

1. Par diferencial MOS (2+2+2+2+2)

A figura apresenta um andar de amplificação diferencial NMOS onde $V_{DD} = -V_{SS} = +3V$, $R_D = 2k\Omega$. Os transístores NMOS têm $K_n = 1mA/V^2$, $V_t = 1V$, $\lambda = 0.01V^{-1}$, e os transístores bipolares têm $V_{BEon} = 0.7V$, $\beta = 100$ e $V_A = 50V$.

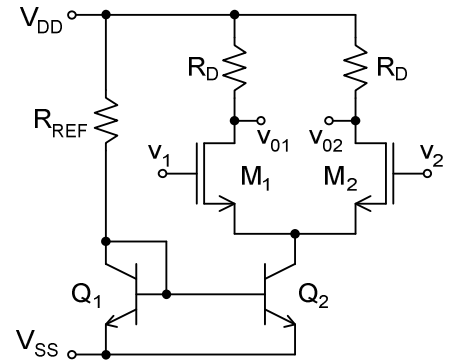
a) Dimensione a resistência R_{REF} de modo que, no PFR com $v_1 = v_2 = 1V$, se tenha $I_{D1} = I_{D2} = 1mA$. Nestas condições calcule as correntes (I_D, I_C) as tensões (V_{GS}, V_{DS}, V_{CE}) em todos os transístores.

b) Calcule o ganho de tensão v_{01}/v_d , v_{02}/v_d e $(v_{01} - v_{02})/v_d$, onde v_d é a tensão de entrada diferencial.

c) Calcule o ganho de tensão v_{01}/v_c , v_{02}/v_c e $(v_{01} - v_{02})/v_c$, onde v_c é a tensão de entrada de modo comum (despreze r_0 de M_1 e M_2).

d) Calcule o valor do CMRR em relação à saída v_{01} do amplificador. Sugira uma alteração ao circuito que melhore este valor.

e) Calcule os limites da tensão de modo comum, $v_c = v_1 = v_2$, que permitem que o amplificador funcione correctamente.



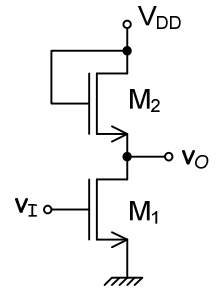
2. Inversor NMOS (1.5+2+1.5)

A figura apresenta um circuito digital NMOS, onde $V_{DD} = 5V$, $K_1 = 8mA/V^2$, $K_2 = 2mA/V^2$ e $V_{t1} = V_{t2} = 1V$.

a) Desenhe um esboço da característica de transferência $v_0(v_1)$, indicando as diferentes zonas de funcionamento dos transístores. Calcule V_{OH} , V_{OL} .

b) Calcule t_{pHL} considerando uma carga $C_L = 1pF$. Justificando a sua resposta e admitindo uma implementação em circuito integrado, indique se os transístores têm efeito de corpo.

c) Desenhe o circuito lógico da mesma família do inversor dado que implementa a função lógica $Y = \overline{(X_1 + X_2)X_3 + X_4}$. Dimensione os parâmetros K_n dos vários transístores para que o circuito nunca seja mais lento a comutar que o inversor dado.



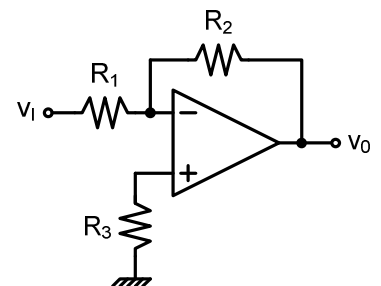
3. Amplificador operacional (1.5+2+1.5)

Considere o circuito da figura onde o AMPOP é ideal, $R_2 = 10k\Omega$ e $R_3 = 1k\Omega$.

a) Dimensione o valor de R_1 para que o ganho de tensão do circuito seja igual a -10. Qual o valor da resistência de entrada do circuito?

b) Admitindo que o AMPOP tem $V_{OS} = 5mV$, $I_B = 10\mu A$, $I_{OS} = 2\mu A$, obtenha a expressão e o valor de v_0 na zona linear de funcionamento para $v_I = 0$.

c) Redimensione o valor de R_3 para que a influência das correntes de polarização e da tensão de desvio na saída v_0 seja nula.



Formulário

- MOSFET**

$$i_D = k_n (v_{GS} - V_t)^2 \quad i_D = k_n [2(v_{GS} - V_t)v_{DS} - v_{DS}^2] \quad g_m = \frac{2I_D}{V_{GS} - V_t} \quad r_0 = \frac{1}{\lambda I_D}$$

$$k_n = \frac{1}{2} \mu_n C_{OX} \frac{W}{L} \quad k_p = \frac{1}{2} \mu_p C_{OX} \frac{W}{L}$$

- TJB**

$$i_C = I_S e^{v_{BE}/V_T} \quad g_m = \frac{I_C}{V_T} \quad r_\pi = \frac{\beta}{g_m} \quad r_0 = \frac{V_A}{I_C} \quad V_T = 25mV$$

- AMPOP**

$$I_B = \frac{I_1 + I_2}{2} \quad I_{OS} = I_1 - I_2$$

1a) $I_{D1} = I_{D2} \Rightarrow I_{C2} = 2 \text{ mA}$ DESPREZANDO $I_{B1,2} \Rightarrow I_{C1} = 2 \text{ mA}$

$$R_{REF} = \frac{V_{DD} - (V_{SS} + V_{BE1})}{I_{C1}} = 2.65 \text{ k}\Omega$$

$$I_{D1} = k_1 (V_{GS1} - V_T)^2 \Rightarrow V_{GS1} = \sqrt{\frac{I_{D1}}{k_1}} + V_T$$

$$V_{GS1} = V_{GS2} = \sqrt{\frac{I_{D1}}{k_1}} + V_T = 2 \text{ V}$$

$$V_{DS1} = V_{DS2} = (V_{DD} - R_D I_{D1}) - (V_1 - V_{GS1}) = 2 \text{ V}$$

$$M_1 \text{ e } M_2 \text{ SATURADOS } (V_{DS} > V_{GS} - V_T)$$

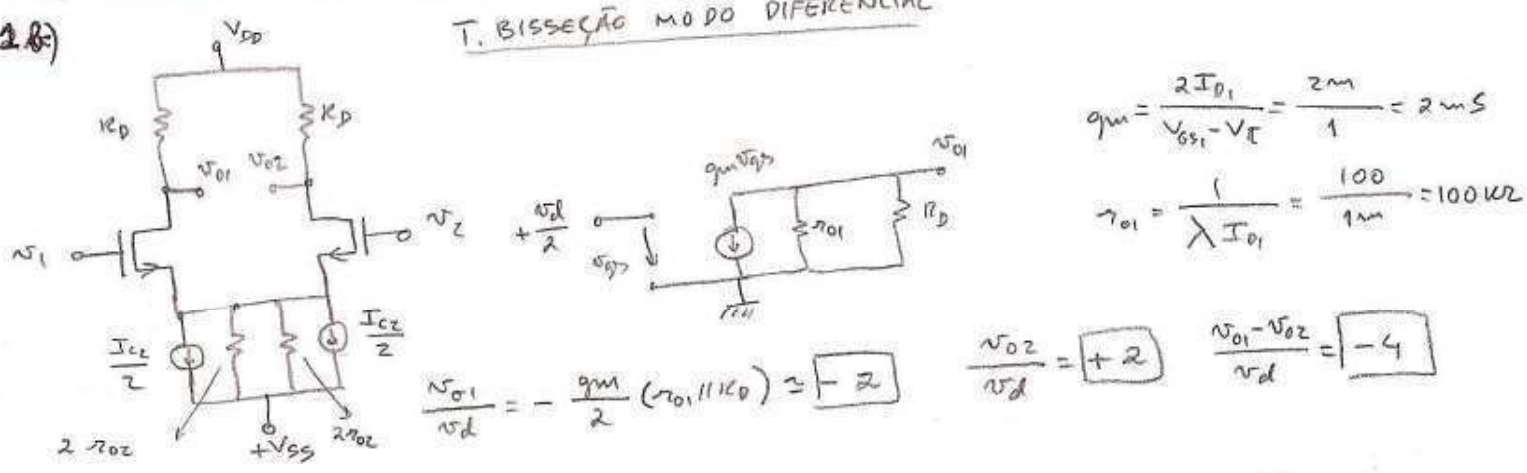
$$V_{CE1} = V_{BE1} = 0.7 \text{ V}$$

$$V_{CE2} = (V_1 - V_{GS1}) - V_{SS}$$

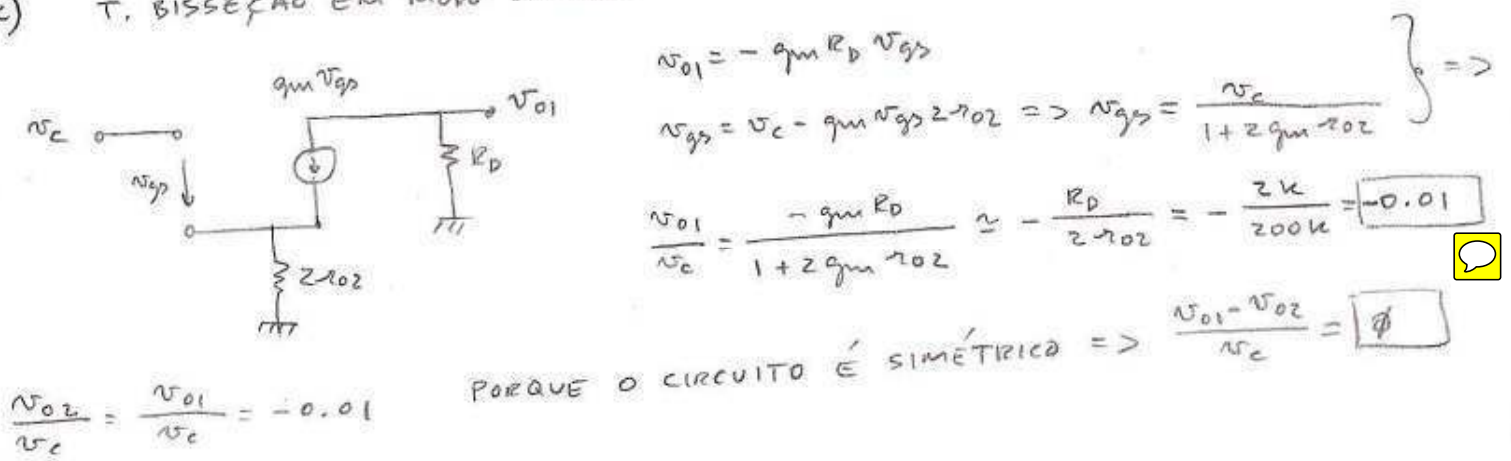
$$= 2 \text{ V}$$

$$Q_1 \text{ e } Q_2 \text{ NA Z. ACTIVA } (V_{CE} > V_{BE})$$

1b) T. BISSEÇÃO MODO DIFERENCIAL

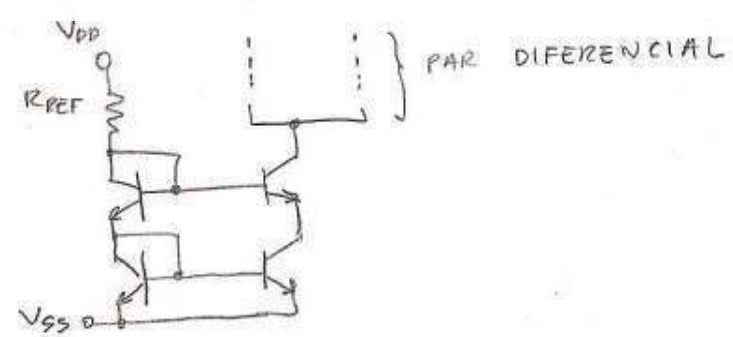


1c) T. BISSEÇÃO EM MODO COMUM



1d) $CMRR = \frac{A_{d01}}{A_{c01}} = \frac{-2}{-0.01} = 200 = 46 \text{ dB}$ PARA MELHORAR CMRR \Rightarrow

\Rightarrow DIMINUIR $A_{c01} \Rightarrow$ AUMENTAR $r_{02} \Rightarrow$ FONTE CASCODE.



1e) LIMITE MÍNIMO (ZONA ATIVA DE Q2)

$$V_{CE2 \min} = 0,7V \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_C \min = V_{SS} + V_{CE2 \min} +$$

$$+ V_{GS1} = \boxed{-0,3V}$$

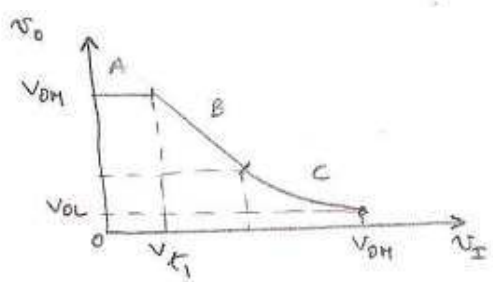
LIMITE MÁXIMO (ZONA DE SATURAÇÃO DE M1 e M2)

$$V_{DS \min} = V_{GS} - V_t = 1V$$

$$V_{D1} = V_{DD} - R_D I_{D1} = 1V \Rightarrow V_{S1 \max} = 0V$$

$$\Rightarrow V_1 \max = \boxed{2V}$$

2a)



A → M1 CORTE, M2 CORTE

B → M1 SAT, M2 SAT.

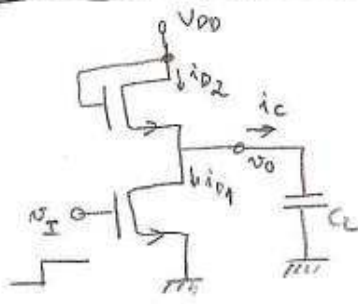
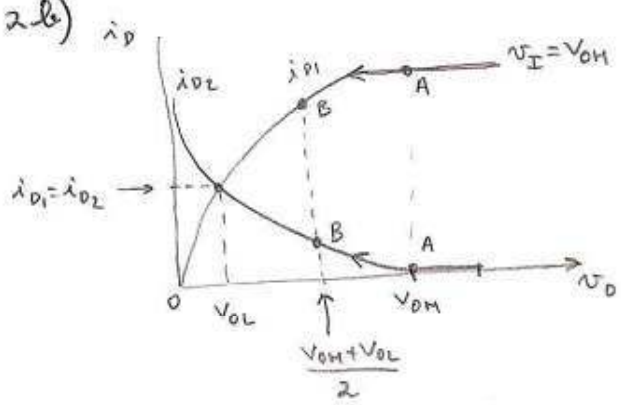
C → M1 TRIODO, M2 SAT

$$V_{OH} = V_{DD} - V_{t2} = \boxed{4V}$$

$$\left. \begin{array}{l} i_{D1} = i_{D2} \\ v_i = V_{OH} \\ v_o = V_{OL} \end{array} \right\} \Rightarrow k_1 [2(V_{OH} - V_{t1})V_{OL} - V_{OL}^2] = k_2 (V_{DD} - V_{OL} - V_{t2})^2 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 4 [6V_{OL} - V_{OL}^2] = (4 - V_{OL})^2 \Rightarrow V_{OL} = \cancel{5,85V} \text{ OU } \boxed{V_{OL} = 0,547V} \text{ CONFIRMA M1 TRIODO}$$

2b)



$$i_c(AV) = \frac{i_c(A) + i_c(B)}{2}$$

$$i_c(A) = -i_{D1}(A)$$

$$i_c(B) = i_{D2}(B) - i_{D1}(B)$$

NO PONTO B $v_o = \frac{V_{OH} + V_{OL}}{2} = 2,27V \Rightarrow$
 \Rightarrow M1 TRIODO

$$i_c(A) = -k_1 (V_{OH} - V_{t1})^2 = -7,2 \text{ mA}$$

$$i_{D1}(B) = k_1 \left[2(V_{OH} - V_{t1}) \frac{V_{OH} + V_{OL}}{2} - \left(\frac{V_{OH} + V_{OL}}{2} \right)^2 \right] = 67,7 \text{ mA} \left. \vphantom{i_{D1}(B)} \right\} i_c(B) = -61,71 \text{ mA}$$

$$i_{D2}(B) = k_2 \left[V_{DD} - \frac{V_{OH} + V_{OL}}{2} - V_{t2} \right]^2 = 5,99 \text{ mA}$$

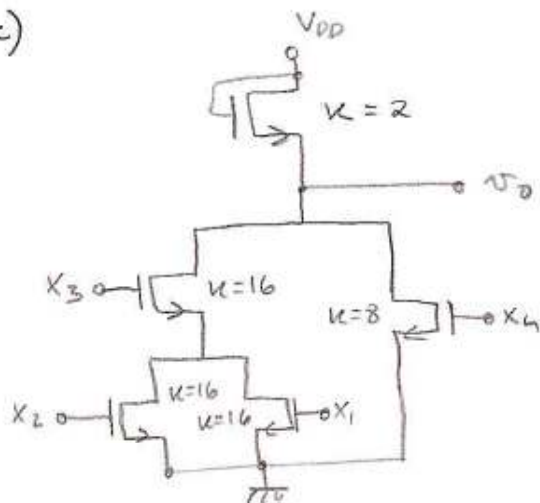
$$i_c(AV) = -66,86 \text{ mA}$$

$$i_c = C_L \frac{dv_o}{dt} \rightarrow |i_c(AV)| = C_L \frac{V_{OH} - \left(\frac{V_{OH} + V_{OL}}{2} \right)}{\tau_{PHL}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \tau_{PHL} = \boxed{25,9 \mu s}$$

M1 NÃO TEM EFEITO DE CORPO PQ. $V_B = V_S = \phi$.
M2 TEM EFEITO DE CORPO PQ. $V_B = \phi \text{ E } V_S = v_o$
 $\Rightarrow V_{BS} \neq \phi$.

2c)



3a) com A.O. IDEAL

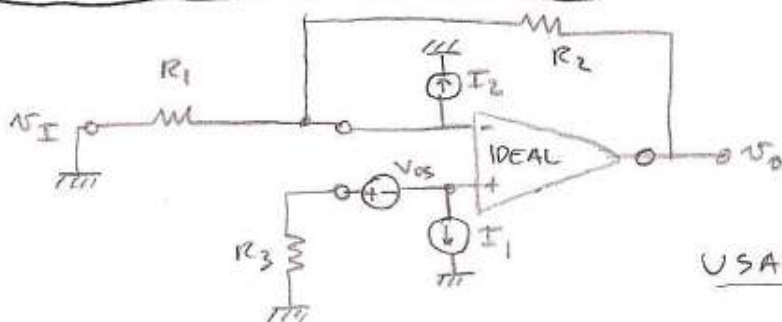
$I_+ = \phi \Rightarrow V_+ = \phi \Rightarrow$ MONTAGEM INVERSORA \Rightarrow

$$G_V = -\frac{R_2}{R_1} = -10 \Rightarrow R_1 = \boxed{1\text{ k}\Omega}$$

$$R_{in} = \frac{V_i}{I_i} = R_1 = 1\text{ k}\Omega \text{ PORQUE}$$

V_- É MASSA VIRTUAL.

3b)



$$I_1 = I_B + \frac{I_{os}}{2} = 11 \mu\text{A}$$

$$I_2 = I_B - \frac{I_{os}}{2} = 9 \mu\text{A}$$

USANDO O T. DA SOBREPÓSICÃO

$$\textcircled{I_1} \rightarrow v_{o1} = -I_1 R_3 \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \quad \textcircled{I_2} \rightarrow v_{o2} = +R_2 I_2$$

$$\textcircled{V_{os}} \rightarrow v_{o3} = -V_{os} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \quad v_o = v_{o1} + v_{o2} + v_{o3} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \boxed{v_o = R_2 I_2 - \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) (V_{os} + I_1 R_3)}$$

$$\boxed{v_o = -86\text{ mV}}$$

3c) $v_o = \phi \Rightarrow R_2 I_2 = \underbrace{\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)}_{11} (V_{os} + I_1 R_3) \Rightarrow$

$$\Rightarrow R_3 = \frac{R_2 I_2 / 11 - V_{os}}{I_1} = \boxed{289.26 \Omega}$$