

# Análise de Circuitos com Transístores Bipolares



**Teresa Mendes de Almeida**

[TeresaMAlmeida@ist.utl.pt](mailto:TeresaMAlmeida@ist.utl.pt)

**DEEC**

**Área Científica de Electrónica**

Maio de 2008

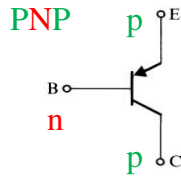
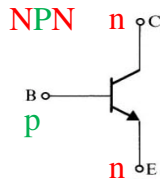
## Matéria

2

- **Transístores de junção bipolares**
  - NPN e PNP
  - zonas de funcionamento
    - corte, zona activa, saturação
- **Circuitos amplificadores**
  - o transístor como amplificador
  - modelo incremental
  - circuito de polarização
  - circuitos seguidor de emissor e amplificador de tensão (emissor comum)
- **Efeito da temperatura**
  - polarização estabilizada
- **Fontes de corrente**
- **Par diferencial com carga resistiva**
- **Exemplos de aplicação**

## ● TJB - transístor de junção bipolar

- fabricado com material semiconductor (silício)
- dispositivo com 3 terminais
  - C – colector
  - B – base
  - E – emissor
- baseia-se em 2 junções PN
  - base-colector (BC)
  - base-emissor (BE)
- 2 tipos de transístores
  - NPN e PNP
- símbolo

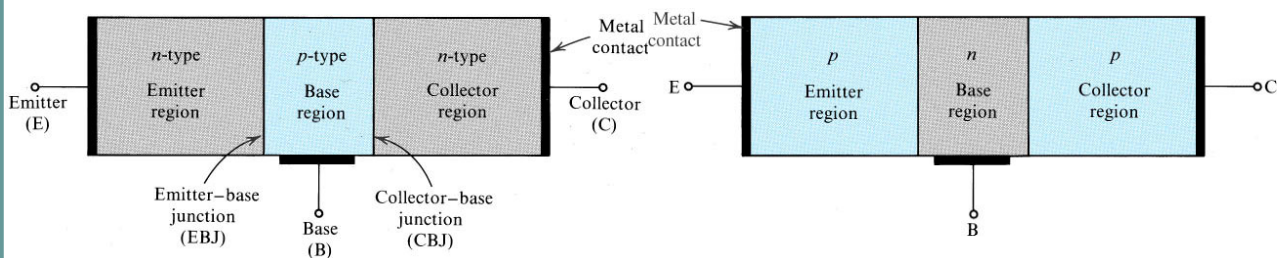


- seta – marca o terminal do emissor – marca sentido da corrente
- indica sentido da junção pn entre base e emissor
- dispositivo não-linear → usar modelo linear para analisar circuito com TJB

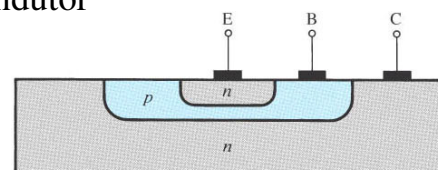
# Transístor de junção bipolar

## ● Transístor NPN

## Transístor PNP



- constituídos por 3 regiões de material semiconductor
  - dispostas em camadas
  - base tem espessura reduzida
  - colector e emissor são diferentes
    - dimensões e constituição são diferentes
- funcionamento do TJB é mais complexo do que considerar apenas 2 junções (como se fossem apenas 2 díodos isolados) porque a base é muito estreita
- 2 junções interagem ente si – não são independentes



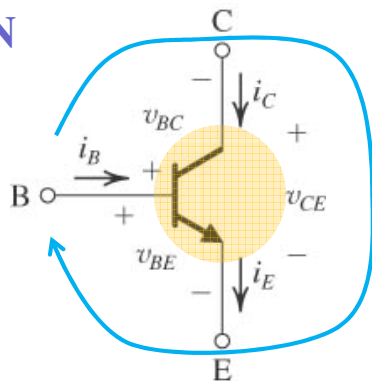
## Aplicação das leis de Kirchhoff

- KVL – tensões entre terminais (circular entre terminais)
- KCL – correntes a entrar/sair dos terminais (TJB visto como um nó)

## Sentidos/polaridades convencionais das correntes/tensões

- valores positivos – quando transístor está em condução

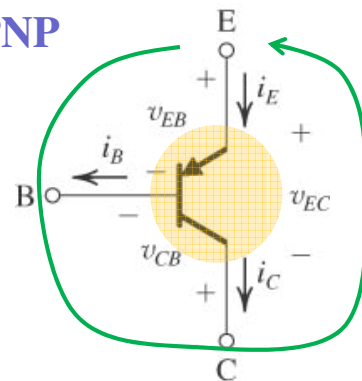
### NPN



$$v_{BC} + v_{CE} - v_{BE} = 0$$

$$i_B + i_C = i_E$$

### PNP



$$v_{EB} - v_{CB} - v_{EC} = 0$$

- PNP – mesmas equações que PNP – sentidos / polaridades trocados

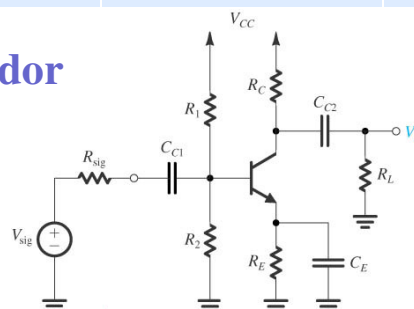
# Regiões de funcionamento do TJB

- modos de funcionamento do TJB de acordo com polarização das junções pn
  - polarização directa – “diodo ON” –  $v_D = V_{ON}$
  - polarização inversa – “diodo OFF” –  $v_D < V_{ON}$

Região de funcionamento	Junção BE	Junção BC	Aplicação típica
CORTE	Polarizada inversamente	Polarizada inversamente	Circuitos lógicos
Zona ACTIVA	Polarizada directamente	Polarizada inversamente	AMPLIFICADOR
SATURAÇÃO	Polarizada directamente	Polarizada directamente	Circuitos lógicos

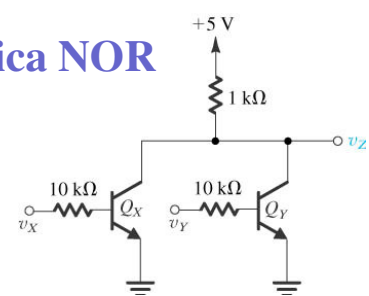
## Amplificador

gerador  
comandado



## Porta lógica NOR

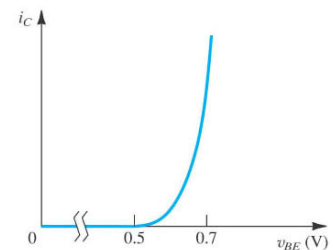
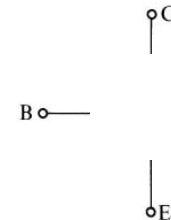
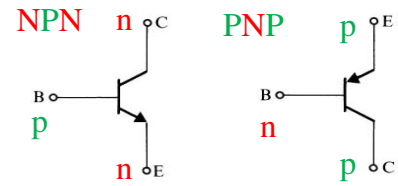
interruptor



### TJB cortado (não conduz)

- 2 junções inversamente polarizadas
  - NPN  $v_{BE} < 0$   $v_{CE} > 0$
  - PNP  $v_{EB} < 0$   $v_{EC} > 0$
- transístor não é percorrido por corrente
  - comporta-se como “interruptor aberto”

$$i_B = i_C = i_E = 0$$



### Modelo equivalente

- circuito aberto entre todos os terminais
- transístor não intervém no circuito onde está inserido

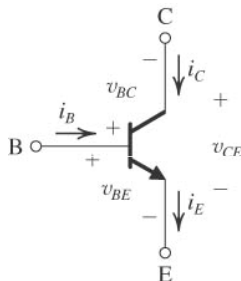
### Na prática considera-se o TJB cortado

$$v_{BE} < V_{BE_{ON}} \quad (\approx 0,5V - 0,7V)$$

## Zona Activa

### TJB conduz ( $i_C > 0$ e $i_B > 0$ )

- junção BE directamente polarizada  $v_{BE} = V_{BE_{ON}} \quad (\approx 0,5V - 0,7V)$
- junção BC inversamente polarizada  $v_{CE} > 2V \quad (\text{tipicamente})$
- corrente de colector é directamente proporcional à corrente de base

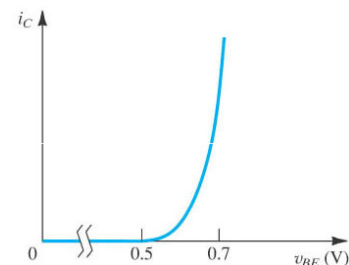


$$i_C \approx I_S e^{v_{BE}/V_T}$$

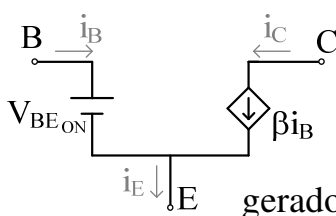
$$i_C = \beta i_B$$

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

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



### Modelo equivalente



gerador comandado

### Ganho de corrente $\beta$ ( $h_{FE}$ )

NPN:  $\beta \approx 100 - 200$

PNP:  $\beta \approx 20 - 50$

### $\beta$ elevado – cálculo aproximado

$i_B \ll i_C \Rightarrow i_E \approx i_C$  (aproximação)

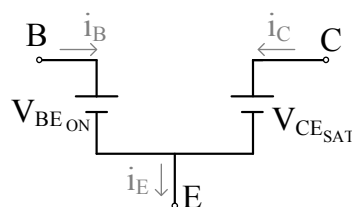
## ● TJB conduz ( $i_C > 0$ e $i_B > 0$ )

- 2 junções directamente polarizadas
- as tensões entre os terminais são impostas pelo transistor

$$v_{BE} = V_{BE_{ON}} \quad (\approx 0,5V - 0,7V) \quad v_{CE} = V_{CE_{SAT}} \quad (\approx 0,1V - 0,2V)$$

- as correntes são determinadas pelo circuito exterior
  - é o circuito exterior que determina se TJB está na saturação ou na zona activa
  - $i_C$  calculada por análise do circuito  $i_C < \beta i_B$   $i_E = i_B + i_C$

## ● Modelo equivalente



# Equações TJB

- Equações escritas para NPN
- Para PNP – trocar sentidos correntes / polaridades tensões

CORTE	ZONA ACTIVA	SATURAÇÃO
Junções inversamente polarizadas  $i_B = i_C = i_E = 0$  $v_{BE} < V_{BE_{ON}} \quad (\approx 0,5V - 0,7V)$	Junção BE directamente polarizada  Junção BC inversamente polarizada  $i_C \approx I_S e^{v_{BE}/V_T}$ $i_C = \beta i_B$ $i_E = i_B + i_C = (1 + \beta) i_B$  $v_{BE} = V_{BE_{ON}} \quad (\approx 0,5V - 0,7V)$	Junções directamente polarizadas  $i_E = i_B + i_C$ $i_C < \beta i_B$  $v_{CE} = V_{CE_{SAT}} \quad (\approx 0,1V - 0,2V)$ $v_{BE} = V_{BE_{ON}} \quad (\approx 0,5V - 0,7V)$

## Exemplo de aplicação NPN

11

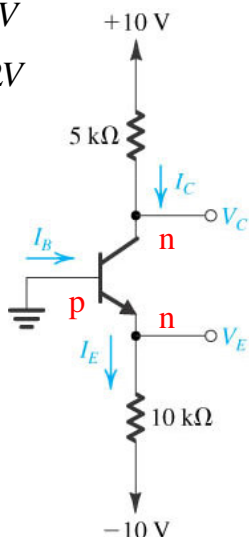
### Calcular tensões e correntes

- hipótese: considerar TJB na zona activa →

$$\beta = 50$$

$$V_{BE_{ON}} = 0,7V$$

$$V_{CE_{SAT}} = 0,2V$$



$$V_{BE} = V_{BE_{ON}} = 0,7V$$

$$V_E = 0 - V_{BE_{ON}} = -0,7V$$

$$I_E = \frac{V_E - (-10)}{R_E} = \frac{V_E - (-10)}{10k} = 0,93mA$$

$$I_B = \frac{I_E}{1 + \beta} = 18,2\mu A$$

$$I_C = \beta I_B = 0,91mA$$

$$V_C = 10 - R_C I_C = 10 - 5 \times 0,91 = 5,45V$$

$$V_C > V_B \quad BC \text{ inversamente polarizada}$$

$$V_{CE} = V_C - V_E = 5,45 - (-0,7) = 6,15V \gg V_{CE_{SAT}}$$

- confirmada a hipótese de zona activa

## Exemplo de aplicação PNP

12

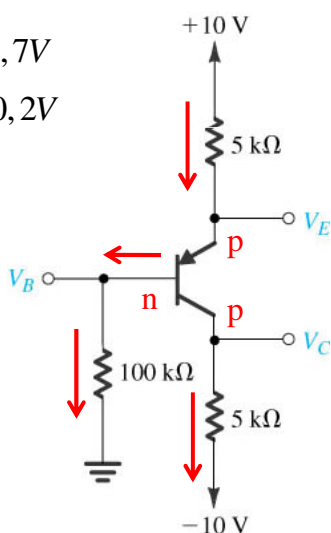
### Calcular $V_C$ sabendo que $V_B=1V$ e $V_E=1,7V$

### Qual o ganho de corrente $\beta$ ?

- PNP – sentidos das correntes são invertidos relativamente a NPN
- $V_{EB} = V_{EB_{ON}} = 0,7V$  considerar hipótese de zona activa

$$V_{EB_{ON}} = 0,7V$$

$$V_{EC_{SAT}} = 0,2V$$



$$V_{EB} = V_{EB_{ON}} = 0,7V$$

$$I_E = \frac{10 - V_E}{R_E} = \frac{10 - 1,7}{5k} = 1,66mA$$

$$I_B = \frac{V_B - 0}{R_B} = \frac{1}{100k} = 10\mu A$$

$$I_E = (1 + \beta) I_B \rightarrow \beta = \frac{I_E}{I_B} - 1 = 165$$

$$I_C = I_E - I_B = 1,65mA$$

$$V_C = R_C I_C + (-10) = -1,75V$$

$$V_B > V_C \quad CB \text{ inversamente polarizada}$$

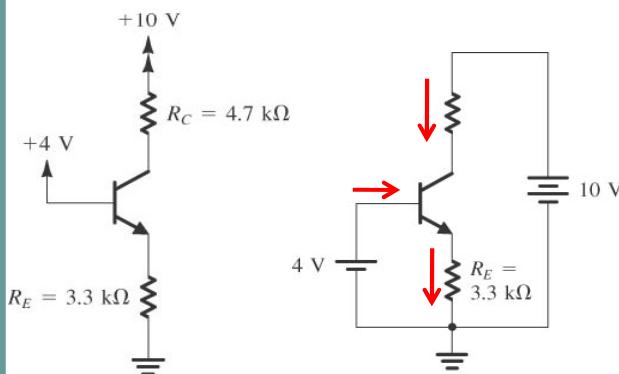
$$V_{EC} = V_E - V_C = 1,7 - (-1,75) = 3,45V \gg V_{EC_{SAT}}$$

## Calcular correntes e tensões para diferentes sinais de entrada

- $V_{IN} = V_B = \{0V, +4V, +6V\}$
- $\beta = 100$   $V_{BEon} = 0,7V$   $V_{CEsat} = 0,2V$

### $V_{IN} = V_B = +4V$

- hipótese: zona activa



$$V_E = V_B - V_{BEon} = 4 - 0,7 = 3,3V$$

$$I_E = \frac{V_E - 0}{R_E} = \frac{3,3}{3,3k} = 1mA$$

$$I_C = \frac{\beta}{1 + \beta} I_E = 0,99mA$$

$$V_C = 10 - R_C I_C = 10 - 4,7 \times 0,99 = 5,3V$$

$$V_C > V_B \quad BC \text{ inversamente polarizada}$$

$$I_B = I_E - I_C = 0,01mA = 10\mu A$$

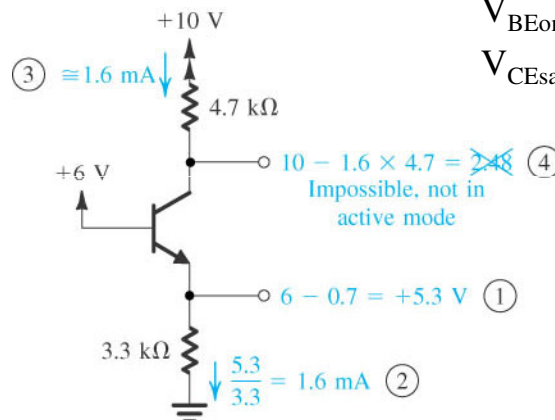
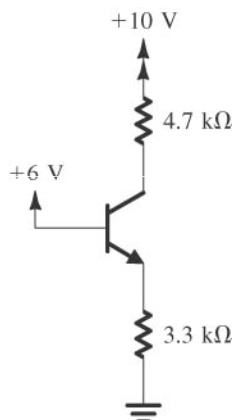
$$V_{CE} = V_C - V_E = 5,3 - 3,3 = 2V \gg V_{CEsat}$$

# Exemplo de aplicação (cont.)

## Calcular correntes e tensões para diferentes sinais de entrada

### $V_{IN} = V_B = +6V$

- hipótese: zona activa



$$\beta = 100$$

$$V_{BEon} = 0,7V$$

$$V_{CEsat} = 0,2V$$

- $V_C < V_B \rightarrow$  junção BC não pode estar inversamente polarizada
- TJB não pode estar na zona activa
- considerar hipótese de saturação e voltar a fazer os cálculos

## Exemplo de aplicação (cont.)

15

- Calcular correntes e tensões para diferentes sinais de entrada

- $V_{IN} = V_B = +6V$

- hipótese: zona de saturação

$$i_C < \beta i_B \quad i_E = i_B + i_C$$

$$v_{CE} = V_{CE_{SAT}} \quad (\approx 0,1V - 0,2V)$$

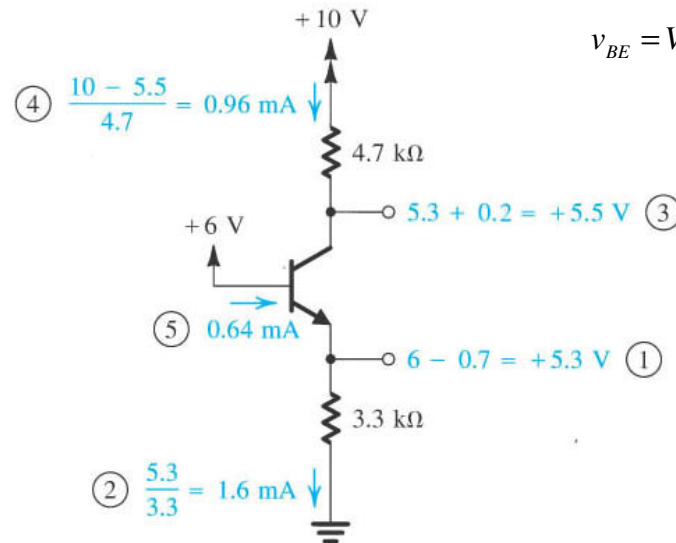
$$v_{BE} = V_{BE_{ON}} \quad (\approx 0,5V - 0,7V)$$

$$\beta = 100$$

$$V_{BE_{on}} = 0,7V$$

$$V_{CE_{sat}} = 0,2V$$

$$I_C < \beta I_B \rightarrow \text{confirma-se hipótese de saturação}$$



## Exemplo de aplicação (cont.)

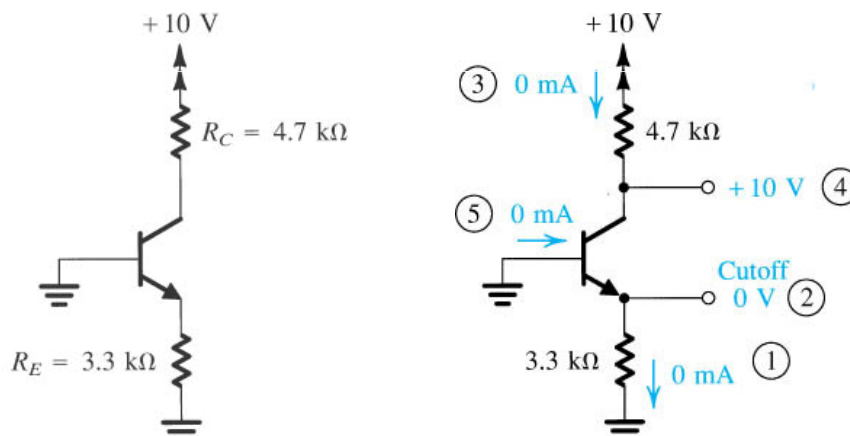
16

- Calcular correntes e tensões para diferentes sinais de entrada

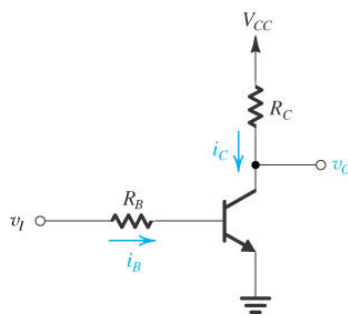
- $V_{IN} = V_B = 0V$

- hipótese: corte

- correntes são nulas
- junções BE e BC inversamente polarizadas





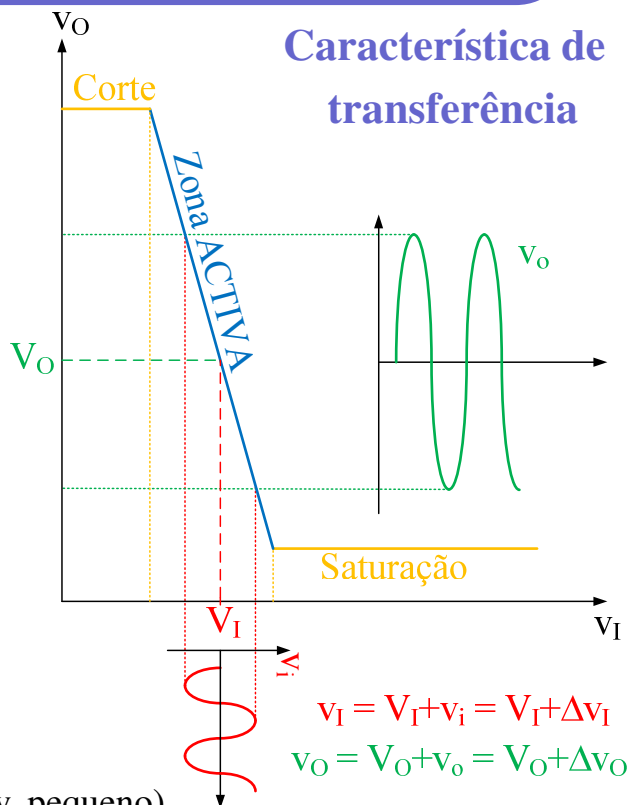


## ● Circuito inversor lógico

- TJB corte / saturação
- $V_I$  nível baixo / alto

## ● Circuito amplificador

- TJB a funcionar na zona activa
- $v_I = V_I + v_i$  (DC + AC)
  - $V_I$  – circuito de polarização
  - $v_i$  – sinal a amplificar
- TJB não pode sair da zona activa ( $v_i$  pequeno)



# Polarização

## ● Tensões e correntes DC para TJB ficar na ZONA ACTIVA

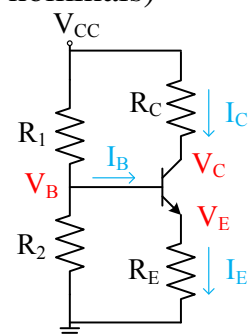
- junção base-emissor directamente polarizada ( $V_{BEon} \approx 0,7V$ )
- tensão  $V_{CE}$  apropriada
  - maximizar a amplitude do sinal de saída (meio da característica)
- obter corrente  $I_C$  pretendida

## ● Circuito de polarização

- um bom circuito de polarização deve ser insensível a variações dos parâmetros:
  - valores reais das resistências (são diferentes dos valores nominais)
  - ganho de corrente,  $\beta$ , do TJB
  - temperatura ( $I_C$  varia com  $T$ )

## ● Exemplo de circuito de polarização

- circuito resistivo
  - fonte de alimentação e resistências
- impõe o ponto de funcionamento em repouso (PFR)



## TJB a funcionar como amplificador

- TJB tem de ser polarizado para funcionar na ZONA ACTIVA

## Polarização

- estabelecer uma corrente constante (DC) no emissor (ou no colector)
- corrente  $I_E$  (ou  $I_C$ ) deve ser insensível a variações de temperatura e do  $\beta$

## Análise do circuito

- DC – polarização
  - calcular o ponto de funcionamento em repouso (PFR)
  - componente AC eliminada

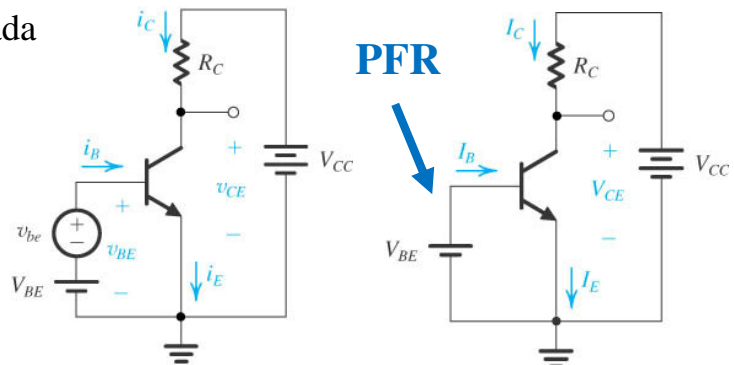
$$I_C = I_S e^{\frac{V_{BE}}{V_T}}$$

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} \quad I_E = \frac{1+\beta}{\beta} I_C$$

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

- AC – amplificador

- fontes DC eliminadas



# O Transístor como amplificador

## Transcondutância – $g_m$

$$v_{BE} = V_{BE} + v_{be} \quad i_C = I_S e^{\frac{v_{BE}}{V_T}} = I_S e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} e^{\frac{v_{be}}{V_T}} = I_C e^{\frac{v_{be}}{V_T}} \quad I_C = I_S e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} \quad \begin{cases} v_{be} = \Delta v_{BE} \\ i_c = \Delta i_C \end{cases}$$

$$i_C \approx I_C \left( 1 + \frac{v_{be}}{V_T} \right) \quad \left\{ \begin{array}{l} v_{be} \ll V_T \\ e^x \approx 1 + x \end{array} \right.$$

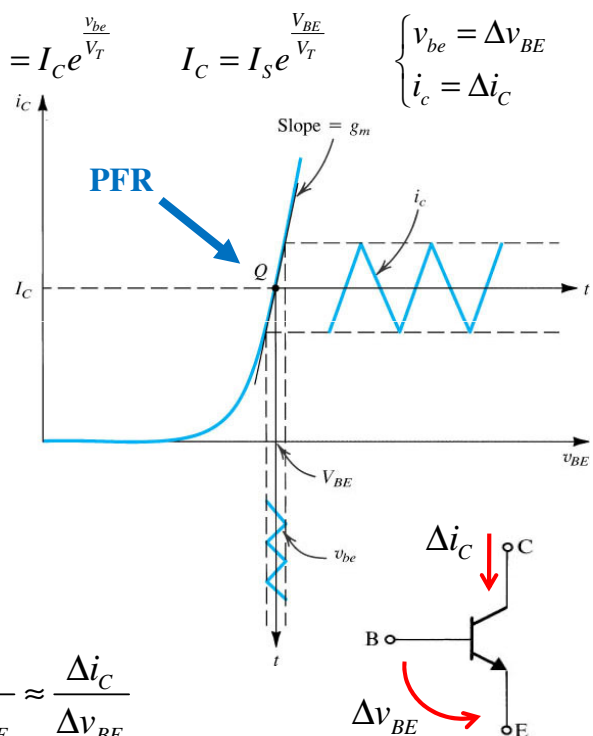
$$i_C = I_C + \frac{I_C}{V_T} v_{be} = I_C + i_c \quad i_c = \frac{I_C}{V_T} v_{be}$$

- $i_c = g_m v_{be} \rightarrow$  fonte de corrente controlada por tensão

$$g_m = \frac{I_C}{V_T}$$

- tipicamente  $\left. \begin{array}{l} I_C = 1mA \\ V_T = 25mV \end{array} \right\} g_m = 40mS$

- declive da curva  $i_C$ - $v_{BE}$  no PFR  $g_m = \frac{\partial i_C}{\partial v_{BE}} \approx \frac{\Delta i_C}{\Delta v_{BE}}$



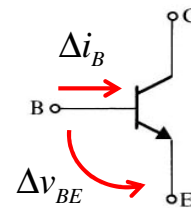
## Resistência entre a Base e o Emissor (olhando da base)

$$i_B = \frac{i_C}{\beta} = \frac{I_C}{\beta} + \frac{1}{\beta} \frac{I_C}{V_T} v_{be} = \frac{I_C}{\beta} + \frac{g_m}{\beta} v_{be}$$

$$i_B = I_B + i_b$$

$$r_\pi = \frac{v_{be}}{i_b} \approx \frac{\Delta v_{BE}}{\Delta i_B} = \frac{\beta}{g_m}$$

$$r_\pi = \frac{\beta}{g_m}$$



## Resistência entre o Emissor e a Base (olhando do emissor)

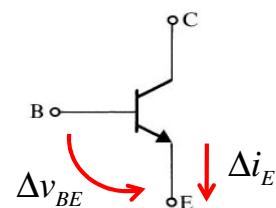
$$i_E = \frac{\beta+1}{\beta} i_C = \frac{\beta+1}{\beta} (I_C + g_m v_{be})$$

$$i_E = I_E + i_e$$

$$i_e = \frac{\beta+1}{\beta} g_m v_{be} \approx g_m v_{be}$$

$$r_e = \frac{v_{be}}{i_e} = \frac{\Delta v_{BE}}{\Delta i_E} \approx \frac{1}{g_m}$$

$$r_e = \frac{1}{g_m}$$



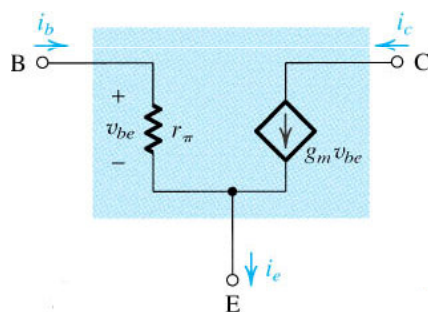
# Modelo para sinais fracos (incremental)

## Circuito equivalente do TJB

- modelo linear que caracteriza o funcionamento do TJB na zona activa
- válido para sinais fracos (pequenas variações das grandezas em torno do ponto de funcionamento em repouso)

## Modelo incremental com fonte de corrente controlada por

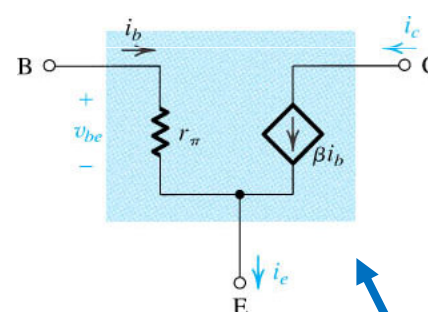
Tensão:



$$g_m = \frac{I_C}{V_T}$$

$$r_\pi = \frac{\beta}{g_m}$$

Corrente:

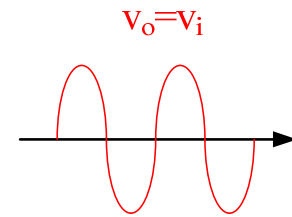


$$r_e = \frac{1}{g_m}$$

Modelo mais utilizado

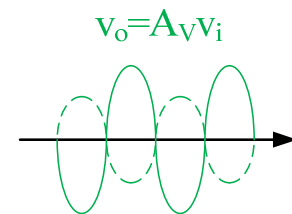
## ● Circuito Seguidor de Emissor

- obter no emissor uma réplica do sinal de entrada
- ganho unitário
- impedância de entrada elevada
- impedância de saída baixa
- aplicação – isolar o gerador da carga



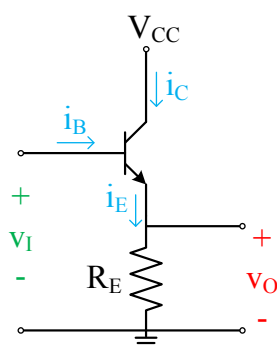
## ● Circuito de Emissor-comum (Amplificador de Tensão)

- obter no colector uma réplica (invertida) amplificada do sinal de entrada
- ganho maior do que 1 (em módulo)
- inverte o sinal de entrada
- impedância de entrada elevada
- aplicação – amplificar o sinal de entrada



# Seguidor de Emissor

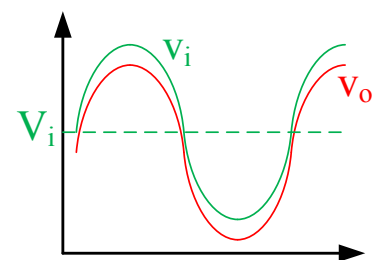
## ● Ganho de tensão unitário



$$v_I = V_I + v_i$$

$$v_O = v_I - V_{BEon} \quad \begin{cases} V_O = V_I - V_{BEon} \\ v_o = v_i \end{cases}$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{\Delta v_O}{\Delta v_I} = \frac{\Delta v_E}{\Delta v_B} = 1$$



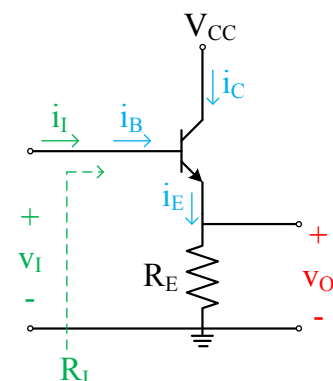
## ● Impedância de entrada

$$R_I = \frac{\Delta v_I}{\Delta i_I}$$

$$\Delta v_I = \Delta v_E = R_E \Delta i_E = R_E (\beta + 1) \Delta i_B = R_E (\beta + 1) \Delta i_I$$

$$R_I = (\beta + 1) R_E$$

- impedância de entrada é elevada



## Impedância de saída

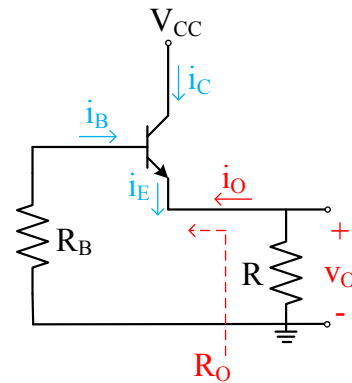
- eliminada entrada  $v_I$
- $R_B$  – resistência devida à polarização

$$R_O = \frac{\Delta v_O}{\Delta i_O} \quad \Delta i_O = -\Delta i_E$$

$$\Delta v_O = \Delta v_E = \Delta v_B = -R_B \Delta i_B$$

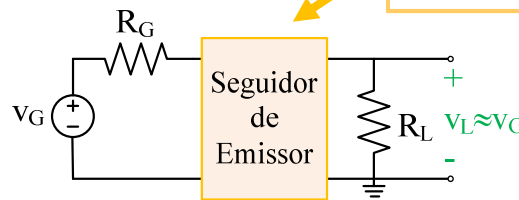
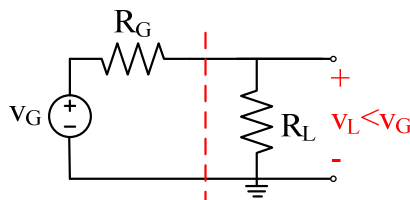
$$\Delta i_B = \frac{\Delta i_E}{\beta + 1}$$

$$R_O = \frac{R_B}{\beta + 1}$$



## Aplicação – isolador (buffer)

- isolar gerador de sinal ( $v_G, R_G$ ) da carga  $R_L$



$A_v = 1$   $R_i$  elevada  
 $R_o$  baixa

# Seguidor de Emissor

## Circuito de polarização

- uma possível sequência de passos para dimensionar o circuito de polarização pode ser:
- 1) escolher valor da corrente  $I_C$  (ou então  $I_E$ )
  - 2) escolher valor de  $V_{CE}$   
(para se ficar a meio da característica de transferência)
  - 3) escolher  $R_C$  e  $R_E$  (admitindo  $I_E = I_C$ )

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

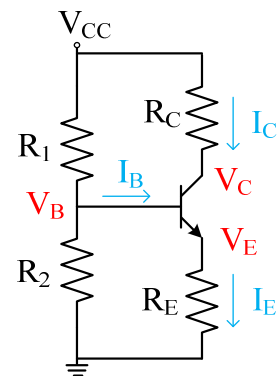
- 4) calcular  $V_B$  para garantir  $V_{BE} \approx 0,7V$  ( $V_{BEon}$ )

- 5) considerar que  $I_{R1}, I_{R2} \gg I_B$ , ou seja,  $I_{R1} = I_{R2}$

- 6) obtém-se a equação de um divisor de tensão

$$V_B = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC} \quad I_{R1} = I_{R2} = \frac{V_{CC}}{R_1 + R_2}$$

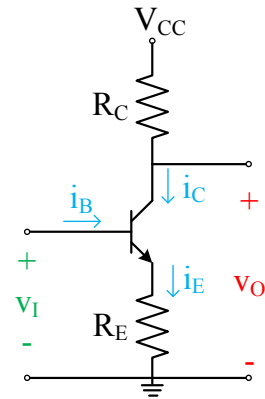
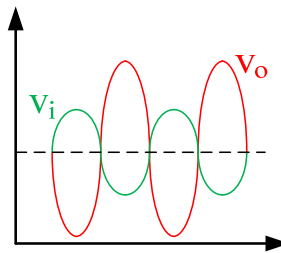
- 7) escolher os valores de  $R_1$  e  $R_2$  para que  $I_{R1} = I_{R2} > 10 I_B$



Este circuito não é único. Podem ser usados outros circuitos diferentes deste!

## ● Amplifica (e inverte) o sinal de entrada

- entrada – na base
- saída – no colector
- emissor – comum à entrada e à saída



## ● Ganho de Tensão

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{\Delta v_o}{\Delta v_i} \rightarrow A_v = \frac{\Delta v_C}{\Delta v_B}$$

$$\Delta v_E = \Delta v_B \quad \Delta i_E = \frac{\Delta v_E}{R_E} \approx \Delta i_C \quad \Delta v_C = -R_C \Delta i_C \rightarrow \Delta v_C = -R_C \frac{\Delta v_B}{R_E}$$

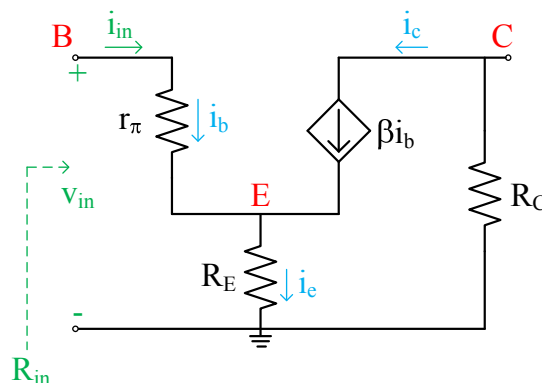
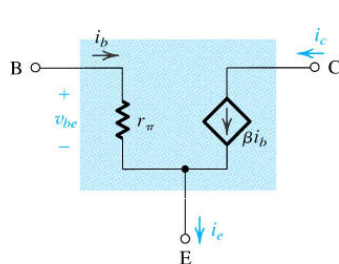
$$A_v = -\frac{R_C}{R_E} \rightarrow \text{ganho de tensão controlado por } R_C \text{ e } R_E$$

- se  $R_E=0$  o ganho seria infinito... Na prática o ganho é sempre finito!
- TJB tem resistência de emissor intrínseca,  $r_e$ , finita!

$$r_e = \frac{1}{g_m}$$

## ● Impedância de entrada

- usar o modelo incremental do TJB para calcular  $R_{in}$
- fontes DC eliminadas



$$R_{in} = \frac{v_{in}}{i_{in}} = \frac{\Delta v_{IN}}{\Delta i_{IN}}$$

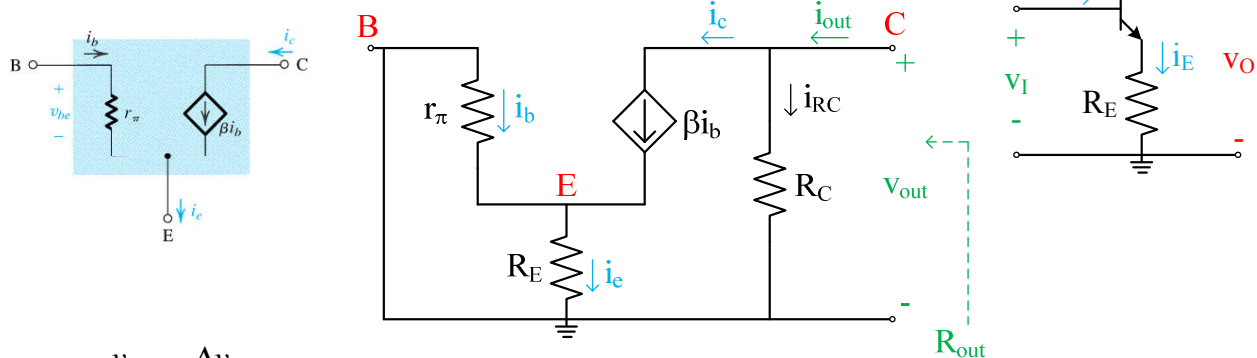
$$v_{in} = r_{\pi} i_b + R_E i_e \quad \begin{cases} i_b = i_{in} \\ i_e = i_b + \beta i_b \end{cases} \rightarrow v_{in} = [r_{\pi} + (\beta + 1) R_E] i_{in} \quad R_{in} = r_{\pi} + (\beta + 1) R_E$$

$$(\beta + 1) R_E \gg r_{\pi} \rightarrow R_{in} \approx (\beta + 1) R_E$$

$$R_{in} = (\beta + 1) R_E$$

## Impedância de saída

- usar o modelo incremental do TJB para calcular  $R_{out}$
- fontes DC eliminadas
- gerador de entrada eliminado



$$R_{out} = \frac{v_{out}}{i_{out}} = \frac{\Delta v_{OUT}}{\Delta i_{OUT}}$$

$$KVL \rightarrow r_{\pi} i_b + R_E (i_b + \beta i_b) = 0 \rightarrow i_b = 0$$

$$v_{out} = R_C I_{RC} = R_C i_{out} \rightarrow \frac{v_{out}}{i_{out}} = R_C$$

$$R_{out} = R_C$$

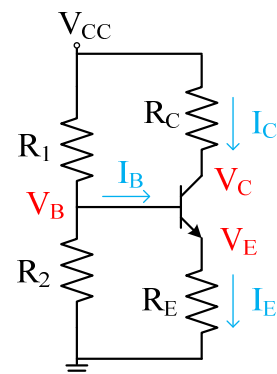
# Amplificador de Tensão (Emissor-comum)

## Circuito de polarização

- uma possível sequência de passos para dimensionar o circuito de polarização pode ser:
- 1) escolher valor da corrente  $I_C$  (ou então  $I_E \approx I_C$ )
  - 2) escolher valor de  $V_C$  – geralmente  $V_C = V_{CC} / 2$  (para se ficar a meio da característica de transferência)
  - 3) calcular  $R_C$ :  $V_{CC} = V_C + R_C I_C$
  - 4) calcular  $R_E$ , usando o valor do ganho de tensão  $A_v = - R_C / R_E$
  - 5) calcular  $V_B$  para garantir  $V_{BE} \approx 0,7V$  ( $V_{BEon}$ ):  $V_B = V_{BE} + R_E I_E$
  - 6) considerar que  $I_{R1}, I_{R2} \gg I_B$ , ou seja,  $I_{R1} = I_{R2}$
  - 7) obtém-se a equação de um divisor de tensão

$$V_B = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC} \quad I_{R1} = I_{R2} = \frac{V_{CC}}{R_1 + R_2}$$

- 8) escolher os valores de  $R_1$  e  $R_2$  para que  $I_{R1} = I_{R2} > 10 I_B$



## ● Acoplamento AC

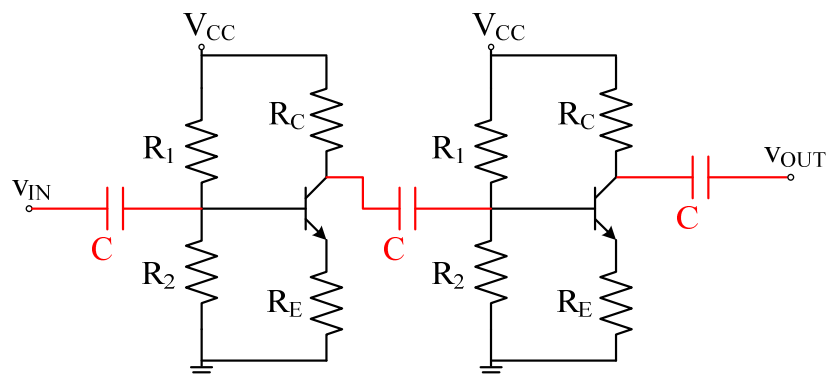
- para não alterar a polarização dos vários andares amplificadores
- usam-se condensadores de acoplamento entre os amplificadores
- condensadores bloqueiam componente DC
  - em DC o condensador é um circuito-aberto
- deixam passar a componente variável (AC) do sinal a amplificar
- escolhem-se as capacidades dos condensadores para que nas frequências de interesse os condensadores correspondam a curto-circuitos (válido em frequências médias)

$$Z_C \approx 0$$

$$|Z_C| = \frac{1}{\omega C}$$

$$\begin{cases} f = 10\text{kHz} \\ C = 150\mu\text{F} \end{cases}$$

$$|Z_C| = 0,106\Omega \approx 0\Omega$$



# Dependência da temperatura

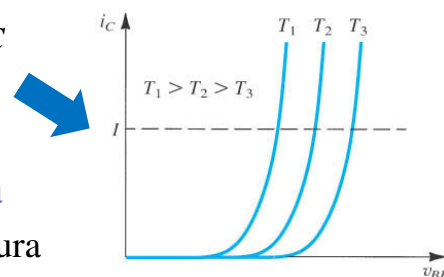
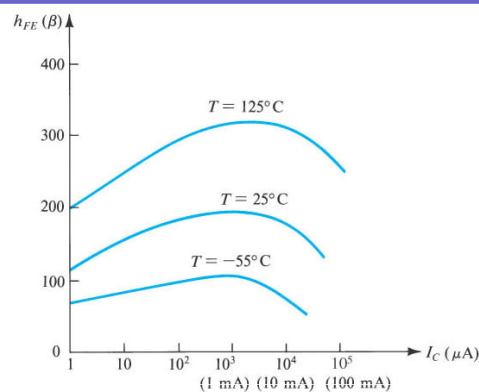
## ● Ganho de corrente $\beta$

- depende da corrente  $I_C$
- aumenta com a temperatura

## ● Tensão $v_{BE}$

- diminui com a temperatura

$$\left. \begin{aligned} v_{BE} &\approx V_T \ln \frac{I_C}{I_S} \\ V_T &= \frac{kT}{q} \quad I_S(T) \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{\Delta v_{BE}}{\Delta T} \approx -2\text{mV}/^\circ\text{C}$$



## ● Circuitos de polarização estabilizada

- compensar efeitos da variação da temperatura
  - $R_E$  – circuito de polarização inclui resistência ligada ao emissor
- circuito integrado – usar fontes de corrente (feitas com TJBs e resistências)

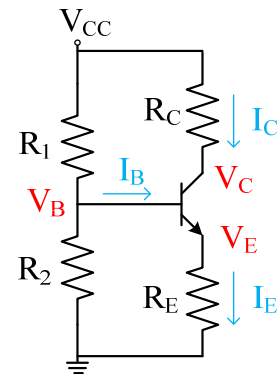


## Resistência $R_E$

- estabiliza a corrente  $I_E$  quando há variação da temperatura

## Quando a temperatura aumenta

- $v_{BE}$  diminui  $\frac{\Delta v_{BE}}{\Delta T} \approx -2mV/^{\circ}C$
- $i_C$  diminui  $i_C \approx I_S e^{v_{BE}/V_T}$
- $i_E \approx i_C$  diminui  $\rightarrow v_E = R_E i_E$  diminui
- $V_B$  não se altera  $I_{R1}, I_{R2} \gg i_B \rightarrow V_B \approx \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC}$
- $v_{BE} = V_B - v_E$  aumenta, contrariando o aumento inicial devido à temperatura
- $i_E \approx i_C$  fica estabilizada, apesar da variação da temperatura



# Efeito de Early

## Modelo aproximado (Modelo Ebers-Moll)

- $i_C$  só depende de  $v_{BE}$   $i_C \approx I_S e^{v_{BE}/V_T}$

## TJB real

- $i_C$  depende de  $v_{BE}$  e de  $v_{CE}$
- $V_A$  – tensão de Early (tipicamente 50 – 100 V)
  - extrapolando as curvas, encontram-se no ponto  $v_{CE} = -V_A$

$$i_C = I_S e^{\frac{v_{BE}}{V_T}} \left( 1 + \frac{v_{CE}}{V_A} \right)$$

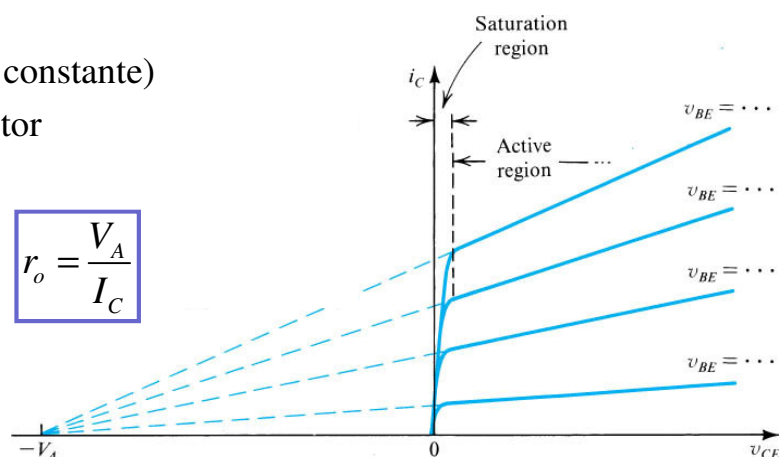
## Efeito de Early

- $i_C$  aumenta com  $v_{CE}$  ( $v_{BE}$  constante)
- resistência vista do colector
  - não é infinita

$$r_o^{-1} = \left. \frac{\Delta i_C}{\Delta v_{CE}} \right|_{v_{BE}} \approx \frac{I_C}{V_A}$$

$$r_o = \frac{V_A}{I_C}$$

- $r_o$  acrescentada no modelo incremental



## Usando uma fonte de corrente ligada ao emissor

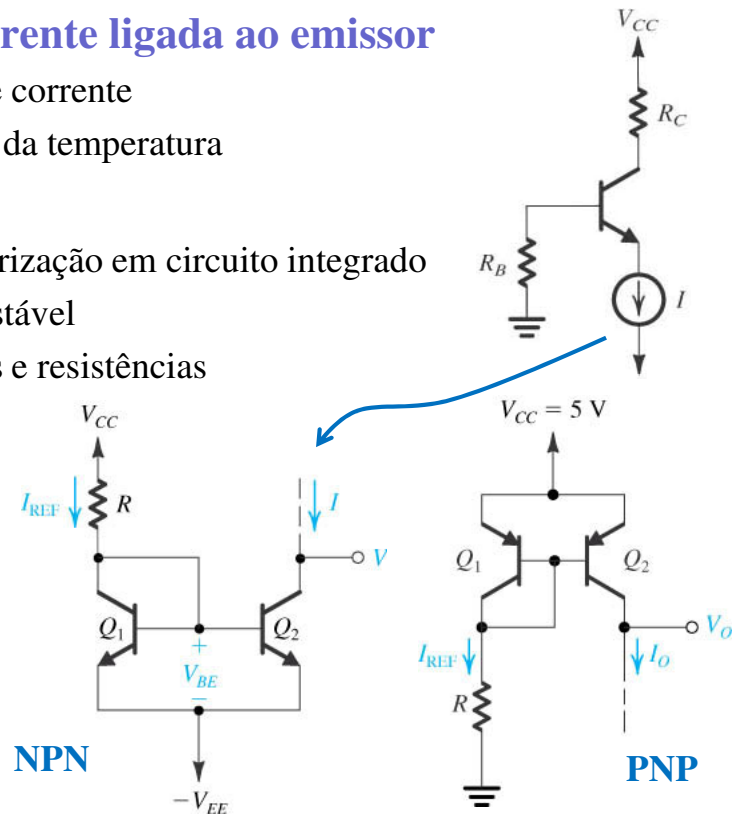
- $I_E$  fica imposta pela fonte de corrente
- deixa de haver dependência da temperatura

## Fontes de corrente

- usadas nos circuitos de polarização em circuito integrado
- estabelecer corrente  $I_C \approx I_E$  estável
- construídas com transistores e resistências

## Exemplo

- fonte de corrente simples
- transistores são iguais
  - $Q_1 = Q_2$
- $V_{BE1} = V_{BE2}$
- $I \approx I_{REF}$



# Espelho de corrente

## Fonte de corrente simples – espelho de corrente

- obter uma fonte de corrente a partir da tensão de alimentação do CI
- circuito que reproduz uma corrente (consegue “espelhar” uma corrente)

## Conversor V-I

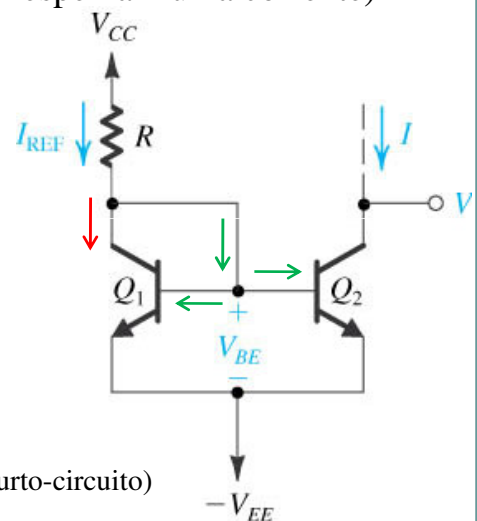
- fonte  $V_{CC}$  e resistência  $R$  em série
- equivalente a fonte de corrente com resistência em paralelo
- permite obter  $I_{REF}$

## Conversor I-V

- Transistor  $Q_1$ 
  - está sempre na zona activa
  - está ligado como um diodo (junção BC curto-circuito)

## Conversor V-I

- Transistor  $Q_2$ 
  - tem de estar na zona activa (tensão  $V$  tem de garantir  $V_{CE2}$  zona activa)



## Fonte de corrente – espelho de corrente

$$I_{C1} = I_{S1} e^{\frac{V_{BE1}}{V_T}} \quad I_{C2} = I_{S2} e^{\frac{V_{BE2}}{V_T}}$$

$$\begin{cases} V_{BE1} = V_{BE2} \\ I_{S1} = I_{S2} \end{cases} \leftarrow Q_1 = Q_2 \Rightarrow I_{C1} = I_{C2}$$

## Cálculo aproximado (análise ideal)

- desprezando as correntes de base ( $\beta \rightarrow \infty$ )

$$I_{B1} + I_{B2} \ll I_{C1} \quad I_{REF} \approx I_{C1}$$

$$V_{CC} - (-V_{EE}) = R I_{REF} + V_{BE1} \rightarrow I_{REF} = \frac{V_{CC} + V_{EE} - V_{BE1}}{R}$$

- escolher R para se ter a  $I_{REF}$  desejada para a fonte de corrente

## Cálculo exacto (análise real)

- $\beta$  é finito (não desprezar  $I_{B1} + I_{B2}$ )

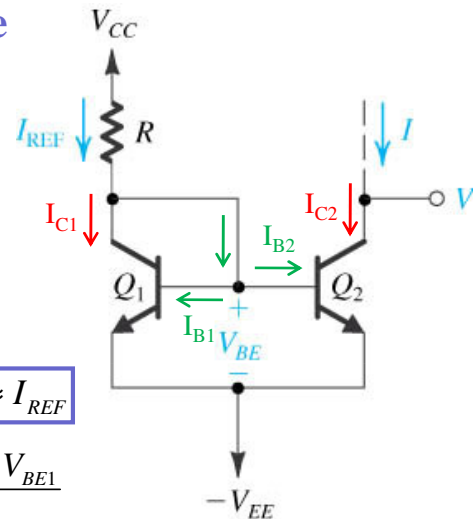
$$I_{REF} = I_{C1} + I_{B1} + I_{B2} = I_{C1} + \frac{I_{C1}}{\beta} + \frac{I_{C2}}{\beta}$$

$$I = \frac{1}{1 + \frac{2}{\beta}} I_{REF}$$

$$\beta = 100$$

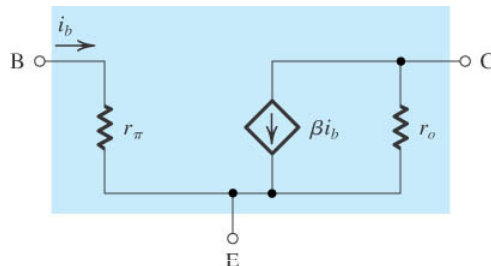
$$I = 0,98 I_{REF}$$

$$\frac{I - I_{REF}}{I_{REF}} \times 100\% = -2\%$$



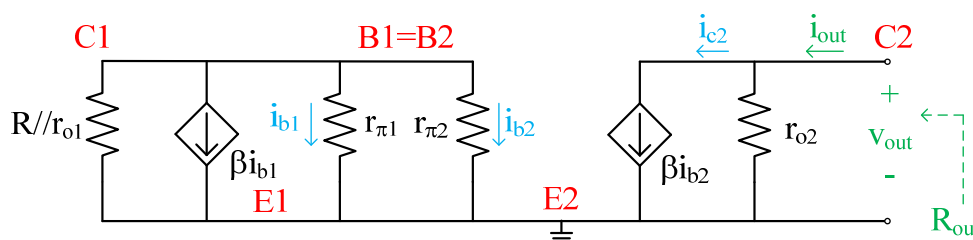
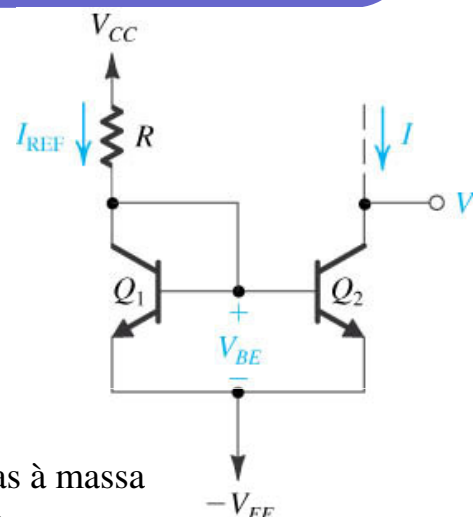
## Resistência de saída (incremental)

- substituir TJBs por modelo incremental



- fontes DC ( $V_{CC}$  e  $-V_{EE}$ )

- do ponto de vista incremental ficam ligadas à massa
- porque não têm componente variável (AC)



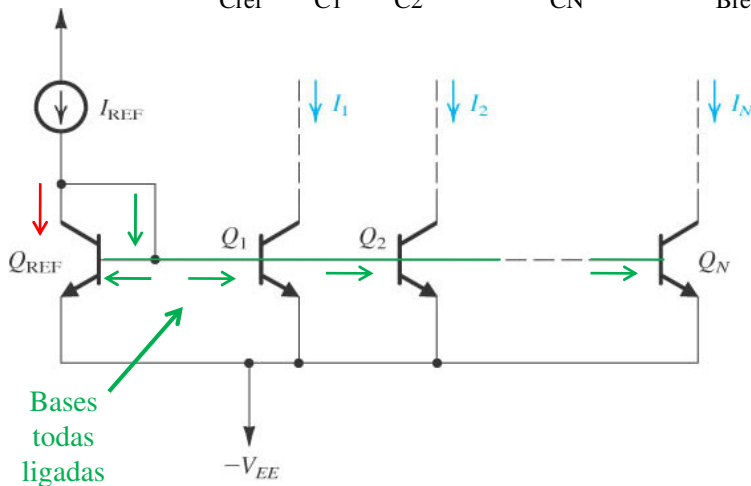
$$i_{b1} = i_{b2} = 0$$

$$R_{out} = r_{o2} = \frac{V_A}{I_{C2}}$$

$$R_{out} \text{ elevada}$$

## Fonte de corrente múltipla

- corrente de referência espelhada várias vezes
- todos TJBs têm as bases ligadas  $\rightarrow V_{BEref} = V_{BE1} = V_{BE2} = \dots = V_{BEN}$
- TJBs são iguais  $Q_{REF} = Q_1 = Q_2 = \dots = Q_N \rightarrow I_{Sref} = I_{S1} = I_{S2} = \dots = I_{SN}$
- então  $I_{Cref} = I_{C1} = I_{C2} = \dots = I_{CN} \rightarrow I_{Bref} = I_{B1} = I_{B2} = \dots = I_{BN} \quad (I_C = \beta I_B)$



$$I_{REF} = I_{Cref} + I_{Bref} + I_{B1} + I_{B2} + \dots + I_{BN}$$

$$I_{REF} = I_{Cref} + (1 + N) \frac{I_{Cref}}{\beta}$$

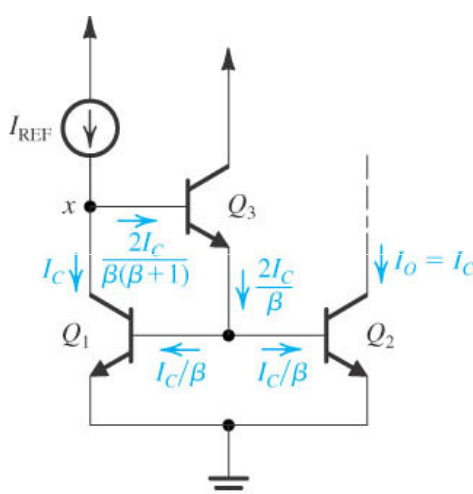
$$I_1 = I_2 = \dots = I_N = \frac{1}{1 + \frac{N+1}{\beta}} I_{REF}$$

- quanto maior o número de TJBs, pior vai ser a relação  $I_K / I_{REF}$

# Espelho de corrente melhorado

## Compensar o erro introduzido pelas correntes de base

- acrescentado um transistor ( $Q_3$ ) – fornece as correntes de base



$$\begin{cases} V_{BE1} = V_{BE2} \\ I_{S1} = I_{S2} \end{cases} \Rightarrow I_{C1} = I_{C2}$$

$$\begin{cases} I_{E3} = I_{B1} + I_{B2} \\ I_{E3} = (\beta + 1) I_{B3} \end{cases} \Rightarrow I_{B3} = \frac{I_{B1} + I_{B2}}{\beta + 1}$$

$$I_{REF} = I_{C1} + I_{B3} = I_{C1} + \frac{1}{\beta} \frac{I_{C1} + I_{C2}}{\beta + 1}$$

$$I = \frac{1}{1 + \frac{2}{\beta(\beta + 1)}} I_{REF}$$

$$I \approx \frac{1}{1 + \frac{2}{\beta^2}} I_{REF}$$

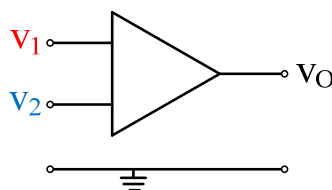
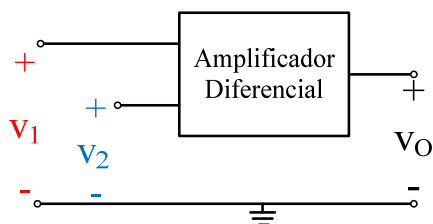
## Comparando com a fonte simples

- foi possível reduzir o erro devido às correntes de base
- $2 / \beta^2 \ll 2 / \beta$  (para  $\beta=100$  o erro é agora -0,02%)

$$I = \frac{1}{1 + \frac{2}{\beta}} I_{REF}$$

## Circuito amplificador com 2 entradas

- tem por objectivo amplificar a diferença entre os sinais de entrada



$$v_O = G_D (v_1 - v_2)$$

## Sinais de entrada

- geralmente  $v_1 \neq v_2$
- $v_1$  e  $v_2$  podem decompor-se em 2 parcelas
  - componente de modo comum (componente simétrica)
    - o que é comum às 2 entradas
    - é a média dos 2 sinais
  - componente diferencial (componente anti-simétrica)
    - é a diferença entre os 2 sinais



$$v_C = \frac{v_1 + v_2}{2}$$

$$\begin{cases} v_1 = v_C + \frac{v_D}{2} \\ v_2 = v_C - \frac{v_D}{2} \end{cases}$$

# Amplificador Diferencial

## Sinal de saída (combinação linear das entradas)

- pode ser descrito como a soma de 2 parcelas (teorema da sobreposição)
  - saída em função de  $v_1$  e  $v_2$   $v_O = v_{O1} + v_{O2}$
  - saída em função de  $v_C$  e  $v_D$   $v_O = v_{OC} + v_{OD}$

## Ganho de tensão

- $G_C$  – ganho de tensão de modo comum

$$v_O = G_C v_C + G_D v_D$$

- calcula-se fazendo  $v_1 = v_2$

$$v_1 = v_2 \rightarrow v_D = 0 \rightarrow v_O = G_C v_C \rightarrow G_C = \frac{v_O}{v_C}$$

- $G_D$  – ganho de tensão de modo diferencial

- calcula-se fazendo  $v_1 = -v_2$

$$v_1 = -v_2 \rightarrow v_C = 0 \rightarrow v_O = G_D v_D \rightarrow G_D = \frac{v_O}{v_D}$$

## CMRR – relação de rejeição do modo comum

- caso ideal  $\rightarrow G_C = 0 \rightarrow \text{CMRR} = +\infty$
- na prática  $\rightarrow G_C$  é baixo mas  $G_C \neq 0 \rightarrow \text{CMRR} \neq +\infty$

$$\text{CMRR} = \left| \frac{G_D}{G_C} \right|$$

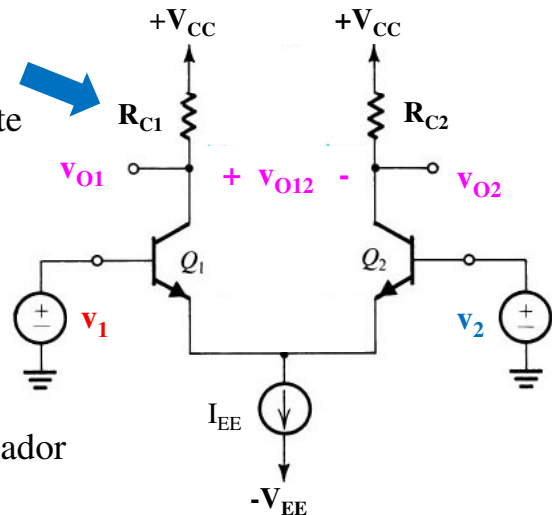
$$\text{CMRR}_{dB} = \left| \frac{G_D}{G_C} \right|_{dB}$$

## ● Circuito fundamental em microelectrónica

- pode ser realizado com TJBs (*bipolar junction transistor*) ou com outro tipo de transístores
  - JFET – *junction field-effect transistor*
  - MOSFET – *metal-oxide-semiconductor field-effect transistor*
- pode ter carga resistiva ou activa
  - resistiva –  $R_s$  ligadas aos colectores
  - activa – são usadas fontes de corrente

## ● Aplicações principais

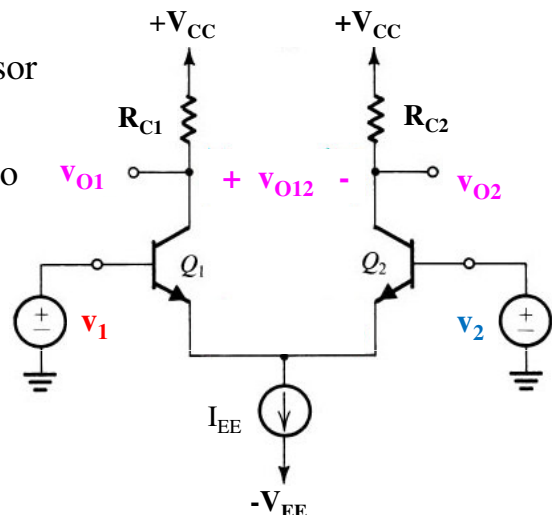
- amplificação de sinais diferenciais
- conversão de sinais diferenciais em sinais não-diferenciais
- amplificadores operacionais
  - andar de entrada – 1º andar amplificador
- circuitos lógicos (família lógica ECL)



# Par Diferencial com carga resistiva

## ● Amplificador diferencial com BJT

- TJBs directamente acoplados pelo emissor
- transístores iguais ( $Q_1=Q_2$ )
  - $Q_1$  e  $Q_2$  no mesmo circuito integrado
- 2 fontes de alimentação ( $+V_{CC}$  e  $-V_{EE}$ )
- fonte de corrente ( $I_{EE}$ )
- 2 sinais de entrada ( $v_1$  e  $v_2$ )
  - aplicados nas bases
- sinal de saída (3 possibilidades)
  - simples – no colector de  $Q_1$ 
    - $v_{O1} = v_{C1}$
  - simples – no colector de  $Q_2$ 
    - $v_{O2} = v_{C2}$
  - saída diferencial – entre os colectores
    - $v_{O12} = v_{O1} - v_{O2}$



$$v_{O1} = v_{C1} = V_{CC} - R_{C1}i_{C1}$$

$$v_{O2} = v_{C2} = V_{CC} - R_{C2}i_{C2}$$

$$v_{O12} = v_{O1} - v_{O2}$$

$$v_{O12} = -R_{C1}i_{C1} + R_{C2}i_{C2}$$

## Modo Comum: $v_1 = v_2 = v_C$ $v_D = 0$

- há simetria no circuito
- $I_{EE}$  divide-se igualmente por  $Q_1$  e  $Q_2$
- transístores estão na zona activa

$$i_{E1} = i_{E2} = \frac{I_{EE}}{2} \quad \alpha = \frac{\beta}{\beta + 1} \rightarrow i_C = \alpha i_E$$

$$i_{C1} = i_{C2} = \frac{\beta}{\beta + 1} \frac{I_{EE}}{2} = \alpha \frac{I_{EE}}{2} \approx \frac{I_{EE}}{2}$$

$$\beta \gg 1 \rightarrow \alpha \approx 1$$

- correntes são independentes do sinal de entrada
- circuito não responde à componente de modo comum das entradas

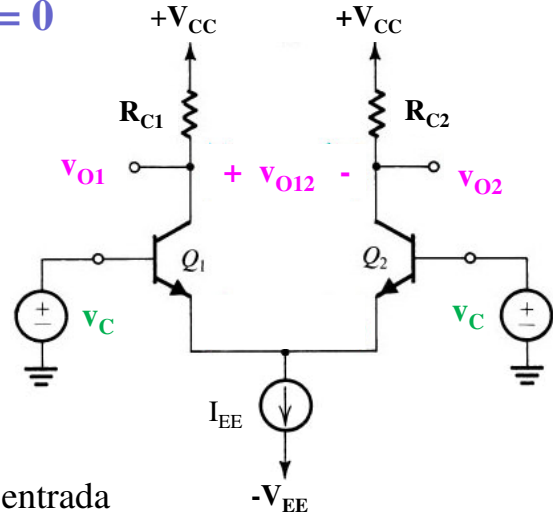
$$R_{C1} = R_{C2} = R_C$$

$$v_{O1} = v_{O2} = V_{CC} - \alpha R_C \frac{I_{EE}}{2}$$

$$v_{O12} = v_{O1} - v_{O2} = 0$$

$$v_{O1} = v_{O2} \approx V_{CC} - R_C \frac{I_{EE}}{2}$$

$$v_{O12} = 0$$



# Funcionamento em Modo Diferencial

## Modo Diferencial: $v_1 = -v_2 = v_D/2$ $v_C = 0$

- há anti-simetria no circuito
- $v_x = 0$  (teorema da sobreposição)

### $v_1 = +1,5V$ e $v_2 = -1,5V$

- $Q_1$  está na zona activa
- $Q_2$  está cortado
- toda a corrente passa em  $Q_1$

$$i_{E1} = I_{EE} \quad i_{C1} = \alpha I_{EE} \approx I_{EE}$$

$$v_{O1} = V_{CC} - \alpha R_C I_{EE} \approx V_{CC} - R_C I_{EE} \quad , \quad v_{O2} = V_{CC}$$

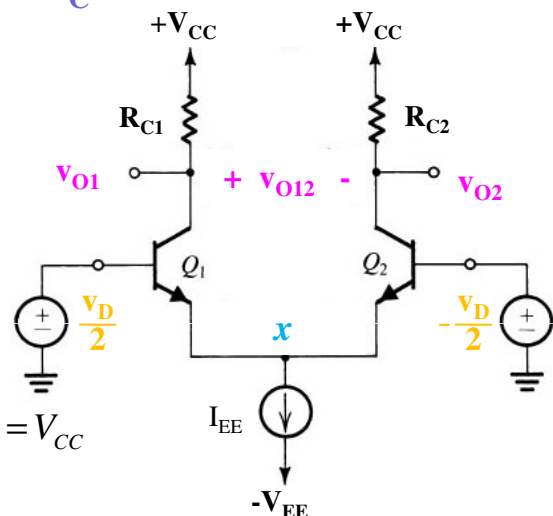
$$v_{O12} = -\alpha R_C I_{EE} \approx -R_C I_{EE}$$

### $v_1 = -1,5V$ e $v_2 = +1,5V$

- $Q_1$  está cortado,  $Q_2$  está na zona activa, toda corrente passa em  $Q_2$

### Corrente passa em $Q_1$ ou $Q_2$ consoante polaridade de $v_D$

### Modo puramente diferencial ( $v_C=0$ ): obtém-se saída diferencial



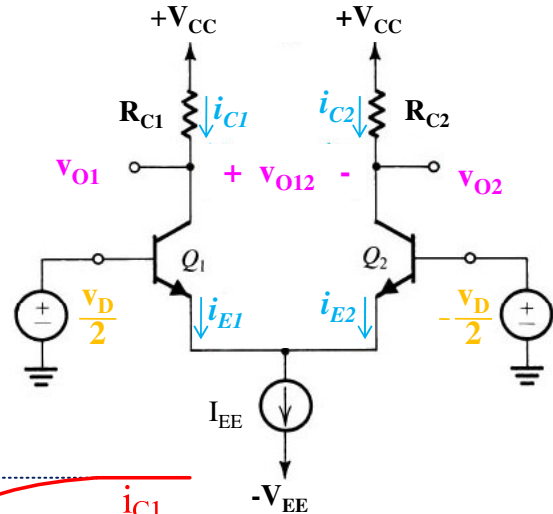
## • Funcionamento em modo diferencial ( $v_1 = -v_2 = v_D/2$ $v_C = 0$ )

$$i_{C1} = I_{S1} e^{\frac{v_{BE1}}{V_T}} \quad i_{C2} = I_{S2} e^{\frac{v_{BE2}}{V_T}}$$

$$Q_1 = Q_2 \rightarrow I_{S1} = I_{S2} = I_S$$

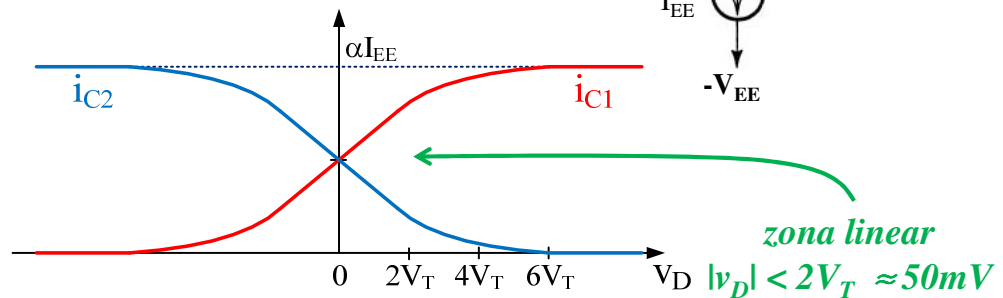
$$\frac{i_{C1}}{i_{C2}} = e^{\frac{v_{BE1} - v_{BE2}}{V_T}} = e^{\frac{v_D}{V_T}}$$

$$i_{E1} + i_{E2} = I_{EE} \quad i_{C1} + i_{C2} = \alpha I_{EE}$$



$$i_{C2} = \frac{\alpha I_{EE}}{1 + e^{\frac{v_D}{V_T}}}$$

$$i_{C1} = \frac{\alpha I_{EE}}{1 + e^{-\frac{v_D}{V_T}}}$$



# Característica de Transferência

## • Característica de transferência: $v_{O12}(v_D)$

$$i_{C1} = \frac{\alpha I_{EE}}{1 + e^{-\frac{v_D}{V_T}}} \quad i_{C2} = \frac{\alpha I_{EE}}{1 + e^{\frac{v_D}{V_T}}}$$

$$v_{O1} = V_{CC} - R_{C1} i_{C1} \quad v_{O2} = V_{CC} - R_{C2} i_{C2}$$

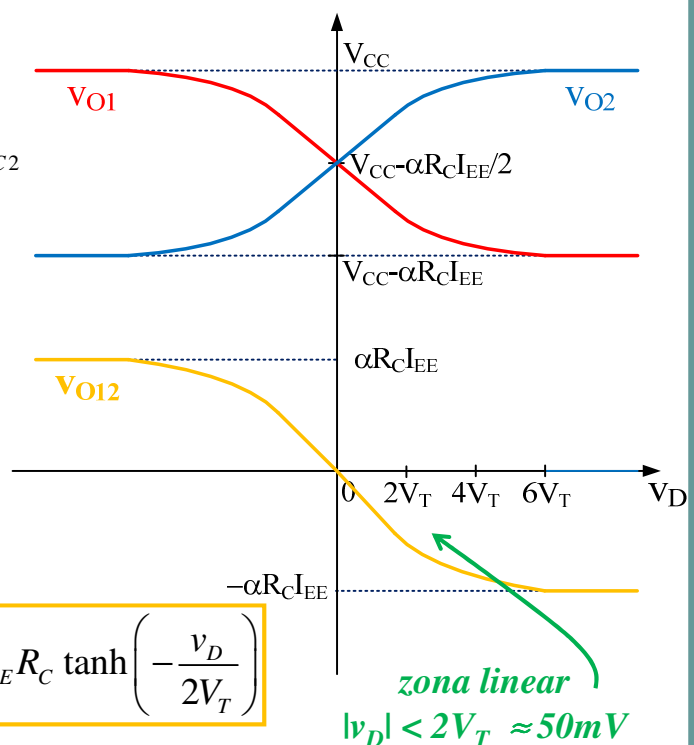
$$v_{O1} = V_{CC} - R_{C1} \frac{\alpha I_{EE}}{1 + e^{-\frac{v_D}{V_T}}}$$

$$v_{O2} = V_{CC} - R_{C2} \frac{\alpha I_{EE}}{1 + e^{\frac{v_D}{V_T}}}$$

$$R_{C1} = R_{C2} = R_C \quad \tanh x = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$$

$$v_{O12} = \alpha I_{EE} R_C \tanh\left(-\frac{v_D}{2V_T}\right)$$

$$v_{O12} \approx I_{EE} R_C \tanh\left(-\frac{v_D}{2V_T}\right)$$





## Na prática a zona linear considera-se para $|v_D| < 10mV$

- zona linear é muito estreita
- apenas permite a amplificação de sinais  $v_D$  muito pequenos

## Característica de transferência aproximada

- aproximação válida na zona linear

$$\alpha \approx 1 \quad R_{C1} = R_{C2} = R_C$$

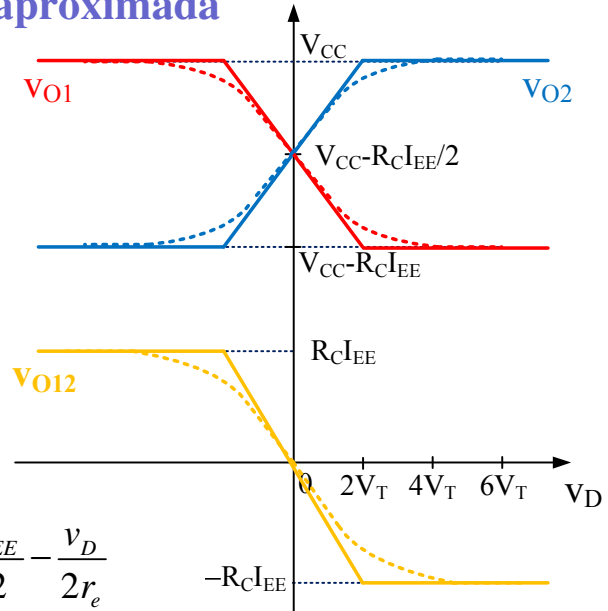
$$I_{EE} = i_{E1} + i_{E2} \approx i_{C1} + i_{C2}$$

- do ponto de vista incremental é preciso considerar  $r_e$  (resistência intrínseca vista do emissor)

$$r_e = \frac{1}{g_m} = \frac{V_T}{I_C} = \frac{V_T}{I_{EE}/2} = \frac{2V_T}{I_{EE}}$$

- pode

$$\text{obter-se } i_{C1} = \frac{I_{EE}}{2} + \frac{v_D}{2r_e} \quad i_{C2} = \frac{I_{EE}}{2} - \frac{v_D}{2r_e}$$



## Característica de transferência aproximada

$$v_{O1} = V_{CC} - R_C \left( \frac{I_{EE}}{2} + \frac{v_D}{2r_e} \right)$$

$$v_{O2} = V_{CC} - R_C \left( \frac{I_{EE}}{2} - \frac{v_D}{2r_e} \right)$$

$$v_{O12} = -\frac{R_C}{r_e} v_D$$

## Limites de validade da aproximação considerada

- quando o par diferencial está desequilibrado

- $Q_1$  condução,  $Q_2$  cortado

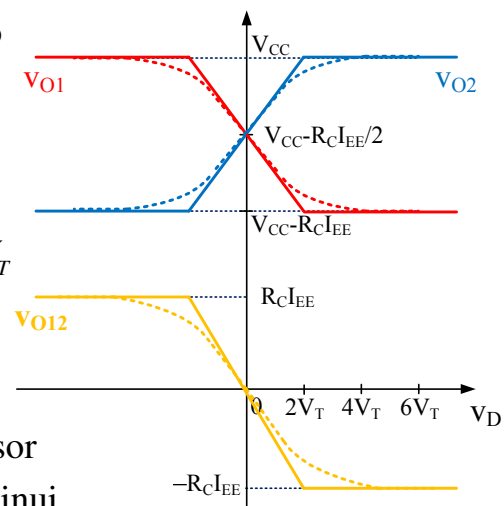
$$i_{C1} = I_{EE} \quad , \quad i_{C2} = 0 \quad \rightarrow \quad v_D = r_e I_{EE} = 2V_T$$

- $Q_2$  condução,  $Q_1$  cortado

$$i_{C2} = I_{EE} \quad , \quad i_{C1} = 0 \quad \rightarrow \quad v_D = -r_e I_{EE} = -2V_T$$

## Como aumentar a zona linear, para se poder amplificar sinais maiores?

- acrescentar resistência em série com o emissor
- como consequência o ganho do circuito diminui

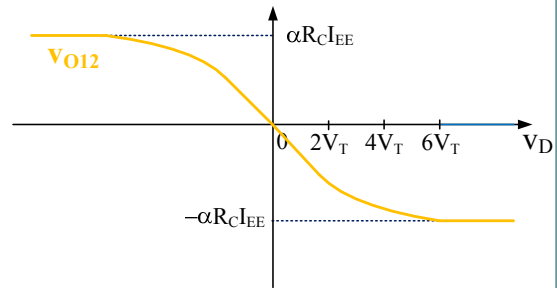




## Sinais fortes (large signal model)

- característica de transferência  $v_{o12}(v_D)$

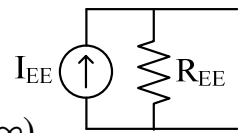
$$v_{o12} \approx I_{EE} R_C \tanh\left(-\frac{v_D}{2V_T}\right)$$



## Sinais fracos (small signal model)

$$v_d = \Delta v_D \quad v_c = \Delta v_C \quad v_{o1} = \Delta v_{o1} \quad v_{o2} = \Delta v_{o2} \quad v_{o12} = \Delta v_{o12}$$

- modelo incremental (válido para pequenas variações do sinal de entrada)
- análise do circuito (funcionamento dinâmico linear)
  - TJB – substituído pelo seu modelo incremental
  - Fontes de tensão  $V_{CC}$  e  $V_{EE}$ 
    - substituídas por curto-circuito (à massa)
  - Fonte de corrente  $I_{EE}$ 
    - fonte ideal – substituída por circuito aberto ( $R_{EE} = +\infty$ )
    - fonte real – substituída pela sua resistência interna ( $R_{EE} \neq +\infty$ )



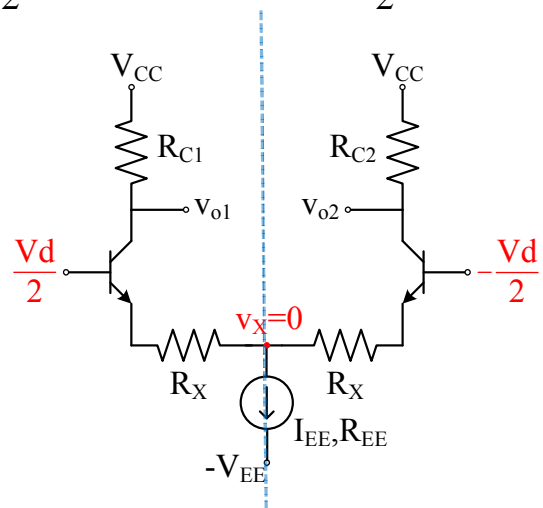
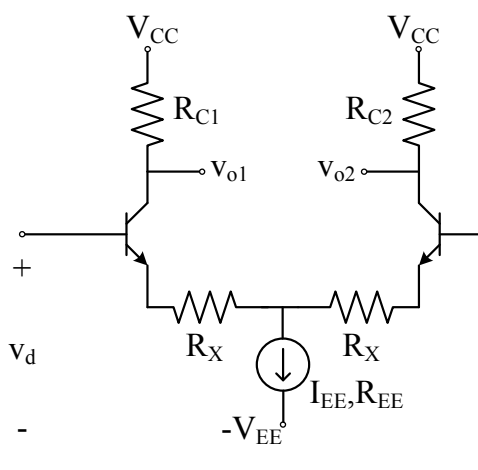
# Modo Diferencial

## Ganho de Modo Diferencial

- definido relativamente a cada uma das saídas

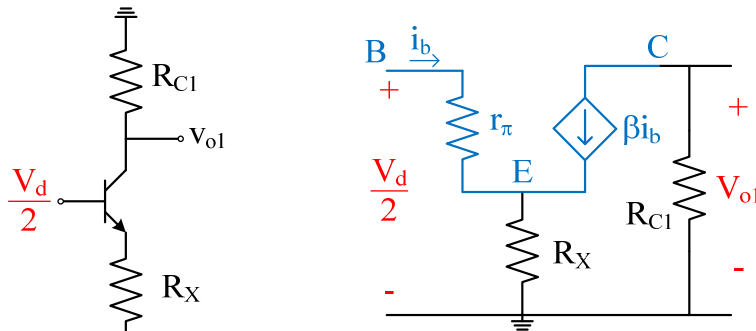
$$G_{d1} = \frac{\Delta v_{o1}}{\Delta v_D} = \frac{v_{o1}}{v_d} \quad G_{d2} = \frac{\Delta v_{o2}}{\Delta v_D} = \frac{v_{o2}}{v_d} \quad G_d = \frac{\Delta v_{o1} - \Delta v_{o2}}{\Delta v_D} = \frac{\Delta v_{o12}}{\Delta v_D} = \frac{v_{o12}}{v_d}$$

- entrada diferencial  $v_1 = \frac{v_d}{2} \quad v_2 = -\frac{v_d}{2} \quad v_1 - v_2 = v_d \quad \frac{v_1 + v_2}{2} = 0 = v_c$



## Ganho de Modo Diferencial

- basta fazer a análise de um circuito de emissor comum para obter o ganho



$$\frac{v_d}{2} = r_{\pi} i_b + R_X (\beta + 1) i_b$$

$$v_{o1} = -R_{C1} \beta i_b$$

$$\begin{cases} G_{d1} = \frac{v_{o1}}{v_d} = -\frac{\beta R_{C1}}{2[r_{\pi} + (\beta + 1) R_X]} \approx -\frac{R_C}{2R_X} \\ G_{d2} = \frac{v_{o2}}{v_d} = +\frac{\beta R_{C2}}{2[r_{\pi} + (\beta + 1) R_X]} \approx +\frac{R_C}{2R_X} \end{cases}$$

$$G_d = \frac{v_{o12}}{v_d} = -\frac{\beta R_{C1}}{r_{\pi} + (\beta + 1) R_X} \approx -\frac{R_C}{R_X}$$

$$R_{C1} = R_{C2} = R_C$$

$$G_d = -\frac{R_C}{R_X}$$

$$G_{d1} = -G_{d2} = -\frac{R_C}{2R_X}$$

# Modo Diferencial

## Ganho de Modo Diferencial

- Quando não há degeneração de emissor ( $R_X=0$ )
  - considera-se a resistência intrínseca vista do emissor ( $r_e$ )
  - substituir  $R_X$  por  $r_e$  nas equações do ganho

$$G_d = -\frac{R_C}{r_e}$$

$$G_{d1} = -G_{d2} = -\frac{R_C}{2r_e}$$

$$r_e \approx \frac{V_T}{I_C} = \frac{V_T}{I_{EE}/2} = \frac{2V_T}{I_{EE}}$$

$$G_d = -R_C \frac{I_{EE}}{2V_T}$$

## Impedância de entrada

- impedância vista pelo gerador de tensão  $v_d$  ligado entre as 2 entradas

$$R_{id} = 2[r_{\pi} + (\beta + 1) R_X]$$

$$R_{id} = 2r_{\pi} \quad (R_X = 0)$$

## Impedância de saída

- impedância vista da saída simples
  - saída num dos colectores
- impedância vista da saída diferencial

$$R_{os} = R_C$$

$$R_{od} = 2R_C$$

## Ganho de Modo Comum

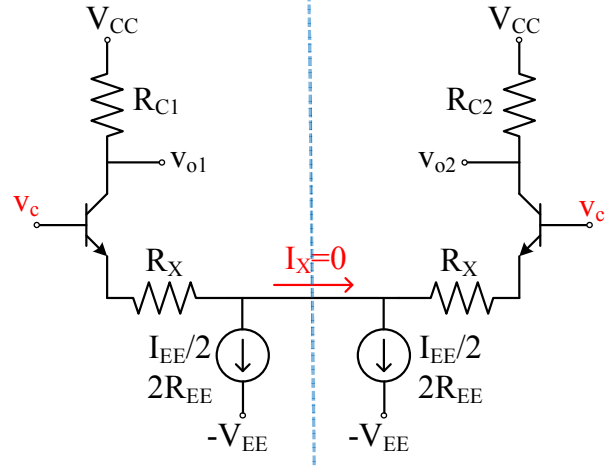
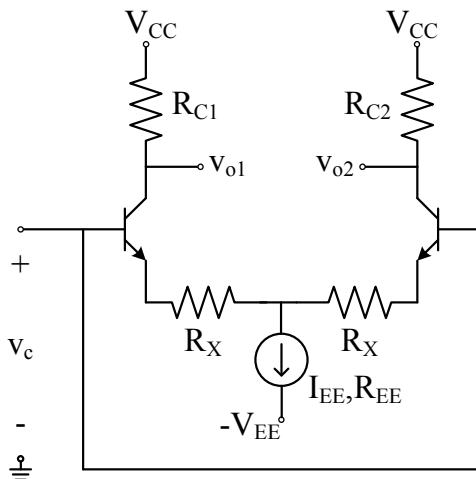
- definido relativamente a cada uma das saídas

$$G_{c1} = \frac{\Delta v_{o1}}{\Delta v_c} = \frac{v_{o1}}{v_c} \quad G_{c2} = \frac{\Delta v_{o2}}{\Delta v_c} = \frac{v_{o2}}{v_c} \quad G_c = \frac{\Delta v_{o1} - \Delta v_{o2}}{\Delta v_c} = \frac{\Delta v_{o12}}{\Delta v_c} = \frac{v_{o12}}{v_c}$$

- entrada comum

$$v_1 = v_2 = v_c$$

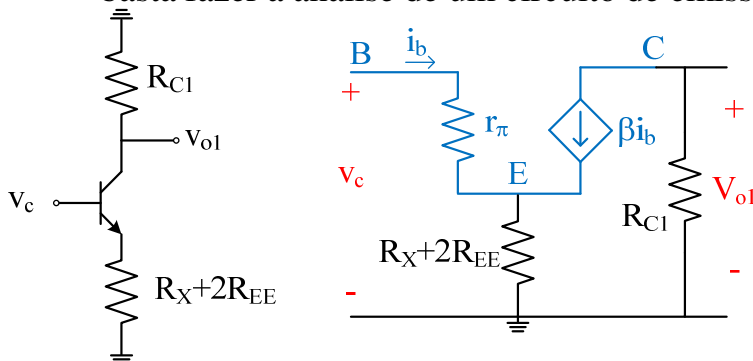
$$v_1 - v_2 = 0 = v_d$$



# Modo Comum

## Ganho de Modo Comum

- basta fazer a análise de um circuito de emissor comum para obter o ganho



$$v_c = r_\pi i_b + (R_X + 2R_{EE})(\beta + 1)i_b$$

$$v_{o1} = -R_{C1}\beta i_b$$

$$R_{C1} = R_{C2} = R_C$$

$$R_{EE} \gg R_X$$

$$G_{c1} = G_{c2} = \frac{v_{o1}}{v_c} = -\frac{\beta R_{C1}}{r_\pi + (\beta + 1)(R_X + 2R_{EE})}$$

$$G_{c1} = G_{c2} \approx -\frac{R_C}{2R_{EE}} \quad G_c = \frac{v_{o12}}{v_d} = 0$$

$$G_{c1} = G_{c2} = -\frac{R_C}{2R_{EE}}$$

$$G_c = 0$$

## Impedância de entrada

- vista pelo gerador de tensão  $v_c$  ligado às 2 entradas

$$R_{ic} = \frac{1}{2} [r_\pi + (\beta + 1)(R_X + 2R_{EE})]$$

$$R_{ic} \approx (\beta + 1)R_{EE}$$

## CMRR – saída diferencial

- se par diferencial for perfeitamente simétrico

$$G_c = 0 \quad G_d = -R_C \frac{I_{EE}}{2V_T}$$

- na prática – existem sempre assimetrias – CMRR é finita mas muito elevada

$$CMRR = \left| \frac{G_d}{G_c} \right| = +\infty$$

## CMRR – saída num dos colectores

$$G_{c1} = G_{c2} \approx -\frac{R_C}{2R_{EE}} \quad G_{d1} = -G_{d2} = -\frac{R_C}{2r_e}$$

$$CMRR = \left| \frac{G_{d1}}{G_{c1}} \right| = \left| \frac{G_{d2}}{G_{c2}} \right| = \frac{R_C/2r_e}{R_C/2R_{EE}} = \frac{R_{EE}}{r_e} = \frac{R_{EE}}{2V_T/I_{EE}} = \frac{R_{EE}I_{EE}}{2V_T}$$

$$CMRR = \frac{R_{EE}I_{EE}}{2V_T}$$

- projecto para CMRR elevada
  - garantir simetria no par diferencial
  - fonte de corrente com resistência interna elevada (espelho de corrente)
  - resistência  $R_X$  baixa (quando há degeneração do emissor)

# Par Diferencial com Espelho de Corrente

## Fonte de corrente

- realizada com espelho de corrente
- resistência de saída da fonte de corrente é elevada ( $R_{EE} = r_o$ )

$$CMRR = \frac{R_{EE}I_{EE}}{2V_T}$$

$$R_{EE} = r_o = \frac{V_A}{I_C}$$

$$I_{EE} = I_C = I_{REF} = \frac{V_{CC} + V_{EE} - V_{BEon}}{R_{REF}}$$

$$CMRR = \frac{V_A}{2V_T}$$

$$\begin{cases} V_A = 100V \\ V_T = 25mV \end{cases}$$

$$CMRR = 2000 \quad CMRR_{dB} = 66dB$$

