

Parcial de Electrónica Avanzada 2
12/05/2021

Resolver cada problema en hojas separadas.

Duración de la prueba: 3 horas.

La prueba es **sin** material.

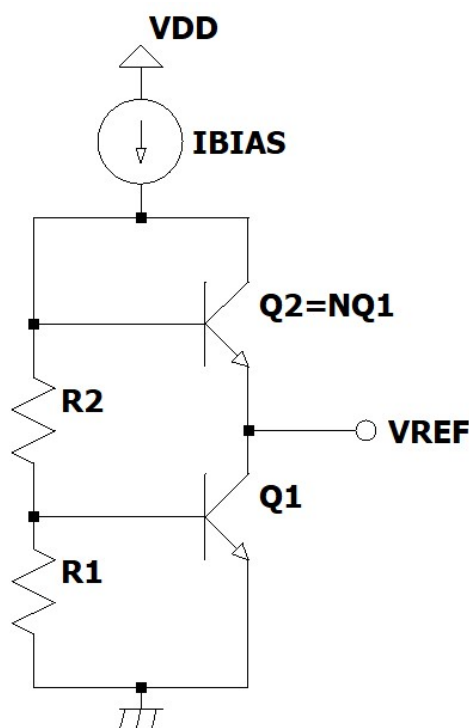
Los puntajes de los problemas se indican sobre un total de 100 puntos.

Problema 1 (34 pts):

El circuito de la figura es una referencia de tensión sub-1V que, a diferencia de las referencias bandgap clásicas, en lugar de generar una tensión de aproximadamente 1.2V genera una tensión de algunos cientos de mV y por lo tanto es adecuada para operar con tensiones de alimentación más bajas.

Asuma que ambos transistores operan en zona activa y que las corrientes de base son despreciables excepto donde se indica lo contrario.

- Demuestre que $V_{REF} = V_{BE1} - V_{BE2} + V_{BE1}/M$, donde $M = R1/R2$.
- Suponga que la dependencia con la temperatura de la tensión V_{BE} de los transistores se puede modelar como $V_{BE} = V_{G0} - \alpha T$ donde $\alpha > 0$ y T es la temperatura absoluta en Kelvin. Calcule el factor M necesario para que V_{REF} tenga dependencia nula con la temperatura. ¿Cuál es la expresión para V_{REF} en ese caso?
- Considere ahora las corrientes de base I_{B1} e I_{B2} de cada transistor y determine el efecto que tiene cada uno sobre la tensión V_{REF} , si es que lo tienen.
- Asuma que $I_{BIAS} = 1\text{mA}$, $V_{G0} = 1.2\text{V}$, $\alpha = 1.55\text{ mV/K}$ y $N = 20$. Determine el valor de $R1$ y $R2$ para anular la dependencia de V_{REF} con la temperatura y mantener al menos 0.5mA de corriente por los transistores. ¿Cuál es el valor de V_{REF} que obtuvo? Para esta parte puede volver a despreciar el efecto de las corrientes de base.



Problema 2 (33 ptos):

El circuito de la Fig. 1 es la etapa de entrada de un amplificador operacional para baja tensión de alimentación.

- Calcular R1 para que la corriente por M7 sea $200\mu\text{A}$.
- Graficar el valor de la transconductancia i_{out}/v_{in} en función de la tensión v_{CM} de modo común a la entrada que varía entre 0 y V_{DD} . Indicar y justificar claramente los valores notables de la gráfica.
- La etapa de entrada de la Fig. 1 se utiliza en el amplificador operacional de la Fig. 2. Calcular la frecuencia de transición f_T , suponiendo un modelo de primer orden y que $v_{CM}=V_{DD}/2$. Se podrá suponer $A_2 \gg 10$.

Datos

- Para todos los transistores: $\beta_n = \beta_p = 2 \text{ mA/V}^2$, $V_{t_n} = V_{t_p} = 1 \text{ V}$.
- $V_{DD} = 5 \text{ V}$.

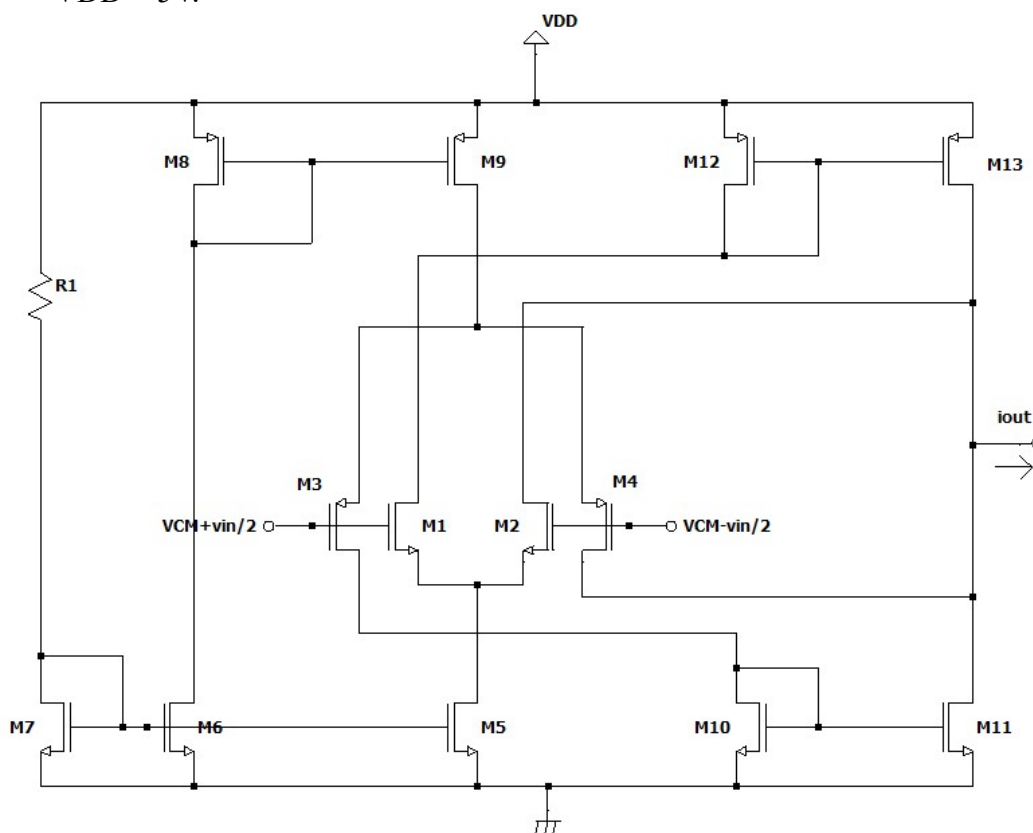


Figura 1

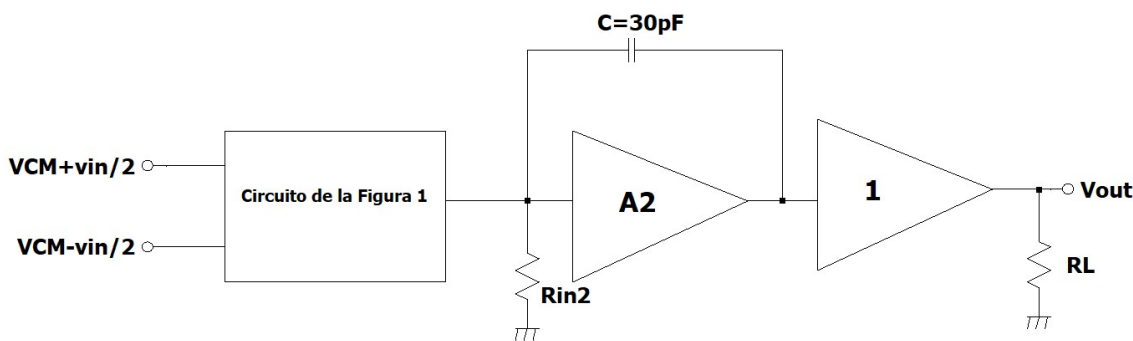


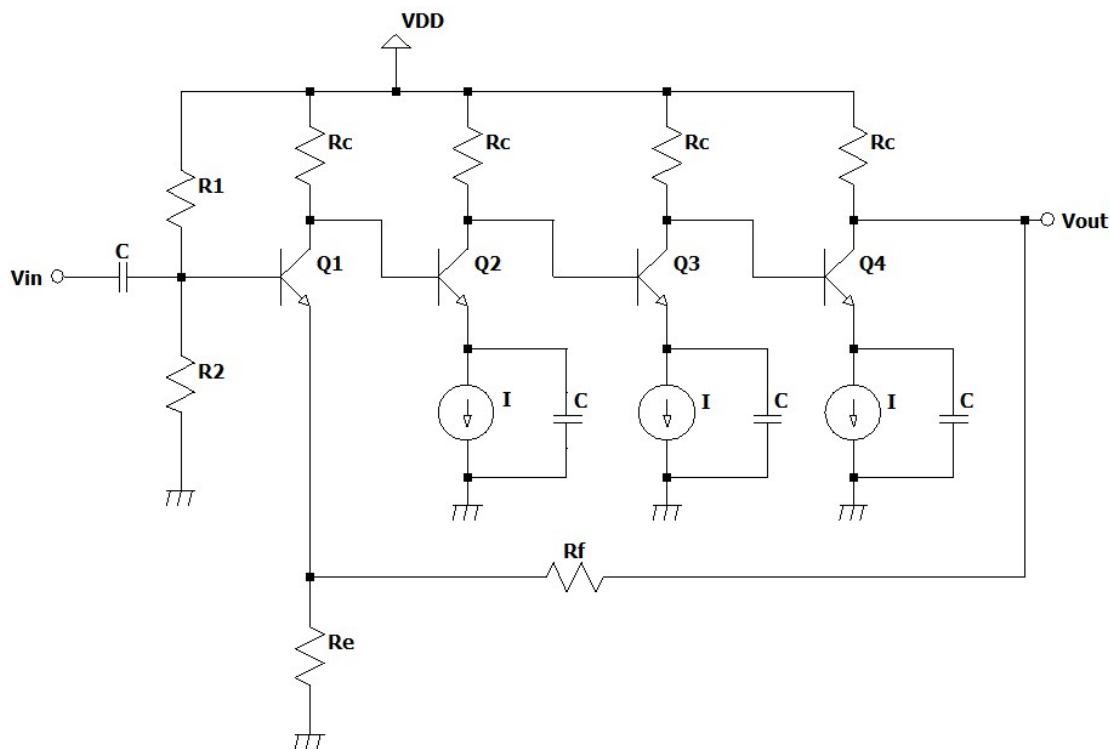
Figura 2

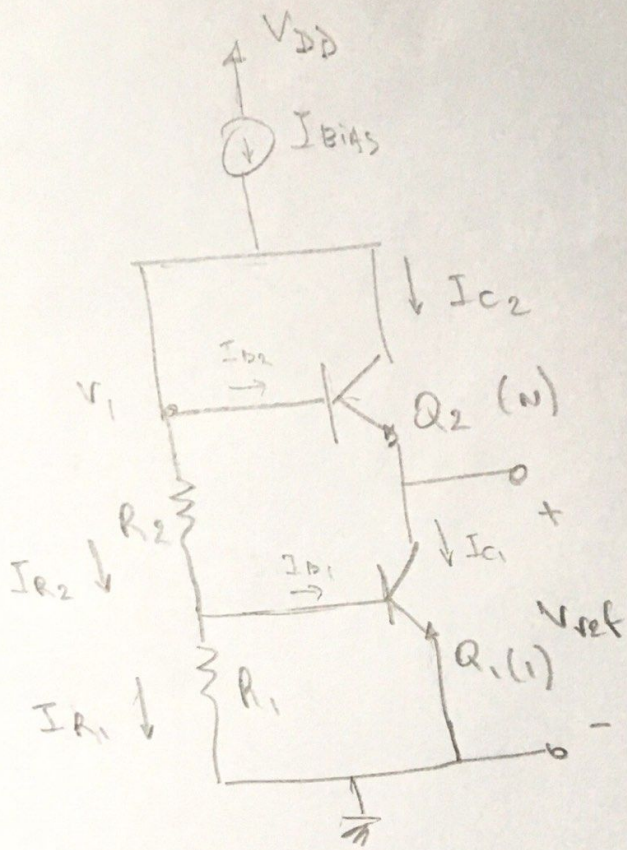
Problema 3 (33 pts):

Se considera el circuito realimentado de la figura, donde:

$R_1=330\Omega$, $R_2=220\Omega$, $R_c=150\Omega$, $R_e=47\Omega$, $R_f=1k\Omega$, $I=10mA$, $V_{CC}=3.3V$, $C=\infty$, $V_{BE}=0.7V$ y el beta de los transistores $\beta_Q=100$.

- Identificar los bloques A y β del circuito.
- Calcular la ganancia en lazo abierto G_{OL} y la ganancia en lazo cerrado G_f .
- Hallar la resistencia de entrada R_{if} y la de salida R_{of} del sistema realimentado.
- Se desea conocer la dependencia de las ganancias en lazo abierto y cerrado con respecto al parámetro β_Q de los transistores. Calcular cuál es la variación de G_{OL} y G_f si β_Q varía entre 50 y 200.





a)

$$\begin{cases} I_{C2} = I_{C1} \\ \therefore I_{B2}, I_{B1} \text{ def.} \end{cases} \quad I_{R2} = I_{R1} = \frac{V_{BE1}}{R_1}$$

$$V_{ref} = V_{BE1} + I_{R1} R_2 - V_{BE2} = (V_{BE1} - V_{BE2}) + \frac{V_{BE1} R_2}{R_1}$$

$$= (V_{BE1} - V_{BE2}) + \frac{V_{BE1}}{M}$$

$$M = \frac{R_1}{R_2}$$

b)

$$V_{BE1} = V_T \ln \frac{I_{C1}}{I_{S1}}$$

$$V_{BE2} = V_T \ln \frac{I_{C1}}{I_{S2}}$$

$$I_{S2} = N I_{S1}$$

$$\Rightarrow V_{BE1} - V_{BE2} = V_T \ln \frac{I_{S2}}{I_{S1}} = V_T \ln N$$

$$V_{ref} = V_T \ln N + \frac{(V_{A0} - \alpha T)}{M}$$

V_{ref} independente de T \Rightarrow $\frac{k \ln N}{q} = \frac{\alpha}{M}$

$$\Rightarrow M = \frac{\alpha q}{k \ln N}$$

$$V_{ref} = \frac{V_{A0}}{M}$$

c)

$$I_{C1} = I_{C2} + I_{B2} = \left(1 + \frac{1}{\beta}\right) I_{C2}$$

$$V_{ref} = V_{BE1} + (I_{R1} + I_{B1})R_2 - V_{BE2}$$

$$= (V_{BE1} - V_{BE2}) + \frac{V_{BE1}}{R_1} R_2 + I_{B1} R_2$$

$$= V_T \ln \frac{I_{C2} \left(1 + \frac{1}{\beta}\right)}{I_{S1}} - V_T \ln \frac{I_{C2}}{I_{S2}} + \frac{R_2}{R_1} V_{BE1}$$

$$+ I_{B1} R_2$$

$$= V_T \ln \frac{I_{S2} \left(\frac{\beta+1}{\beta}\right)}{I_{S1}} + \frac{R_2}{R_1} V_{BE} + \underbrace{I_{B1} R_2}$$

$$= V_T \ln N + \frac{V_{BE1}}{M} + V_T \ln \frac{\beta+1}{\beta} + I_{B1} R_2$$

\uparrow
Término por I_{B2}

\uparrow
término por I_{B1}

d) For parte b)

$$M = \frac{\alpha q}{k \ln N} = \frac{2,55 \text{ mV/K} \cdot 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}}{1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K} \cdot \ln 20} = 6$$

$$\frac{R_1}{R_2} = 6$$

$$I_{C1} = I_{C2} > 0,5 \text{ mA}$$

$$V_{A0} = 1,2 \text{ V} \Rightarrow V_{BE} @ 300 \text{ K} = 0,735$$

$$\Rightarrow I_{R1} = \frac{V_{BE}}{R_1} < 0,5 \text{ mA} \Rightarrow R_1 > \frac{V_{BE}}{0,5 \text{ mA}} = 1,47 \text{ k}$$

$$R_1 = 2,8 \text{ k} \Rightarrow R_2 = \frac{R_1}{6} = 300 \Omega$$

$$V_{ref} = \frac{V_{A0}}{M} = 0,2 \text{ V}$$

2)

$$I_D = \frac{\mu}{2} (V_{GS} - V_T)^2 = 200 \mu A$$

$$(V_{GS} - V_T)^2 = \frac{2 \cdot 200 \mu A}{2 \text{ mA/V}^2} = 0,2 \text{ V}^2$$

$$\Rightarrow (V_{GS} - V_T) = 0,45 \text{ V} \Rightarrow V_{GS} = 1,45 \text{ V}$$

$$V_{DD} = 5 \text{ V}$$

$$R_1 = \frac{V_{DD} - V_{GS}}{200 \mu A} = 17,75 \text{ k}\Omega$$

b)

$$g_m = g_{m_{1,2}} = g_{m_{3,4}} = \sqrt{2\mu I_D} = 0,63 \text{ mS}$$

für M_1, M_2

$$V_{CM} > V_{GS_{1,2}} + V_{DS_{SAT}5} = 1,32 + 0,45 = 1,77 \text{ V}$$

$$V_{DS_{1,2}} > V_{DS_{SAT_{1,2}}}$$

$$V_{DD} - V_{SG_{1,2}} - (V_{CM} - V_{GS_{1,2}}) > (V_{GS_{1,2}} - V_T)$$

$$V_{CM} < V_{DD} - V_{SG_{1,2}} + V_T = 5 - 1,32 + 1 = 4,68 \text{ V}$$

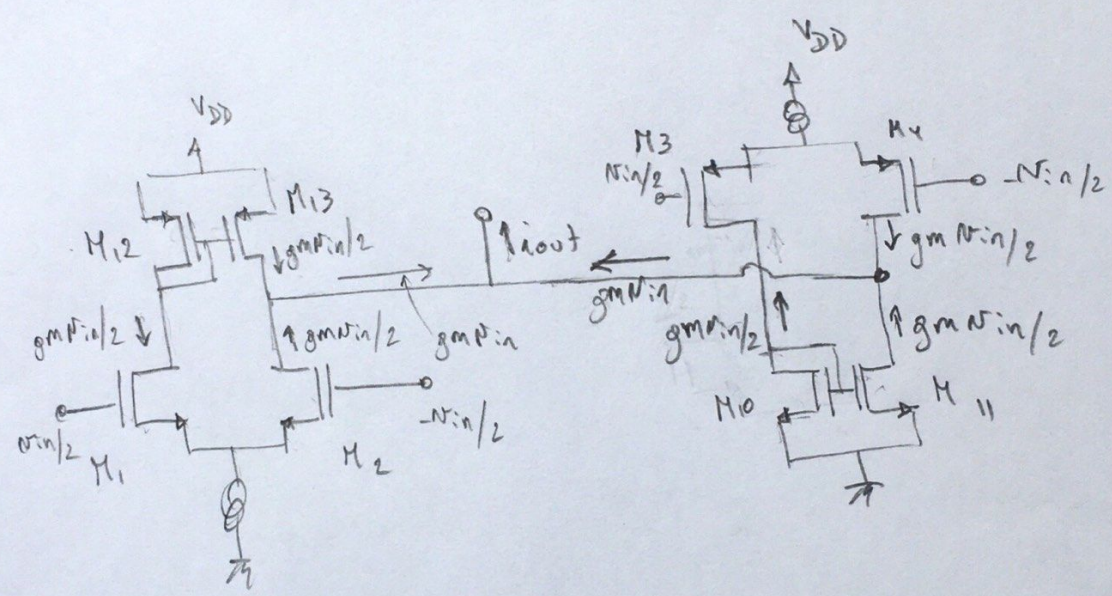
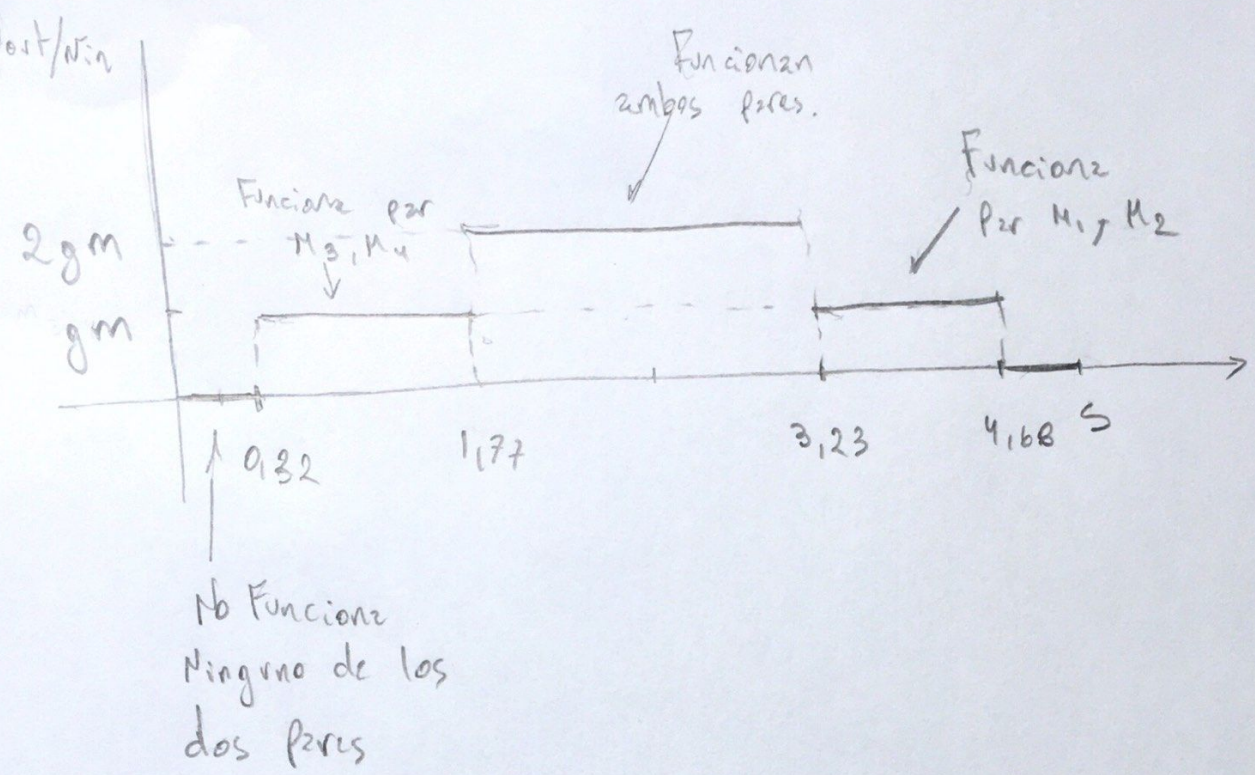
für M_3, M_4

$$V_{CM} < V_{DD} - V_{SG_{3,4}} - V_{SD_{SAT}9} = 5 - 1,32 - 0,45 = 3,23 \text{ V}$$

$$V_{SD_{3,4}} > V_{SD_{SAT_{3,3}}}$$

$$V_{CM} + V_{SG_{3,4}} - V_{GS_{10}} > V_{SG_{3,4}} - V_T \Rightarrow V_{CM} > V_{GS_{10}} - V_T = 0,32 \text{ V}$$

$$g_{m_{Tot}} = i_{out} / v_{in}$$



c)

$$f_T = \frac{g_{m_{Tot}}}{2 \cdot \pi \cdot C} = \frac{1,26 \text{ nS}}{2 \cdot \pi \cdot 30 \text{ pF}} = 6,7 \text{ MHz}$$

Problema 3

a) $I_{C2} = I_{C3} = I_{C4} = I$

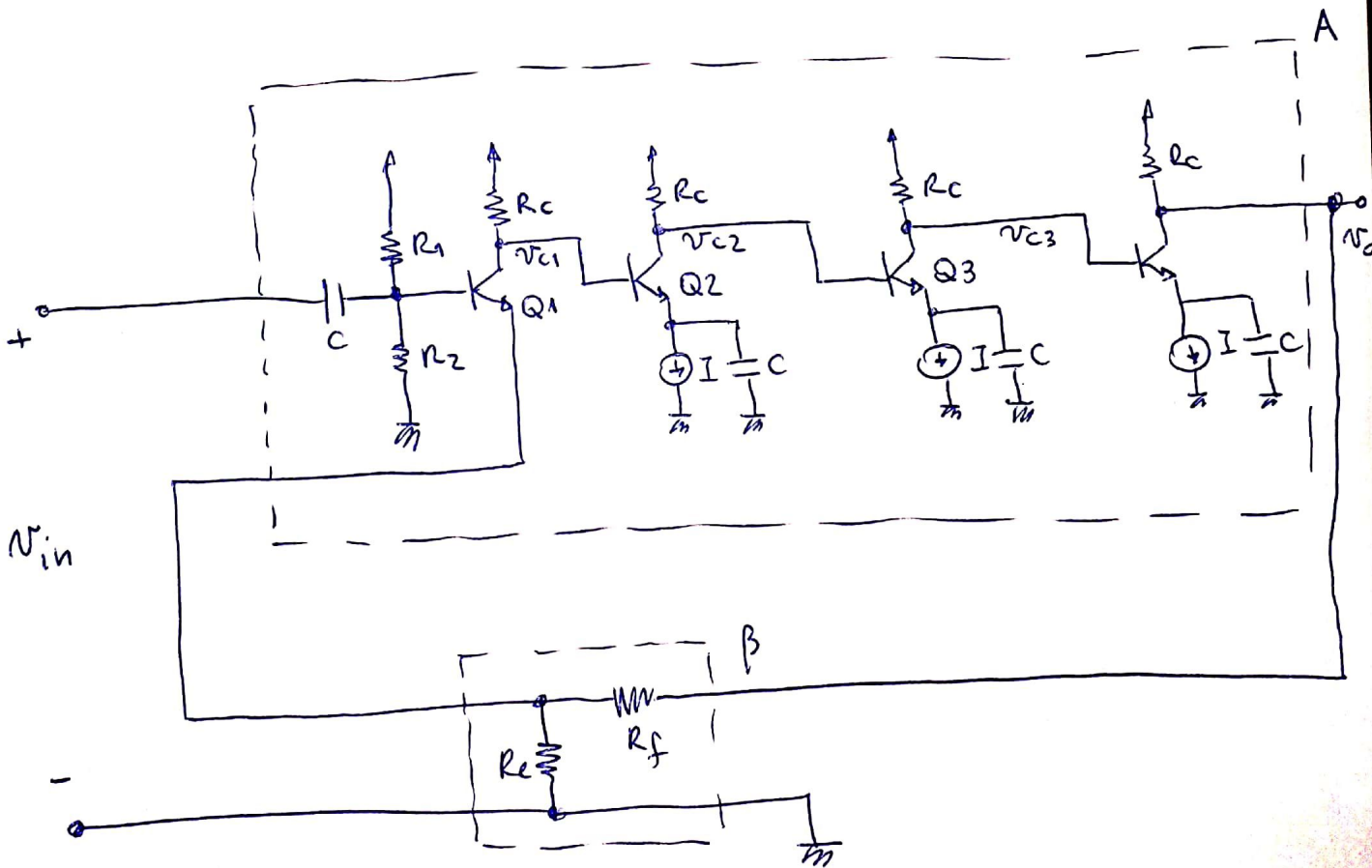
$$V_{B1} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{CC} = \frac{220\Omega}{5\Omega} \cdot 3,3V = 1,32V \rightarrow V_{E1} = V_{B1} - V_{BE} = 0,62V$$

$$V_o = V_{CC} - R_C I = 1,8V$$

$$I_{E1} = \frac{V_{E1}}{R_e} = \frac{0,62V}{4\Omega} = 13,2mA$$

$$I_{R_f} = \frac{V_o - V_{E1}}{R_f} = \frac{1,8V - 0,62V}{1k\Omega} = 1,18mA$$

$$\rightarrow I_{C1} = 12mA$$



b) Bloque β : $h_{m\beta} = R_e \parallel R_f$; $h_{22\beta}^{-1} = R_e + R_f$; $\beta = \frac{R_e}{R_e + R_f} = 0,045$

Bloque A': 4 etapas emisor común

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{v_{out}}{v_{c3}} \times \frac{v_{c3}}{v_{c2}} \times \frac{v_{c2}}{v_{c1}} \times \frac{v_{c1}}{v_{in}}$$

$$I_{c2} = I_{c3} = I_{c4} \Rightarrow g_{m2} = g_{m3} = g_{m4} = \frac{I}{V_T} = \frac{10 \text{ mA}}{26 \text{ mV}} = 385 \text{ mS}$$

$$\frac{v_{c3}}{v_{c2}} = \frac{v_{c2}}{v_{c1}} = -g_{m2,3} (R_c \parallel r_{\pi 3,4}) = -385 \text{ mS} \times 95 \Omega \quad \hookrightarrow r_{\pi 2,3,4} = \frac{\beta_0}{g_m} = 260 \Omega$$

$$= -36,6 \text{ V/V}$$

$$\frac{v_{out}}{v_{c3}} = -g_{m4} [R_c \parallel (R_f + R_e)] = -385 \text{ mS} [150 \Omega \parallel (1 \text{ k}\Omega + 47 \Omega)] = -385 \text{ mS} \times 131 \Omega$$

$$= -50,4 \text{ V/V}$$

$$\frac{v_{c1}}{v_{in}} = \frac{-g_{m1} (R_c \parallel r_{\pi 2})}{1 + g_{m1} (R_e \parallel R_f)}$$

$$\Rightarrow \frac{v_{c1}}{v_{in}} = - \frac{R_c \parallel r_{\pi 2}}{R_e} = - \frac{95 \Omega}{47 \Omega} = -2,0 \text{ V/V}$$

$$g_{m1} = \frac{I_{c1}}{V_T} = \frac{12 \text{ mA}}{26 \text{ mV}} = 0,5 \text{ S} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow g_{m1} (R_e \parallel R_f) = 0,5 \text{ S} \times \underbrace{(47 \Omega \parallel 1 \text{ k}\Omega)}_{22,47 \Omega} = 24 \gg 1$$

$$\Rightarrow \frac{v_{out}}{v_{in}} = (-50,4 \frac{\text{V}}{\text{V}}) \cdot (-36,6 \frac{\text{V}}{\text{V}})^2 \cdot (-2,0 \frac{\text{V}}{\text{V}}) = 135 \frac{\text{kV}}{\text{V}} \rightarrow 102,6 \text{ dB}$$

$$G_{OL} = A'\beta = 135 \frac{\text{kV}}{\text{V}} \times 0,045 \frac{\text{V}}{\text{V}} = 6075 \text{ V/V}$$

$$A'\beta \gg 1 \Rightarrow G_{CL} = \frac{1}{\beta} = 22,4 \text{ V/V}$$

$$c) R_{iA} = \frac{r_{ih}}{(\beta_Q + 1) \cdot i_1} = \frac{\beta_Q \cdot i_1 [R_1 \parallel R_2 \parallel (r_{\pi 1} + (\beta_Q + 1)(R_e \parallel R_f)]}{(\beta_Q + 1) i_1} = R_1 \parallel R_2 \parallel (r_{\pi 1} + \beta_Q R_e) =$$

$r_{\pi 1} = \frac{\beta_Q \cdot V_T}{I_{Q1}} = 216 \Omega$
 $\uparrow = 330 \Omega \parallel 220 \Omega \parallel 4,9 k\Omega = 129 \Omega$

si $\beta_Q \gg 1$ y con $R_e \ll R_f$

$$R_{if} = R_{iA} (1 + A' \beta) = 129 \Omega \times 6075 \frac{V}{V} = 784 k\Omega \rightarrow \boxed{R_{if} = 784 k\Omega}$$

$$R_{oA} = R_c \parallel (R_f + R_e) \approx R_c \parallel R_f = 150 \Omega \parallel 1 k\Omega = 130 \Omega$$

$$R_{of} = \frac{R_{oA}}{1 + A' \beta} = \frac{130 \Omega}{6075 V/V} = 21,5 m\Omega \rightarrow \boxed{R_{of} = 21,5 m\Omega}$$

$$d) A' \beta = \underbrace{\frac{v_{out}}{v_{c3}}}_{\text{independiente } \beta_Q} \times \underbrace{\frac{v_{c3}}{v_{c2}} \times \frac{v_{c2}}{v_{c1}}}_{\text{dependen a través de } r_{\pi 2,3}} \times \underbrace{\frac{v_{c1}}{v_{ih}}}_{\text{independiente de } \beta_Q} \times \beta$$

$r_{\pi 2,3} = \frac{\beta_Q}{g_{m 2,3}}$

$$\Rightarrow G_{OL} = 6075 \frac{V}{V} \times \frac{[R_c \parallel r_{\pi 2,3}(\beta_Q)]}{[R_c \parallel r_{\pi 2,3}(\beta_Q = 100)]}$$

$$\text{Si } \beta_Q = 50 \Rightarrow G_{OL} = 6075 \times \frac{(150 \Omega \parallel 130 \Omega)^3}{(150 \Omega \parallel 260 \Omega)^3} = 2384 \frac{V}{V}$$

$$\text{Si } \beta_Q = 200 \Rightarrow G_{OL} = 6075 \times \frac{(150 \Omega \parallel 520 \Omega)^3}{(150 \Omega \parallel 260 \Omega)^3} = 11,14 \frac{kV}{V}$$

$$G_{CL} = \frac{G_{OL} / \beta}{1 + G_{OL}} \Rightarrow \begin{cases} \text{si } \beta_Q = 50 : G_{CL} = \frac{2384 / 0,045}{1 + 2384} = 22,213 \frac{V}{V} \\ \text{si } \beta_Q = 200 : G_{CL} = \frac{11,14 kV/V / 0,045}{1 + 11,14 kV/V} = 22,220 \frac{V}{V} \end{cases}$$