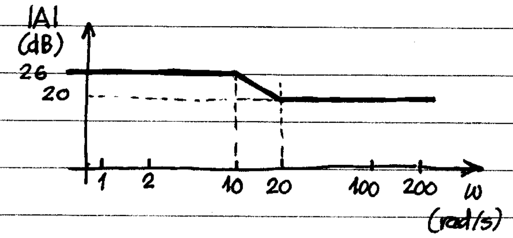
Electrónica I - 2004-05 | **1ª chamada**
3º ano (LEEC - APEL) | **12 JAN 05**

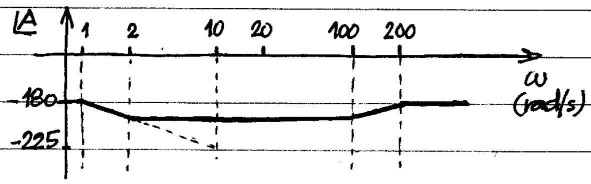
Resolução:

1a. $Z = [10k + 10k /\!/ 10\mu F] = \dfrac{10k\,(2 + s/10)}{1 + s/10}$

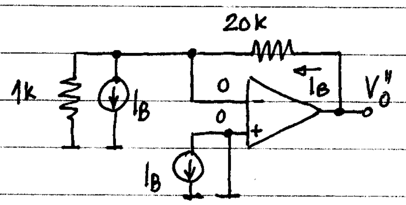
$A(s) = -\dfrac{Z}{1k} = -20\,\dfrac{1+s/20}{1+s/10} \Rightarrow$ 1 zero $s_o = -20\,s^{-1}$ e 1 pólo $s_p = -10\,s^{-1}$

$A(0) = -20 \rightarrow 26\,dB \qquad A(\infty) = -10 \rightarrow 20\,dB$





1b. Devido a $V_{OS} \rightarrow V_o' = V_{OS}\left(1 + \dfrac{20k}{1k}\right) = \pm 210\,mV$



Devido a $I_B \rightarrow V^+ = 0 \Rightarrow V^- = 0 \Rightarrow I_{20k} = I_B$

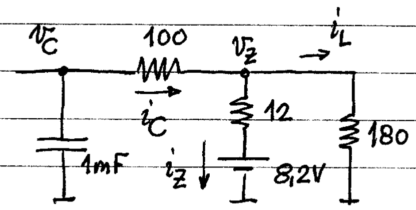
Logo $V_o'' = 20k \cdot I_B + 0 = 20\,mV$

Como a exacta polaridade de V_o'' é ignorada:

$V_o = V_o' + V_o'' = \pm 230\,mV$

2a. O pico de tensão no condensador é $\hat{V}_C = \dfrac{220\sqrt{2}}{20} - 0{,}7 = 14{,}86\,V$

No zener $V_{Z0} = 8{,}56 - 12 \times 30m = 8{,}2\,V$



Na descarga de C, quando $t \rightarrow \infty$, $i_C \rightarrow 0$

e $v_C \rightarrow \dfrac{180}{192} \times 8{,}2 \cong 7{,}69\,V$

Assim $v_C = 7{,}69 + (14{,}86 - 7{,}69)\,e^{-t/\tau}$

Sendo $T = 20\,ms$ e $\tau = 1mF\,(100 + 12 /\!/ 180) = 111{,}25\,ms$

Logo, para $t \cong T/2 = 10\,ms \rightarrow 14{,}86 - V_r \cong 7{,}69 + (14{,}86 - 7{,}69)\left(1 - \dfrac{T/2}{\tau}\right)$

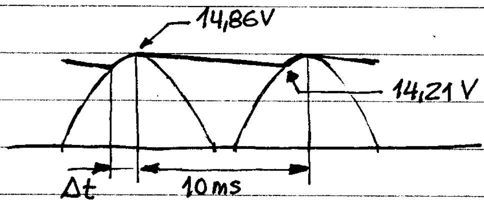
donde $V_r \cong 0{,}644\,V$

Para $t = -\Delta t$

$14{,}21 = (14{,}86 + 0{,}7).\cos(-\omega\Delta t) - 0{,}7$

donde

$\Delta t = \dfrac{1}{\omega} \arccos \dfrac{14{,}21 + 0{,}7}{14{,}86 + 0{,}7} \cong 0{,}92\,ms$



2b. No esquema acima $v_C = R_1(i_Z + i_L) + v_Z$, onde $i_L = v_Z/180$

e $v_Z = 8{,}2 + 12\,i_Z$. É necessário que $i_Z \geq I_{ZK} = 3mA$ e

no pior caso $v_C = 14{,}21\,V$, donde:

$$R_1 \leq \frac{14{,}21 - 8{,}2 - 0{,}036}{8{,}2 + 0{,}576} \times 180 \cong 123\,\Omega$$

3a.

Como $\beta \gg 1$ $\quad I_C \cong I_E$

Em T_3: $V_{E3} = 15\,V$ $\quad V_{B3} = V_{E3} - 0{,}7 = 14{,}3\,V$ $\quad V_{C3} = -1{,}4\,V$ (imposto)

$I_3 = 0{,}5\,mA$ $\quad I_{B3} = I_3/\beta = 2{,}5\,\mu A$

Em T_2: $V_{C2} = -1{,}4\,V$ (imposto) $\quad I_2 = I_3 = 0{,}5\,mA$ e $I_{B2} = 2{,}5\,\mu A$

$V_{E2} = -15 + 100\,I_2 = -14{,}95\,V$ $\quad V_{B2} = V_{E2} + 0{,}7 = -14{,}25\,V$

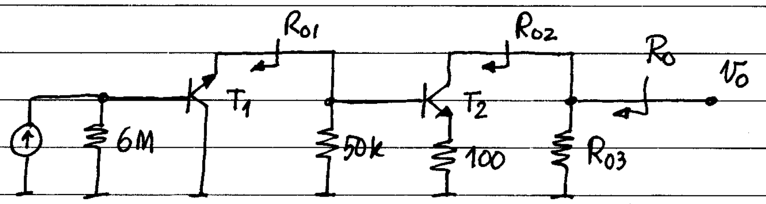
Em T_1: $V_{E1} = V_{B2} = -14{,}25\,V$ $\quad V_{B1} = V_{E1} + 0{,}7 = -13{,}55\,V$ $\quad V_{C1} = 15\,V$

$I_1 = I_{50k} + I_{B2}$

$$I_{50k} = \frac{V_{E1} - (-15)}{50k} = \frac{-14{,}25+15}{50k} = 15\,\mu A \qquad I_1 = 17{,}5\,\mu A$$

$$I_{B1} \cong 88\,nA$$

3b.



$R_o = R_{o3} /\!/ R_{o2}$ $\quad$ Como B3 é uma massa virtual para sinais, então

$$R_{o3} = r_{o3} = \frac{V_A}{I_3} = \frac{50}{0{,}5m} = 100\,k\Omega$$

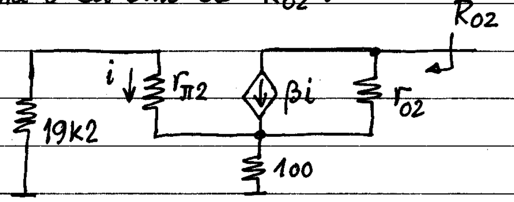
Para calcular R_{o2} precisamos de R_{o1}:

$$R_{o1} = r_{o1} /\!/ \frac{6M + r_{\pi 1}}{\beta + 1} \qquad r_{o1} = \frac{V_A}{I_1} = \frac{100}{17{,}5\mu} \cong 5{,}71\,M\Omega$$

$$r_{\pi 1} = \frac{\beta V_T}{I_1} = \frac{200 \times 25m}{17{,}5\mu} \cong 286\,k\Omega \qquad \text{donde} \qquad R_{o1} \cong 31{,}3\,k\Omega$$

Assim, na base de T_2 temos $R_{o1} /\!/ 50k \cong 19{,}2\,k\Omega$

Para o cálculo de R_{o2}:



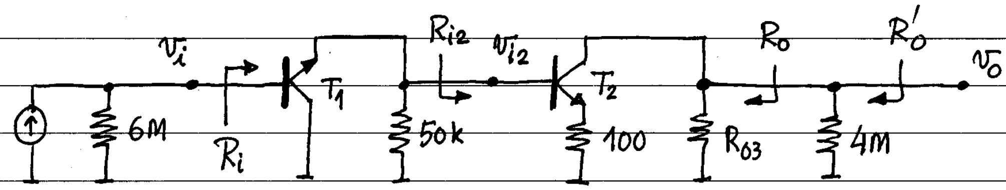
$$r_{\pi 2} = \frac{200 \times 25m}{0{,}5m} = 10\,k\Omega$$

$$r_{o2} = \frac{100}{0{,}5m} = 200\,k\Omega$$

Obtém-se $\quad R_{o2} = 200k + 137k + 100 \cong 337\,k\Omega$

Finalmente $\quad R_o = 100k /\!/ 337k \cong 77\,k\Omega$

3c.



$R_i = R_{i1}$ com $R_{i1} = r_{\pi 1} + (\beta+1) R_{L1}$ — R_i dum CC
com $R_{L1} = r_{o1} \,//\, 50k \,//\, R_{i2}$ – carga total do emissor
$r_{\pi 1} \cong 286\ k\Omega$ e $r_{o1} \cong 5{,}71\ M\Omega$ já calculados atrás
$R_{i2} = r_{\pi 2} + (\beta+1) \cdot 100$ – R_i dum EC com $R_E = 100\ \Omega$
$r_{\pi 2} = 10\ k\Omega$ já calculado atrás.
Assim

$$R_{i2} = 30{,}1\ k\Omega \qquad R_{L1} \cong 18{,}8\ k\Omega \qquad e \qquad R_i \cong 4{,}06\ M\Omega$$

Cálculo do ganho

$$A_v = A_1 \cdot A_2 \quad com \quad A_1 = \frac{v_{i2}}{v_i} \quad e \quad A_2 = \frac{v_o}{v_{i2}}$$

T_1 é um CC. Será $A_1 \cong 1$?
Num CC, com R_E aqui designada por R_{L1}, temos:

$$A_1 = \frac{R_{L1}}{r_{e1} + R_{L1}} \qquad \text{Como vimos } R_{L1} \cong 18{,}8\ k\Omega \quad e \quad r_{e1} \cong \frac{25m}{17{,}5\mu} \cong 1{,}43\ k\Omega$$

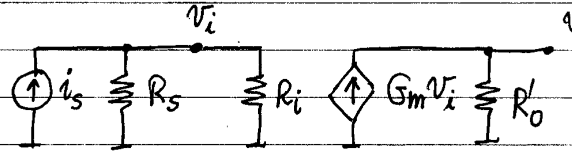
donde $A_1 \cong 0{,}93$, isto é, tomar $A_1 \cong 1$ não será um erro grosseiro, mas também não é um erro desprezável! Trata-se duma situação normal num TBJ com um PFE muito baixo (17,5 μA).

T_2 é um EC com R_E. Quando é $R_C \ll r_o$, uma boa aproximação para o ganho é

$$A_v \cong -\frac{R_C}{r_e + R_E}$$

No caso presente, $R_C = R_{o3} \,//\, 4M = 100k \,//\, 4M \cong 97{,}6\ k\Omega$ e $r_{o2} = 200\ k\Omega$, portanto __não é__ $r_{o2} \gg R_{C2}$

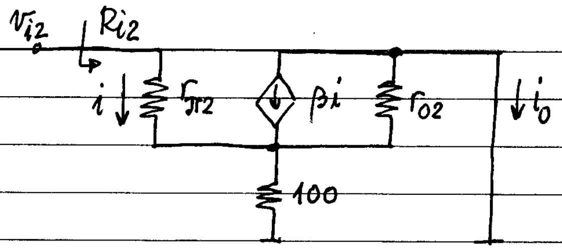
Um processo simples de calcular o ganho A_v com muito boa aproximação é usar a relação dos modelos equivalentes dos amplificadores:



$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = G_m R'_o$$

em que G_m é a transcondutância em curto-circuito e R'_o é a resistência de saída vista a jusante de todas as resistências de carga consideradas no cálculo de A_v.
No caso presente $R'_o = R_o \,//\, 4M \cong 77k \,//\, 4M \cong 75{,}7\ k\Omega$

A aproximação consiste em considerar que, no cálculo de G_m, a corrente i_o de curto-circuito é $\cong -\beta i$. O erro é muito pequeno devido a ser $R_E (100\Omega) \ll r_{o2} (200k\Omega)$.



Assim,

$$G_m = \frac{i_o}{v_{i2}} \cong \frac{-\beta i}{R_{i2} \cdot i} = -\frac{\beta}{R_{i2}} = -\frac{200}{30{,}1k} \cong -6{,}64 \; mA/V$$

donde $\quad A_2 = G_{m2} R_o' = -6{,}64m \times 75{,}7k \cong -503 \; V/V$

NOTA: Deve notar-se que G_m, com a aproximação indicada, resulta, muito aproximadamente, igual a $-1/(r_e + R_E)$. Desta forma, A_v pode continuar-se a calcular com a expressão

$$A_v = -\frac{R_C}{r_e + R_E}$$

na condição de que R_C corresponda a R_o', i.e., o que poderíamos designar por carga total efectiva do colector. Note-se ainda que calcular A_v considerando $R_C = 97{,}6k\Omega$ (ver atrás) levaria a $A_v = -651$, i.e., com um erro de $+29{,}4\%$!
Uma outra aproximação, recomendada em alguns livros de texto, sugere que se tome $R_C = r_o // R_L$, o que no caso presente conduz a $R_C = r_{o2} // R_{o3} // 4M \cong 65{,}6k\Omega$. Obtém-se, assim, $A_v = -437 \; V/V$, i.e., um valor com um erro de -13%, que é bastante menor e no "bom" sentido.

Finalmente, $\quad A_v = A_1 . A_2 \cong -468 \; V/V$

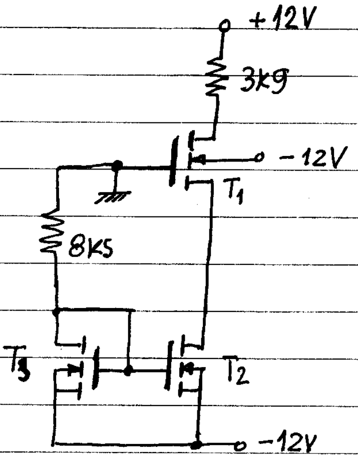
3d. Com $I_2 = 0{,}5mA \quad V_{BE2} = V_T \ln \frac{I_2}{I_S} = 25m . \ln \frac{0{,}5m}{10^{-14}} \cong 616 \; mV$

Assim $\quad I_{50k} = \frac{V_{BE2} + 100 \times 0{,}5m}{50k} = 13{,}3 \mu A$

e $\quad I_1 = I_{50k} + I_{B2} = 15{,}8 \mu A$

logo $\quad V_{BE1} = 25m . \ln \frac{15{,}8\mu}{10^{-14}} \cong 530 mV$

4a. Em c.c.:



$$\begin{cases} 12 = 8k5 \cdot I_3 + V_{GS3} \rightarrow I_3 = \dfrac{12 - V_{GS3}}{8k5} \\ I_3 = 0{,}25m\,(V_{GS3} - 1{,}5)^2 \end{cases}$$

$$12 - V_{GS3} = 2{,}125\,(V_{GS3}^2 - 3V_{GS3} + 2{,}25)$$

donde

$$V_{GS3} = 3{,}5\,V \implies I_3 = 1mA$$

e

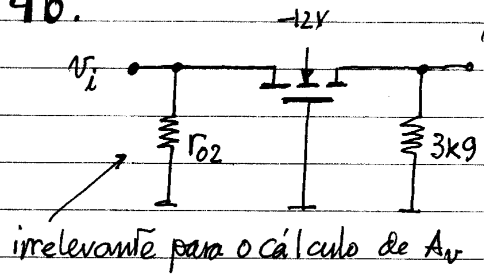
$$I_1 = I_2 = I_3 = 1mA$$

$$V_{GS1} = V_{GS2} = V_{GS3} = 3{,}5\,V$$

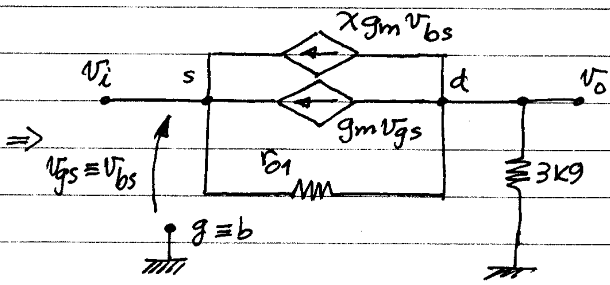
Então $V_{S2} = V_{S3} = -12\,V$ $\quad V_{G2} = V_{G3} = -8{,}5\,V = V_{D3}$

$V_{G1} = 0$ $\quad V_{S1} \equiv V_{D2} = -3{,}5\,V$ $\quad$ e $\quad V_{D1} = 12 - 3k9 \times 1m = 8{,}1\,V$

4b.

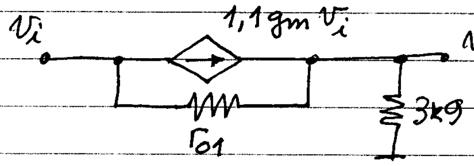


$\Rightarrow$



Podemos redesenhar o esquema, $\rightarrow$
uma vez que

$$v_{gs} = v_{bs} = -v_i$$



Sendo $r_{o1} = \dfrac{30}{1m} = 30\,k\Omega$ $\quad$ e $\quad g_m = 2\sqrt{K I_D} = 2\sqrt{0{,}25 \times 1}\,m = 1mA/V$

Assim $\quad v_o = 3k9 \left(1{,}1\,g_m v_i + \dfrac{v_i - v_o}{r_{o1}}\right)$

donde

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{1{,}1\,g_m + \dfrac{1}{r_{o1}}}{\dfrac{1}{3k9} + \dfrac{1}{r_{o1}}} \simeq 3{,}91\,V/V$$