

1. Amplificador TJB (2+2+1+2+2)

A figura representa um andar de amplificação. Os dados são $\beta=100$, $V_{BEon}=0.7V$, $V_{CC}=5V$, $R_E=500\Omega$ e $R_L=6k\Omega$.

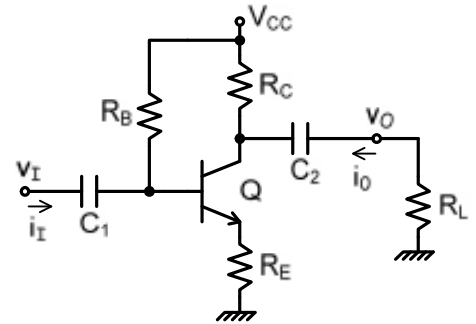
a) Dimensione R_B e R_C de modo que, no PFR, $I_C=1mA$ e $V_{CE}=1.5V$. Explique a função dos condensadores C_1 e C_2 .

b) Desenhe o esquema incremental do circuito na banda de passagem. Calcule o ganho de tensão $G_v=v_o/v_i$, as resistências de entrada $R_i=v_i/i_i$ e de saída $R_o=v_o/i_o$.

c) O circuito tem polarização estabilizada? Justifique.

d) Admitindo que $C_2=\infty$, calcule o valor de C_1 para que $f_L=10Hz$.

e) Se o transistor Q tiver $C_\pi=10pF$ qual o valor de f_H do amplificador?



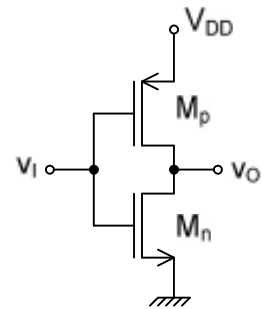
2. Inversor CMOS (1+2+2)

Considere o circuito da figura, onde $V_{DD}=5V$, $1/2 \cdot \mu_n C_{OX}=0.4mA/V^2$, $1/2 \cdot \mu_p C_{OX}=0.1mA/V^2$, $(W/L)_n=(W/L)_p=2$ e $V_{tp}=V_{tn}=1V$.

a) Faça um esboço da característica $v_o(v_i)$, indicando as diferentes zonas de funcionamento dos transistores. Calcule as coordenadas dos pontos limites entre essas zonas.

b) 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 (W/L) dos vários transistores para que o circuito nunca seja mais lento a comutar que o inversor dado.

c) Usando a média das correntes, calcule o tempo de propagação t_{pHL} do inversor dado, supondo uma carga $C_L=1pF$.



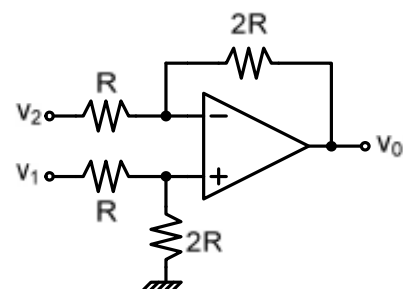
3. Amplificador operacional (3+1+2)

Considere o circuito da figura onde o AMPOP é ideal e $R=10k\Omega$.

a) Obtenha a expressão de v_o em função de v_1 e v_2 . Calcule as resistências de entrada nos acessos 1 e 2.

b) Admitindo que o AMPOP satura com $V_{SAT}^+=-V_{SAT}^- = 5V$, desenhe a característica de transferência $v_o(v_1-v_2)$ quando $|v_1-v_2| \leq 5V$. Calcule as coordenadas dos pontos notáveis.

c) Se o AMPOP tiver $I_B=100nA$ e $I_{OS}=10nA$, calcule o valor do erro na saída v_o devido a esta não idealidade.



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**

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

- Métodos das constantes de tempo**

$$\omega_L \approx \sum_k \frac{1}{C_k R_{k\infty}} \quad \frac{1}{\omega_H} \approx \sum_k C_k R_{k0}$$

- AMPOP**

$$I_{OS} = I_{B1} - I_{B2} \quad I_B = \frac{1}{2}(I_{B1} + I_{B2})$$

1a) $\beta \gg 1 \Rightarrow I_c \approx I_E$

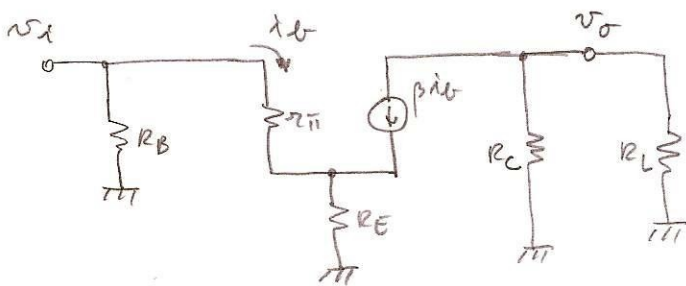
$$R_c = \frac{V_{cc} - (R_E I_E + V_{CE})}{I_c} \approx \frac{V_{cc} - R_E I_c - V_{CE}}{I_c} = \boxed{3 \text{ k}\Omega}$$

Z.A.D, PORQUE $V_{CE} > V_{BE}$

$$R_B = \frac{V_{cc} - (R_E I_E + V_{BE_{on}})}{I_B} \approx \frac{V_{cc} - R_E I_c - V_{BE_{on}}}{I_c / \beta} = \boxed{380 \text{ k}\Omega}$$

C_1 E $C_2 \rightarrow$ CONDENSADORES DE DESACOPLAMENTO DC. ISOLA A POLARIZAÇÃO DO AMPLIFICADOR DA CARGA R_L E DO GERADOR DE ENTRADA. EM DC SÃO C.A., NA BANDA DE PASSAGEM C.C.

1b) NA BANDA DE PASSAGEM C_1 E C_2 SÃO C.C.



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

$$R_{in} = R_B \parallel [r_{\pi} + (\beta + 1)R_E] = \boxed{46.51 \text{ k}\Omega}$$

$R_{out} = R_c = \boxed{3 \text{ k}\Omega} \rightarrow$ PORQUE A SOLUÇÃO CI $v_i = \phi$ É $i_b = \phi$.

$$\left. \begin{aligned} v_o &= -\beta i_b (R_c \parallel R_L) \\ i_b &= \frac{v_i}{r_{\pi} + (\beta + 1)R_E} \end{aligned} \right\} \Rightarrow G_v = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{\beta (R_c \parallel R_L)}{r_{\pi} + (\beta + 1)R_E} \approx -\frac{R_c \parallel R_L}{R_E} = \boxed{-4}$$

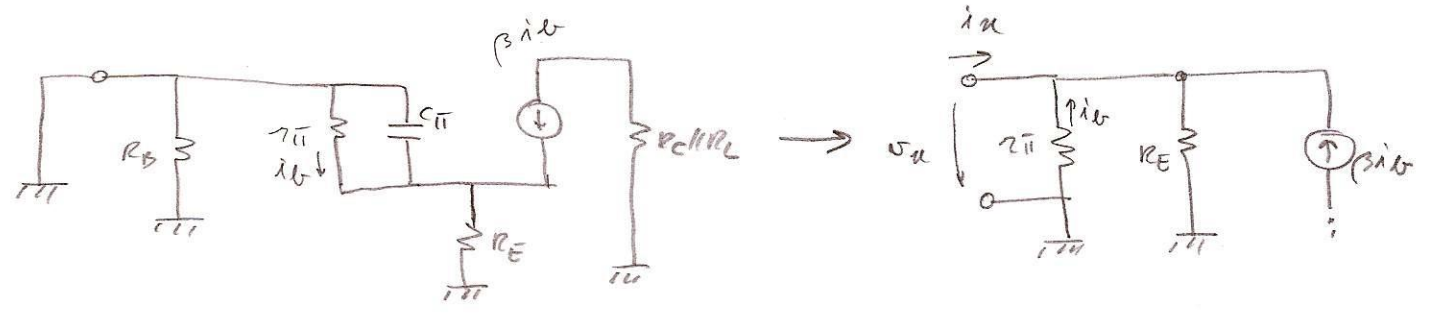
1c) TEM POLARIZAÇÃO ESTABILIZADA. SE $\beta \uparrow \Rightarrow I_c \uparrow \Rightarrow I_E \uparrow \Rightarrow V_E \uparrow$. $V_B \approx \text{cte}$ PORQUE $\Delta I_B = \Delta I_c / \beta \approx \phi$. ENTÃO $V_{BE} \downarrow \Rightarrow I_c \downarrow$. \rightarrow HÁ REALIMENTAÇÃO NEGATIVA.

1d) SE $C_2 \rightarrow \infty \Rightarrow$ O SEU PÓLO $\rightarrow \phi \Rightarrow$ PÓLO DE C_1 DOMINANTE.

$$\omega_L = \frac{1}{C_1 \cdot R_{in}} \quad (R_{in} \text{ É A RESISTÊNCIA VISTA POR } C_1)$$

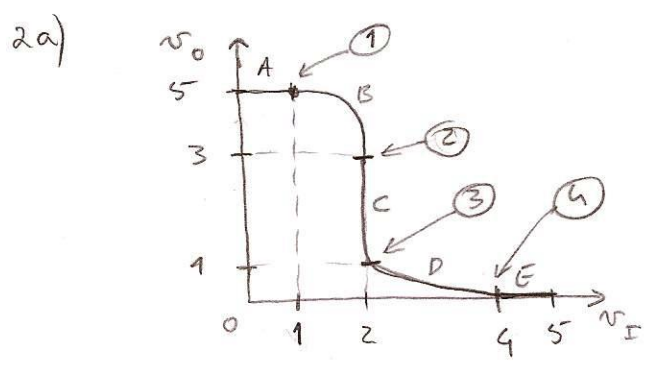
$$C_1 = \frac{1}{2\pi f_L R_{in}} = \frac{1}{2\pi \cdot 90 \cdot 81.34 \text{ k}} = \boxed{0.196 \mu\text{F}}$$

1.2) NA FINAL DA BANDA DE PASSAGEM C_{π} É O ÚNICO CONDENSADOR \Rightarrow PÓLO DE C_{π} É DOMINANTE.



$$\left. \begin{aligned} i_u + i_b + \beta i_b &= \frac{v_u}{R_E} \\ i_b &= -\frac{v_u}{r_{\pi}} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{v_u}{i_u} = R_E \parallel \frac{r_{\pi}}{\beta + 1} = 23.6 \Omega = R_{eq}$$

$$\omega_H = \frac{1}{R_{eq} \cdot C_{\pi}} \Rightarrow f_H = \frac{1}{2\pi R_{eq} C_{\pi}} = 674.4 \text{ MHz}$$



ZONAS	M_n	M_p
A	CORT	TRI
B	SAT	TRI
C	SAT	SAT
D	TRI	SAT
E	TRI	CORT

OS TRANSISTORES NÃO ESTÃO ADAPTADOS.
 $\mu_n = 0.8 \text{ mA/V}^2$
 $\mu_p = 0.2 \text{ mA/V}^2$

$$V_{tn} = V_{tp} = V_t$$

ZONA C: $\rightarrow i_{Dn} = i_{Dp} \Rightarrow \mu_n (v_i - V_t)^2 = \mu_p (V_{DD} - v_i - V_t)^2 \Rightarrow$
 $\Rightarrow 2(v_i - V_t) = (V_{DD} - V_t - v_i) \Rightarrow v_i = \boxed{2V}$

PONTO ③: M_n SAT-TRIO $\Rightarrow v_{DS} = v_{GS} - V_t \Rightarrow v_o = v_i - V_t$
 $v_i = 2 \Rightarrow v_o = \boxed{1V}$

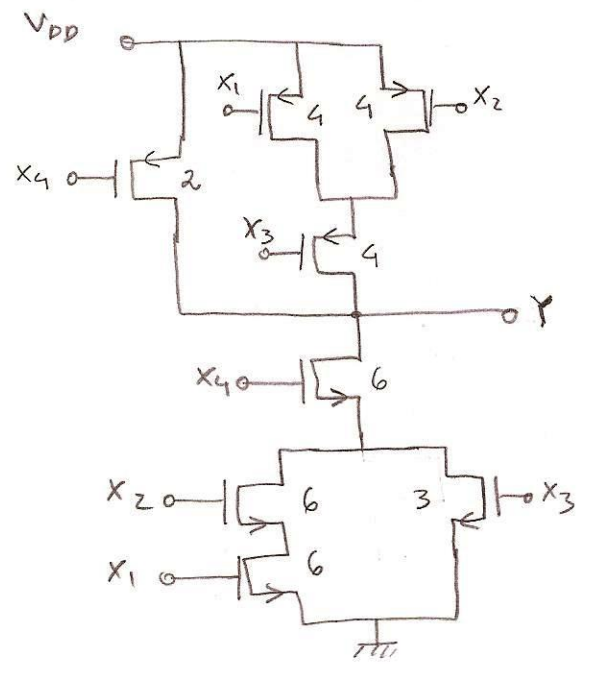
PONTO ②: M_p SAT-TRIO $\Rightarrow v_{SD} = v_{SG} - V_t \Rightarrow V_{DD} - v_o = V_{DD} - v_i - V_t$
 $\Rightarrow v_o = v_i + V_t$. COM $v_i = 2V \Rightarrow v_o = \boxed{3V}$

PONTO ①: M_n CORTE $\Rightarrow v_i < V_t = \boxed{1V}$

PONTO ④: M_p CORTE $\Rightarrow v_{SG} < V_t \Rightarrow V_{DD} - v_i < V_t \Rightarrow v_i > V_{DD} - V_t = \boxed{4V}$

2b) BLOCO PULL-DOWN $\rightarrow Y = \overline{(X_1 X_2 + X_3)} X_4$

BLOCO PULL-UP $\rightarrow Y = \overline{(X_1 X_2 + X_3)} + \overline{X_4} = \overline{(X_1 X_2 + X_3)} + \overline{X_4} = (\overline{X_1 + X_2}) \overline{X_3} + \overline{X_4}$



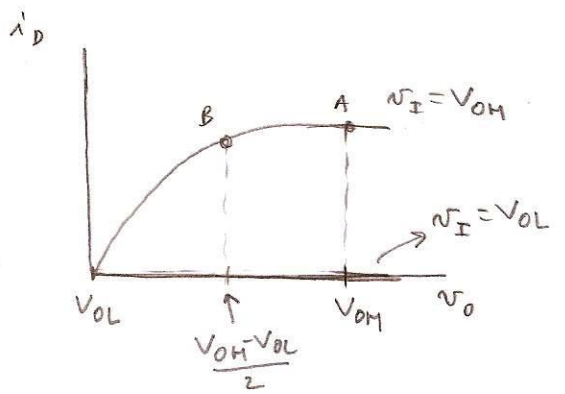
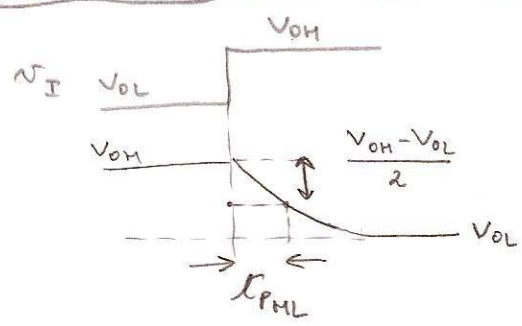
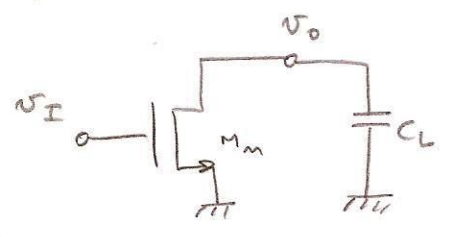
PULL-DOWN

- PIOR CASO $X_4, 1, 2$ ON $\Rightarrow \Rightarrow (\frac{W}{L})_i = 6$
- CASO $X_4, 3$ ON $\Rightarrow \Rightarrow \frac{1}{6} + \frac{1}{\pi} = \frac{1}{2} \Rightarrow \pi = 3$

PULL-UP

- PIOR CASO $X_3, 1$ ON, OU $X_3, 2$ ON $\Rightarrow (\frac{W}{L})_i = 4$
- X_4 ON ISOLADO $\Rightarrow (\frac{W}{L})_i = 2$

2c)



PONTO A $v_o = v_I \Rightarrow M_m$ SATURADO
 $i_{DA} = \mu_m (v_I - V_t)^2 = \mu_m (V_{OH} - V_t)^2 = 12.8 \text{ mA}$

PONTO B ϕV
 $v_o = \frac{V_{OH} - V_{OL}}{2} = 2.5 \text{ V}$ $v_o < v_I - V_t = 4 \text{ V} \Rightarrow \Rightarrow M_m$ TRIODO.

$$i_{DB} = \mu_m [2(v_{DS} - V_t)v_{DS} - v_{DS}^2] = \mu_m [2(V_{OH} - V_t) \frac{V_{OH}}{2} - (\frac{V_{OH}}{2})^2] = 9 \text{ mA}$$

$$i_C = C_L \frac{dv_o}{dt} \Rightarrow i_D = -C_L \frac{dv_o}{dt} \Rightarrow \overline{i_D} = -C_L \frac{\Delta v_o}{t_{PHL}} \Rightarrow$$

$$t_{PHL} = C_L \frac{|\Delta v_o|}{\overline{i_D}} \quad \overline{i_D} = \frac{i_{DA} + i_{DB}}{2} = 11.9 \text{ mA} \quad |\Delta v_o| = \frac{V_{OH}}{2} = 2.5 \text{ V}$$

$$t_{PHL} = \boxed{210.1 \text{ ps}}$$

3a) USANDO O TEOREMA DA SOBREPOSIÇÃO

c/ $v_1 = \phi \rightarrow v_0^I = -\frac{2R}{R} v_2 \Rightarrow v_0^I = -2v_2$ (MONT. INVERSORA)

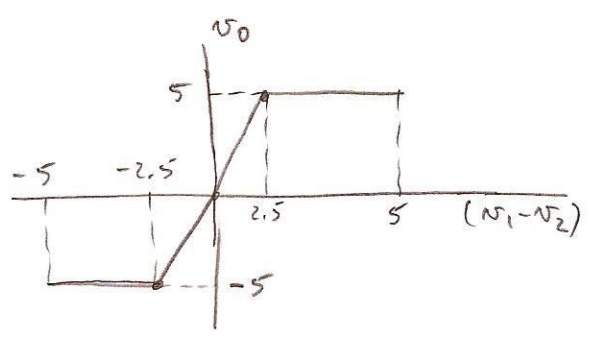
c/ $v_2 = \phi \rightarrow v_0^{II} = \frac{2R}{R+2R} \cdot \left(1 + \frac{2R}{R}\right) \Rightarrow v_0^{II} = 2v_1$ (MONT. \bar{N} INVER.)

$v_0 = v_0^I + v_0^{II} \Rightarrow v_0 = 2(v_1 - v_2)$

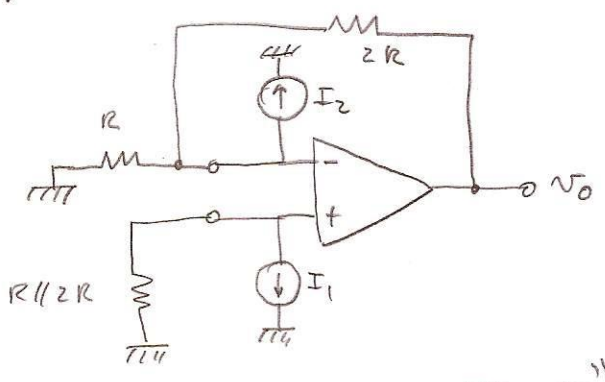
$R_{in1} = 3R = 30k\Omega$

$R_{in2} = R = 10k\Omega$

3b)



3c)



USANDO O TEOREMA DA SOBREPOSIÇÃO

c/ $I_1 = \phi \Rightarrow v_+ = \phi \Rightarrow v_- = \phi$

$\Rightarrow v_0^I = 2I_2 R$

c/ $I_2 = \phi \Rightarrow v_+ = -(R || 2R) I_1$

$\Rightarrow v_0^{II} = -(R || 2R) I_1 \left(1 + \frac{2R}{R}\right) = -\frac{2}{3} R I_1 \cdot 3 = -2R I_1$

$v_0 = v_0^I + v_0^{II} = 2R I_2 - 2R I_1 = 2R (I_2 - I_1)$

$\begin{cases} I_1 = I_B + \frac{I_{os}}{2} \\ I_2 = I_B - \frac{I_{os}}{2} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} I_1 = 105 \mu A \\ I_2 = 95 \mu A \end{cases}$

$v_0 = -2R (I_1 - I_2) = -2R I_{os} = 0,2 mV$