

**Examen de Electrónica 2**  
**23/12/2008**

Resolver cada problema en hojas separadas.

Duración de la prueba: 3 horas 30 minutos.

La prueba es sin material.

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

**Problema 1 (35 pts):**

El circuito de la Figura 1 es un oscilador de anillo de  $n$  etapas, donde  $n$  es impar. Para este circuito se pide:

- a) Calcular la frecuencia y condición de oscilación teniendo  $n$  como parámetro.
- b) Si la ganancia  $\beta$  del amplificador Beta depende del valor  $V_{out,rms}$  (valor rms de la tensión de salida  $V_{out}$ ) de la siguiente forma:  $\beta = \beta_0 + k.V_{out,rms}$ 
  - i) ¿Qué signo debe tener  $k$ ?
  - ii) ¿Que condición debe cumplir  $\beta_0$  para que el oscilador arranque?
  - iii) ¿Cuál es valor  $V_{out,rms}$  de las oscilaciones?

Todas las preguntas deberán ser justificadas adecuadamente.

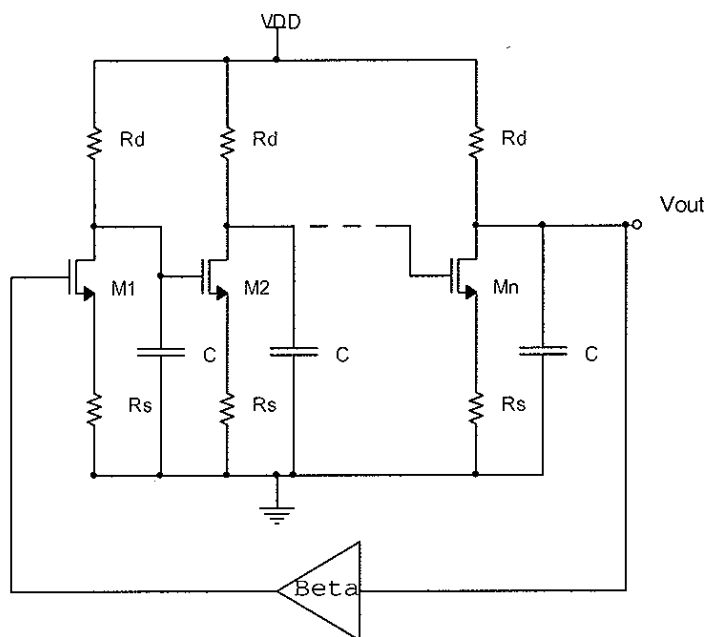


Figura 1

**Datos:**

- Capacidades de  $M_j$  : despreciables respecto a  $C$ .
- El sustrato de los transistores esta conectado a la source y la corriente continua por los transistores es tal que  $g_m.R_s \gg 1$ .
- El amplificador Beta es un amplificador ideal de ganancia  $\beta$ .
- Se supone la amplitud de oscilación suficientemente pequeña para que todos los transistores trabajen en saturación.

**Problema 2 (40 ptos):**

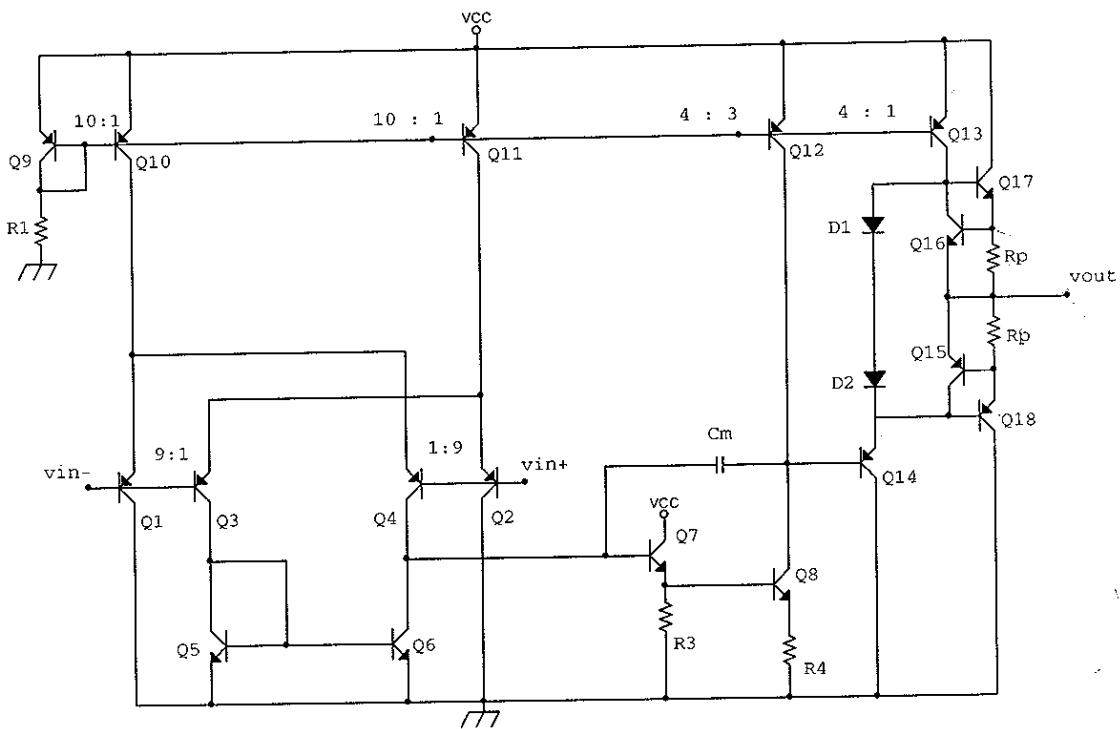
El circuito de la figura representa un amplificador operacional, donde se supone que todos los transistores tienen  $\beta=100$ , salvo Q15...18 que tienen  $\beta=50$ , la tensión de Early para todos los transistores se supondrá de 100 V, y  $V_{BE}=0.6$  V. Además se supondrá  $V_{CC}=5$  V,  $R_1=6$  k $\Omega$ ,  $R_3=50$  k $\Omega$ ,  $R_4=100$   $\Omega$ ,  $R_p=10$   $\Omega$ , y  $C=50$  pF.

En la figura se indican la relación de áreas de emisor de Q10, Q11, Q12 y Q13 respecto a Q9, es decir que:

- Q10 y Q11 tienen área de emisor 10 veces menor que Q9 o en forma equivalente, Q9 es equivalente a 10 transistores Q10 o Q11 en paralelo
- Q12 tiene área de emisor que es (3/4) el área de emisor de Q9
- Q13 tiene área de emisor que es (1/4) el área de emisor de Q9
- Análogamente se indican la relación entre las áreas de emisor de Q1 y Q3 por un lado y Q2 y Q4 por otro lado.

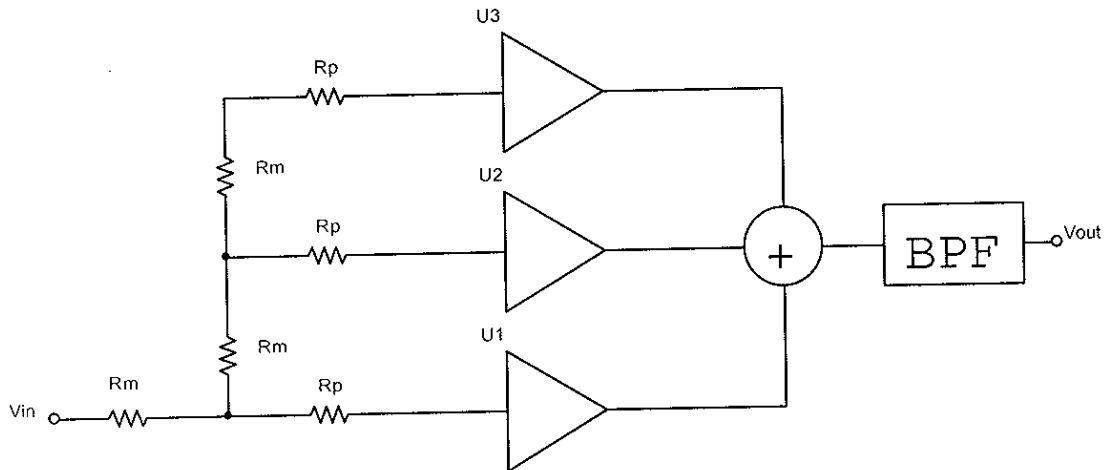
Se pide:

- Determinar la corriente de polarización de todos los transistores.
- Calcular la ganancia diferencial a baja frecuencia si se coloca un carga de 2k $\Omega$ .
- Determinar la frecuencia de ganancia unitaria ( $f_T$ ) y el SR del amplificador.
- Explicar la función de los transistores Q15 y Q16.

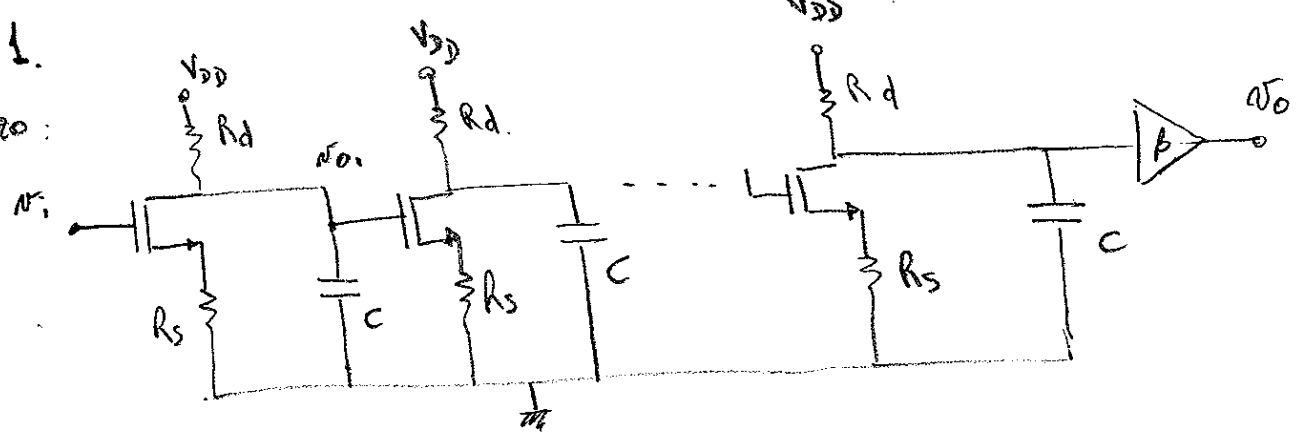


**Pregunta (25 pts):**

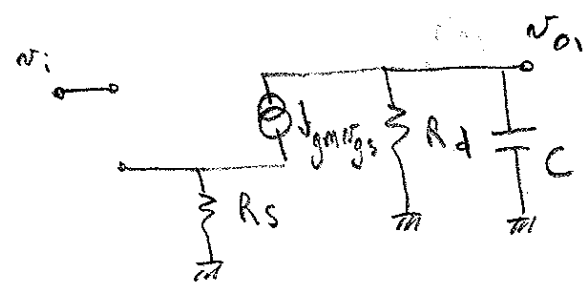
En el circuito de la figura, se tienen 3 amplificadores ideales de ganancia  $A$  conectados en paralelo. La conexión entre la entrada y cada amplificador tiene resistencias de cableado  $R_m$  y  $R_p$ , según se indica en la figura. Por último, la salida del circuito está filtrada por un filtro pasa banda con ancho de banda ideal  $\Delta f$ . Se desea evaluar el impacto del ruido debido a las resistencias de cableado, por lo tanto determine el ruido equivalente a la entrada del circuito.



Problema 1.  
Abro el lazo:



$G_{ol} = \frac{v_o}{v_i} = G^n \cdot \beta$  con  $G$  ganancia de cada etapa



$$v_{gs} = v_i - v_s = v_i - g_m v_{gs} \cdot R_s \Rightarrow v_{gs} (1 + g_m R_s) = v_i \Rightarrow v_{gs} = \frac{v_i}{1 + g_m R_s}$$

$$v_{o1} = -g_m v_{gs} \cdot (R_d \parallel \frac{1}{sC}) \Rightarrow G = \frac{v_{o1}}{v_i} = -\frac{R_d \parallel \frac{1}{sC}}{R_s} = -\frac{R_d}{R_s} \cdot \frac{1}{1 + R_d C s}$$

$$G_{ol} = -\left(\frac{R_d}{R_s}\right)^n \cdot \left(\frac{1}{1 + R_d C s}\right)^n \cdot \beta$$

Barkhausen:

$$\text{Im} = \phi \Rightarrow \text{Arg}(G_{ol}) = 0 \Rightarrow \text{Arg}(G^n) = \phi$$

$$\text{Arg}(G^n) = \pi + n \text{Arg}\left(\frac{1}{1 + j R_d C \omega s}\right)$$

$$= \pi - n \text{Arctg}(R_d C \omega s) = 2k\pi \quad k \text{ entero.}$$

$$n \text{Arctg}(R_d C \omega s) = \pi(1 - 2k)$$

$$\Rightarrow R_d \cdot C \cdot \omega_{osc} = \operatorname{tg} \left( \frac{\pi}{n} (1-2k) \right)$$

$$\omega_{osc} = \frac{1}{R_d \cdot C} \cdot \operatorname{tg} \left( \frac{\pi}{n} (1-2k) \right)$$

$$|G_{ol}| = 1$$

$$\left( \frac{R_d}{R_s} \right)^n \left( \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{R_d^2 \cdot C^2 \cdot (\operatorname{tg}(\frac{\pi}{n}(1-2k)))^2}{R_d^2 \cdot C^2}}} \right)^n \cdot \beta = 1$$

$$\boxed{\left( \frac{R_d}{R_s} \right)^n \left( \frac{1}{\sqrt{1 + (\operatorname{tg}(\frac{\pi}{n}(1-2k)))^2}} \right)^n \cdot \beta = 1}$$

b)  $\beta = \beta_0 + K \cdot N_{out\,rms}$

En el arranque  $\beta = \beta_0$  y  $|G_{ol}| > 1$

$$\Rightarrow \beta_0 > \left( \left( \frac{R_d}{R_s} \right)^n \frac{1}{(1 + (\operatorname{tg}(\frac{\pi}{n}(1-2k)))^2)^{n/2}} \right)^{-1}$$

luego  $\beta$  debe bajar  $\Rightarrow k$  debe ser negativo.

La amplitud de las oscilaciones se estabiliza en el valor para el cual se cumple la condición de oscilación

$$\Rightarrow N_{out\,rms} = \frac{1}{K} \cdot \left( \left( \frac{R_d}{R_s} \right)^n \frac{1}{(1 + (\operatorname{tg}(\frac{\pi}{n}(1-2k)))^2)^{n/2}} \right)^{-1} - \beta_0$$

②

$$(a) \quad I_q = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_L} = 0,73 \text{ mA} \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} I_{J0} = I_{J1} = 73 \mu\text{A} \\ I_{J2} = 550 \mu\text{A} \\ I_{J3} = 183 \mu\text{A} \end{cases}$$

Como  $I_{J0} = I_{J1} \Rightarrow \begin{cases} I_5 = I_2 = 66 \mu\text{A} \quad (= 0,9 I_{J0}) \\ I_3 = I_4 = 73 \mu\text{A} \quad (= 0,1 I_{J0}) \end{cases}$

$$I_5 = I_6 = 7,3 \mu\text{A}$$

$$I_B = I_{J2} \Rightarrow V_{EB} = R_4 I_{J2} = 55 \text{ mV}$$

$$\Rightarrow V_{E7} = V_{EB} + V_{BE} = 0,655 \text{ V}$$

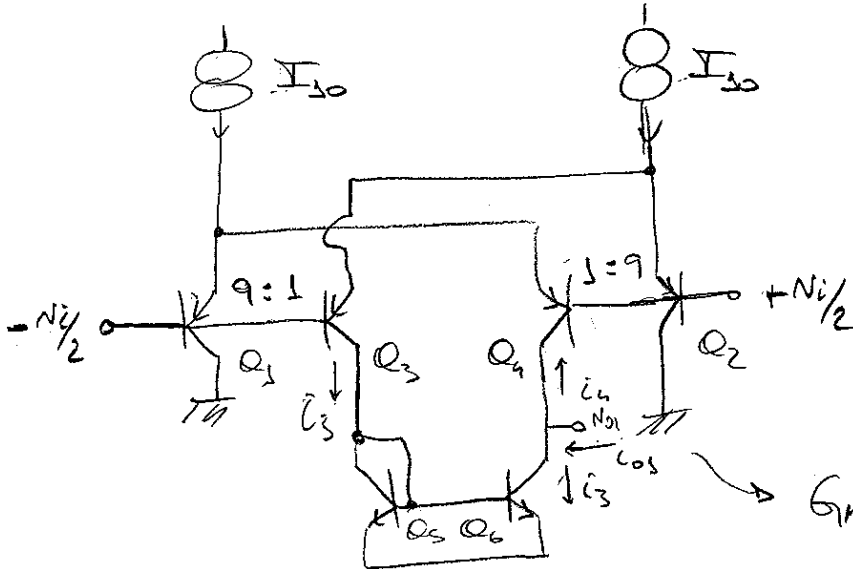
$$\Rightarrow I_7 = V_{E7} / R_3 = 13,1 \mu\text{A}$$

$$I_{J4} = I_{J5} \quad \left( \begin{array}{l} I_{12} = I_{18} \\ \beta_{17} = \beta_{18} = 50 \end{array} \right) \Rightarrow I_{B17} = I_{B18}$$

$$I_{15} = I_{16} = 0$$

2

(b) etapas k etapas :



$$g_{m3} = g_{m4} = \frac{I_{D0}}{10V_T}$$

$$g_{m3} = g_{m2} = \frac{9I_{D0}}{10V_T} = 9g_{m4}$$

$$\Gamma_{\pi3} = \Gamma_{\pi4} = 10 \frac{\beta V_T}{I_{D0}}$$

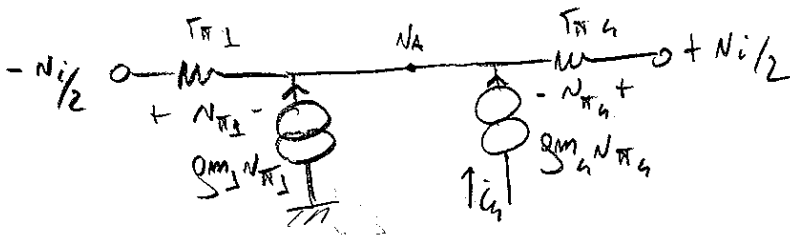
$$\Gamma_{\pi1} = \Gamma_{\pi2} = \frac{\Gamma_{\pi4}}{9}$$

$$G_{M1} = \left. \frac{i_{Cos}}{N_i} \right|_{N_{\pi4} = 0} = \frac{i_3 + i_4}{N_i}$$

TRANS CONDUCTANCIA DE LA PRIMER ETAPA

Req. señal:

Nuestro solo  $Q_4 - Q_1$  El circuito  $Q_3 - Q_2$  es equivalente



$$N_{\pi4} - N_{\pi1} = N_i \quad (*)$$

Node e  $N_A$ : 
$$N_{\pi4} \left( \frac{1}{\Gamma_{\pi4}} + g_{m4} \right) + N_{\pi1} \left( \frac{1}{\Gamma_{\pi1}} + g_{m1} \right) = 0$$

$$N_{\pi4} \left( \frac{1 + g_{m4} \Gamma_{\pi4}}{\Gamma_{\pi4}} \right) = -N_{\pi1} \left( \frac{9}{\Gamma_{\pi4}} + 9g_{m4} \right) = -N_{\pi1} 9 \left( \frac{1 + g_{m4} \Gamma_{\pi4}}{\Gamma_{\pi4}} \right)$$

$$\Rightarrow \left. \begin{aligned} N_{\pi4} &= -9N_{\pi1} \\ (*) \quad N_{\pi4} - N_{\pi1} &= N_i \end{aligned} \right\} \Rightarrow \begin{cases} N_{\pi1} = -N_i/10 \\ N_{\pi4} = 9N_i/10 \end{cases}$$

$$\Rightarrow i_4 = +g_{m4} N_{\pi4} = \frac{9g_{m4}}{10} N_i \quad \left\{ \Rightarrow G_{M1} = \frac{18}{10} \frac{I_{D0}}{V_T} = 0,53 \frac{mA}{V} \right.$$

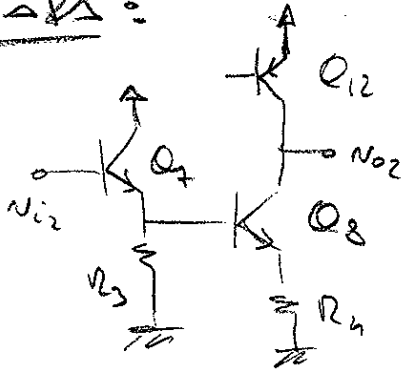
Analógicamente  $i_3 = \frac{9g_{m3}}{10} N_i$

(2)

(b) Impedancia de salida

•  $R_{o1} = \frac{N_{o1}}{i_{o1}} \Big|_{N_i = 0} \Rightarrow R_{o1} = r_{o1} \parallel r_{o4} = \frac{V_A}{2I_{E4}} = 6,85 \text{ k}\Omega$

SEGUNDA ETAPA:



•  $R_{i2} = r_{\pi 7} + (\beta + 1)(R_3 \parallel (r_{\pi 8} + (\beta + 1)R_E))$

$r_{\pi 7} = 1984 \Omega$

$r_{\pi 8} = 4,7 \text{ k}\Omega$

$\Rightarrow R_{i2} = 210 \text{ k}\Omega$

•  $G_{m2} = \frac{i_{o2}}{N_{i2}} \Big|_{N_{o2} = 0}$

$G_{m2} = g_{m8} \cdot \frac{N_{b8}}{N_{i2}}$

$N_{b8} = N_{b8} \cdot \frac{r_{\pi 8}}{r_{\pi 8} + (\beta + 1)R_E} = \frac{N_{b8}}{1 + g_{m8}R_E}$

$\Rightarrow G_{m2} = \frac{g_{m8}}{1 + g_{m8}R_E} \cdot \frac{N_{b8}}{N_{i2}}$

$N_{b8} = \frac{g_{m2} [R_3 \parallel (r_{\pi 8} + (\beta + 1)R_E)]}{1 + g_{m2} [R_3 \parallel (r_{\pi 8} + (\beta + 1)R_E)]} N_{i2} \Rightarrow \frac{N_{b8}}{N_{i2}} \approx 0,85 \%$

$\Rightarrow G_{m2} = 5,79 \text{ mA/V}$

•  $R_{o2} = R_{o8} \parallel R_{o12}$

$R_{o8} = r_{o8} \left( 1 + \frac{\beta}{r_{\pi 8} + R_{b8}} (R_E \parallel (r_{\pi 8} + R_{b8})) \right)$

$R_{b8} = R_3 \parallel \left( \frac{r_{\pi 7} + R_{o1}}{\beta + 1} \right) = 1,17 \text{ k}\Omega$

$R_{o12} = r_{o12} = 182 \text{ k}\Omega$

$r_{o8} = 182 \text{ k}\Omega$

$\Rightarrow R_{o8} = 530 \text{ k}\Omega$

$\Rightarrow R_{o2} = 136 \text{ k}\Omega$



(2)

(b)  $R_L = 2 \text{ k}\Omega$  (incluye la carga en las vueltas)

$$\Rightarrow R_{i3} = r_{\pi 14} + (\beta + 1) \left[ r_{o13} // \left( r_{\pi 18/17} + (\beta + 1)(R_E + R_L) \right) \right]$$

$$r_{o13} = 546 \text{ k}\Omega$$

$$r_{\pi 14} = 14,2 \text{ k}\Omega \ll \beta (r_{o13} // (\beta + 1)(R_E + R_L))$$

$$(\beta + 1)(R_E + R_L) \cong 200 \text{ k}\Omega \quad (\text{ASUMO } r_{\pi 18/17} \text{ despreciable})$$

$$\Rightarrow \boxed{R_{i3} \cong 15,4 \text{ k}\Omega}$$

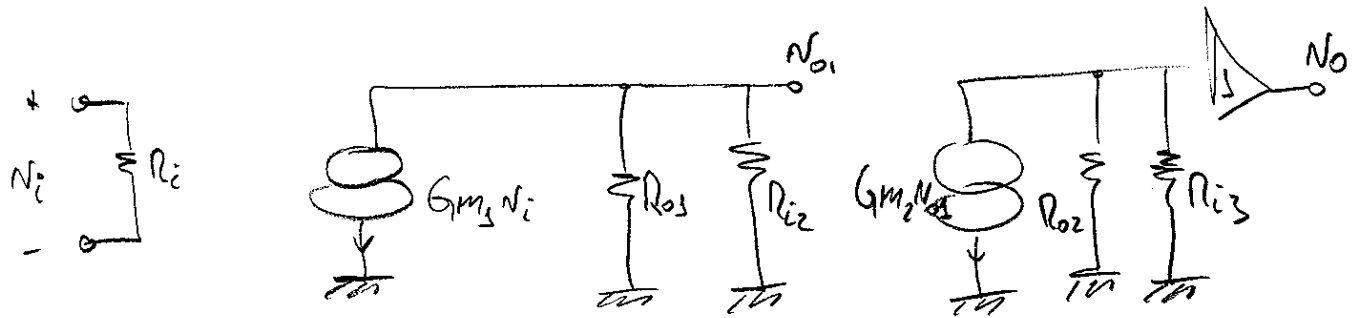
•  $\frac{N_{o3}}{N_{i3}} \Big|_{i_{o3} = 0}$  (incluye  $R_L$ )

$$\frac{N_{e14}}{N_{i3}} = \frac{g_{m14} \left[ r_{o13} // (\beta + 1)(R_E + R_L) \right]}{1 + g_{m14} \left[ r_{o13} // (\beta + 1)(R_E + R_L) \right]} \left\{ \begin{array}{l} \Rightarrow N_{e14} \cong N_{i3} \\ g_{m14} = f_{m\Delta/V} \Rightarrow g_{m14} \times R_{E14} \gg 1 \end{array} \right.$$

$$\text{ASUMO } g_{m17/18} \times (R_E + R_L) \gg 1 \Rightarrow \boxed{\frac{N_{o3}}{N_{i3}} \cong 1 \text{ V}}$$

• Dado q' ya inclui la carga, no preciso calcular  $R_{o3}$

2  
(b)



$$A_0 = G_{m1} R_{o1} // R_{i2} + G_{m2} R_{o2} // R_{i3}$$

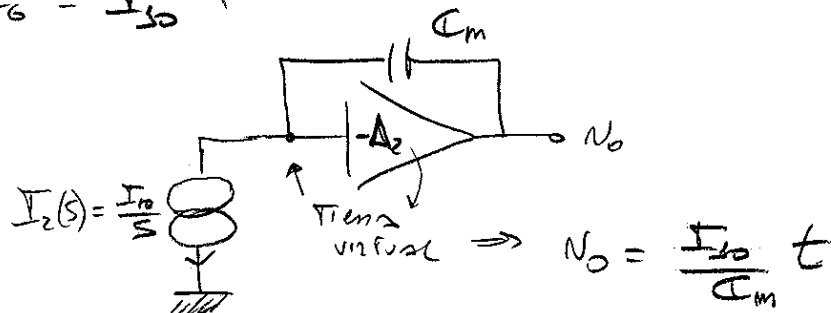
$$A_0 = 84,3 \times 10^4 \text{ V/V} \Rightarrow \boxed{A_0 = 98,5 \text{ dB}}$$

(c)  $f_T = \frac{1}{2\pi} \frac{G_{m1}}{C_m} \Rightarrow \boxed{f_T = 1,6 \text{ MHz}}$

SR: Escalon positivo  $\rightarrow$   $\left. \begin{array}{l} Q_2 \text{ y } Q_4 \text{ OFF} \\ Q_3 \text{ y } Q_5 \text{ ON} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{CARGA ESC.} \\ \text{NEGATIVO} \\ \text{ES ANALÓGICO} \end{array}$

$$\Rightarrow \left. \begin{array}{l} I_1 = I_{D0} \\ I_3 = I_{D0} \\ I_5 = I_6 = I_{D0} \end{array} \right\} \Rightarrow I_{D3} = I_{D0}$$

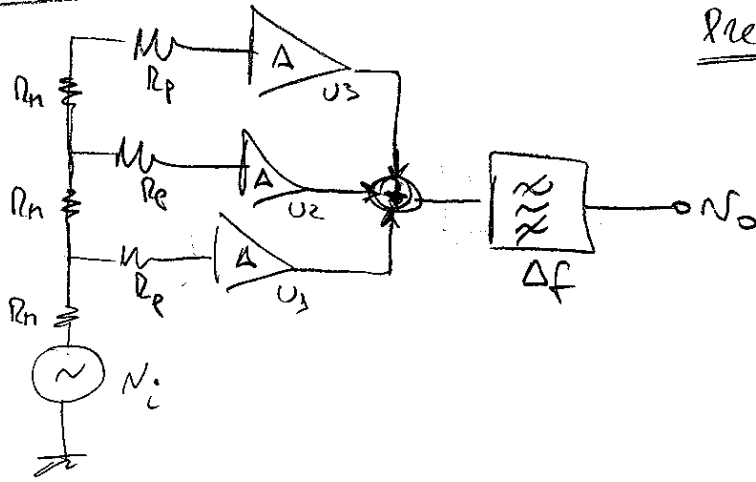
Situación:



$$\Rightarrow SR = \frac{I_{D0}}{C_m} \Rightarrow \boxed{SR = 1,46 \text{ V/\mu s}}$$

(d)  $Q_{15}$  y  $Q_{16}$  proveen protección contra cortocircuitos ( $I_{max} = \frac{V_{DS}}{R_{CP}} = 60 \text{ mA}$ )

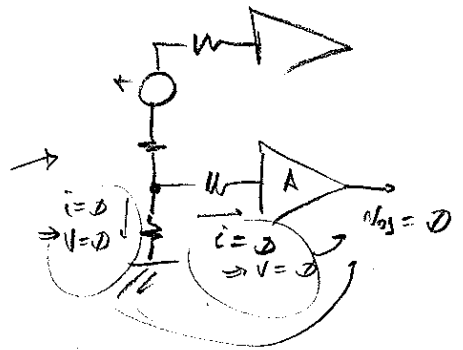
Preguntas



Preguntas:  $N_{ineq}$

•  $N_{signal} = 3A N_i$

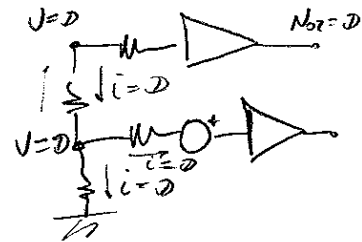
¿Porque no afecta las otras R's?



•  $U_1: N_{on1} = A \sqrt{4kT(Rn + Rp)\Delta f}$

$U_2: N_{on2} = A \sqrt{4kT(2Rn + Rp)\Delta f}$

x'q ¿sido Rp?



$U_3: N_{on3} = A \sqrt{4kT(3Rn + Rp)\Delta f}$

$$\Rightarrow N_{onT}^2 = \sum_i N_{oni}^2 = \Delta^2 \cdot 4kT\Delta f \cdot \sum_i (iRn + Rp)$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow N_{onT} &= A \sqrt{4kT\Delta f} \sqrt{6Rn + 3Rp} \\ &= A \sqrt{12kT\Delta f} \sqrt{2Rn + Rp} \end{aligned}$$

$$N_{ineq} = \frac{N_{onT}}{3A} = \sqrt{\frac{4kT\Delta f}{3}} \sqrt{2Rn + Rp}$$