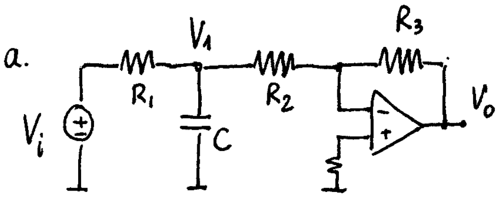
Resolução (compacta):

1a.

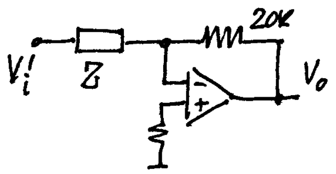


Como a entrada inversora é uma massa virtual: $\dfrac{V_1}{V_i} = \dfrac{R_2 /\!/ \frac{1}{sC}}{R_1 + R_2 /\!/ \frac{1}{sC}}$ e $\dfrac{V_o}{V_1} = -\dfrac{R_3}{R_2}$

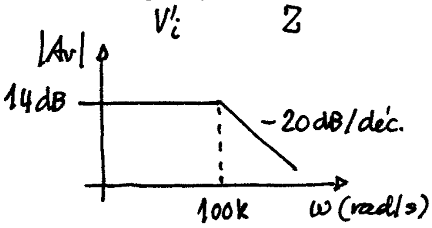
donde $\dfrac{V_o}{V_i} = \dfrac{V_o}{V_1} \cdot \dfrac{V_1}{V_i} = -10 \dfrac{R_2}{R_1 + R_2 + sR_1R_2C} = -\dfrac{5}{1 + s/100k}$ $\quad A_v(0) = -5$, $\omega_p = 100$ krad/s

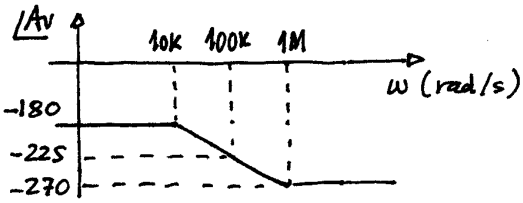
Ver **nota 1** no fim

Outra maneira: – aplicando o T. Thévenin na entrada, resulta $V_i' = \dfrac{V_i}{1 + s\,20\mu}$ e $Z = 4k \dfrac{1 + s\,10\mu}{1 + s\,20\mu}$

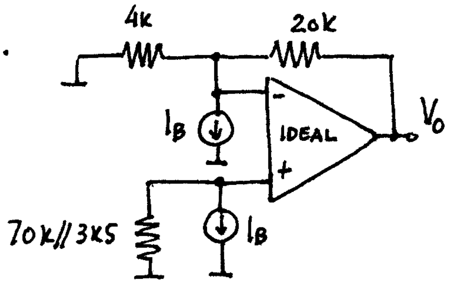


e como $\dfrac{V_o}{V_i'} = -\dfrac{20k}{Z}$ vem $A_v(s) = \dfrac{V_o}{V_i} = -\dfrac{5}{1 + s/100k}$





1b.



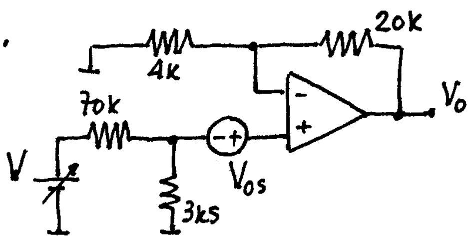
$V^- = V^+ = -(70k /\!/ 3k5)\, I_B = -\dfrac{10k}{3} I_B$

Na entrada inversora:

$I_B = \dfrac{-V^-}{4k} + \dfrac{V_o - V^-}{20k}$

donde $V_o = 20k\, I_B + 6V^- = 20k\, I_B - 6\, \dfrac{10k}{3} I_B \equiv 0$ q. e. d.

1c.



$V_o = \left(1 + \dfrac{20k}{4k}\right) V^+ = 0 \iff V^+ = 0$

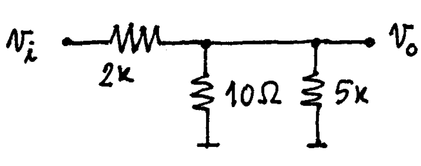
Como

$V^+ = V_{os} + \dfrac{3k5}{70k + 3k5} V = V_{os} + \dfrac{V}{21} = 0 \iff$

$\iff V = -21\, V_{os} = \pm 420$ mV

2a. $v_I = 12 \pm 1$ V, pelo que $v_i = 2$ V $\qquad r_d = \dfrac{V_T}{I_D} = \dfrac{25m}{5m} = 5\,\Omega$

Para sinais:



donde $v_o = \dfrac{5k /\!/ 10}{2k + 5k /\!/ 10} \cong 5 \times 10^{-3}\, v_i =$

$= 10$ mV $\Rightarrow v_d \cong 5$ mV

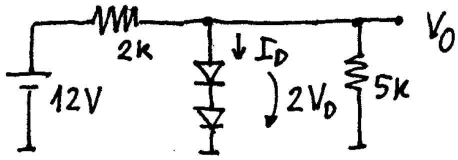
Ver **nota 2** no fim

Como $v_d < 10\,mV$, é legítimo usar o modelo para pequenos sinais.

Para $I_D = 5\,mA \Rightarrow V_D = V_T \ln \frac{I_D}{I_S} \cong 0{,}731\,V \Rightarrow V_O = 2V_D = 1{,}462\,V$

Finalmente $v_O = 1{,}462\,V \pm 5\,mV$, i.e., v_O varia entre 1,457 e 1,467V.

2b.



$$12 = 2k\left(I_D + \frac{2V_D}{5k}\right) + 2V_D \Rightarrow$$

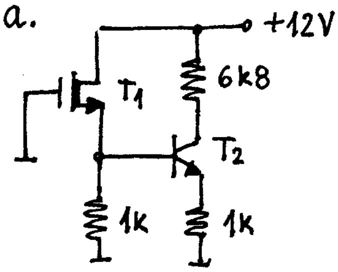
$$60 = 10k\, I_D + 14\, V_D$$

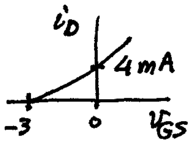
donde $I_D = \dfrac{30 - 7V_D}{5k} = 10^{-15} e^{V_D/V_T}$ e $V_D = V_T \ln \dfrac{30-7V_D}{5 \times 10^{-12}}$,

Ver **nota 3** no fim

obtendo-se $V_D = 0{,}731\,V \Rightarrow V_O = 1{,}462\,V$ e $I_D = 4{,}977\,mA$

3a.





$V_G = 0$ e $V_D = 12\,V$

Desprezando $I_B \Rightarrow I_D = -\dfrac{V_{GS}}{1k}$

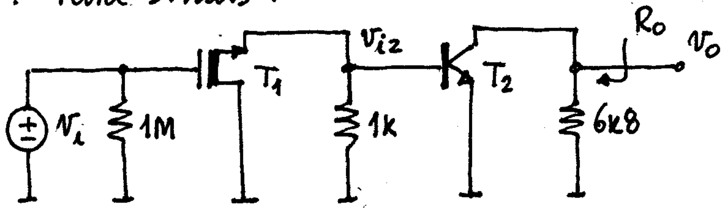
logo $-\dfrac{V_{GS}}{1k} = 4m\left(1 + \dfrac{V_{GS}}{3}\right)^2$ donde $V_{GS} = -1{,}29\,V$

e $I_D = 1{,}29\,mA$

Sucessivamente $V_B = V_S = 1{,}29\,V$, $V_E = 0{,}59\,V$, $I_C \cong I_E = 0{,}59\,mA$

e finalmente $V_C = 12 - 0{,}59 \times 6{,}8 = 8{,}01\,V$

3b. Para sinais:



$r_{o2} = 200\,k\Omega$, $r_{o1} = 46{,}2\,k\Omega$

$g_{m2} = 24\,mA/V$, $g_{m1} = 1{,}52\,mA/V$

$r_\pi = 3{,}33\,k\Omega$

$A_2 = \dfrac{v_o}{v_{i2}} = -g_{m2}(6k8 \,//\, r_{o2}) = -158\,V/V$ $\quad R_{L1} = 46k2 \,//\, 1k \,//\, 3k33 = 757\,\Omega$

$A_1 = \dfrac{R_{L1}}{1/g_{m1} + R_{L1}} = 0{,}54\,V/V$ $\quad A_v = A_1 \cdot A_2 \cong -84{,}4\,V/V$

$R_o = 6k8 \,//\, r_{o2} \cong 6{,}6\,k\Omega$

3c. Em repouso $V_C = 12 - 0{,}6 \times 6{,}8 = 7{,}92\,V$

Na fronteira do corte $i_C = i_E = 0 \Rightarrow v_{C\,máx} = 12\,V$

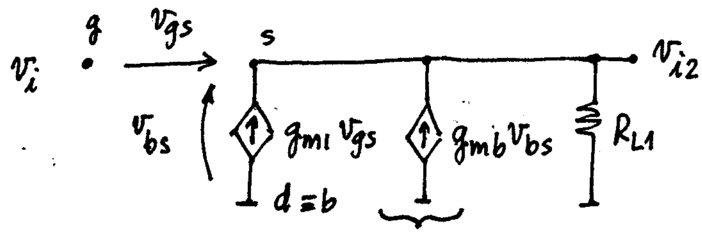
Na fronteira da saturação $v_{CE} \cong 0{,}3\,V \Rightarrow i_E \cong i_C = \dfrac{12 - 0{,}3}{6k8 + 1k} = 1{,}5\,mA$

logo $v_{C\,mín} = 0{,}3 + 1k \times 1{,}5m = 1{,}80\,V$

Portanto, a excursão positiva máxima de $v_O \equiv v_C$ é $12 - 7{,}92 = 4{,}08\,V$

e a excursão negativa máxima é $7{,}92 - 1{,}80 = 6{,}12\,V$

3d. Para T_1:



$g_{mb} = 0{,}3\, g_{m1} = 456\ \mu A/V$ $\qquad \cong 1/g_{mb}$

$1/g_{mb} \cong 2{,}2\ k\Omega \qquad R'_{L1} = (1/g_{mb}) /\!/ R_{L1} = 563\ \Omega$

$A'_1 = \dfrac{R_{L1}}{1/g_{m1} + R'_{L1}} \cong 0{,}46\ V/V \qquad A_2$ não se altera, logo

$A'_v = A'_1 \cdot A_2 = -72{,}8\ V/V$

Nota 1: A aplicação do T. Thévenin refere-se a toda a malha da entrada, i.e., desde a fonte V_i até à entrada inversora que é uma massa virtual.

Nota 2: Recorda-se que, sendo

$$i_D = I_s e^{v_D/V_T} \qquad \text{e} \qquad v_D = V_D + v_d$$

resulta, sucessivamente:

$$i_D = I_s e^{V_D/V_T} e^{v_d/V_T} = I_D e^{v_d/V_T}$$

Tomando o desenvolvimento em série de McLaurin da exponencial, vem:

$e^{v_d/V_T} = 1 + \dfrac{v_d}{V_T} + \dfrac{v_d^2}{2V_T^2} + \ldots$ e como, para V_T = 25 mV, desde que seja v_d < 10 mV, o erro resultante de ignorar os termos de ordem superior ou igual à segunda é suficientemente pequeno, vem:

$i_D = I_D + i_d = I_D\left(1 + \dfrac{v_d}{V_T}\right) = I_D + \dfrac{I_D}{V_T} v_d = I_D + \dfrac{v_d}{r_d}$ donde $i_d = \dfrac{v_d}{r_d}$ que é o suporte da utilização do modelo para pequenos sinais.

Nota 3: A expressão:

$V_D = V_T \ln \dfrac{30 - 7V_D}{5 \times 10^{-12}}$ permite, através de um processo iterativo extremamente rápido, obter os valores indicados. De facto, tomando como valor inicial o valor de V_D = 0,731 V, já obtido atrás para I_D = 5 mA, resulta:

$V_D = V_T \ln \dfrac{30 - 7 \times 0{,}731}{5 \times 10^{-12}} = 0{,}73089\,\text{V}$ e com uma segunda iteração:

$V_D = V_T \ln \dfrac{30 - 7 \times 0{,}73089}{5 \times 10^{-12}} = 0{,}73089\,\text{V}$ pelo que o valor V_D = 0,731 V é suficientemente aproximado.