

# **CAP. 1**

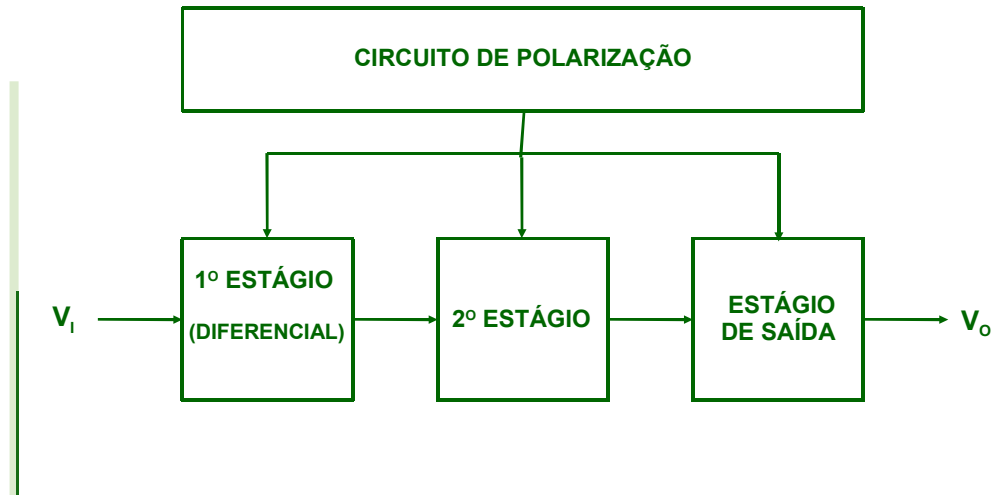
## **AMPLIFICADORES DIFERENCIAIS E DE MÚLTIPLOS ESTÁGIOS**

### **OBJETIVOS**

- **Analisar a operação do amplificador diferencial**
- **Entender o significado de tensão de modo diferencial e de modo comum**
- **Determinar as características de pequenos sinais do amplificador diferencial**
- **Analisar e projetar amplificadores diferenciais com cargas ativas**
- **Analisar e projetar amplificadores com múltiplos estágios**

# INTRODUÇÃO

## DIAGRAMA EM BLOCOS

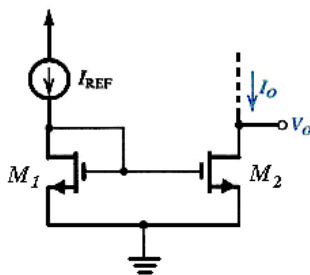


TE 054 CIRCUITOS ELETRÔNICOS LINEARES

3

## 1.1.1 Circuitos de Polarização: Correntes de referência

### ESPELHO DE CORRENTE MOS



**M<sub>1</sub> sempre saturado**

$$I_{REF} = \frac{1}{2} k_n' \left( \frac{W}{L} \right)_1 (V_{GS} - V_t)^2$$

**M<sub>2</sub> saturado** ( $V_o \geq V_{GS} - V_t$ )

$$I_o = \frac{1}{2} k_n' \left( \frac{W}{L} \right)_2 (V_{GS} - V_t)^2$$

$$\frac{I_o}{I_{REF}} = \frac{(W/L)_2}{(W/L)_1}$$

TE 054 CIRCUITOS ELETRÔNICOS LINEARES

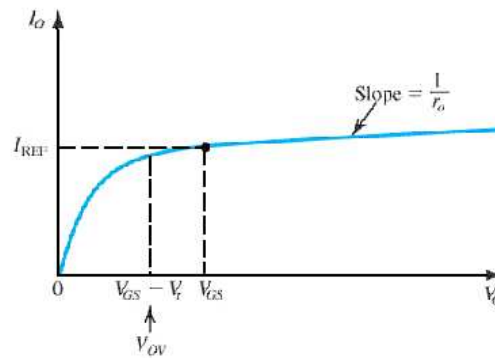
4

## Efeito de $V_o$ sobre $I_o$

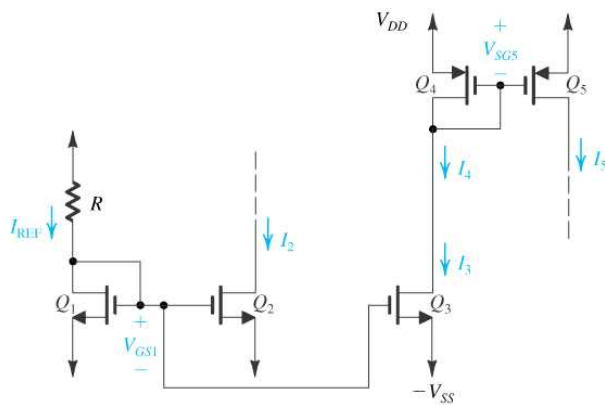
$$I_o = \frac{1}{2} k'_n \left( \frac{W}{L} \right)_2 (V_{GS} - V_t)^2 \left( 1 + \frac{V_{DS2}}{V_{A2}} \right)$$

$$\frac{I_o}{I_{REF}} = \frac{(W/L)_2}{(W/L)_1} \left( 1 + \frac{V_o - V_{GS}}{V_{A2}} \right)$$

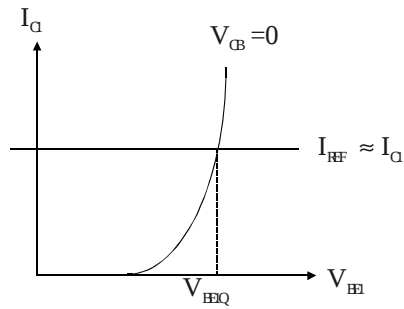
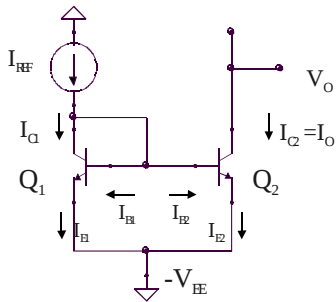
$$R_o = \frac{\Delta V_o}{\Delta I_o} = r_{o2} = \frac{V_{A2}}{I_o}$$



## Circuito guia de corrente CMOS



## ESPELHO DE CORRENTE COM TBJ



$$Q_1 \cong Q_2$$

$Q_1$  e  $Q_2$  na região ativa

Desprezando o Efeito Early:

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



$$\frac{I_O}{I_{REF}} \approx 1$$

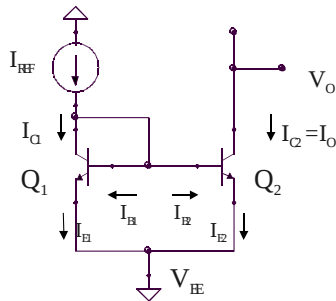
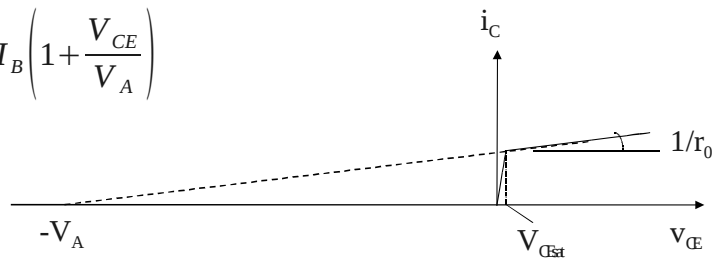
$$I_{C1} = I_{C2} = I_C$$

$$I_{B1} = I_{B2} = I_B$$

Para  $\beta \gg 1$

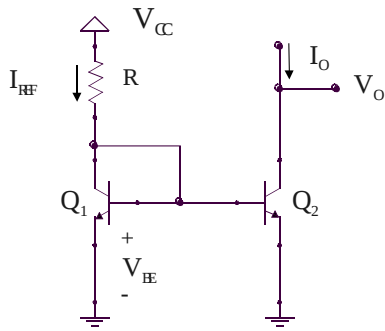
Considerando o efeito Early:

$$I_C = \beta I_B \left( 1 + \frac{V_{CE}}{V_A} \right)$$



$$\frac{I_O}{I_{REF}} \approx \frac{1}{1 + \frac{2}{\beta}} \left( 1 + \frac{V_O - V_{EE}}{V_A} \right)$$

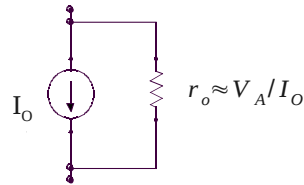
Exemplo de fonte de corrente a partir de uma fonte de tensão:



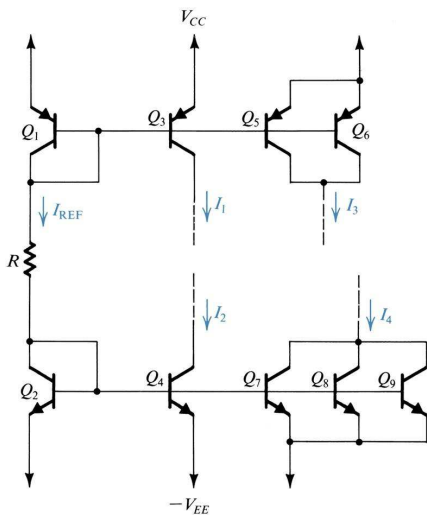
$$I_{REF} = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R}$$

$$I_O = \frac{1}{1 + 2/\beta} \cdot \left(1 + \frac{V_O}{V_A}\right) \cdot \left(\frac{V_{CC} - V_{BE}}{R}\right)$$

Modelo equivalente CC, válido para  $Q_2$  na região ativa



### Circuitos guias de corrente



$$I_{REF} = \frac{V_{CC} + V_{EE} - V_{EB1} - V_{BE2}}{R}$$

Considerando todos os transistores idênticos e  $\beta$  muito alto:

$$I_1 = I_2 = I_{REF}$$

$$I_3 = 2I_{REF}$$

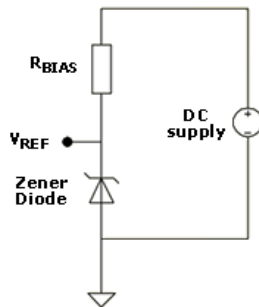
$$I_4 = 3I_{REF}$$

## 1.1.2 Circuitos de Polarização: Tensões de referência

### Parâmetros importantes:

- Estabilidade com a fonte de alimentação
- Impedância de saída
- Estabilidade com temperatura

#### a) Diodo Zener



$$V_{REF} = V_{Z0} + I_Z * R_Z$$

$$I_Z = \frac{V_{CC} - V_{REF}}{R_Z}$$

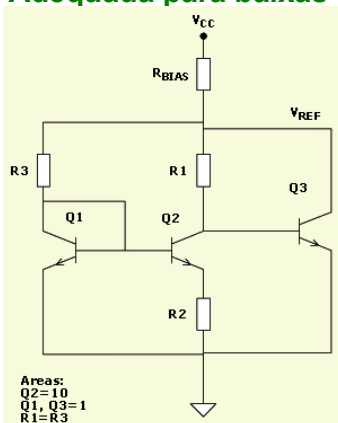
### Características:

- Estabilidade com  $V_{CC}$  depende de  $I_Z$  e  $R_Z$
- Impedância de saída
- Estável em temperatura para  $V_{Z0} \sim 5,6 V$

#### b) Bandgap

### Características:

- Tensão de referência igual ao “bandgap” de energia do semiconductor ( $\sim 1,22 V$  para o Silício)
- Soma de duas tensões com coeficiente de temperatura opostos
- Alta estabilidade com temperatura
- Adequada para baixas tensões de alimentação



Areas:  
Q2=10  
Q1, Q3=1  
R1=R3

$$V_{REF} = V_{BE1} + I_{C1} * R_3$$

$$V_{E2} = VT * \ln[(I_{C1}/A1)/(I_{C2}/A2)]$$

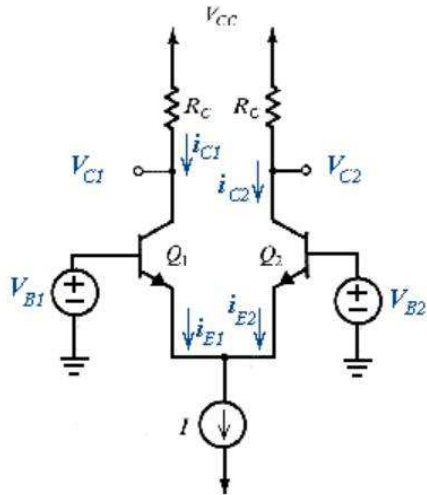
$$R_1 = R_3 = 9 * R_2 \quad A2 = 10 * A1$$

$$V_{E2} = VT * \ln[10] = 2,3 VT$$

$$V_{REF} = V_{BE1} + 2,3 VT * R1/R2$$

$$\text{para } V_{BE} \approx 0,7 \rightarrow V_{REF} \approx 1,24 V$$

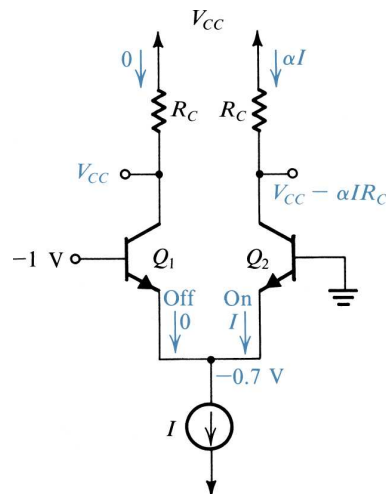
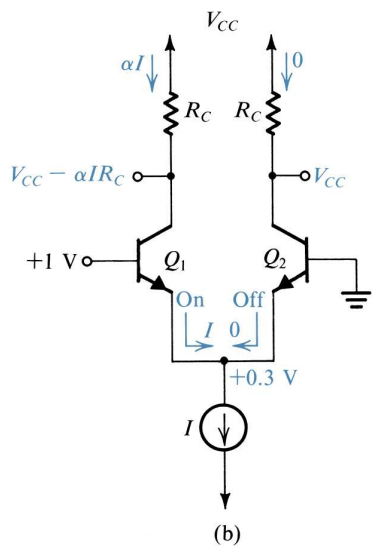
## 1.2 Amplificador Diferencial com TBJ



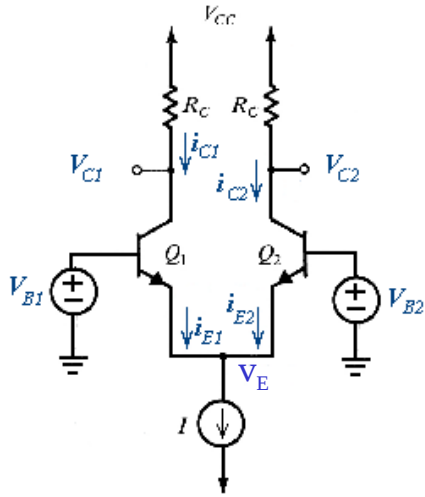
### Considerações iniciais:

- Fonte de corrente ideal
- Transistores e resistores casados
- Transistores na região ativa
- Resistência de saída do TBJ infinita

### OPERAÇÃO COM GRANDES SINAIS



## Análise de grandes sinais



$$i_{E1} = \frac{I_S}{\alpha} e^{(v_{B1} - v_E)/V_T}$$

$$i_{E2} = \frac{I_S}{\alpha} e^{(v_{B2} - v_E)/V_T}$$

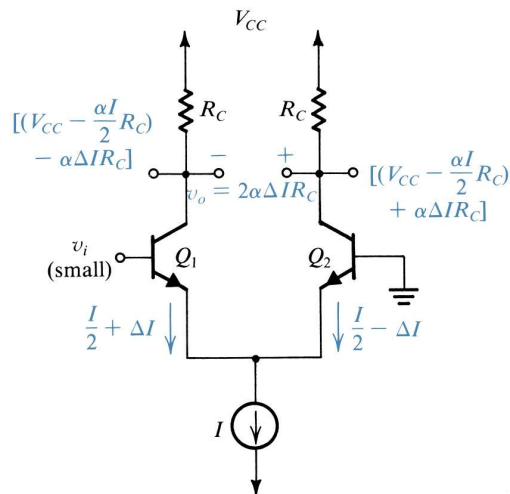
$$I = i_{E1} + i_{E2} = \frac{I_S}{\alpha} e^{-\frac{v_E}{V_T}} \left( e^{\frac{v_{B1}}{V_T}} + e^{\frac{v_{B2}}{V_T}} \right)$$

$$\frac{i_{E1}}{I} = \frac{1}{1 + e^{[(v_{B2} - v_{B1})/V_T]}}$$

$$\frac{i_{E2}}{I} = \frac{1}{1 + e^{[(v_{B1} - v_{B2})/V_T]}}$$

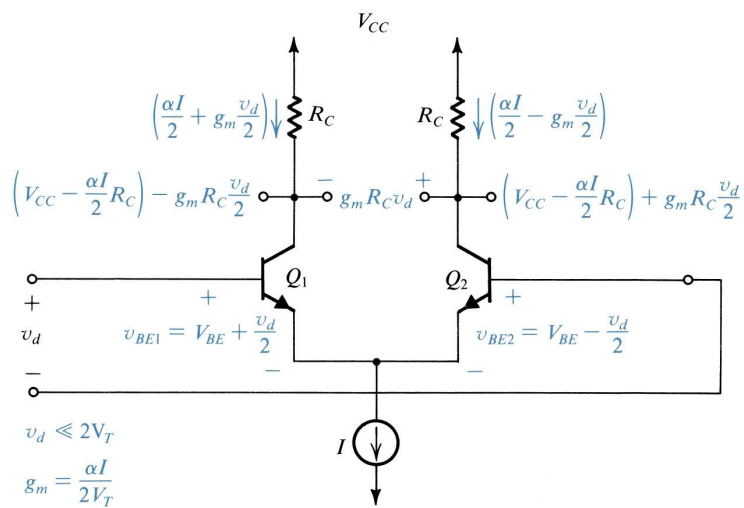
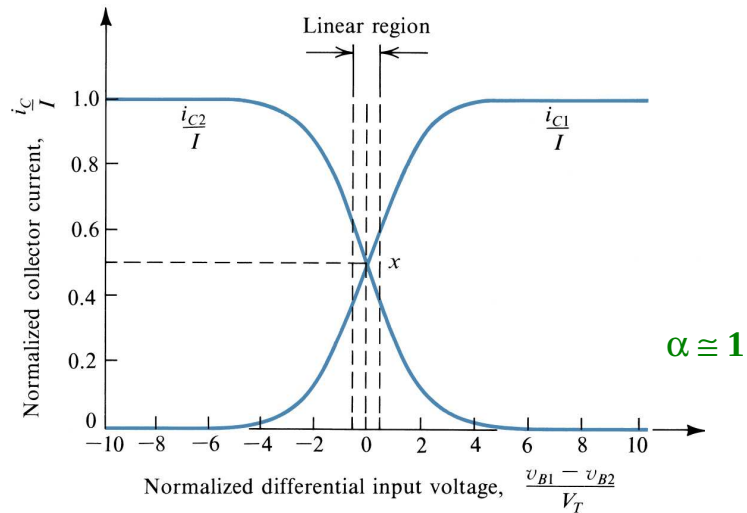
## OPERAÇÃO COM PEQUENOS SINAIS

- $v_i = (v_{B1} - v_{B2}) < 2V_T$
- Temperatura ambiente (~27°C):  $V_T = 25 \text{ mV}$



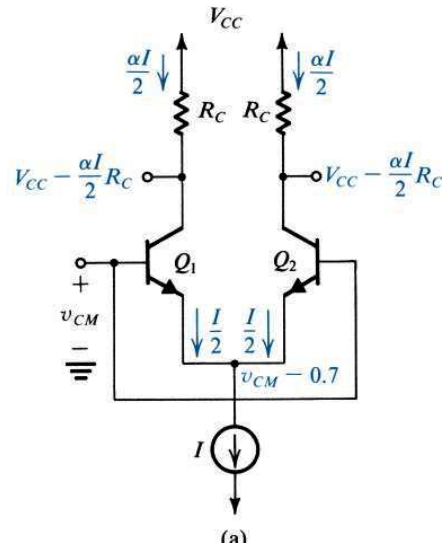


## Curva de Transferência Característica:

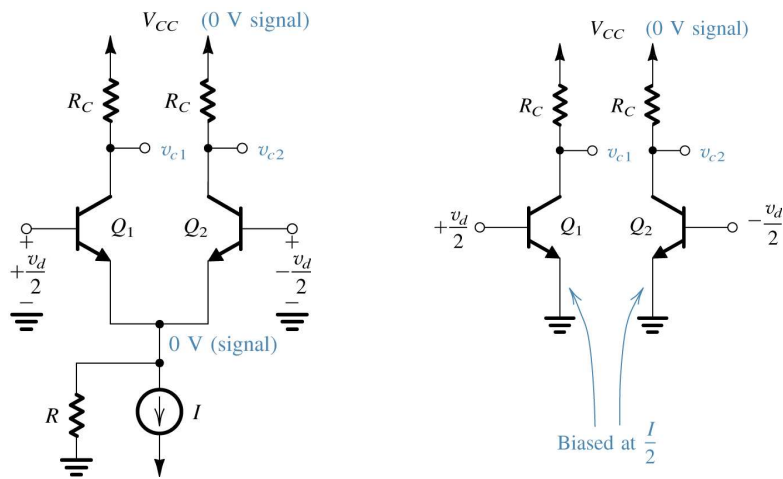


## Operação em MODO COMUM

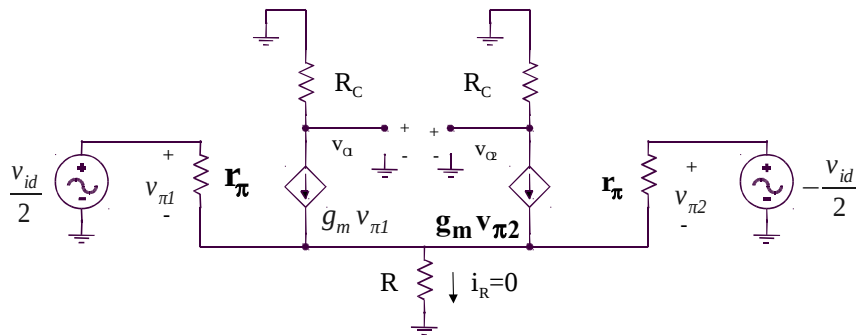
- Entradas conectadas em uma mesma tensão  $v_{CM}$
- Saídas independentes nos coletores



## Operação em MODO DIFERENCIAL



## CIRCUITO EQUIVALENTE DE PEQUENOS SINAIS

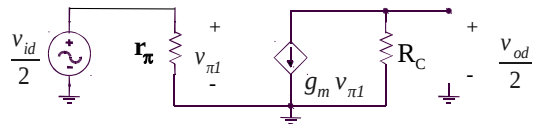


$$v_{od} = v_{o1} - v_{o2}$$

$$v_{o1} = \frac{v_{od}}{2} \quad v_{o2} = -\frac{v_{od}}{2}$$

## Análises de pequenos sinais

### Ganho de modo diferencial



Saída diferencial ( $v_{o1} - v_{o2}$ ):

$$A_{dd} = \frac{v_{od}}{v_{id}} = -g_m R_C$$

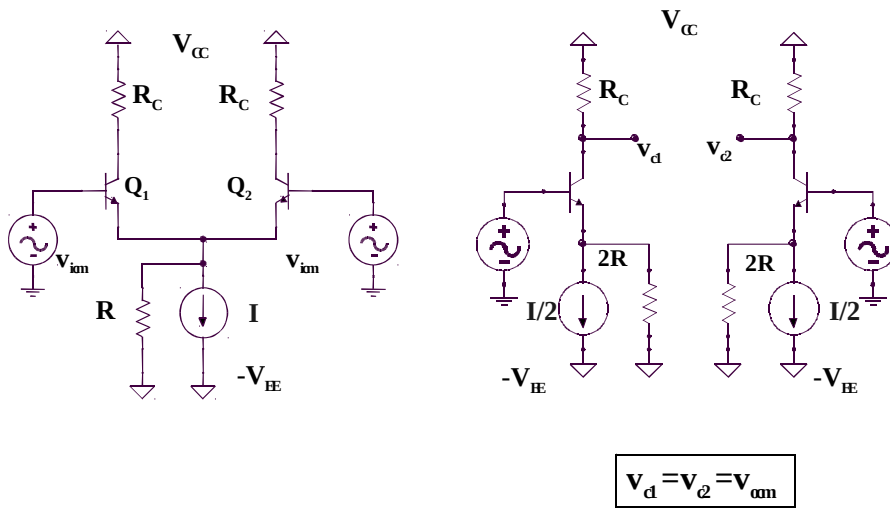
$$g_m = \frac{I_C}{V_T} = \frac{\alpha I}{2V_T}$$

Saída simples ou modo comum ( $v_{o1}$  ou  $v_{o2}$ ):

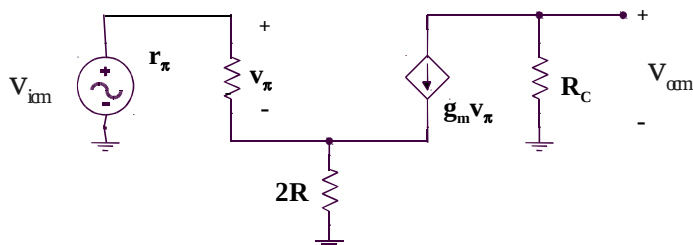
$$A_{d1} = \frac{v_{o1}}{v_{id}} = -\frac{1}{2} g_m R_C$$

$$A_{d2} = \frac{v_{o2}}{v_{id}} = \frac{1}{2} g_m R_C$$

## Ganho de modo comum



## Meio circuito equivalente AC para análise de modo-comum



$$A_{cm} = \frac{v_{ocm}}{v_{icm}}$$

$$A_{cm} = -\frac{g_m R_C}{1 + 2g_m R \left(1 + \frac{1}{\beta}\right)} \approx -\frac{\alpha R_C}{2R}$$

### CMRR: razão de rejeição de modo comum (considerando saída simples)

$$CMRR = \left| \frac{A_d}{A_{cm}} \right| = \frac{1}{2} \left[ 1 + 2g_m R \left( 1 + \frac{1}{\beta_o} \right) \right] \approx g_m R$$

$$CMRR|_{dB} = 20 \log \left| \frac{A_d}{A_{cm}} \right|$$

Obs: Os sinais de entrada contêm usualmente uma componente de modo diferencial ( $v_{id}$ ) e uma de modo comum ( $v_{icm}$ )

$$v_{id} = v_1 - v_2$$

$$v_{icm} = \frac{v_1 + v_2}{2}$$

$$v_o = A_d v_{id} + A_{cm} v_{icm}$$

### Resistência de entrada de modo diferencial

$$R_{id} = \left. \frac{v_{id}}{i_b} \right|_{v_{icm}=0} = 2r_\pi$$

### Resistência de entrada de modo comum:

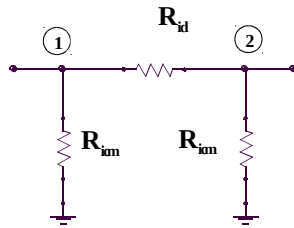
$$R_{icm} = \left. \frac{v_{icm}}{2i_b} \right|_{v_{id}=0} = \frac{1}{2} [r_\pi + 2R(\beta + 1)]$$

### Correntes de entrada (modos diferencial e comum):

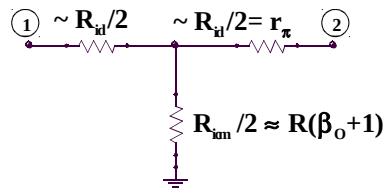
$$i_{b1} = \frac{v_{id}}{R_{id}} + \frac{v_{icm}}{R_{icm}}$$

$$i_{b2} = -\frac{v_{id}}{R_{id}} + \frac{v_{icm}}{R_{icm}}$$

## Circuito equivalente de pequenos sinais para entrada de um amplificador diferencial



Modelo  $\pi$

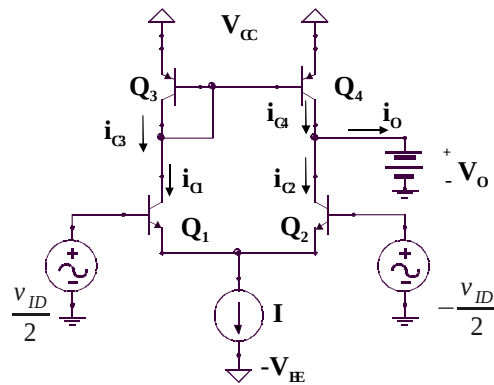


Modelo T

## 1.7 O AMPLIFICADOR DIFERENCIAL COM CARGA ATIVA

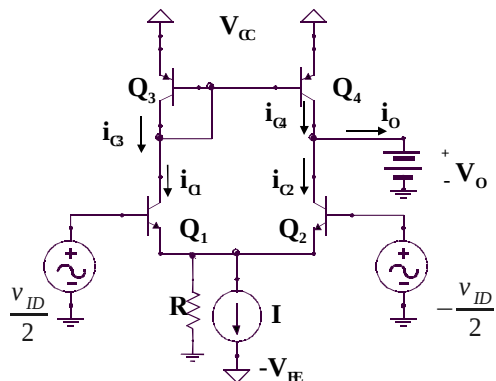
- Utiliza-se apenas uma saída
- Espelho de corrente com transistores PNP substituem  $R_C$ 
  - menor área em CI
  - maior  $R_o$  → maior  $A_d$

A saída geralmente é acoplada a um estágio de baixa impedância que define a tensão  $v_o$ .



## 1.7 O AMPLIFICADOR DIFERENCIAL COM CARGA ATIVA

Análise DC:



Transcondutância em curto-circuito:

$$Q_1 \equiv Q_2 \text{ e } Q_3 \equiv Q_4$$

$V_o$  é tal que  $Q_2$  e  $Q_4$  operam na região ativa

$I_B$  desprezível

$$i_{C1} = \frac{I}{2} + g_m \frac{v_{id}}{2}$$

$$i_{C2} = \frac{I}{2} - g_m \frac{v_{id}}{2}$$

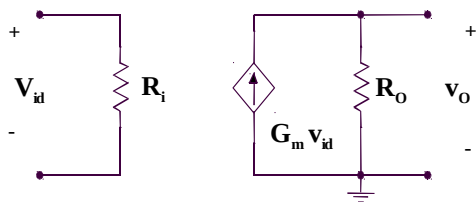
$$i_{C1} = i_{C3} = i_{C4}$$

$$i_o = i_{C4} - i_{C2} = g_m v_{id}$$

$$G_m \equiv \frac{i_o}{v_{id}} = g_m$$

## Ganho de tensão em circuito aberto

Modelo para pequenos sinais



$$A_{cm} = \frac{-r_{o4}}{2R(1 + g_m r_{\pi 3}/2)}$$

$$A_d = \frac{v_o}{v_{id}} = G_m R_o$$

$$R_o = r_{o2} // r_{o4}$$

$$r_{o2(4)} = \frac{V_{An(p)}}{I/2} \quad g_m = \frac{I/2}{V_T}$$

$$A_d = \frac{1}{V_T \left( \frac{1}{V_{An}} + \frac{1}{V_{Ap}} \right)}$$