamado de β forçado.

$$\beta_{FOR} \leq \beta_F$$

5.8 Efeito Early



$$10 \text{ V} \leq V_A \leq 200 \text{ V}$$

$$i_C = I_S \left[\exp \left(\frac{v_{BE}}{V_T} \right) \right] \left[1 + \frac{v_{CE}}{V_A} \right]$$

$$\beta_F = \beta_{FO} \left[1 + \frac{v_{CE}}{V_A} \right]$$

$$i_B = \frac{I_S}{\beta_{FO}} \left[\exp \left(\frac{v_{BE}}{V_T} \right) \right]$$

β_{FO} é β_F para $v_{CE} = 0$