

PSI3322 – Eletrônica II

2ª PROVA – 06/12/2022

NOTAS : 1ª _____
 2ª _____
 3ª _____
 4ª _____

INSTRUÇÕES IMPORTANTES :

- . Duração da prova: 100 minutos.
- . Sem consulta.
- . Não é permitido o uso de **CALCULADORA**.
- . Responder as questões nos respectivos espaços.

TOTAL : _____

N.USP: _____ NOME: _____

ASSINATURA: _____ PROF.: _____

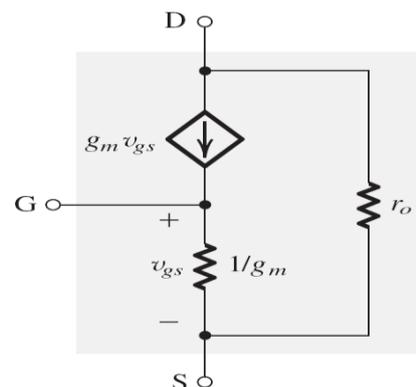
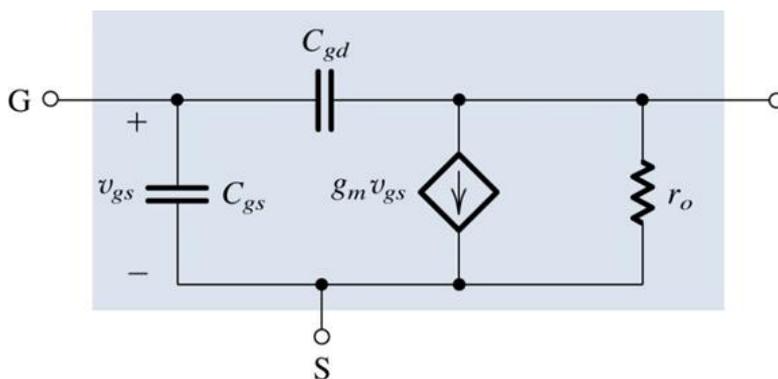
Formulário:

$$i_D = k' \frac{W}{L} \left[(v_{GS} - V_t) \cdot v_{DS} - \frac{v_{DS}^2}{2} \right] \quad \text{região de triodo: } v_{DS} \leq (v_{GS} - V_t) \text{ (NMOS); } v_{DS} \geq (v_{GS} - V_t) \text{ (PMOS)}$$

$$i_D = k' \frac{W}{L} \frac{(v_{GS} - V_t)^2}{2} (1 + \lambda \cdot v_{DS}) \quad \text{região de saturação: } v_{DS} \geq (v_{GS} - V_t) \text{ (NMOS); } v_{DS} \leq (v_{GS} - V_t) \text{ (PMOS)}$$

Onde $k'_n = \frac{\mu_n \epsilon_{ox}}{t_{ox}} = \mu_n \cdot C_{ox}$; $k'_p = \frac{\mu_p \epsilon_{ox}}{t_{ox}} = \mu_p \cdot C_{ox}$; $\lambda = \frac{1}{V_A}$; $V_A = \text{tensão Early}$

$$g_m(\text{sat}) = \left. \frac{di_D}{dv_{GS}} \right|_{v_{GS} = V_{GS}} = k' \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t) = \sqrt{2 \cdot I_D \cdot k' \cdot \frac{W}{L}} = \frac{2 \cdot I_D}{V_{OV}} = \frac{2 \cdot I_D}{V_{GS} - V_t} \quad ; \quad r_o = \frac{|V_A|}{I_D}$$



1ª Questão (2,0 pontos): Dado um inversor CMOS, pede-se:

a) → (1,0): Considerando que a tensão de transição V_{th} seja de 2,0 V, determine a largura do transistor PMOS (W_p) a partir das expressões de corrente fornecidas no formulário.

b) → (1,0): b) Esboce a curva de transferência do inversor CMOS ($V_o \times V_i$) e a curva ($I_D \times V_i$) no mesmo gráfico indicando todos os valores numéricos possíveis para ($V_o \times V_i$) e esboçando nessa mesma curva as definições de margem de ruído em nível baixo (MR_L) e em nível alto (MR_H) (não precisa indicar o valor de MR_L e MR_H). Esboce a curva ($I_D \times V_i$) sobreposta, indicando seu formato e o valor da corrente de dreno máxima e sua posição no eixo V_i .

Dados: $V_{DD} = 3,5 V$, $V_{tn} = 1,0 V$, $V_{tp} = -1,0 V$, $k_n' = 600 \mu A/V^2$, $k_p' = 300 \mu A/V^2$, $W_n = 1,0 \mu m$, $L_n = 0,5 \mu m$, $L_p = 0,5 \mu m$ e $\lambda = 0$.

a)

$$I_{DN SAT} = I_{DP SAT}$$

$$\frac{1}{2} k_n' \frac{W_n}{L_n} (V_{GSN} - V_{tn})^2 = \frac{1}{2} k_p' \frac{W_p}{L_p} (V_{GSP} - V_{tp})^2$$

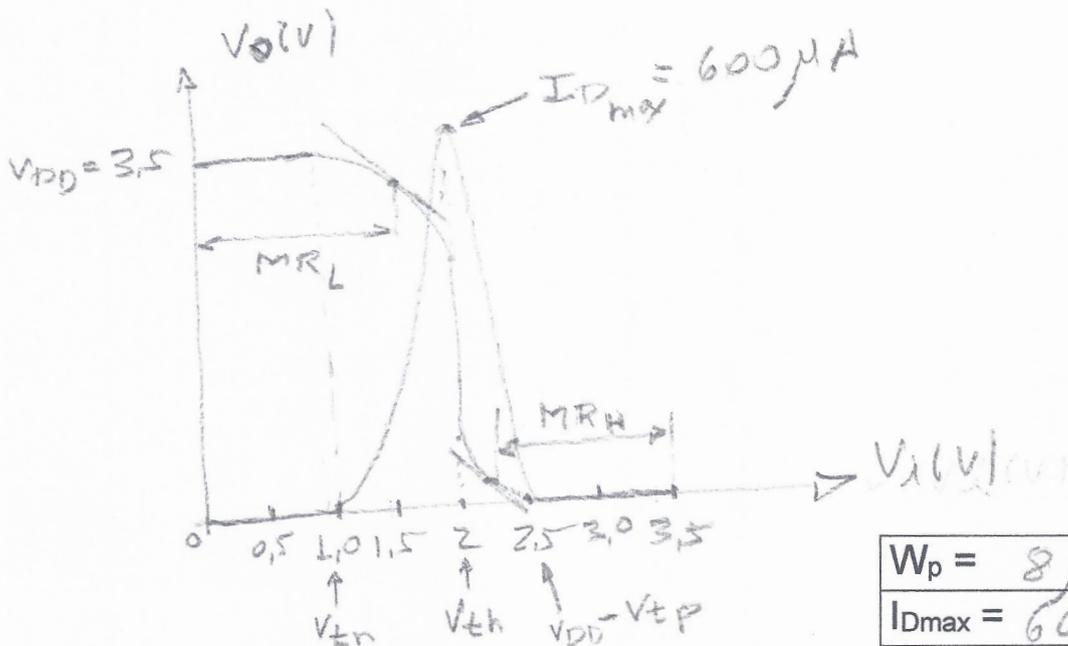
$$\frac{1}{2} 600 \mu \frac{1}{0,5} (2,0 - 1,0)^2 = \frac{1}{2} 300 \mu \frac{W_p}{0,5 \mu} [2,0 - 3,5 - (-1,0)]^2$$

$$W_p = 8 \mu m$$

b)

$$I_{DN max} (V_{GSN} = V_{th} = 2,0) = \frac{1}{2} k_n' \frac{W_n}{L_n} (V_{th} - V_{tn})^2$$

$$I_{DN max} = \frac{1}{2} 600 \mu \frac{1,0}{0,5} (2,0 - 1,0)^2 = 600 \mu A$$



$W_p = 8 \mu m$
$I_{Dmax} = 600 \mu A$

2° Questão (3,0 Pontos): Dado o amplificador de tensão realimentado abaixo, pede-se:

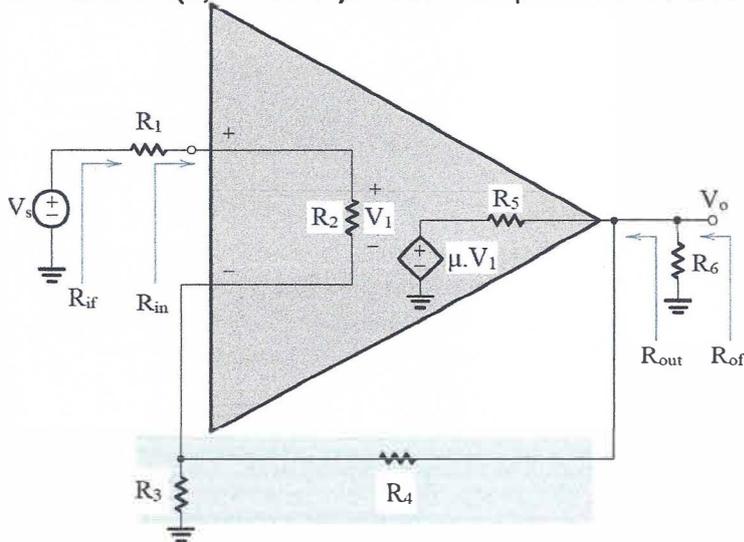
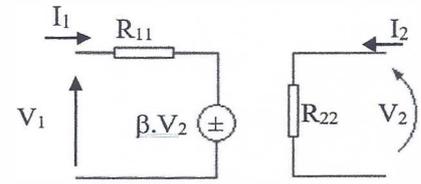


Figura 1 – Amplificador realimentado

Dados: $R_1 = 100 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 1 \text{ k}\Omega$, $R_4 = 999 \text{ k}\Omega$ e $R_6 = 1200 \Omega$.

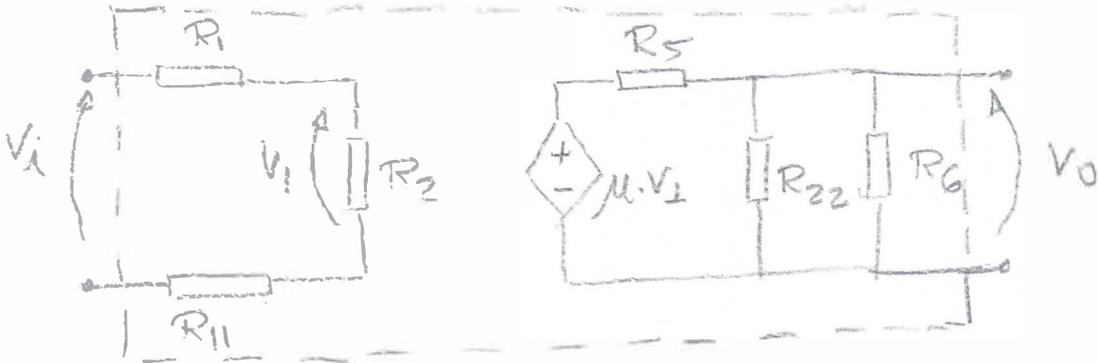


$$R_{11} = R_3 // R_4$$

$$R_{22} = R_3 + R_4$$

Figura 2: Malha de realimentação “β”

- a) (1,5) Desenhe o “**novo circuito A**” levando-se em consideração a influência da malha de realimentação. Determine as **expressões literais** do ganho (A), da resistência de entrada (R_i) e da resistência de saída (R_o) “**novo circuito A**”.



$$R_i = R_1 + R_2 + R_{11} \quad \text{onde} \quad R_{11} = R_3 // R_4$$

$$R_o = R_5 // R_6 // R_{22} \quad \text{onde} \quad R_{22} = R_3 + R_4$$

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{V_o}{V_2} \cdot \frac{V_2}{V_1} = \frac{\mu \cdot R_6 // R_{22}}{R_6 // R_{22} + R_5} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_{11}}$$

b) (1,5) Considerando-se que para o "novo circuito A", temos o novo ganho $A = 1000 \text{ V/V}$, a nova resistência de entrada $R_i = 200 \text{ k}\Omega$ e a nova resistência de saída $R_o = 600 \Omega$, determine os valores numéricos do ganho (A_f), da resistência de entrada (R_{if}) e de saída (R_{of}) do circuito realimentado. Determine também R_{in} e R_{out} .

$$\beta = \frac{R_3}{R_3 + R_4} = \frac{1\text{K}}{1\text{K} + 999\text{K}} = 0,001$$

$$A_f = \frac{A}{1 + A \cdot \beta} = \frac{1000}{1 + \underbrace{1000 \times 0,001}_1} = \frac{1000}{2} = 500 \text{ V/V}$$

$$R_{if} = R_i (1 + A \beta) = 200\text{K} (1 + 1) = 400 \text{ K}\Omega$$

$$R_{of} = \frac{R_o}{(1 + A \beta)} = \frac{600}{1 + 1} = 300 \Omega$$

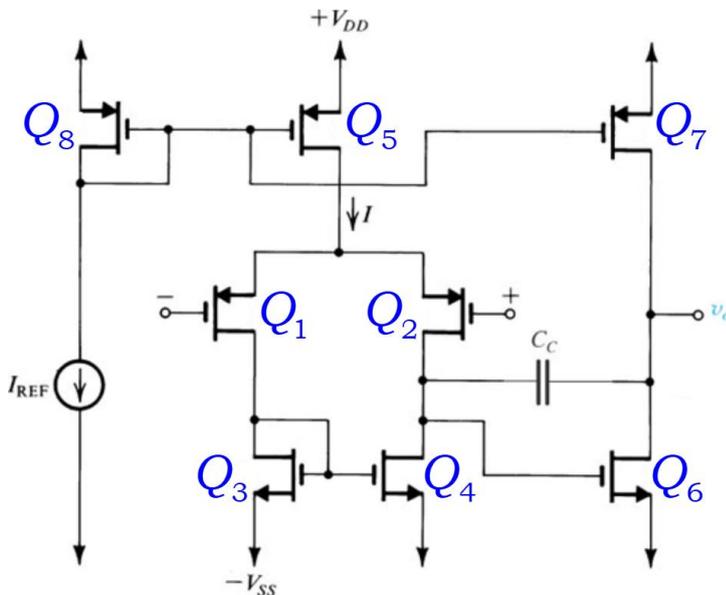
$$R_{in} = R_{if} - R_L = 400\text{K} - 100\text{K} = 300 \text{ K}\Omega$$

$$R_{of} = R_{out} \parallel R_G \Rightarrow \frac{1}{R_{of}} = \frac{1}{R_{out}} + \frac{1}{R_G}$$

$$R_{out} = \frac{1}{\frac{1}{R_{of}} - \frac{1}{R_G}} = \frac{1}{\frac{1}{300} - \frac{1}{1200}} = 400 \Omega$$

$A_f = 500 \text{ V/V}$	$R_{if} = 400 \text{ K}\Omega$	$R_{of} = 300 \Omega$
$R_{in} = 300 \text{ K}\Omega$	$R_{out} = 400 \Omega$	$\beta = 0,001$

3) (2,0 pontos) Para o amplificador de dois estágios da figura determine:



- $I_{REF} = 1,0\text{mA}$
- $k'_n = 0,2\text{ mA/V}^2$
- $k'_p = 0,1\text{ mA/V}^2$
- $V_{An} = 60\text{V}$
- $V_{Ap} = -60\text{V}$
- $(W/L)_3 = (W/L)_4 = 80$
- $(W/L)_5 = 20$
- $(W/L)_6 = 160$
- $(W/L)_8 = 10$

OBS: Despreze o efeito Early ($\lambda = 0$) nos cálculos CC.

a) (1,0) o valor numérico para o (W/L) do transistor Q_2 para que o primeiro estágio tenha um ganho de $|30|\text{V/V}$

$$A_{12} = -g_{m2} r_{o2} || r_{o4} = -30 \text{ V/V}; \quad r_{o2} = \frac{|V_{An}|}{I_{D2}} \quad r_{o4} = \frac{|V_{Ap}|}{I_{D4}} \quad |V_{An}| = |V_{Ap}| \Rightarrow r_{o4} = r_{o2} = \frac{60}{I_{D2}} \Rightarrow r_{o2} || r_{o4} = \frac{30}{I_{D2}} \quad (1)$$

$$I_{D2} = I/2 = I_{REF} \frac{W/L_5 \cdot 1}{W/L_8 \cdot 2} = 1\text{m} \cdot \frac{20}{10 \cdot 2} = 1\text{mA} \quad (2) \Rightarrow r_{o2} || r_{o4} = 30\text{k} \Rightarrow g_{m2} = \frac{30}{30\text{k}} = 1\text{mA/V}$$

$$g_{m2} = \frac{2 I_{D2}}{V_{ov2}} \Rightarrow V_{ov2} = \frac{2\text{m}}{1\text{m}} = 2\text{V} \Rightarrow g_{m2} = k'_n \left(\frac{W}{L}\right)_2 V_{ov2} = 0,2\text{m} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_2 \cdot 2 = 1\text{mA/V}$$

$$\left(\frac{W}{L}\right)_2 = \frac{10}{2} = 5$$

$(W/L)_2 = 5$

b) (1,0) o valor numérico para o (W/L) do transistor Q_7 para que o segundo estágio tenha um ganho de $|120|\text{V/V}$.

$$A_2 = -g_{m6} \cdot r_{o2} || r_{o6} = -120; \quad r_{o7} = \frac{|V_{Ap}|}{I_{D7}} \quad r_{o6} = \frac{|V_{An}|}{I_{D6}} \quad |V_{An}| = |V_{Ap}| \Rightarrow r_{o6} = r_{o7} = \frac{60}{I_{D6}} \Rightarrow r_{o6} || r_{o7} = \frac{30}{I_{D6}}$$

$$I_{D6} = I_{D7}; \quad 120 = g_{m6} \cdot \frac{30}{I_{D6}} \Rightarrow g_{m6} = 4 I_{D6}$$

$$\text{Como } g_{m6} = \sqrt{2 I_{D6} \cdot k'_n \left(\frac{W}{L}\right)_6} = 4 I_{D6} \Rightarrow 2 I_{D6} \cdot 0,2\text{m} \cdot 160 = 16 I_{D6}^2 \Rightarrow I_{D6} = \frac{0,4\text{m} \cdot 160}{16}$$

$$I_{D6} = 4\text{mA}; \quad I_{D7} = 4\text{mA} \quad I_{D7} = I_{REF} \cdot \frac{W/L_7}{W/L_8} \Rightarrow \frac{W/L_7}{W/L_8} = \frac{4\text{m} \cdot 10}{1\text{m}} = 40$$

$(W/L)_7 = 40$

- c) (1,0) Considerando $v_{G1} = v_{G2}$, qual o valor numérico **máximo** para v_{G2} antes do circuito sair da região de operação onde todos os transistores estão na saturação? Nesta situação indique claramente qual ou quais transistores saem da saturação.

Para $v_{G1} = v_{G2}$ $I_{D1} = I_{D2} = \frac{I_{REF}}{2}$ Neste caso, como $I_{D1} = I_{D2} = \text{cte} \Rightarrow V_{GS1} = V_{GS2} = \text{cte}$
 Como $v_{D2} = v_0 = 3V$ (item b anterior) se elevarmos $v_{G2} \Rightarrow v_{S2} = v_{G2} - V_{GS2}$ aumenta
 Max $v_{D2} - v_{S2} \gg V_{GS2} - V_{tn}$ p/ saturação.
 Logo ~~no~~ no limite $v_{D2} - v_{S2} = V_{GS2} - V_{tn}$
 Logo $v_{G2} = v_{D2} + V_{tn} = 3V + 1V = 4V$
 Note que neste caso quem sai da saturação são Q_1 e Q_2

Transistor(es) que sai(em) da saturação: Q_1 e Q_2

$$v_{G2} \text{ MAX} = +4V$$

- d) (1,0) Considerando $v_{G1} = v_{G2}$, qual o valor numérico **mínimo** para v_{G2} antes do circuito sair da região de operação onde todos os transistores estão na saturação? Nesta situação indique claramente qual ou quais transistores saem da saturação.

Note que v_{G2} min implica em $v_{S2} = v_{D6}$ mínimo, ou seja Q_6 pode sair da saturação
 Note que Q_5 sempre na saturação. Para Q_6 , $v_{G6} = -10V$, $v_{GS6} = v_{GS5}$
 $v_{DS6} \gg v_{GS6} - V_{tn}$ ou no limite $v_{DS6} = v_{GS6} - V_{tn}$
 $v_{GS6} = v_{GS5} \Rightarrow \frac{10 - v_{GS5} - (-10)}{18k} = 1m \Rightarrow 20 - v_{GS5} = 18 \Rightarrow v_{GS5} = v_{GS6} = 2V$
 Logo $v_{DS6} = 2 - 1 = 1V \Rightarrow v_{D6} = v_{S6} + 1 = -10 + 1 = -9V$
 $v_{G2 \text{ MIN}} - v_{GS2} = v_{D6} = -9V \Rightarrow v_{G2 \text{ MIN}} = -9V + v_{GS2}$
 $I_{D2} = 0.5 \cdot \frac{1}{2} \mu n^2 \left(\frac{W}{L}\right)_2 (v_{GS2} - V_{tn})^2 \Rightarrow 0.5 = 0.5 \cdot 200 \cdot 10^6 \cdot 5 (v_{GS2} - 1)^2$
 $1 = 200 \cdot 10^3 \cdot 5 (v_{GS2} - 1)^2 \Rightarrow v_{GS2} = +2V$
 $v_{G2 \text{ MIN}} = -9V + 2V = -7V$

Transistor(es) que sai(em) da saturação: só Q_6

$$v_{G2} \text{ MIN} = -7V$$