

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 $k_n = 1mA/V^2$, $V_t = 1V$, $\lambda = 0.01V^{-1}$.

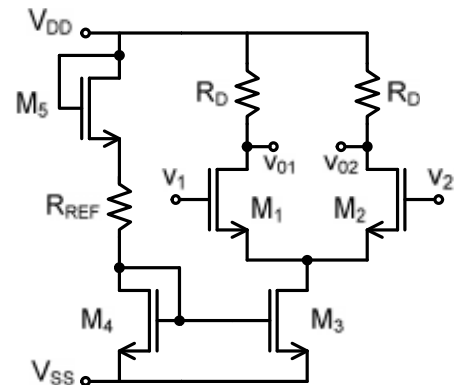
a) Dimensione a resistência R_{REF} de modo que, no PFR com $v_1 = v_2 = 1V$, se tenha $I_{D1} = I_{D2} = 1mA$. Nestas condições calcule as correntes (I_D) as tensões (V_{GS}, V_{DS}) em todos os transístores.

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).

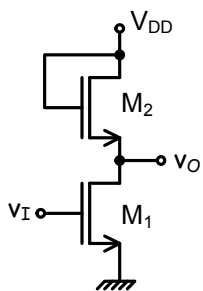
d) Calcule o valor do CMRR em relação à saída v_{01} do amplificador. Sugira uma alteração ao circuito que melhore este valor.

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



2. Circuitos digitais MOS (2+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 $v_o(v_i)$, indicando as diferentes zonas de funcionamento dos transístores. Calcule os pontos limites entre essas zonas.

b) Calcule V_{OH} e V_{OL} , e explique os seus significados.

c) Justificando a sua resposta e admitindo uma implementação em circuito integrado, indique se os transístores têm efeito de corpo. Qual a influência deste efeito na característica da alínea a).

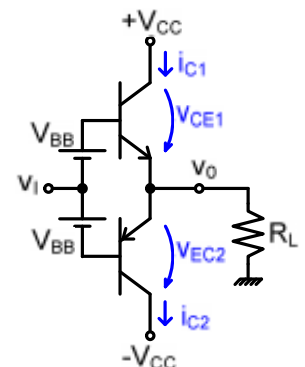
3. Andar de potência (1.5+1.5+1.5)

A figura apresenta um andar de amplificação de potência *push-pull*, onde os transístores TJB têm $V_{BEon} = V_{EBon} = 0.7V$ e $V_{CEsat} = V_{ECsat} = 0.2V$, e os restantes elementos $V_{CC} = 5V$, $V_{BB} = 0.7V$ e $R_L = 48\Omega$. Admita que os transístores são lineares até estarem fortemente saturados.

a) Calcule os valores máximo e mínimo que v_o pode atingir. Desenhe a característica $v_o(v_i)$ do circuito indicando os valores dos pontos notáveis.

b) Desenhe as formas de onda de v_i , v_o , v_{EC2} e i_{C2} , que conduzem à situação de excursão máxima na saída, admitindo uma excitação sinusoidal em v_i . Indique os valores máximos e mínimos das formas de onda.

c) Calcule o valor da potência na carga, P_L , nas condições da alínea b). Diga qual a classe de amplificação de funcionamento dos transístores e qual a razão para se usarem as fontes V_{BB} . Justifique as suas respostas.



Formulário

- **MOSFET**

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

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

- **TJB**

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

1a) $I_{D1} = I_{D2} = 1 \text{ mA} \Rightarrow I_{D3} = 2 \text{ mA} \Rightarrow I_{D4} = I_{D5} = 2 \text{ mA}$

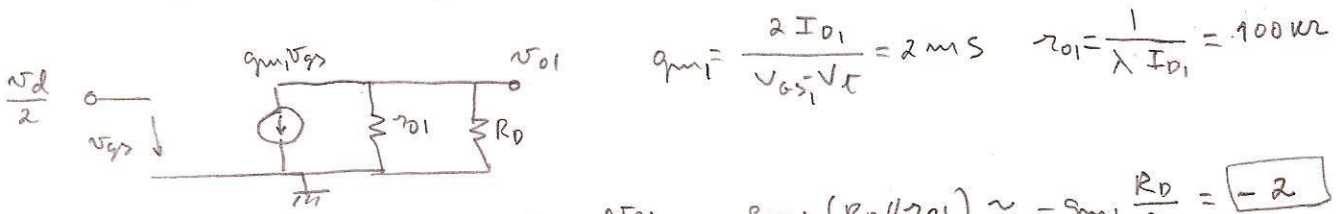
$V_{GS5} = V_{GS4} = \sqrt{\frac{I_{D5}}{\mu_n}} + V_t = \sqrt{\frac{2 \text{ mA}}{1 \text{ mA}}} + 1 = 2.41 \text{ V} = V_{GS3}$ $V_{GS1} = V_{GS2} = \sqrt{\frac{I_{D1}}{\mu_n}} + 1 = 2 \text{ V}$

$R_{REF} = \frac{V_{DD} - (V_{GS5} + V_{GS4}) - V_{SS}}{I_{D4}} = 1.172 \text{ k}\Omega$ $V_{S1} = V_1 - V_{GS2} = 1 - 2 = -1 \text{ V}$

$V_{DS3} = V_{S1} - V_{SS} = -1 + 3 = 2 \text{ V}$ $V_{DS5} = V_{DS4} = V_{GS5} = 2.41 \text{ V}$ $V_{D1} = V_{D2} = V_{DD} - R_D I_{D1} = 1 \text{ V}$

$V_{DS2} = V_{DS1} = V_{D1} - V_{S1} = 2 \text{ V}$ OS TRANSISTORES ESTÃO TODOS NA ZONA DE SATURAÇÃO PORQUE $V_{DSi} > V_{GSi} - V_t$

1b) USANDO O T. BISSEÇÃO MODO DIFERENCIAL

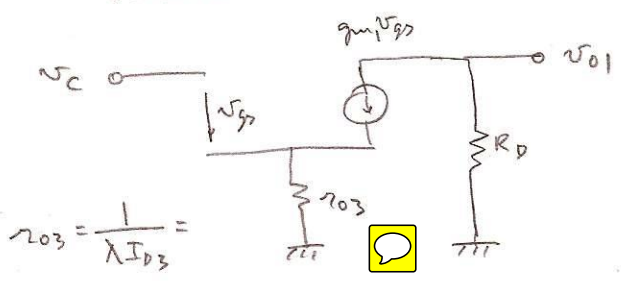


$g_{m1} = \frac{2 I_{D1}}{V_{GS1} - V_t} = 2 \text{ mS}$ $r_{o1} = \frac{1}{\lambda I_{D1}} = 100 \text{ k}\Omega$

$v_{01} = -(R_D || r_{o1}) g_{m1} \frac{v_d}{2} \Rightarrow \frac{v_{01}}{v_d} = -\frac{g_{m1}}{2} (R_D || r_{o1}) \approx -g_{m1} \frac{R_D}{2} = -2$

$\frac{v_{02}}{v_d} \approx +g_{m2} \frac{R_D}{2} = +2$ $\frac{v_{01} - v_{02}}{v_d} = -4$

1c) USANDO O T. BISSEÇÃO MODO COMUM

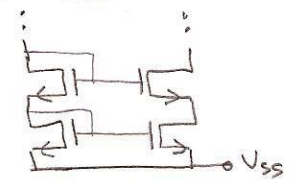


$v_{01} = -g_{m1} V_{gs} R_D$ $V_{gs} = v_c - r_{o3} g_{m1} V_{gs} \Rightarrow V_{gs} = \frac{v_c}{1 + r_{o3} g_{m1}}$

$r_{o3} = \frac{1}{\lambda I_{D3}} = 50 \text{ k}\Omega$ $\Rightarrow \frac{v_{01}}{v_c} = -\frac{g_{m1} R_D}{1 + r_{o3} g_{m1}} \approx -\frac{R_D}{r_{o3}} = -0.04$

$\frac{v_{02}}{v_c} \approx -\frac{R_D}{r_{o3}} = -0.04$ $\frac{v_{01} - v_{02}}{v_c} = \emptyset$

1d) $CMRR = \left| \frac{A_d}{A_c} \right| = \left| \frac{v_{01}/v_d}{v_{01}/v_c} \right| = \frac{2}{0.04} = 50 = 34 \text{ dB}$



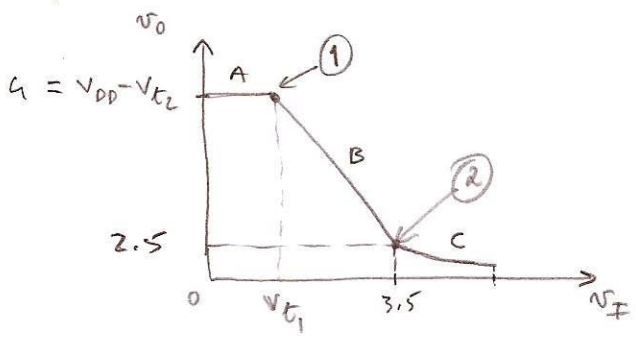
TRANSFORMAR A FONTE DE CORRENTE NUMA FONTE CASCODE PARA AUMENTAR A RESISTÊNCIA DE SAÍDA.

1e) v_c mínimo \rightarrow TRIODO DE M_3

$V_{DS3}(\text{min}) = V_{GS3} - V_t = 1.41 \text{ V}$
 $v_c(\text{min}) = V_{SS} + V_{DS3}(\text{min}) + V_{GS1} = 0.41 \text{ V}$

v_c máximo \rightarrow TRIODO DE $M_{1,2}$
 $V_{DS1}(\text{min}) = V_{GS1} - V_t = 1 \text{ V}$
 $v_c(\text{máx}) = V_{D1} - V_{DS1}(\text{min}) + V_{GS1} = 2 \text{ V}$

2a)



ZONAS	M ₁	M ₂
A	CORT	CORT
B	SAT	SAT
C	TRIO	SAT

PONTO 1:

$v_I = v_{t1} = 1V$

$v_O = V_{DD} - V_{t2} = 4V$

PONTO 2:

$i_{D1} = i_{D2} \Rightarrow k_1 (v_I - v_{t1})^2 = k_2 (V_{DD} - v_O - v_{t2})^2$

$\Rightarrow 2(v_I - 1) = 4 - v_O \Rightarrow v_O = 6 - v_I$ COMO EM 2) $v_O = v_I - 1 \Rightarrow$

$\Rightarrow v_I = 3.5V \Rightarrow v_O = 2.5V$

2b)

$V_{OH} = V_{DD} - V_{t2} = 4V$ QUANDO $v_I = V_{OH} \Rightarrow v_O = V_{OL}$ COMO $V_{OH} > 3.5V$

$\Rightarrow V_{OL}$ ESTÁ NA ZONA C. $i_{D1} = i_{D2} \Rightarrow k_1 [2(V_{OH} - v_t) V_{OL} - V_{OL}^2] = k_2 (V_{DD} - V_{OL} - v_t)^2$

$\Rightarrow 5V_{OL}^2 - 32V_{OL} + 16 = 0 \Rightarrow V_{OL} = 5.85V \Rightarrow V_{OL} = 0.5467V$

2c)

M₁ NÃO TEM EFEITO DE CORPO PORQUE $V_{SB} = \phi$.

M₂ TEM EFEITO DE CORPO PORQUE $V_{SB} > \phi$.

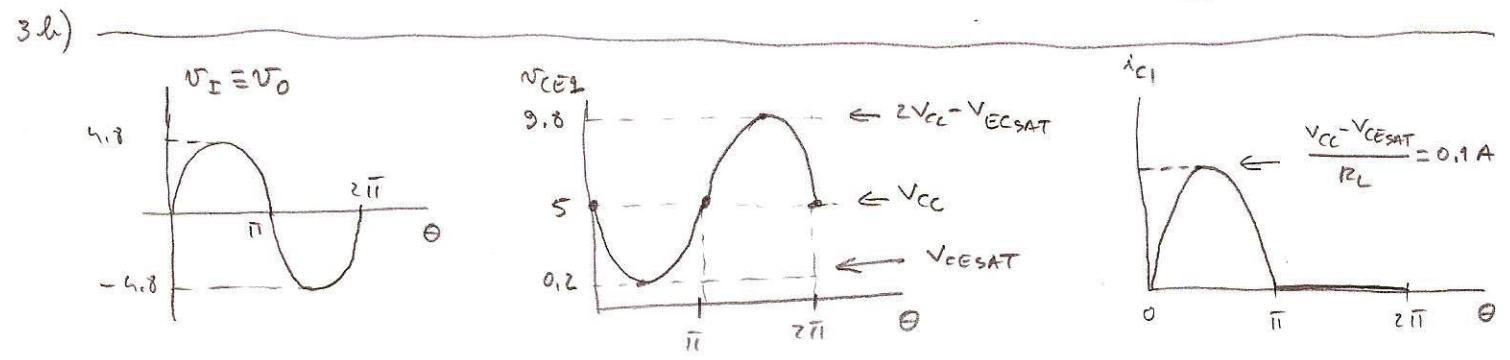
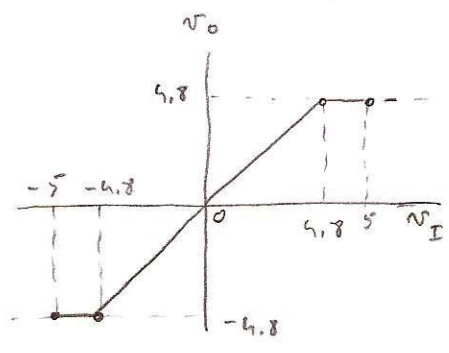
V_{t2} MAIOR $\Rightarrow V_{OH}$ MENOR $\Rightarrow NM_H$ MENOR.

" \Rightarrow ZONA B CÍ MENOS DECLIVE $\Rightarrow V_{OL}$ MAIOR.

3a)

$$V_o(\max) = V_{CC} - V_{CE\text{SAT}} = 4.8\text{V}$$

$$V_o(\min) = -V_{CC} + V_{CE\text{SAT}} = -4.8\text{V}$$



3c)

$$P_L = \frac{1}{2} \frac{V_o^2}{R_L} = \frac{1}{2} \frac{4.8^2}{48} = 0.24\text{W}$$

A RAZÃO PARA A INCLUSÃO DOS V_{BB} É EVITAR A DISTORÇÃO DE CRUZAMENTO.

COM $V_{BB} = \phi$ HAVERIA UMA ZONA MORTA PARA $|V_i| \leq 0.7$ ONDE $V_o = \phi$.

• ESTÃO A FUNCIONAR EM CLASSE B POIS SÓ CONDUZEM METADE DO PERÍODO.