

Examen de Electrónica Avanzada 1
09/02/2022

Resolver cada problema en hojas separadas.

Duración de la prueba: 3 horas.

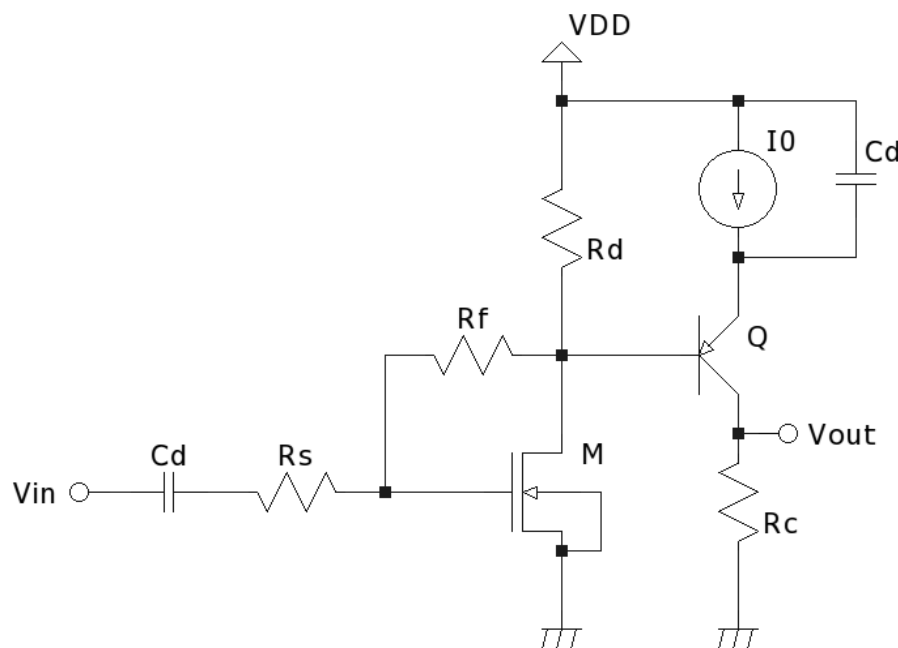
La prueba es **sin material** e **individual**.

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

Problema 1: (38 puntos)

En el amplificador de la Figura determinar:

- Ganancia a frecuencias medias.
- Frecuencia de corte superior.



Datos:

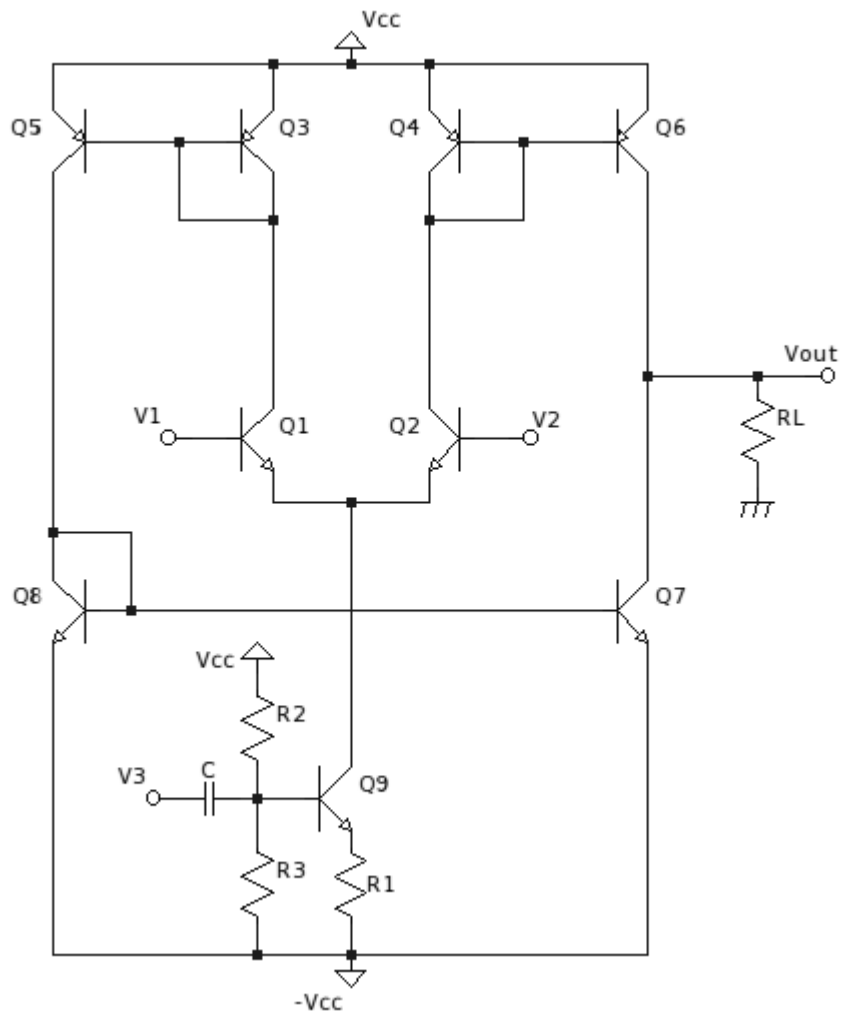
$V_{DD} = 3V$, $I_0 = 0,1 \text{ mA}$, $R_c = 6.8 \text{ k}\Omega$, $R_d = 6.8 \text{ k}\Omega$, $R_s = 75 \text{ }\Omega$, R_f es lo suficientemente grande tal que solo determina la polarización y su influencia en señal puede ser despreciada.

M: $V_T = 1 \text{ V}$, $\delta = 0$, $\beta_M = 10 \text{ mA/V}^2$, $C_{ox} = 10 \text{ fF}/\mu\text{m}^2$, $W = 500 \text{ }\mu\text{m}$, $L = 50 \text{ }\mu\text{m}$, $C_{ovn} = 2 \text{ fF}/\mu\text{m}$.

Q: $V_{EB} = 0.7 \text{ V}$, $\beta = 200$, $C_\mu = 0.8 \text{ pF}$, $C_{je} = 5 \text{ pF}$, $f_T@10\text{mA} = 6 \text{ GHz}$.

Problema 2: (38 puntos)

Considere el circuito de la Figura:



Para las partes a)-c) se puede asumir que V1 y V2 son tales que Q1-Q9 operan en zona activa.

- a) Determinar la función que relaciona Vout con V1, V2 y V3, siendo V3 de amplitud tal que el transistor Q9 opera en zona activa y (V1- V2) puede tomar cualquier amplitud.
- b) Si se linealiza la función calculada en a), ¿qué otra nueva función que relaciona Vout con V1, V2 y V3 se obtiene? ¿cuál es la amplitud de pico máxima en (V1-V2) para que la función linealizada se aproxime correctamente (rango lineal)?
- c) ¿Qué modificación o agregado se podría hacer al circuito de la figura para aumentar el rango lineal expresado en b)? Justifique su respuesta.
- d) Determinar el rango de entrada en modo común (ICMR) para las entradas V1 y V2.

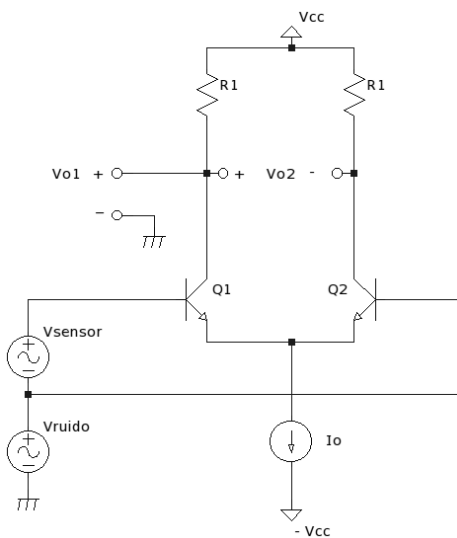
Datos:

- Para todos los transistores: $\beta = 200$, $V_{BEon} = V_{EBon} = 0.7 \text{ V}$, $V_{CEsat} = V_{ECsat} = 0.3 \text{ V}$
- $V_{cc} = 15\text{V}$, $R_1 = 2 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 47 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_L = 47 \text{ k}\Omega$ y $C = \infty$.

Nota: estas fórmulas pueden resultar de utilidad: $\text{Ln}\left(\frac{1+x}{1-x}\right) = 2 \tanh^{-1}(x)$ y $\tanh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$

Pregunta : (24 puntos)

El par diferencial de la Figura amplifica la señal de salida de un sensor representada por V_{sensor} . Entre la tierra y el sensor hay un ruido representado en la Figura como V_{ruido} . Para evitar amplificar la señal de ruido se utiliza la configuración que se muestra. Se desea analizar la influencia del apareo de los transistores $Q1$ y $Q2$ y de la resistencia de salida R_{out} de la fuente de corriente I_o en la anulación de la señal de ruido. La salida del par diferencial se puede ver en forma “single-ended” en V_{o1} o en forma diferencial en V_{o2} . Indique en las dos tablas que se muestran los casos en que la señal de ruido es anulada (con un “SI”) y los casos en que no lo es (con un “NO”). Fundamente claramente sus respuestas (de completarse solamente las tablas sin fundamentación el problema no tendrá valor). Se supondrá que la tensión de Early de $Q1$ y $Q2$ es ∞ y que las fuentes V_{sensor} y V_{ruido} son tales que los transistores funcionan en activa.



V_{o1}	$Q1 \equiv Q2$	$Q1 \neq Q2$
I_o ideal ($R_{out} = \infty$)		
I_o real ($R_{out} \neq \infty$)		
V_{o2}	$Q1 \equiv Q2$	$Q1 \neq Q2$
I_o ideal ($R_{out} = \infty$)		
I_o real ($R_{out} \neq \infty$)		

Problema 1

Planización del MOSFET:

$$\text{En DC: } V_{GS} = V_{DS} = V_{DD} - R_D I_D \quad (1)$$

$$\text{A su vez } I_D = \frac{\beta}{2} (V_{GS} - V_t)^2 \quad (2)$$

Sustituyendo V_{GS} en la ec (2) por la expresión (1):

$$I_D = \frac{\beta}{2} (V_{DD} - R_D I_D - V_t)^2 \quad (3)$$

Resolviendo ec. cuadrática (3) hallo I_D :

$$\frac{2}{\beta} I_D = V_{DD}^2 + R_D^2 I_D^2 - 2V_{DD} R_D I_D + 2R_D V_t I_D - 2V_{DD} V_t - V_t^2$$

Reordenando:

$$I_D^2 (R_D^2) + I_D (2R_D V_t - 2V_{DD} R_D - \frac{2}{\beta}) + (V_{DD}^2 - 2V_{DD} V_t - V_t^2) = 0.$$

$$\text{Dos posibles soluciones: } \begin{cases} I_{D1} = 0,5 \text{ mA} \\ I_{D2} = 0,08 \text{ mA} \end{cases}$$

$$\text{Si es } I_{D1} \Rightarrow V_{GS} = 3\text{V} - 6,8 \text{ k}\Omega \cdot 0,5 \text{ mA} = -0,4\text{V} \quad \times$$

No tiene sentido

$$\text{Si es } I_{D2} \Rightarrow V_{GS} = 3\text{V} - 6,8 \text{ k}\Omega \cdot 0,08 \text{ mA} = 2,5\text{V} \quad \checkmark$$

$$\Rightarrow \boxed{I_D = 0,08 \text{ mA}}$$

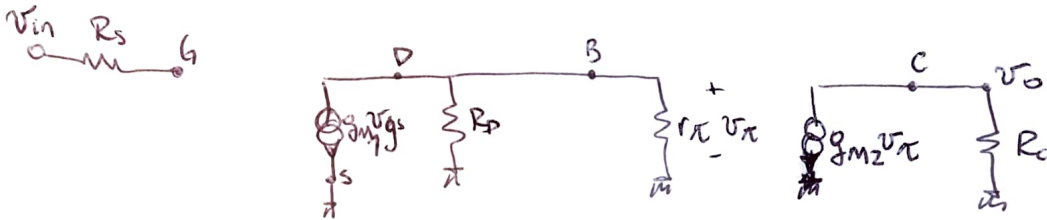
$$\Rightarrow \boxed{g_{m1} = \sqrt{2\beta I_D} = 1,26 \text{ mS}}$$

ce

a) Ganancia a freq. media.

(2)

Peg. señal freq. medias:



$$v_{gs} = v_{in} \quad ; \quad v_{\pi} = -(R_D // r_{\pi}) g_{m1} v_{gs}$$

$$\Rightarrow v_o = -g_{m2} R_c (-g_{m1} (R_D // r_{\pi}) \cdot v_{in})$$

$$\Rightarrow \left| G = \frac{v_o}{v_{in}} = g_{m1} g_{m2} R_c (R_D // r_{\pi}) \right|$$

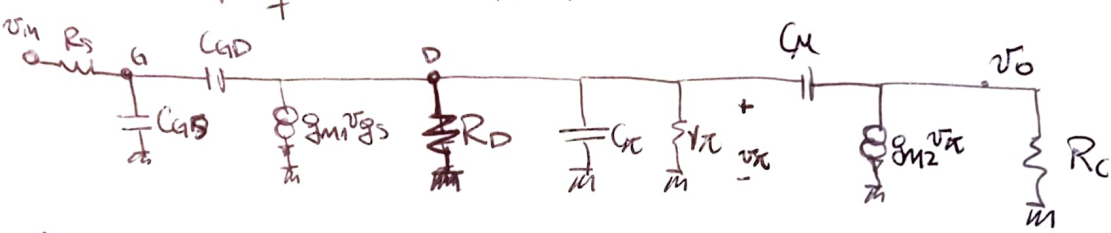
$$\bullet \quad g_{m2} = \frac{I_o}{V_T} = \frac{0,1 \text{ mA}}{26 \text{ mV}} = 3,8 \text{ mS}$$

$$\bullet \quad r_{\pi} = \frac{\beta}{g_m} = \frac{200}{3,8 \text{ mS}} = 52 \text{ k}\Omega$$

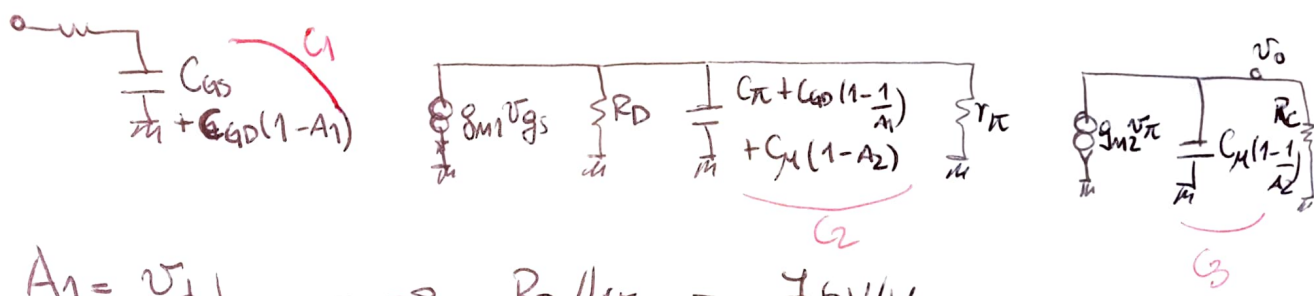
$$\Rightarrow \left| G = 196 \text{ V/V} \right| \quad \underline{\underline{\text{Ganancia a freq. medias}}}$$

b) Frec. corte superior.

Modelo peg. serial AF:



Aplico Miller a C_{GD} y C_{GE} :



$$A_1 = \frac{v_d}{v_g} |_{B.F.} = -g_{m1} R_D // r_{\pi} = -7,6 \text{ V/V.}$$

$$A_2 = \frac{v_c}{v_b} |_{B.F.} = -g_{m2} R_C = -25,8 \text{ V/V.}$$

$$C_{GS} = \frac{2}{3} W L C_{ox} + C_{ovn} W = 167 \text{ pF}$$

$$C_{GD} = C_{ovn} \cdot W = 1 \text{ pF}$$

$$C_{\mu} = 0,8 \text{ pF}$$

$$C_{\pi} : f_T @ 10 \text{ mA} = 6 \text{ GHz}$$

$$f_T = \frac{10 \text{ mA} / 26 \text{ mV}}{2\pi(C_{\pi} + C_{\mu})} \rightarrow C_{\pi} @ 10 \text{ mA} = \frac{10 \text{ mA} / 26 \text{ mV}}{2\pi \cdot 6 \text{ GHz}} = 98 \text{ pF}$$

$$\Rightarrow C_{\pi} @ 10 \text{ mA} = 9,4 \text{ pF} \Rightarrow C_{de} = C_{\pi} - C_{je} = 4,4 \text{ pF.}$$

$$\Rightarrow C_{\pi} @ 0,1 \text{ mA} = 4,4 \text{ pF} \cdot \frac{0,1 \text{ mA}}{10 \text{ mA}} + 5 \text{ pF} = 5 \text{ pF.}$$

(9)

$$\text{Polo entrada: } f_{p1} = \frac{1}{2\pi R_5 C_1} = 4,5 \text{ MHz}$$

$$\text{Polo intermedio: } f_{p2} = \frac{1}{2\pi (R_0 // 1/\pi) C_2} = 123 \text{ kHz}$$

$$\text{Polo salida: } f_{p3} = \frac{1}{2\pi R_c C_3} = 28 \text{ MHz}$$

\Rightarrow Polo dominante $f_{p2} = 123 \text{ kHz}$

\Rightarrow frec. corte superior es 123 kHz .

$$2) I_{CQ1} = I_S e^{\frac{N_{BEQ1}}{V_T}} \Rightarrow N_{BEQ1} = V_T \ln \left(\frac{I_{CQ1}}{I_S} \right)$$

$$N_{BEQ2} = V_T \ln \left(\frac{I_{CQ2}}{I_S} \right)$$

$$V_1 - V_2 = N_{BEQ1} - N_{BEQ2} = V_T \ln \left(\frac{I_{CQ1}}{I_{CQ2}} \right) \Rightarrow$$

$$\left. \begin{aligned} I_{CQ1} &= I_{CQ2} e^{\frac{V_1 - V_2}{V_T}} \\ I_{CQ1} + I_{CQ2} &= I_{CQ9} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \left. \begin{aligned} I_{CQ2} &= \frac{I_{CQ9}}{1 + e^{\frac{V_1 - V_2}{V_T}}} \\ I_{CQ1} &= \frac{I_{CQ9}}{1 + e^{\frac{V_2 - V_1}{V_T}}} \end{aligned} \right\}$$

$$\begin{aligned} N_{out} &= (I_{CQ2} - I_{CQ1}) R_L = I_{CQ9} R_L \left(\frac{1}{1 + e^{\frac{V_1 - V_2}{V_T}}} - \frac{1}{1 + e^{\frac{-(V_1 - V_2)}{V_T}}} \right) \\ &= I_{CQ9} R_L \left(\frac{e^{-\frac{(V_1 - V_2)}{2V_T}}}{e^{\frac{-(V_1 - V_2)}{2V_T}} + e^{\frac{V_1 - V_2}{2V_T}}} - \frac{e^{\frac{V_1 - V_2}{2V_T}}}{e^{\frac{V_1 - V_2}{2V_T}} + e^{\frac{-(V_1 - V_2)}{2V_T}}} \right) \\ &= I_{CQ9} R_L \left(\frac{e^{-\frac{(V_1 - V_2)}{2V_T}} - e^{\frac{V_1 - V_2}{2V_T}}}{e^{\frac{V_1 - V_2}{2V_T}} + e^{\frac{-(V_1 - V_2)}{2V_T}}} \right) \end{aligned}$$

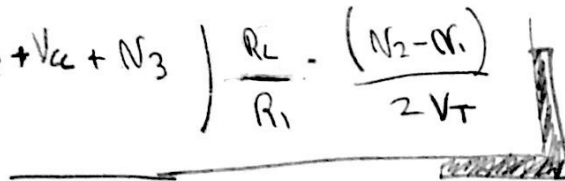
$$\left. \begin{aligned} N_{out} &= I_{CQ9} R_L \tanh \left(\frac{V_2 - V_1}{2V_T} \right) \\ I_{CQ9} &= \frac{1}{R_1} \left(V_{CC} \frac{(R_3 - R_2)}{R_2 + R_3} - N_{BEQ1} + V_{CC} \right) + \frac{g_{mQ9} N_3}{1 + g_{mQ9} R_1} \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

$$g_{mQ9} R_1 \gg 1$$

$$g_{mQ9} = \left(V_{CC} \frac{(R_3 - R_2)}{R_2 + R_3} - N_{BEQ1} + V_{CC} \right) \frac{1}{V_T R_1}$$

$$N_{out} = \left(V_{CC} \frac{(R_3 - R_2)}{(R_2 + R_3)} - N_{BEQ1} + V_{CC} + N_3 \right) \frac{R_L}{R_1} \tanh \left(\frac{V_2 - V_1}{2V_T} \right)$$

$$b) N_{out} \Big|_{N_2=N_1=0} = N_{out} \Big|_{N_2=N_1=0} + \frac{\partial N_{out}}{\partial (N_2-N_1)} \Big|_{N_2=N_1=0} \cdot (N_2-N_1)$$

$$N_{out} = \left(\frac{V_{cc}(R_3-R_2)}{R_2+R_3} - N_{BE(on)} + V_{cc} + N_3 \right) \frac{R_L}{R_1} \cdot \frac{(N_2-N_1)}{2V_T}$$


condición

$$|V_1 - V_2| < 2V_T$$

c) se podría aproximar un circuito de predistorsión que implemente: $N_2 - N_1 = 2V_T \tanh^{-1}(x)$.

d) • Q₃ en zona activa

$$\left. \begin{aligned} V_{CEQ3} &= \frac{V_{cc}(R_3-R_2)}{R_3+R_2} - N_{BE(on)} \\ V_{CEQ3} &= V_{CE1} - N_{BE(on)} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \begin{aligned} V_{CE1} - N_{BE(on)} - \frac{V_{cc}(R_3-R_2)}{R_3+R_2} + N_{BE(on)} &> V_{CE(sat)} \\ V_{CE1} &> V_{CE(sat)} + V_{cc} \frac{R_3-R_2}{R_3+R_2} = -9,4V \end{aligned}$$

• Q₃ y Q₄ en zona activa

$$\left. \begin{aligned} V_{CEQ1} &= V_{cc} - V_{BE(on)} \\ V_{EQ1} &= V_{CE1} - V_{BE(on)} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \begin{aligned} V_{cc} - V_{BE(on)} - V_{CE1} + V_{BE(on)} &> V_{CE(sat)} \\ V_{CE1} &< V_{cc} - V_{CE(sat)} = 14,7V \end{aligned}$$

$$[-9,4 ; 14,7] V \in I_{CTR}$$
