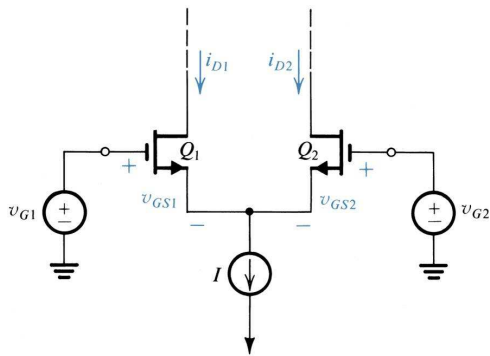


1.3 Amplificador Diferencial com MOSFET



$Q_1 \equiv Q_2$
 Q_1 e Q_2 saturados
 Fonte de corrente ideal
 $V_A \rightarrow \infty$

$$v_{G1} - v_{G2} = v_{GS1} - v_{GS2} = v_{id} \quad (1)$$

$$i_{D1(2)} = \frac{1}{2} k_n' \frac{W}{L} (v_{GS1(2)} - V_t)^2 \quad (2)$$

$$i_{D1} + i_{D2} = I \quad (3)$$

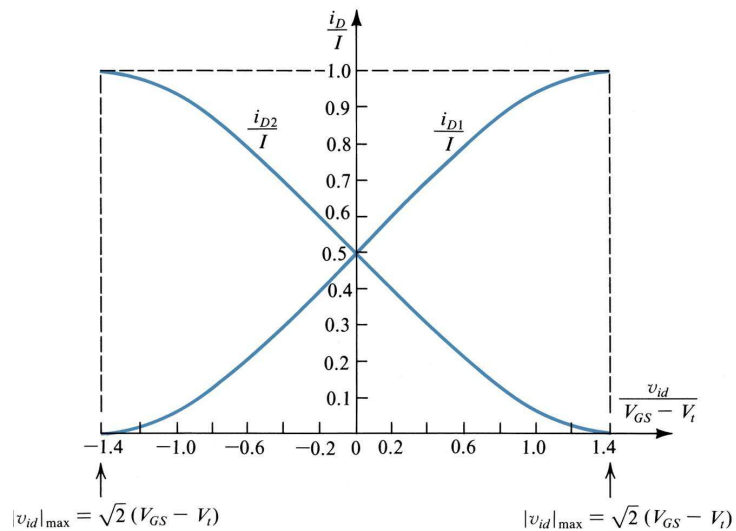
Combinando as equações 1, 2 e 3 e considerando que no ponto quiescente:

$$i_{D1} = i_{D2} = \frac{I}{2} \quad v_{GS1} = v_{GS2} = V_{GS}$$

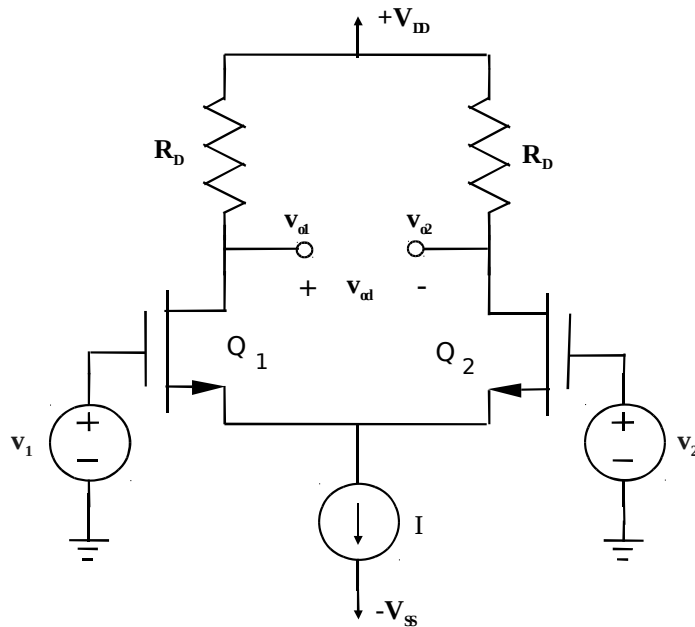
tem-se

$$i_{D1(2)} = \frac{I}{2} \pm \frac{I}{(V_{GS} - V_t)} \frac{v_{id}}{2} \sqrt{1 - \left(\frac{v_{id}/2}{V_{GS} - V_t} \right)^2}$$

Característica de transferência normalizada do par diferencial MOS



1.6.4 OPERAÇÃO COM PEQUENOS SINAIS DO AMP. DIF. MOS



Operação em pequenos sinais do amp. dif. MOS

$$i_{D1(2)} = \frac{I}{2} \pm \frac{I}{(V_{GS} - V_t)} \frac{v_{id}}{2} \sqrt{1 - \left(\frac{v_{id}/2}{V_{GS} - V_t} \right)^2}$$

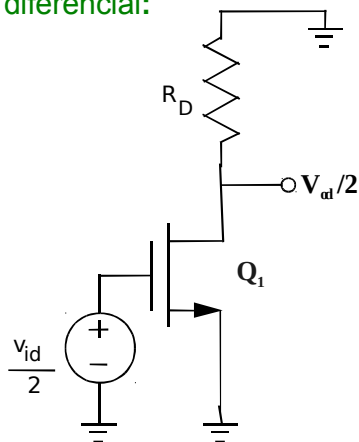
$$\frac{v_{id}}{2} \ll (V_{GS} - V_t)$$

$$i_{D1(2)} = \frac{I}{2} \pm \frac{I}{(V_{GS} - V_t)} \frac{v_{id}}{2}$$

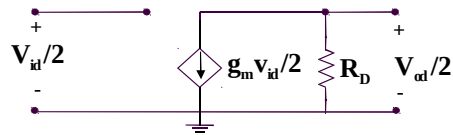
$$i_d = g_m \frac{v_{id}}{2}$$

Ganho de modo diferencial:

Analisando metade do estágio diferencial:



Modelo equivalente pequenos sinais:



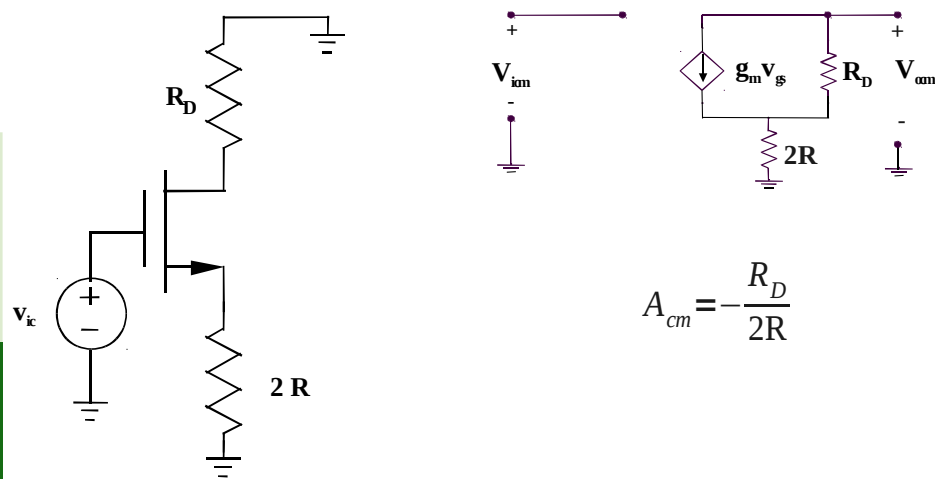
Considerando saída diferencial:

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

Considerando saída simples:

$$A_d = \frac{v_o}{v_{id}} = \frac{-g_m R_D}{2}$$

Ganho de modo comum (considerando saída simples)



CMRR (considerando saída simples)

$$CMRR = g_m R$$

Resistência de entrada de modo diferencial
(baixas frequências)

$$R_{id} = \infty$$

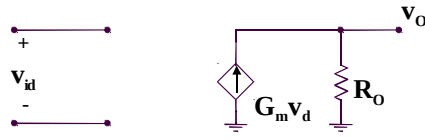
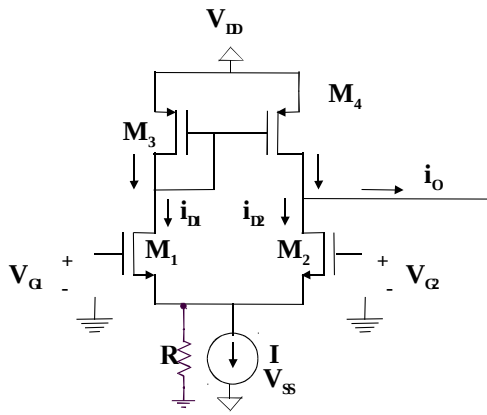
Resistência de entrada de modo comum
(baixas frequências)

$$R_{icm} = \infty$$

Resistência de saída:

$$R_o = R_D || r_{o1}$$

Amplificador diferencial CMOS com carga ativa



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

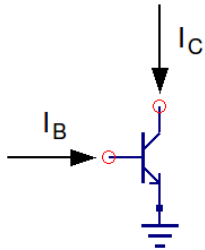
$$G_m \equiv \frac{i_o}{v_{id}} = g_m$$

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

$$A_{cm} = \frac{-r_{o4}}{2R(1 + g_m r_{o3})}$$

1.7.1 Amplificadores básicos com TBJ

Emissor comum



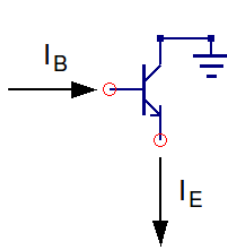
Entrada: Base

Saída: Coletor

$$R_i = r_\pi = \frac{V_T}{I_B}$$

$$R_o = \frac{V_A}{I_C}; A_V = -g_m \cdot R_{Ceq}$$

Coletor comum



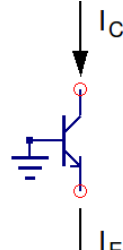
Entrada: Base

Saída: Emissor

$$R_i = r_\pi + (\beta + 1) R_{Eeq}$$

$$R_o = \frac{r_\pi + R_{Beq}}{(\beta + 1)}; A_V \approx 1$$

Base comum



Entrada: Emissor

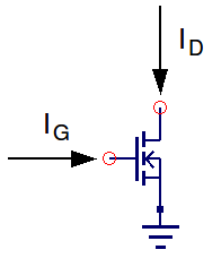
Saída: Coletor

$$R_i = \frac{r_\pi}{(\beta + 1)}$$

$$R_o = \frac{V_A}{I_C}; A_V = g_m \cdot R_{Ceq}$$

1.7.2 Amplificadores básicos com MOSFET

Fonte comum



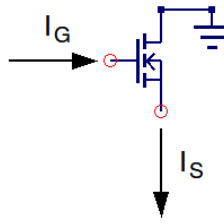
Entrada: Porta

Saída: Dreno

$$R_i = \infty; R_o = \frac{V_A}{I_D}$$

$$A_V = -g_m \cdot R_{Deq}$$

Dreno comum



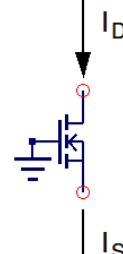
Entrada: Porta

Saída: Fonte

$$R_i = \infty; R_o = \frac{1}{g_m}$$

$$A_V = \frac{R_{Seq}}{R_{Seq} + R_o}$$

Porta comum



Entrada: Fonte

Saída: Dreno

$$R_i = \frac{1}{g_m}; R_o = \frac{V_A}{I_D}$$

$$A_V = g_m \cdot R_{Deq}$$

1.8 Estágio de saída de AMPOP's Bipolares

- Proporciona baixa impedância de saída e alto ganho de corrente
- Mantém o ganho de tensão menos dependente da carga
- Eficiência – baixa potência dissipada no circuito
- Transistores na configuração Coletor comum

Classificação quanto à polarização dos transistores:

- Classe A
- Classe B
- Classe A/B

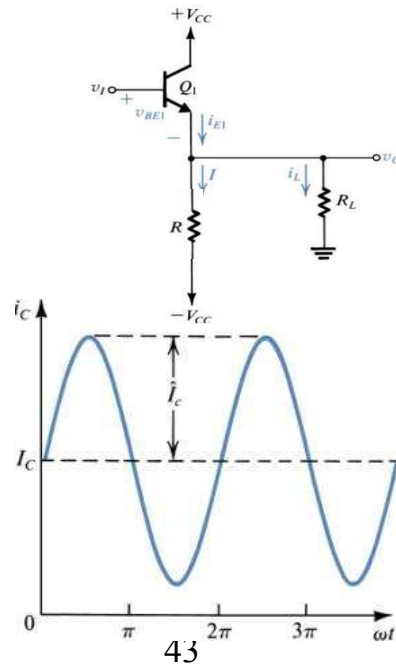
CLASSIFICAÇÃO DOS ESTÁGIOS DE SAÍDA

➤ Classe A

- O transistor é polarizado com uma corrente média (I_C) maior que a corrente de pico do sinal (\hat{I}_c).

- O transistor conduz durante todo o ciclo do sinal de entrada

- Baixa eficiência
- Baixa distorção
- I_C limita a corrente na carga



43

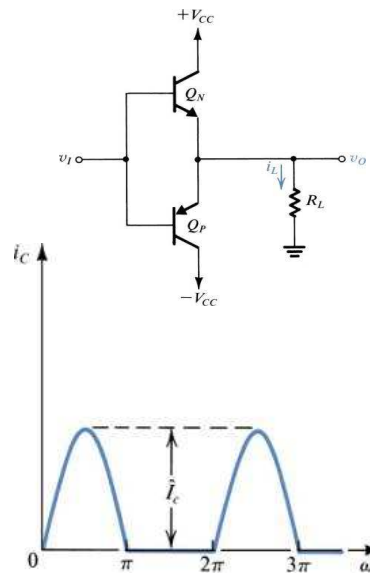
CLASSIFICAÇÃO DOS ESTÁGIOS DE SAÍDA

➤ Classe B

- Os transistores são polarizados com uma corrente média (I_C) nula ($V_{BE} = 0$).

- Os transistores conduzem durante meio ciclo do sinal de entrada

- Alta eficiência
- Alta distorção (passagem pelo zero)



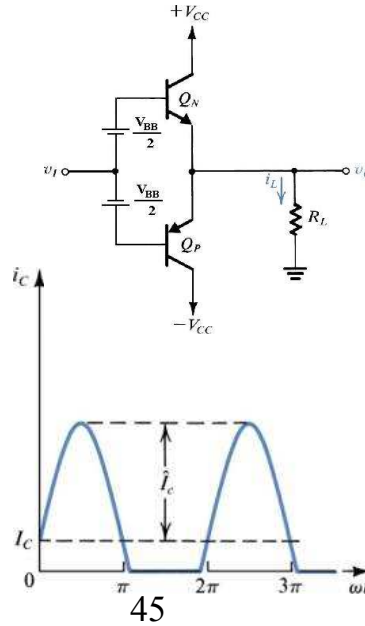
44

CLASSIFICAÇÃO DOS ESTÁGIOS DE SAÍDA

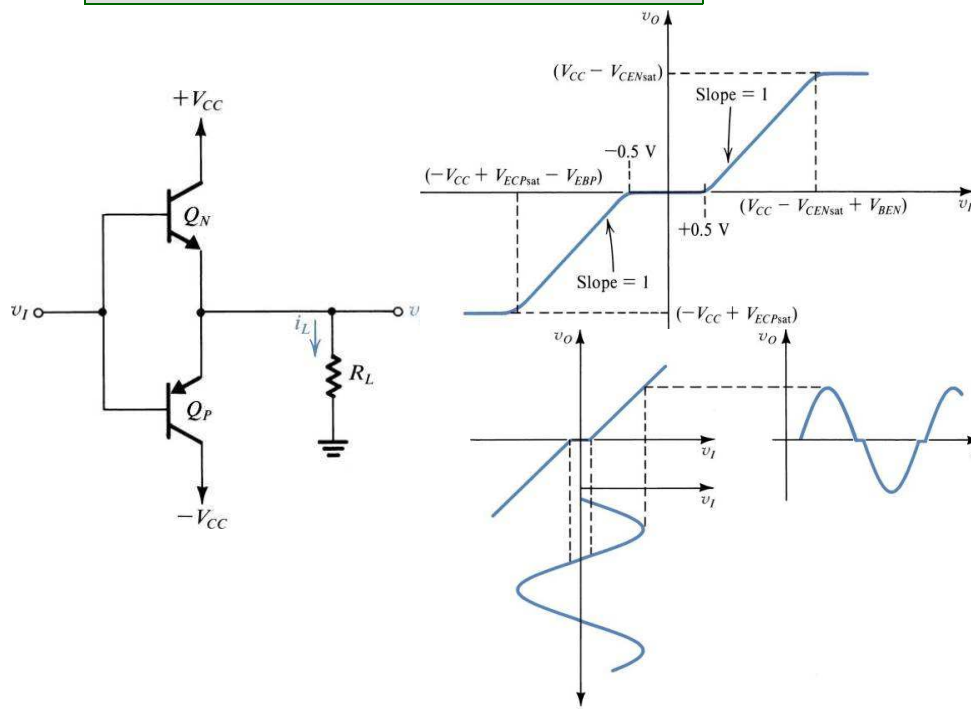
➤ Classe AB

- Os transistores são polarizados com uma corrente média (I_C) diferente de zero mas muito menor ($\sim 1\%$) que a corrente de pico do sinal de entrada.
- O ângulo de condução dos transistores é maior que 180° e muito menor que 360° .

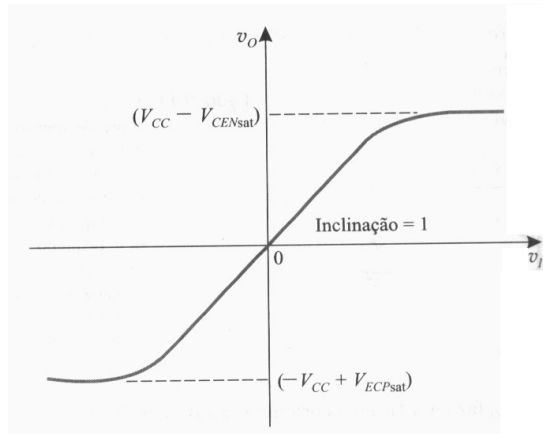
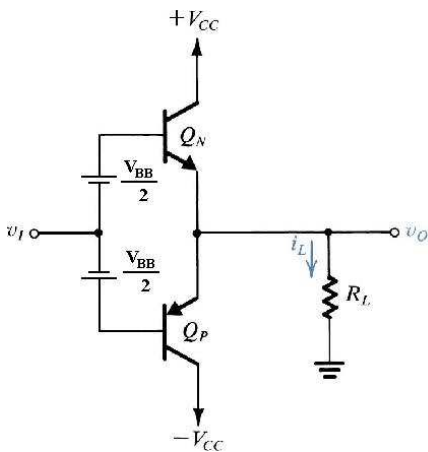
- Alta eficiência
- Baixa distorção



ESTÁGIO DE SAÍDA CLASSE B



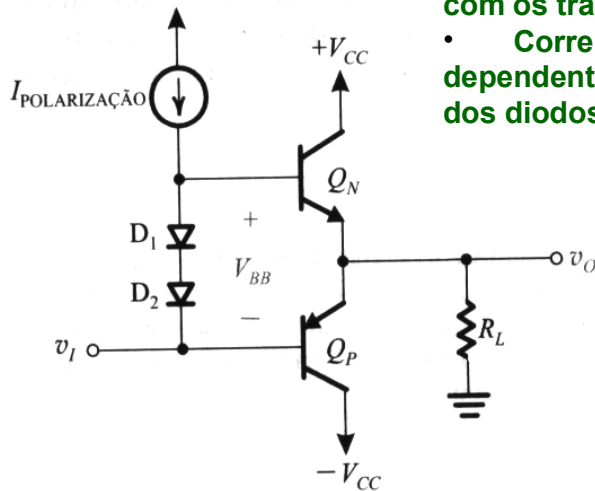
ESTÁGIO DE SAÍDA CLASSE AB



47

POLARIZAÇÃO DO CIRCUITO CLASSE AB

Polarização com diodos

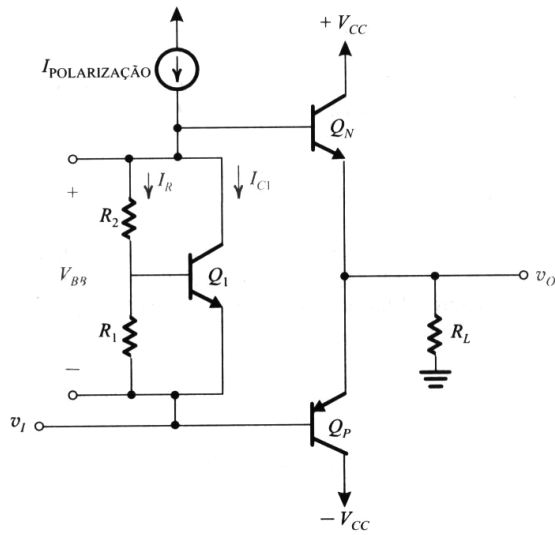


- Diodos em contato térmico com os transistores.
- Corrente de coletor dependente das características dos diodos.

48

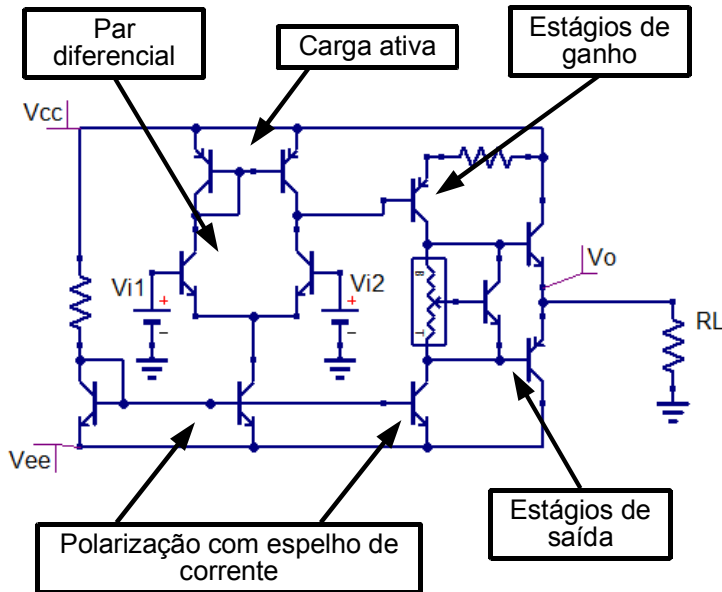
POLARIZAÇÃO DO CIRCUITO CLASSE AB

Polarização com multiplicação de V_{BE}

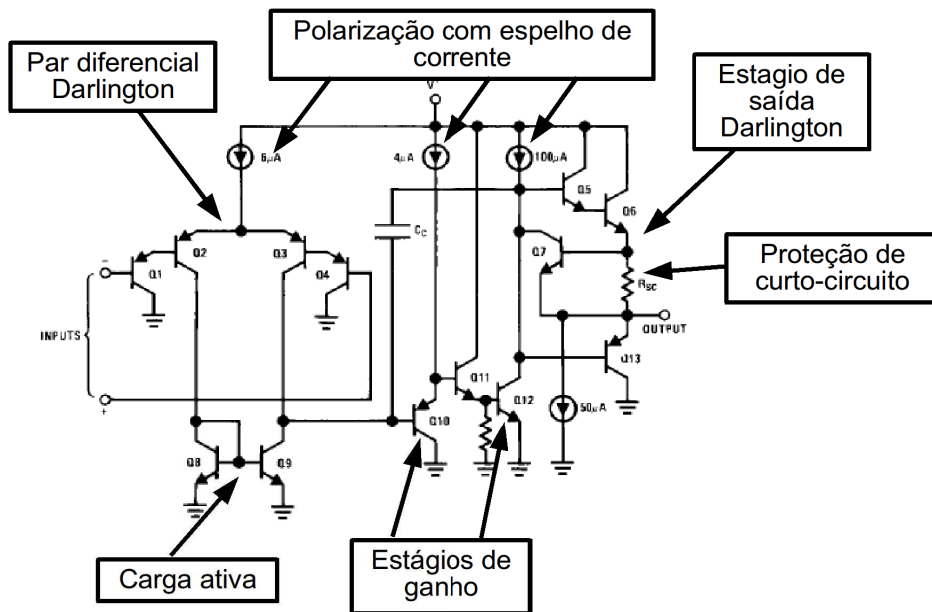


49

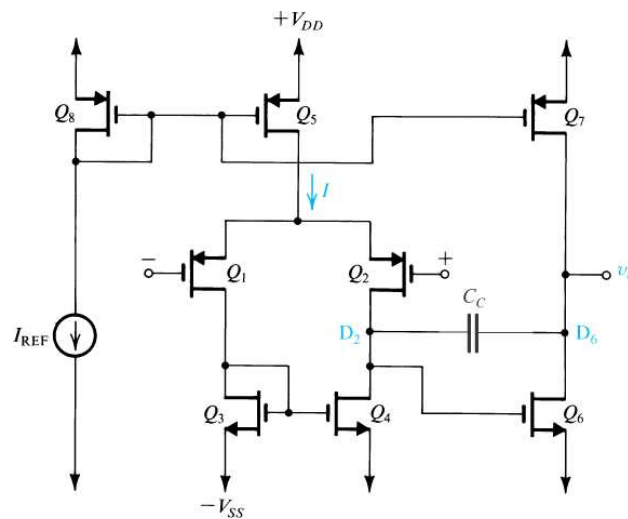
1.8 AMPLIFICADOR OPERACIONAL BIPOLAR



1.8 AMPOP Bipolar: LM124



1.9 AMPLIFICADOR OPERACIONAL CMOS



1.10 Principais Características CC dos AMPOP's

- “Offset” de tensão e corrente de entrada;
- Correntes de polarização de entrada;
- Impedâncias de entrada e saída;
- Ganhos de tensão diferencial e comum;
- Razão de rejeição de modo comum (CMRR);
- Razão de rejeição da tensão de alimentação (PSRR);
- Faixa de tensão em modo-comum da entrada;
- Tensão e corrente de polarização;
- Excursão da tensão de saída;
- Corrente máxima de saída.

1.10 Características Principais dos AMPOP's

Parameter	Conditions	LM124A			Units
		Min	Typ	Max	
Input Offset Voltage	(Note 5) $T_A = 25^\circ\text{C}$	1	2		mV
Input Bias Current (Note 6)	$I_{IN(+)}$ or $I_{IN(-)}$, $V_{CM} = 0\text{V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$	20	50		nA
Input Offset Current	$I_{IN(+)} - I_{IN(-)}$, $V_{CM} = 0\text{V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$	2	10		nA
Input Common-Mode Voltage Range (Note 7)	$V^+ = 30\text{V}$, (LM2902, $V^+ = 26\text{V}$), $T_A = 25^\circ\text{C}$	0		$V^+ - 1.5$	V
Supply Current	Over Full Temperature Range $R_L = \infty$ On All Op Amps $V^+ = 30\text{V}$ (LM2902 $V^+ = 26\text{V}$) $V^+ = 5\text{V}$		1.5 0.7	3 1.2	mA
Large Signal Voltage Gain	$V^+ = 15\text{V}$, $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$, ($V_O = 1\text{V}$ to 11V), $T_A = 25^\circ\text{C}$	50	100		V/mV
Common-Mode Rejection Ratio	DC, $V_{CM} = 0\text{V}$ to $V^+ - 1.5\text{V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$	70	85		dB
Power Supply Rejection Ratio	$V^+ = 5\text{V}$ to 30V (LM2902, $V^+ = 5\text{V}$ to 26V), $T_A = 25^\circ\text{C}$	65	100		dB

1.10 Características Principais dos AMPOP's

Parameter	Conditions	LM124A			Units
		Min	Typ	Max	
Output Current	Source	$V_{IN}^+ = 1V, V_{IN}^- = 0V,$ $V^+ = 15V, V_O = 2V, T_A = 25^\circ C$			mA
	Sink	$V_{IN}^- = 1V, V_{IN}^+ = 0V,$ $V^+ = 15V, V_O = 2V, T_A = 25^\circ C$			
			$V_{IN}^- = 1V, V_{IN}^+ = 0V,$ $V^+ = 15V, V_O = 200\text{ mV}, T_A = 25^\circ C$		
Short Circuit to Ground	(Note 2) $V^+ = 15V, T_A = 25^\circ C$	40	60		mA
Output Voltage Swing	V_{OH}	$V^+ = 30V$	$R_L = 2\text{ k}\Omega$		V
		(LM2902, $V^+ = 26V$)	$R_L = 10\text{ k}\Omega$		
	V_{OL}	$V^+ = 5V, R_L = 10\text{ k}\Omega$	5	20	