

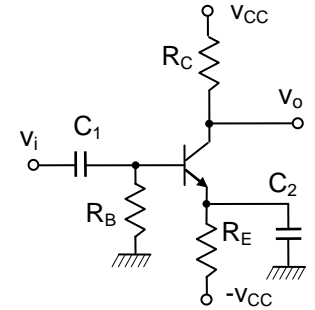
Atenção:

O exame é sem consulta

Justifique as respostas

**Problema 1**

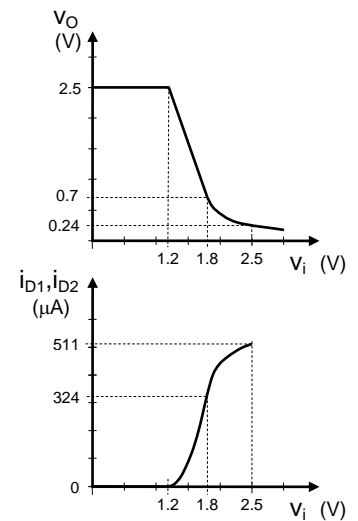
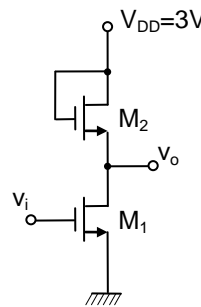
Considere o amplificador da figura com  $V_{CC}=5V$ ,  $R_E=1k\Omega$ ,  $Q_1: \beta_f=100$ ,  $V_A=50V$ ,  $V_{BEon}=0.7V$ ,  $V_{CEsat}=0.2V$ ,  $C_\pi=10pF$ .



- 1 a) Dimensione  $R_B$  e  $R_C$  de forma a que  $I_C=1mA$  e  $V_{CE}=2V$ .
- 2.5 b) Calcule os parâmetros do modelo incremental do transistor, desenhe o esquema incremental do circuito e determine o ganho de tensão  $G_V=v_o/v_i$ , a resistência de entrada  $R_i$  e a resistência de saída do circuito  $R_o$ .
- 1.5 c) Dimensione o valor do condensador  $C_3$  a colocar entre a base e a massa de modo a que o polo dominante de alta frequência seja  $f_H=1MHz$ .
- 1 d) Compare as vantagens e os inconvenientes dos amplificadores de potência em Classe A, Classe B e Classe AB.

**Problema 2**

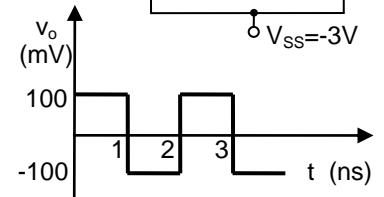
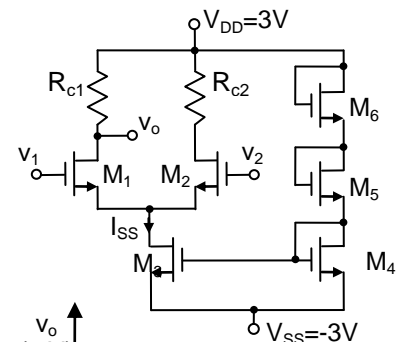
Considere o inversor nMOS da figura, assim como os gráficos da tensão de saída  $v_o$  e da corrente nos transistores ( $i_{D1}$ ,  $i_{D2}$ ) em função da tensão de entrada ( $v_i$ ).



- 3 a) Determine as características dos dois transistores ( $M_1$  e  $M_2$ ):  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $V_{T1}$  e  $V_{T2}$ . Indique as zonas de funcionamento dos dois transistores nos diversos troços dos gráficos e justifique a razão de  $v_o(v_i)$  ser um troço de recta para  $1.2 < v_i < 1.8V$ .
- 1 b) Calcule os valores de  $V_{OH}$ ,  $V_{OL}$ ,  $V_{IL}$  e  $NM_L$ . Explique como calculava  $V_{IH}$  e  $NM_H$ .
- 1 c) Determine a potência estática do circuito e compare-a com a potência estática dos circuitos digitais CMOS.
- 1.5 d) Desenhe um circuito da mesma família do inversor nMOS da figura que realize a função lógica  $Y=X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 + X_4 \cdot X_5 + X_6$ . Dimensione os transistores do circuito para que este nunca seja mais lento a comutar que o circuito da figura (se não resolveu a alínea a) considere  $k_1=1mA/V^2$  e  $k_2=0.1mA/V^2$ ).

**Problema 3**

Considere o amplificador diferencial da figura e a respectiva fonte de corrente ( $R_{C1}=R_{C2}=100k\Omega$ ,  $M_{1..6}: VT=1V$ ,  $k=2mA/V^2$ ,  $\lambda=0.01V^{-1}$ )



- 2 a) Calcule a corrente  $I_{SS}$  da fonte de corrente do par diferencial e a sua resistência dinâmica.
- 3 b) Determine o ganho diferencial  $A_d=v_o/v_d$ , com  $v_d=v_1-v_2$  e o ganho comum  $A_c=v_o/v_c$ , com  $v_c=(v_1+v_2)/2$ . Calcule a taxa de rejeição de modo comum (CMRR), apresentando o resultado em dB.  
NOTA: No cálculo de  $A_c$  considere  $\lambda=0$  para  $M_1$  e  $M_2$ .
- 1.5 c) Considere que na saída o circuito tem o sinal  $v_o(t)$  da figura. Represente a forma de onda do sinal de saída  $v_o(t)$  quando esta é carregada com uma capacidade de  $5pF$  e identifique qual a limitação que o condensador impõe na resposta do par diferencial.
- 1 d) Explique em que consistem e qual a origem da tensão de offset, da corrente de polarização e da corrente de offset de um amplificador operacional.

**Formulário:**

$$i_D = k(v_{GS} - V_T)^2$$

$$v_{GS} > V_T, v_{DS} > V_{GS} - V_T$$

$$i_C = I_S e^{v_{BE}/V_T}; \quad V_T = 25mV$$

$$i_D = k[2(v_{GS} - V_T)v_{DS} - v_{DS}^2]$$

$$v_{GS} > V_T, v_{DS} < V_{GS} - V_T$$

$$g_m = \frac{I_C}{V_T} \quad r_\pi = \frac{\beta}{g_m} \quad r_o = \frac{V_A}{I_C}$$

$$g_m = 2k(v_{GS} - V_T) = 2\sqrt{kI_D} \quad r_o = \frac{1}{\lambda I_D}$$

# ELECTRÓNICA I

2014/2015-

1º EXAME

11/6/2015

## Problema 1

a)

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

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

$$R_C = \frac{2V_{CC} - V_{CE} - R_E \frac{\beta + 1}{\beta} I_C}{I_C}$$

$$R_C = 6.99 \text{ k}\Omega$$

$$R_B I_B + V_{BEON} + R_E I_E - V_{CC} = 0$$

$$I_B = \frac{I_C}{\beta}$$

$$R_B = \frac{V_{CC} - V_{BEON} - R_E \frac{\beta + 1}{\beta} I_C}{I_C / \beta}$$

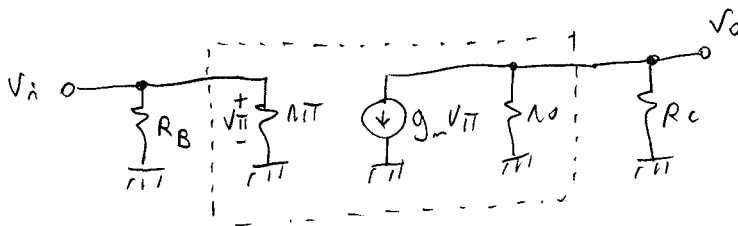
$$R_E = 329 \text{ k}\Omega$$

b)

$$g_m = \frac{I_C}{V_T} = 40 \text{ mS}$$

$$r_{\pi} = \frac{\beta}{g_m} = 2.5 \text{ k}\Omega$$

$$r_o = \frac{V_A}{I_C} = 50 \text{ k}\Omega$$



$$v_{\pi} = v_i$$

$$A_V = \frac{v_o}{v_i} = -g_m (R_C \parallel r_o)$$

$$A_V = -245$$

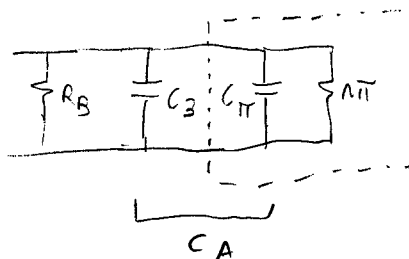
$$R_i = \frac{v_i}{i_i} = R_B \parallel r_{\pi}$$

$$R_i = 2.481 \text{ k}\Omega$$

$$R_o = \left. \frac{v_o}{i_o} \right|_{v_i=0} = R_C \parallel r_o$$

$$R_o = 6.132 \text{ k}\Omega$$

c)



$$\frac{1}{\omega_H} = \sum R_{k0} C_k$$

$$\begin{cases} R_{A0} = R_B \parallel r_{\pi} = 2.481 \text{ k}\Omega \\ C_A = C_3 + C_{\pi} \Rightarrow C_3 = C_A - C_{\pi} \end{cases}$$

$$\frac{1}{2\pi \omega_H} = R_{A0} C_A$$

$$C_A = \frac{1}{R_{A0} 2\pi \omega_H} = 64.75 \text{ pF}$$

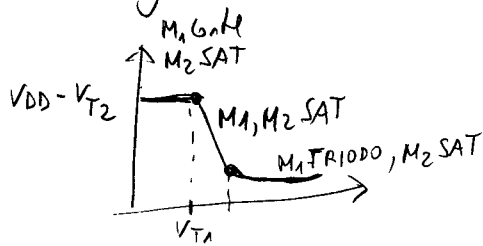
$$C_3 = 54.15 \text{ pF}$$

d)

	A	B	AB
Vantagens	Bom linearidade	Rendimento melhor $\leq 78.5\%$	Linearidade inferior sem distorções de conjugamento
Inconvenientes	Baixo rendimento $\leq 25\%$	Distorções de conjugamento	Pior rendimento que B

## Problema 2

a)  $M_2$  sempre saturado  $\Rightarrow M_2$  sempre saturado



$M_1$  sempre  $\Rightarrow V_{GS1} = V_I < V_{T1}$

$$\Rightarrow \boxed{V_{T1} = 1.2V}$$

$$V_{Omax} = V_{DD} - V_{T2} \Rightarrow \boxed{V_{T2} = 0.5V}$$

Para  $V_I = 1.8V \Rightarrow M_1, M_2$  SAT:  $\begin{cases} i_{D1} = K_1 (V_I - V_{T1})^2 \\ i_{D1} = i_{D2} = 324 \mu A \\ i_{D2} = K_2 (V_{DD} - V_O - V_{T2})^2 \end{cases}$

$$\Rightarrow \begin{cases} \boxed{K_1 = 900 \mu A V^{-2}} \\ \boxed{K_2 = 100 \mu A V^{-2}} \end{cases}$$

$$1.2 < V_I < 1.8V \Rightarrow M_1, M_2 \text{ SAT} \Rightarrow K_1 (V_I - V_{T1})^2 = K_2 (V_{DD} - V_O - V_{T2})^2$$

$$V_O = V_{DD} - V_{T2} + \sqrt{\frac{K_1}{K_2}} V_{T1} - \sqrt{\frac{K_1}{K_2}} V_I$$

$$\underline{V_O = 6.1 - 3V_I} \quad \text{linear e } \underline{g_{mL} = -3}$$

b)  $\underline{V_{OH} = 2.5V}$  ,  $\underline{V_{OL} = 0.24V}$

$$\left. \frac{dV_O}{dV_I} \right|_{V_I=1.2} = 0$$

$$\left. \frac{dV_O}{dV_I} \right|_{V_I=1.2+} = -3$$

$$\Rightarrow \underline{V_{IL} = 1.2V}$$

$$NML = V_{IL} - V_{OL} = 0.96V$$

Cálculo de  $V_{IH}$ :  $M_1$  TRIODO  
 $M_2$  SAT

$$\begin{cases} i_{D1} = i_{D2} \\ \frac{di_{D1}}{dV_I} = \frac{di_{D2}}{dV_I} \leftarrow \frac{dV_O}{dV_I} = -1 \end{cases}$$

Do sistema de duas equações anteriores substituindo

$$\frac{dV_O}{dV_I} = -1 \quad \text{obtem-se } V_I = V_{IH} \quad \text{e} \quad NMH = V_{OH} - V_{IH}$$

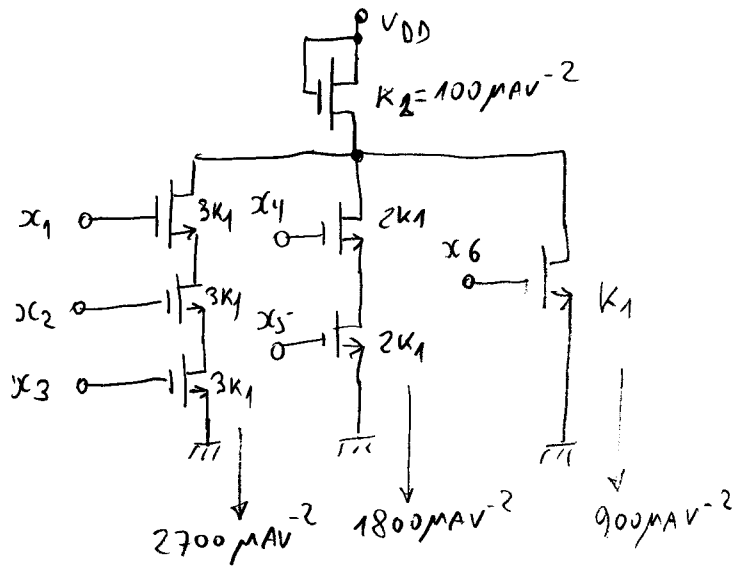
c)  $P_D = \frac{1}{2} (P_{DH} + P_{DL})$

$$P_{DH} = 0 \quad \text{pois } i_{D1} = i_{D2} = 0$$

$$P_{DL} = V_{DD} i_D = (3V) \times (511 \mu A) = 1.533 \text{ mW}$$

$$\boxed{P_D = 0.767 \text{ mW}}$$

d)



Problem 3

a)  $V_{GS6} = V_{GS5} = V_{GS4} = V_{GS3} \Rightarrow I_{D6} = I_{D5} = I_{D4} = I_{D3} = I_{SS}$

Como  $V_{DD} = V_{GS6} + V_{GS5} + V_{GS4} \Rightarrow V_{GS6} = V_{GS5} = V_{GS4} = \frac{V_{DD} - V_{GS5}}{3} = 2V$

pois transistores iguais

Todos os transistores estão saturados

pois  $V_{GS} = V_{DS} \Rightarrow V_{DS} > V_{GS} - V_T$

$I_{SS} = K(V_{GS} - V_T)^2 = \underline{2mA}$

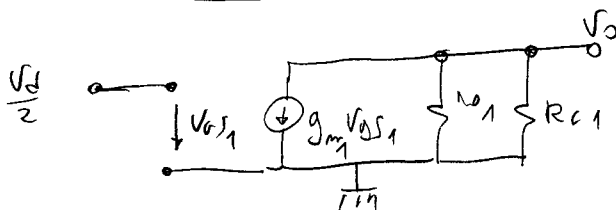
A resistência diminuiu da fonte de corrente e a resistência diminuiu de  $M_3$

$R_0 = r_{o3} = \frac{1}{\lambda I_{SS}} = \underline{50k\Omega}$

b) Utilizando o teorema da bibrânquia:

Gain diferencial

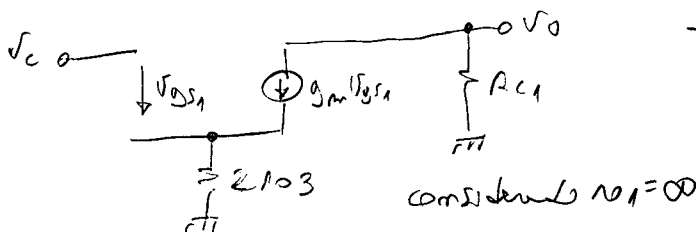
$$\begin{cases} g_{m1,2} = 2\sqrt{K I_D} = 2.83 \text{ mS} \\ r_{o1,2} = \frac{1}{\lambda I_D} = 100k\Omega \end{cases}$$



$V_o = -g_{m1}(r_{o1} || R_{C1}) \frac{V_d}{2}$

$A_d = -\frac{1}{2} g_{m1}(r_{o1} || R_{C1}) = \underline{-70.75}$

Gain modo comum:



$$\begin{cases} V_c = V_{GS1} + g_m V_{GS1} 2R_{O3} \\ V_o = -g_m V_{GS1} R_{C1} \end{cases}$$

$A_C = \frac{V_o}{V_c} = -\frac{g_m R_{C1}}{1 + 2g_m R_{O3}}$

$A_C = \underline{-0.996}$

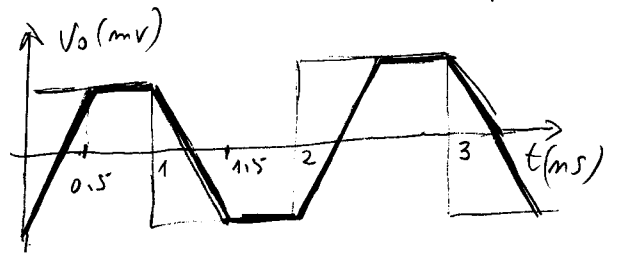
$$CMRR = \left| \frac{A_d}{A_c} \right| = 71 = \underline{37 \text{ dB}}$$

e)  $\left. \frac{dV_o}{dt} \right|_{\text{max}} = \frac{I_{SS}}{C} = 400 \text{ V}/\mu\text{s}$   $\rightarrow$  slew rate  
 $SR = 0.4 \text{ V}/\text{ms}$

a saída tem uma variação total de 200 mV

$$\Delta V = 0.2 \text{ V} \quad \Rightarrow \quad SR = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad \Delta t = \frac{\Delta V}{SR}$$

$$\Delta t = 0.5 \text{ ms}$$



d) Tensão de offset:  $V_{os} = V_1 - V_2$  quando  $V_o = 0$   
 Tem origem nos assimétricos do par diferencial

Corrente de Polarização:

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{I_{B1} + I_{B2}}{2}$$

Tem origem na corrente de polarização do par diferencial quando usados transistores bipolares, pois a corrente de gate dos FETs é nula

Corrente de offset:

$$I_{os} = I_{B1} - I_{B2}$$

Tem origem nos assimétricos do par diferencial quando usados em transistores bipolares.