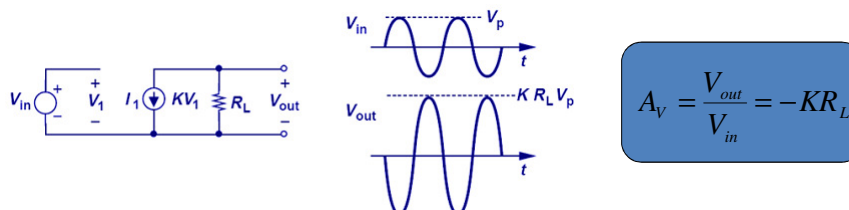


Transistor Bipolar

- Pode ser utilizado como chave ou como amplificador:

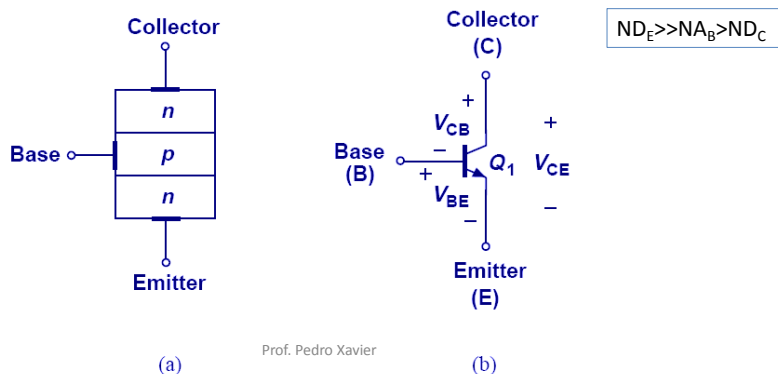


$$A_V = \frac{V_{out}}{V_{in}} = -KR_L$$

Prof. Pedro Xavier

Transistor Bipolar

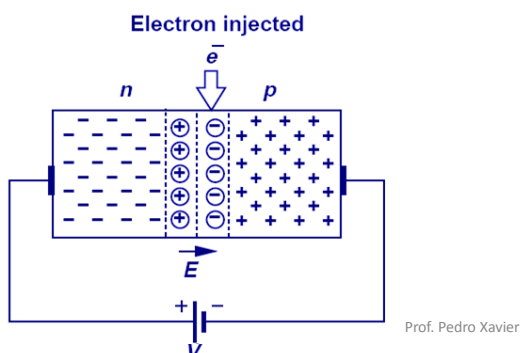
- O transistor bipolar é formado por um sanduíche 3 regiões dopadas, podendo ser NPN ou PNP.
- A região central tem espessura mínima e é menos dopada que o emissor. O emissor é mais dopado que o coletor.



Prof. Pedro Xavier

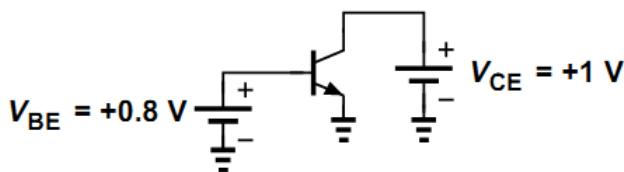
Transistor Bipolar

- Observação:
 - Quando injetamos portadores em um junção PN polarizada reversamente.
 - Os elétrons são deslocados rapidamente para o lado N e as lacunas, para o lado P. De acordo com o sentido do campo elétrico



Transistor operando na região ativa

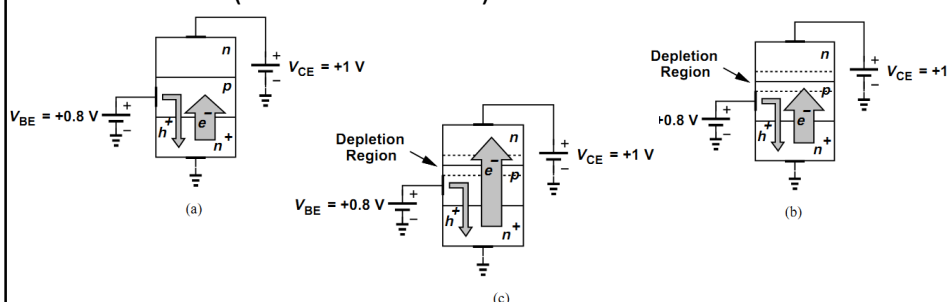
- Junção BE polarizada diretamente (0,8V)
- Junção BC polarizada reversamente (1-0,8= 0,2V)
- V_{BE} e $V_{CB} > 0$



Prof. Pedro Xavier

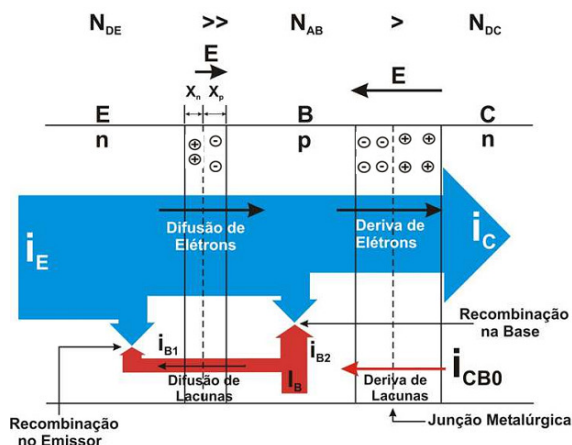
Transistor operando na região ativa

- Corrente de Difusão de elétrons e de lacunas. A difusão de elétrons é maior pois o emissor é mais dopado que a base.
- Como a espessura da base é pequena os elétrons atingem a região de depleção da junção BC.
- Os elétrons são conduzidos, devido ao campo elétrico, para o coletor (corrente de deriva)



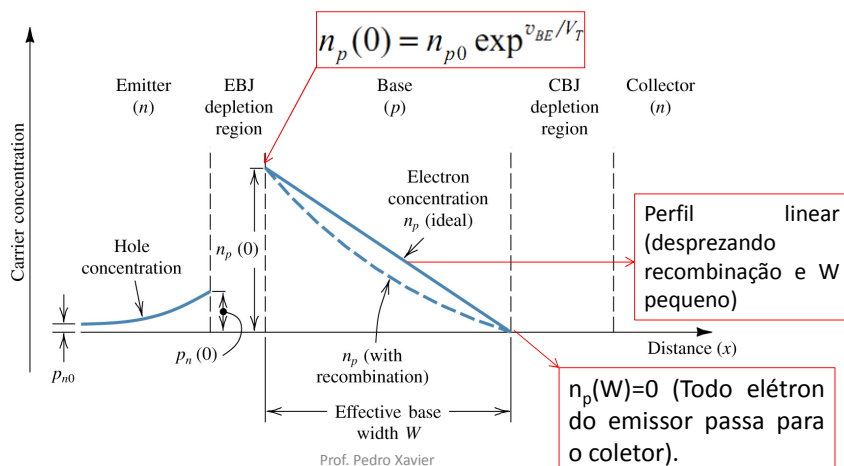
Transistor operando na região ativa

- Além da difusão e deriva de elétrons e difusão de lacunas, ocorre a recombinação de elétrons e lacunas na base e no emissor.



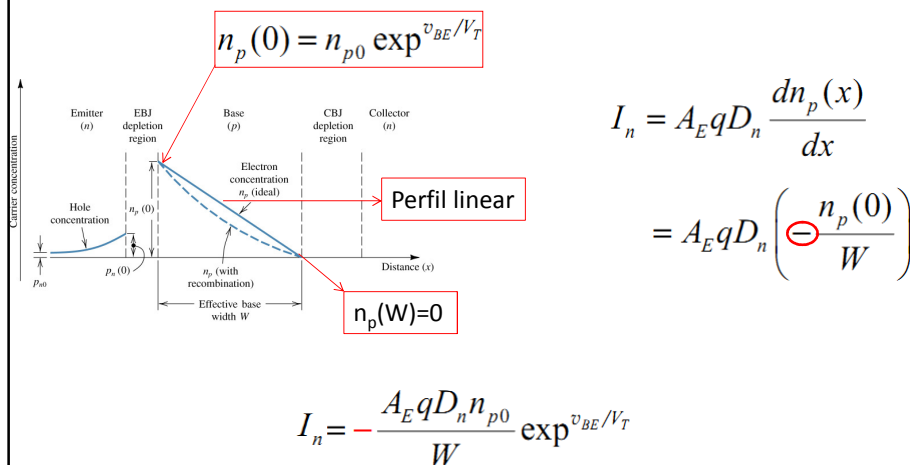
Transistor operando na região ativa

- Corrente no emissor devido a difusão de elétrons



Transistor operando na região ativa

- Corrente no emissor devido a difusão de elétrons



$$I_n = A_E q D_n \frac{dn_p(x)}{dx}$$

$$= A_E q D_n \left(\frac{n_p(0)}{W} \right)$$

$$I_n = - \frac{A_E q D_n n_{p0}}{W} \exp^{v_{BE}/V_T}$$

Corrente de coletor

- A maioria dos elétrons que se difundem pela base alcançarão os limites da região de depleção coletor-base. Devido a ação do campo elétrico, estes elétrons serão transpostos para o coletor através do mecanismo de deriva.

$$i_C = I_n = \frac{A_E q D_n n_{p0}}{W} \exp^{v_{BE}/V_T}$$

$$i_C = I_S \exp^{v_{BE}/V_T}$$

$$I_S = \frac{A_E q D_n n_{p0}}{W}$$

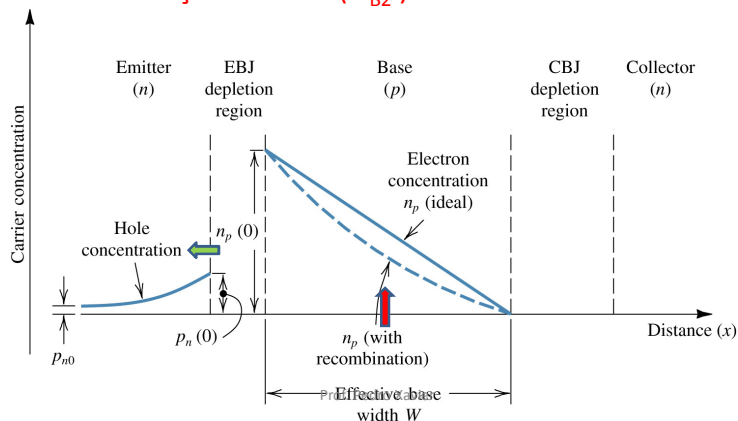
$$n_{p0} = \frac{n_i^2}{N_A}$$

$$I_S = \frac{A_E q D_n n_i^2}{N_A W}$$

Prof. Pedro Xavier

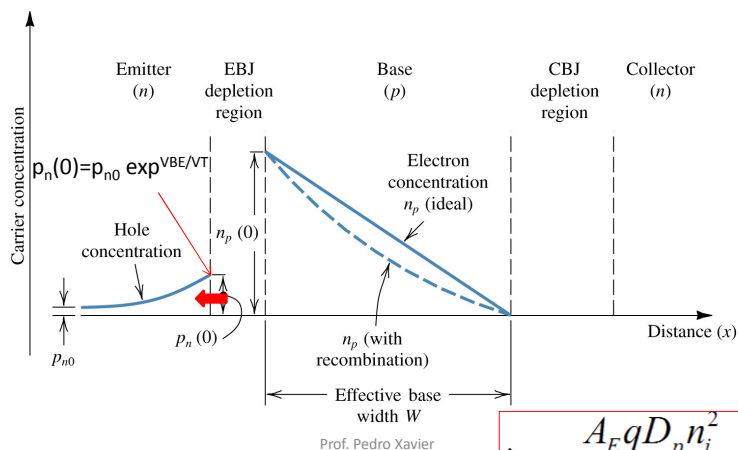
Transistor operando na região ativa

- Corrente de base
 - Corrente de difusão de lacunas da base para o emissor (i_{B1})
 - Recombinação na base (i_{B2})



Transistor operando na região ativa

- Corrente de base: difusão de lacunas (i_{B1})

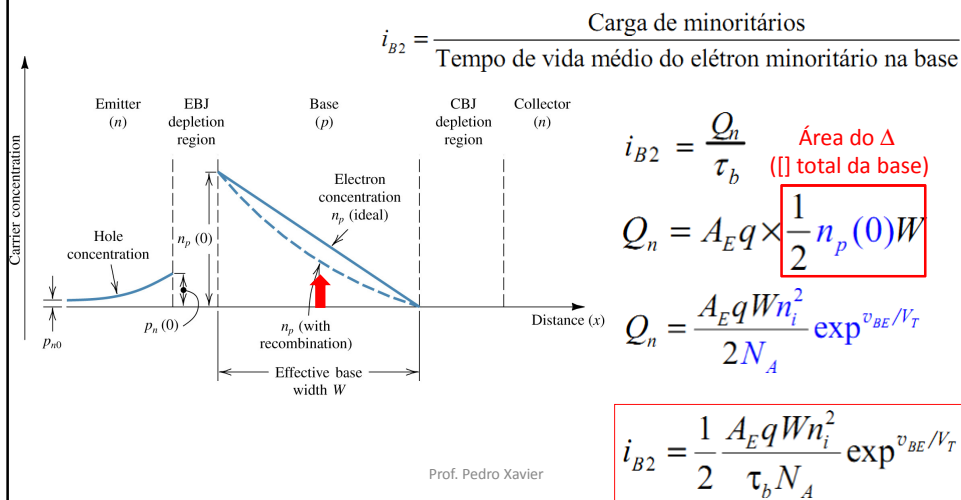


$$i_{B1} = \frac{A_E q D_p n_i^2}{N_D L_p} \exp^{v_{BE}/V_T}$$

Prof. Pedro Xavier

Transistor operando na região ativa

- Corrente de base: recombinação



$$i_{B2} = \frac{\text{Carga de minoritários}}{\text{Tempo de vida médio do elétron minoritário na base}}$$

$$i_{B2} = \frac{Q_n}{\tau_b} \quad \text{Área do } \Delta \text{ (} \square \text{ total da base)}$$

$$Q_n = A_E q \times \frac{1}{2} n_p(0) W$$

$$Q_n = \frac{A_E q W n_i^2}{2 N_A} \exp^{v_{BE}/V_T}$$

$$i_{B2} = \frac{1}{2} \frac{A_E q W n_i^2}{\tau_b N_A} \exp^{v_{BE}/V_T}$$

Prof. Pedro Xavier

Transistor operando na região ativa

- Corrente de base

Corrente de difusão de lacunas da base para o emissor (i_{B1}) +

Recombinação na base (i_{B2}) =

Corrente de base (i_B)

$$i_{B1} = \frac{A_E q D_p n_i^2}{N_D L_p} \exp^{v_{BE}/V_T} +$$

$$i_{B2} = \frac{1}{2} \frac{A_E q W n_i^2}{\tau_b N_A} \exp^{v_{BE}/V_T} =$$

$$i_B = i_{B1} + i_{B2} = I_S \left(\frac{D_p N_A W}{D_n N_D L_p} + \frac{1}{2} \frac{W^2}{D_n \tau_b} \right) \exp^{v_{BE}/V_T}$$

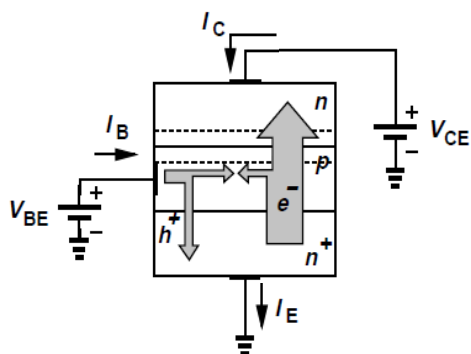
$$i_B = \frac{I_S}{\beta} \exp^{v_{BE}/V_T} = \frac{i_C}{\beta} \quad \beta \text{ é o ganho de corrente de emissor comum}$$

$$I_S = \frac{A_E q D_n n_i^2}{N_A W}$$

$$\beta = 1 / \left(\frac{D_p N_A W}{D_n N_D L_p} + \frac{1}{2} \frac{W^2}{D_n \tau_b} \right)$$

Corrente de emissor

- A corrente de emissor (I_E)



$$I_E = I_C + I_B$$

$$I_E = I_C \left(1 + \frac{1}{\beta} \right)$$

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}$$

Prof. Pedro Xavier

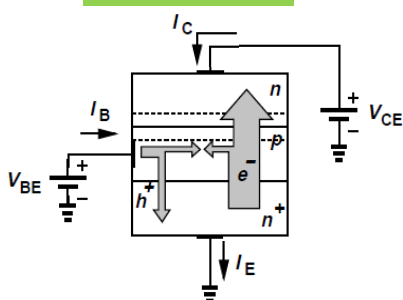
Resumo das correntes

$$I_C = \beta I_B$$

$$I_E = I_C + I_B$$

$$I_E = I_C \left(1 + \frac{1}{\beta} \right)$$

$$I_C = \alpha I_E$$



Prof. Pedro Xavier

$$I_C = I_S \exp \frac{V_{BE}}{V_T}$$

$$I_B = \frac{1}{\beta} I_S \exp \frac{V_{BE}}{V_T}$$

$$I_E = \frac{\beta + 1}{\beta} I_S \exp \frac{V_{BE}}{V_T}$$

$$\frac{\beta}{\beta + 1} = \alpha \quad \text{Ganho de corrente de base comum}$$

I_C independente de β

$$\beta = \frac{1}{\left(\frac{D_p N_A W}{D_n N_D L_p} + \frac{1}{2} \frac{W^2}{D_n \tau_b} \right)}$$

Exercício

- Um TBJ com $I_S = 5 \times 10^{-16}$ A é polarizado na região ativa com $V_{BE} = 750$ mV. Se o ganho de corrente variar entre 50 e 200, quais são os valores mínimos e máximos das correntes do TBJ.

$$i_C = I_S \exp \frac{v_{BE}}{V_T} = 1,685 \text{ mA}$$

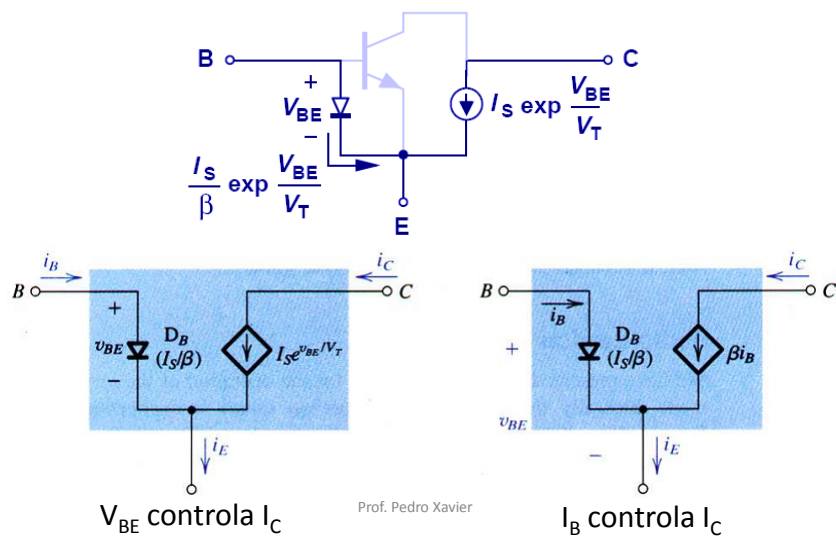
$$i_B = \frac{i_C}{\beta} = 8,43 \text{ } \mu\text{A a } 33,7 \text{ } \mu\text{A}$$

$$I_E = I_C + I_B = 1.693 \text{ mA a } 1719 \text{ mA}$$

Prof. Pedro Xavier

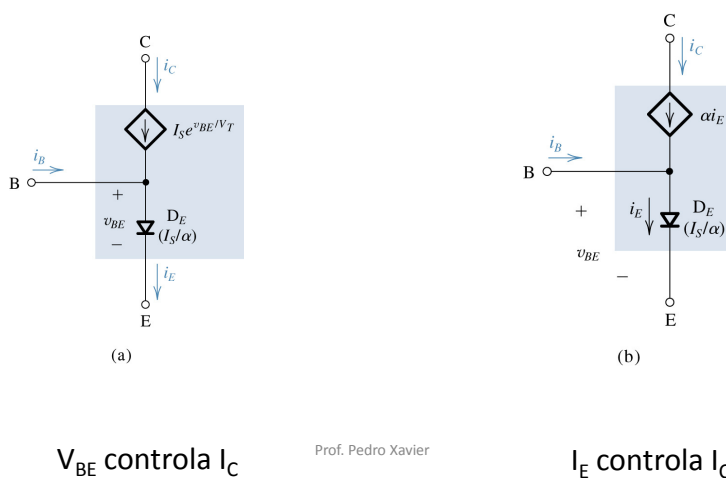
Modelo de grandes sinais (região ativa)

- Emissor comum

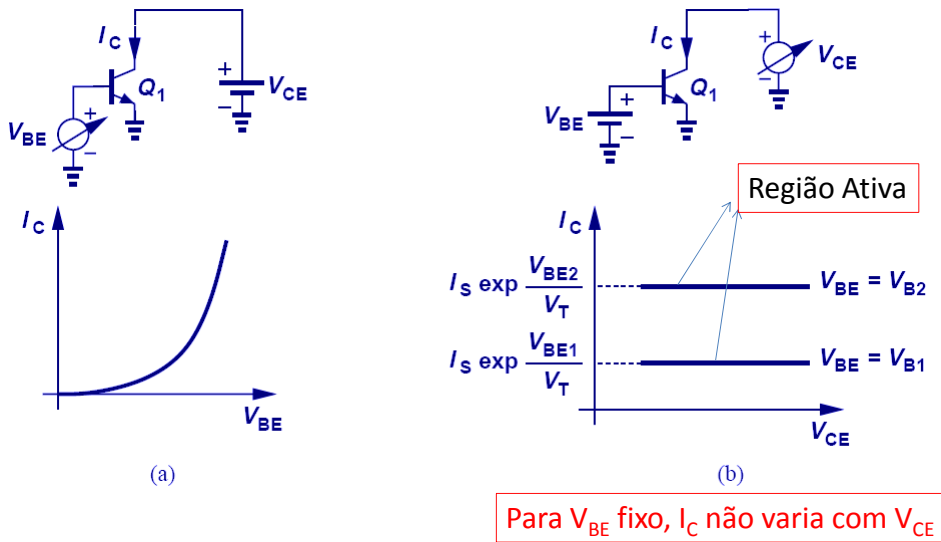


Modelo de grandes sinais (região ativa)

- Base comum

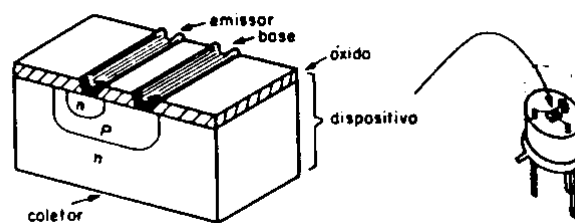


Características I versus V



Prof. Pedro Xavier

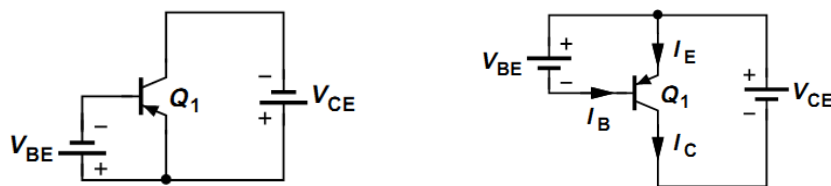
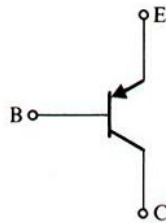
Estrutura do transistor



Prof. Pedro Xavier

Transistor PNP

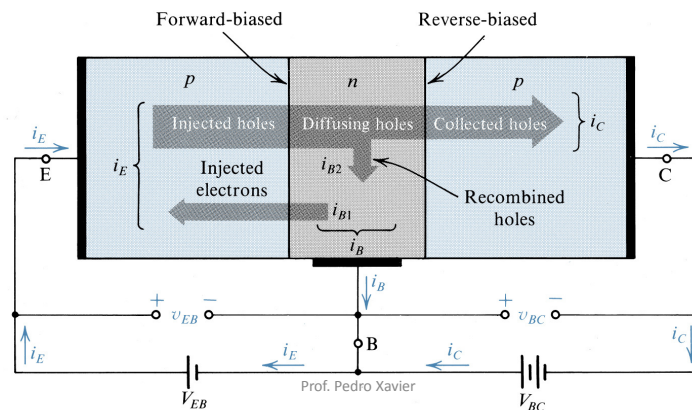
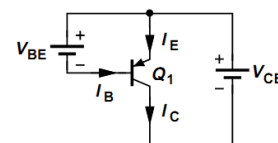
- Modo ativo



Prof. Pedro Xavier

Transistor PNP

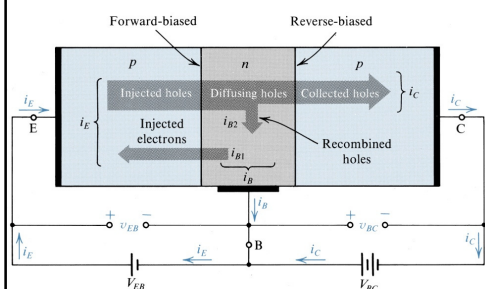
- Modo ativo: a corrente é constituída principalmente por lacunas.



Prof. Pedro Xavier

Transistor PNP

- Modo ativo: a corrente é constituída principalmente por lacunas.



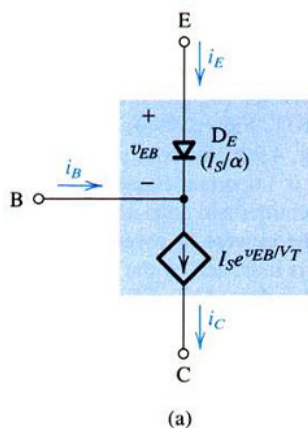
Prof. Pedro Xavier

$$I_C = I_S \exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right)$$

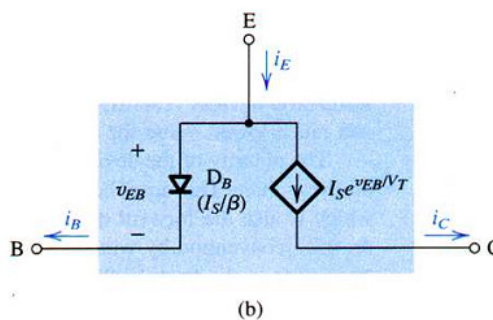
$$I_B = \frac{I_S}{\beta} \exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right)$$

$$I_E = \frac{\beta + 1}{\beta} I_S \exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right)$$

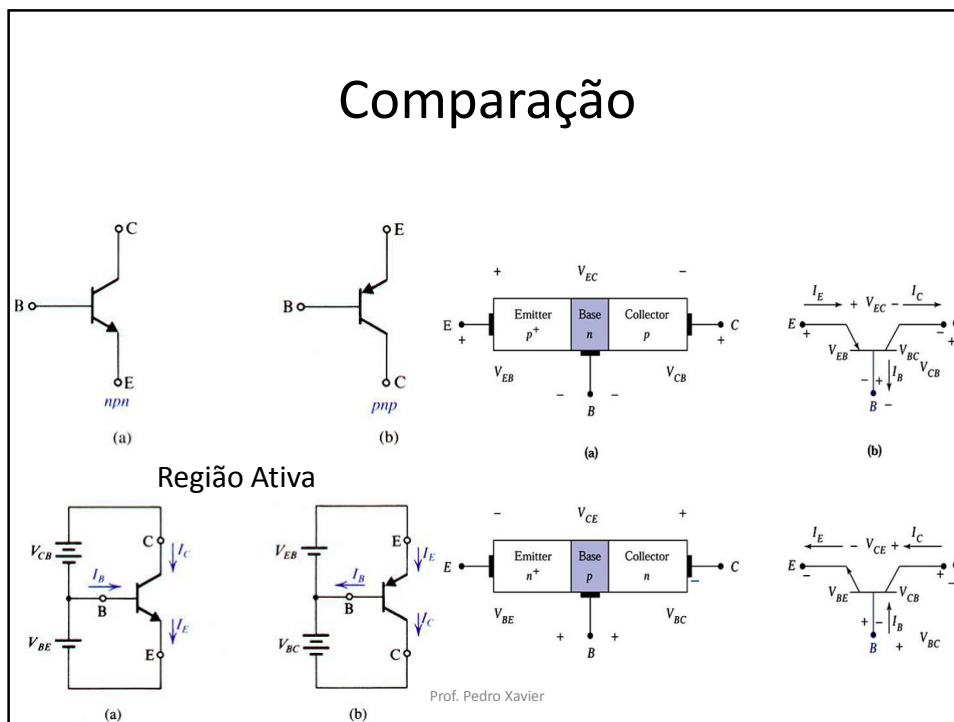
Modelo para grandes sinais do pnp



Base Comum
 i_C contrololada por v_{EB}



Emissor Comum
 i_C contrololada por v_{EB}



Correntes

- Modo ativo

$$i_C = I_S \exp^{v_{BE}/V_T}$$

$$i_B = \frac{i_C}{\beta} = \left(\frac{I_S}{\beta} \right) \exp^{v_{BE}/V_T}$$

$$i_E = \frac{i_C}{\alpha} = \left(\frac{I_S}{\alpha} \right) \exp^{v_{BE}/V_T}$$

Nota: Para o transistor *pnp*, substitua v_{BE} por v_{EB}

$$i_C = \alpha i_E \quad i_B = (1 - \alpha) i_E = \frac{i_E}{\beta + 1}$$

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

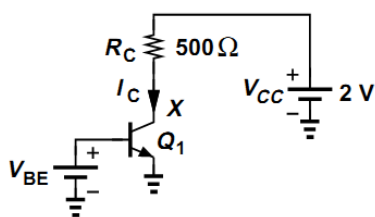
$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad \alpha = \frac{\beta}{\beta + 1}$$

V_T = tensão térmica = $kT/q \cong 25$ mV a temperatura ambiente

Prof. Pedro Xavier

Exercício

- Para o circuito abaixo determine as correntes do transistor V_{CE} e V_{CB} . Qual o valor de R_C máximo para que o TBJ opere no modo ativo?



$$I_{S,Q1} = 5 \times 10^{-17}$$

$$V_{BE} = 800 \text{ mV.}$$

Prof. Pedro Xavier

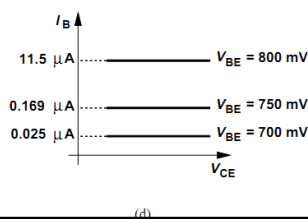
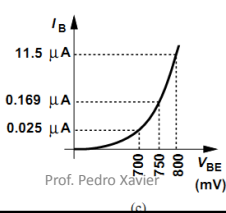
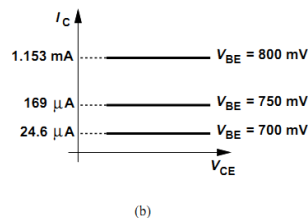
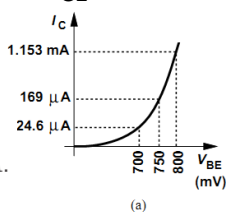
Exercício

- Para um TBJ, polarizado na região ativa, com $I_S=5 \times 10^{-17} \text{ A}$ e $\beta=100$. Trace as curvas $I_C \times V_{BE}$, $I_B \times V_{BE}$, $I_C \times V_{CE}$ e $I_B \times V_{CE}$.

$$V_{BE1} = 700 \text{ mV} \Rightarrow I_{C1} = 24.6 \mu\text{A}$$

$$V_{BE2} = 750 \text{ mV} \Rightarrow I_{C2} = 169 \mu\text{A}$$

$$V_{BE3} = 800 \text{ mV} \Rightarrow I_{C3} = 1.153 \text{ mA.}$$



Prof. Pedro Xavier

Fontes de figuras da aula

- Aula do prof. Fabiano Fruett
- Introdução à física dos semicondutores (H.A. Mello)
- Fundamentos da microeletrônica (Razavi)
- Microeletrônica (Sedra)

Prof. Pedro Xavier

Sugestão de estudo

- Sedra/Smith cap. 4 seções 4.1 até 4.4
- Razavi, cap. 4

Para saber mais:

Paul R. Gray e Robert G. Meyer, Analysis and Design of Analog integrated Circuits, John Wiley & Sons