

2^{do} Parcial de Electrónica 2
26/11/2013

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: (30 puntos)

El circuito de la Figura es un Amplificador Operacional internamente compensado. Se pide:

- Determinar cual es la entrada no-inversora.
- Calcular la corriente de polarización de todos los transistores.
- Calcular la ganancia a bajas frecuencias $v_o/(v_a-v_b)$.
- Calcular el f_T del amplificador.
- Calcular el SR del amplificador.

Datos:

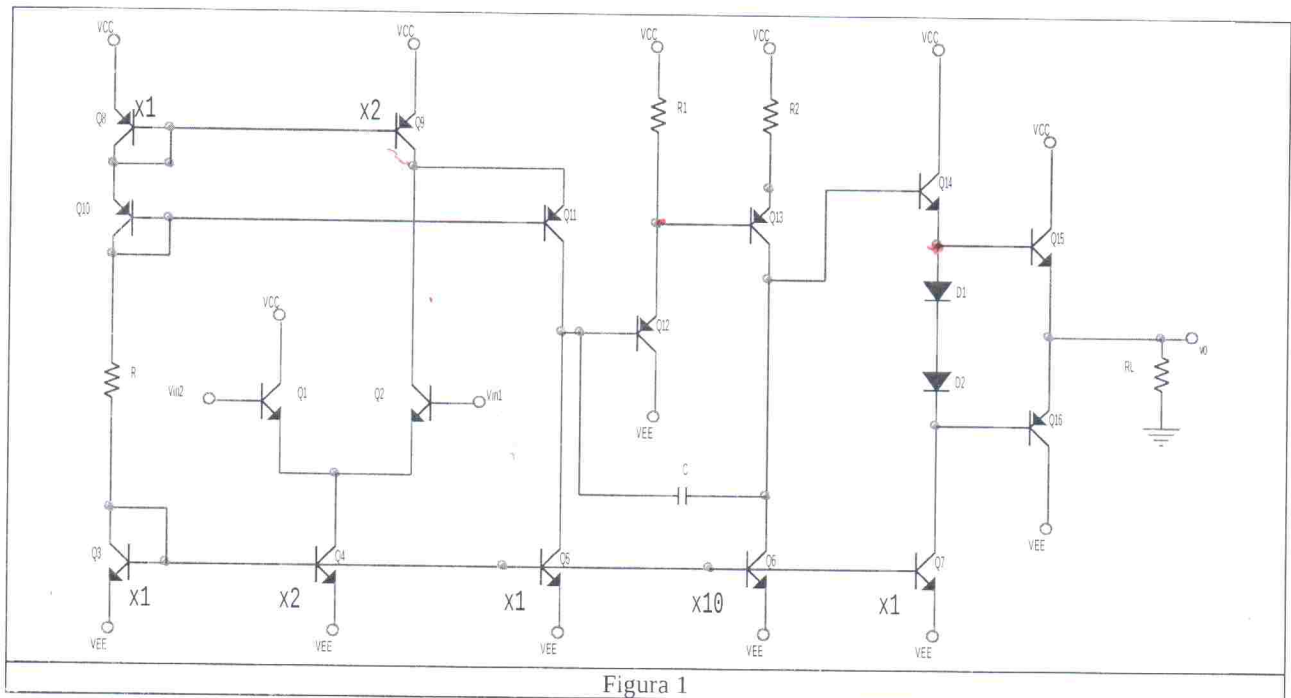
$$V_{CC} = -V_{EE} = 5 \text{ V}$$

Todos los transistores: $V_{BE} = 0.7 \text{ V}$, $\beta = 200$, $V_A = 125 \text{ V}$.

$R = 330 \text{ k}\Omega$, $R_1 = 100 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 5,6 \text{ k}\Omega$, $R_L = 2 \text{ k}\Omega$, $C = 25 \text{ pF}$.

Los diodos D1, D2 estan hechos con transistores idénticos a los demas.

Los transistores Q15 y Q16 son idénticos a los demás excepto que tienen un área de emisor 2 veces más grande que el resto.



Problema 2 (24 puntos):

Para la etapa de potencia de la figura:

- a) Calcular V_{out}/V_{in} .
- b) Calcular el máximo rendimiento.
- c) Calcular la máxima potencia que deben disipar los transistores de salida (Q4, Q6) si se tiene una señal sinusoidal de entrada con amplitud entre 0 y V_{CC} .

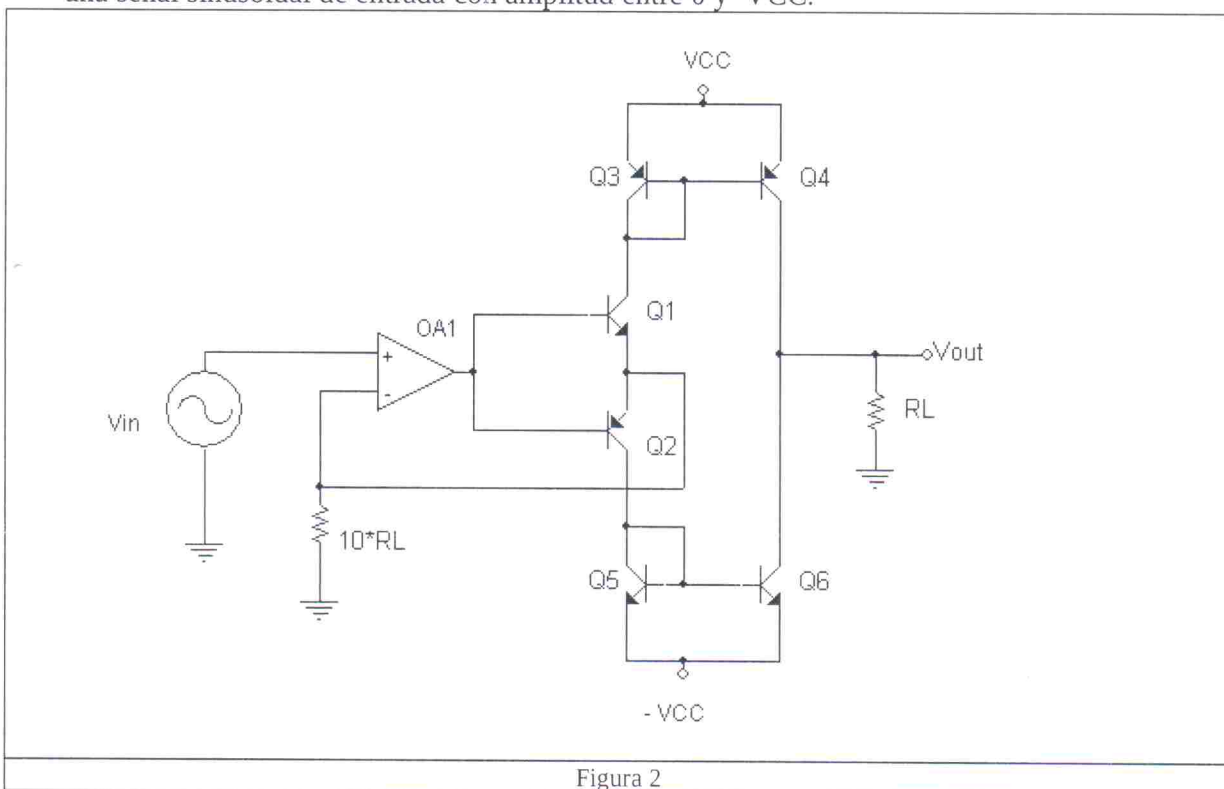


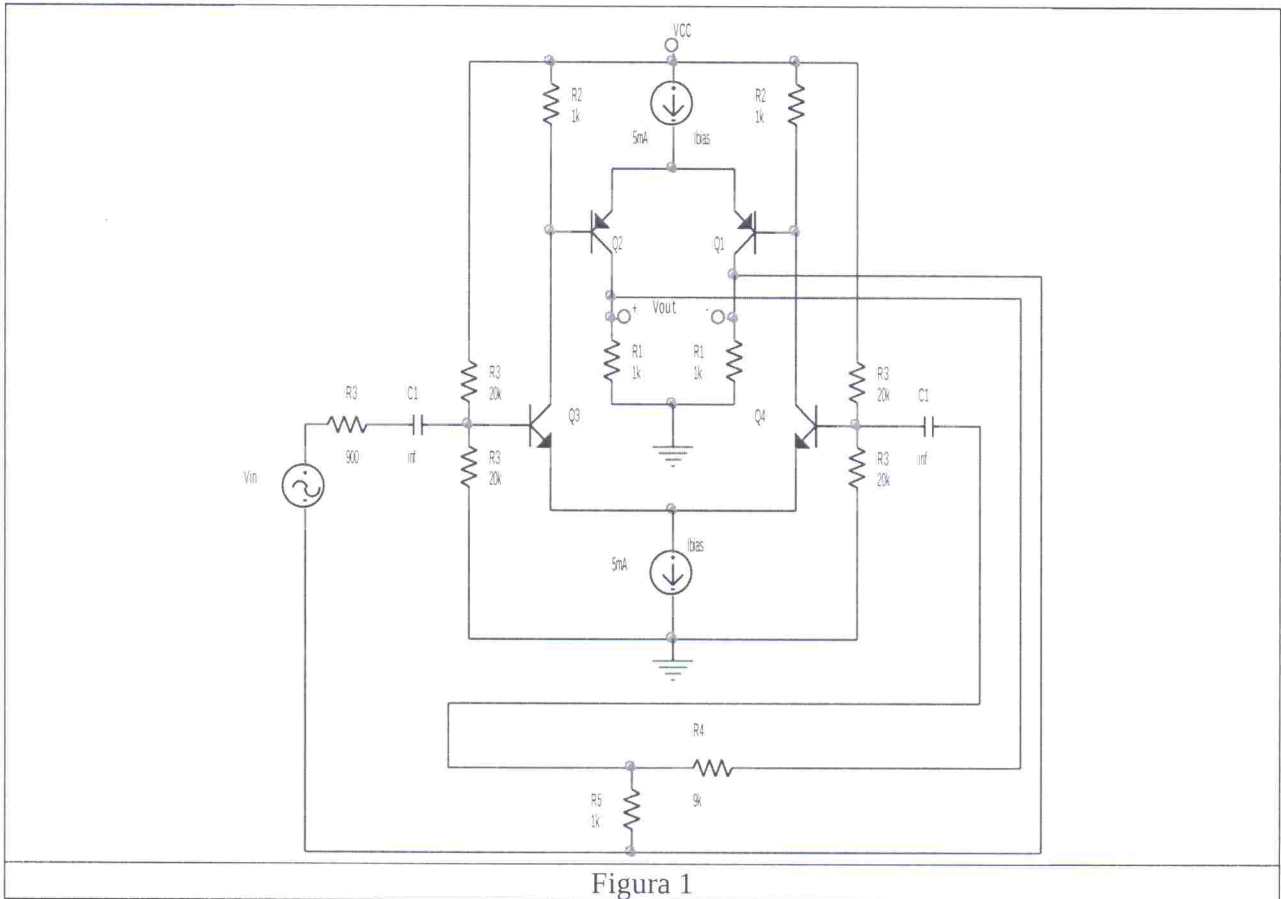
Figura 2

Datos: $V_{CC} = |-V_{CC}| = 10V$, $R_L = 8 \Omega$, todos los transistores tienen tensión base-emisor V_{BE} , tensión de saturación colector-emisor V_{CESAT} , $V_{CC} \gg V_{BE}$, V_{CESAT} , $\beta \gg 10$ e $I_{S4,6} = 10 * I_{S3,5}$. El amplificador operacional OA1 se podrá considerar ideal, alimentado con V_{CC} y $-V_{CC}$.

Problema 3: (26 puntos)

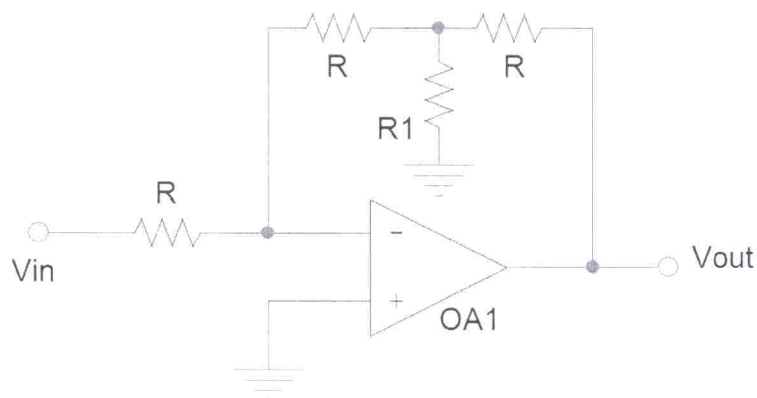
En el circuito de la figura V_{in} es una fuente de señal flotante (ninguno de sus bornes tiene conexión a tierra) Todos los transistores tienen un $\beta = 100$ y las resistencias los valores indicados en la figura.

- a) Calcule la ganancia $G = V_{out}/V_{in}$ del circuito.
- b) Ambas corrientes de polarización son creadas copiando una misma fuente de corriente. Si, por tal motivo, ambas tienen el mismo error del 10% respecto a su valor nominal indicado en la figura ¿como se refleja este error en la ganancia del circuito?, calcule dG/G .



Problema 4: (20 puntos)

Para el circuito de la figura determinar el voltaje rms de ruido equivalente en la entrada V_{in} . Para ello se deberá considerar el ruido aportado por las resistencias y que se trabaja sobre un ancho de banda ideal de B Hz. Se podrá despreciar el ruido aportado por el amplificador operacional OA1 y se podrá asumir que $R/R_1 \gg 2$.



I

$$(a) N_{in1} \uparrow \Rightarrow i_{c2} \uparrow \Rightarrow i_{c11} \downarrow \Rightarrow N_{b12} \downarrow \Rightarrow N_{b13} \downarrow$$

$$\Rightarrow N_{b14} \uparrow \Rightarrow N_b \uparrow \Rightarrow \boxed{N_{in1} \text{ e } b \text{ entran a } \underline{\underline{NO-INVIERSONS}}}$$

$$(b) I_{c3} = \frac{2V_{cc} - 3V_{BE}}{R} = \underline{\underline{24 \mu A}}$$

$$I_{c3} = I_{c8} = I_{c10} = I_{c1} = I_{c2} = I_{c5} = I_{c7} = I_{REF}$$

$$I_{c4} = I_{c9} = 2I_{REF} = 48 \mu A$$

$$I_{c6} = 10 I_{REF} = 240 \mu A$$

$$(H) I_{B16} \ll I_{c7} \Rightarrow I_{D1} = I_{D2} = I_{REF}$$

$$\Rightarrow I_Q = I_{c15} \Big|_{I=0} = I_{B16} \Big|_{I=0} = 2I_{REF}$$

$$\Rightarrow I_{B16} \ll I_{c7} \checkmark$$

$$\Rightarrow I_{c14} = I_{REF} \quad (I_{B15} \ll I_{c14})$$

$$I_{c6} \gg I_{B14} \Rightarrow I_{c13} = 10 I_{REF}$$

$$I_{c12} = \frac{V_{cc} - V_{BE3}}{R_1} + I_{B13} = 1,2 \mu A$$

$$V_{cc} - V_{BE3} = I_{c13} R_2 + V_{BE3} = 2,04 V \Rightarrow \frac{V_{cc} - V_{BE3}}{R_2} = 20,4 \mu A$$

$$\Rightarrow I_{c12} = 21,6 \mu A$$

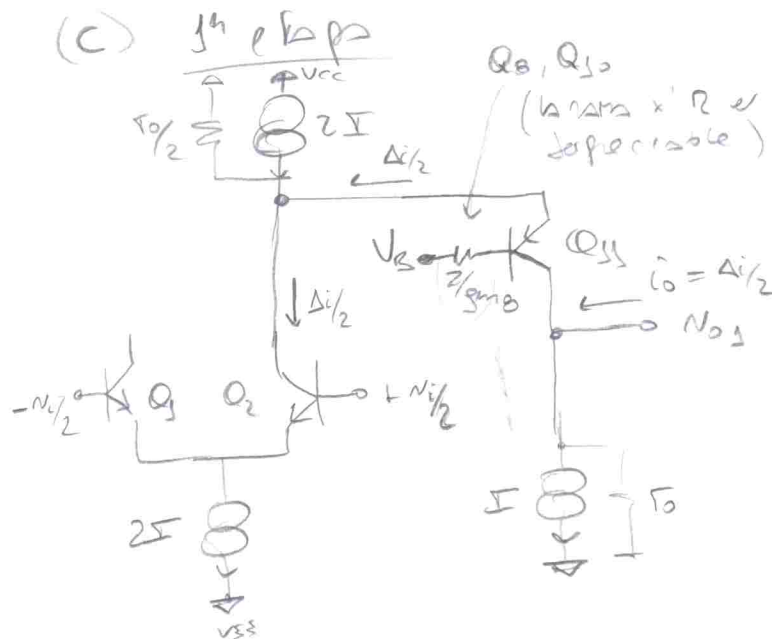
$$I_{B12} \ll I_{c5} \Rightarrow I_{c11} = I_{REF}$$

$$\left(\begin{array}{l} \text{se verifica} \\ I_{c2} + I_{c11} = I_{c9} \end{array} \right)$$

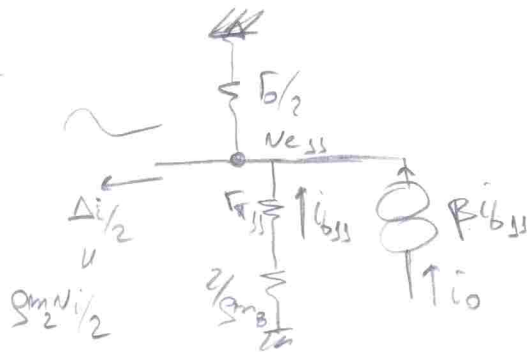
1

$$r_o = \frac{V_A}{I} = 5,211 \Omega$$

(c) 14 e b p



$$G_m = \frac{i_o}{N_{i2}} \Big|_{N_{i0} = 0}$$



$$i_{b33} (\beta + 1) + \frac{N_{e33}}{r_{d2}} = \Delta i / 2$$

$$i_{b33} = \frac{N_{e33}}{r_{d2} + \frac{r_o33}{\beta + 1}} \quad r_{d2} = 215,84 \Omega \gg 540 \Omega = \frac{2}{g_{m3}}$$

$$\Rightarrow N_{e33} \left(\frac{\beta + 1}{r_{d2}} + \frac{1}{r_o33} \right) \approx N_{e33} \cdot g_{m33} = \Delta i / 2$$

$$\sim g_{m33} = 3,71 \text{ mA/V} \gg 0,338 \text{ mA/V} = \frac{2}{r_o}$$

$$i_o = \beta i_{b33} \approx \beta \frac{N_{e33}}{r_{d2}} = g_{m33} N_{e33} = \Delta i / 2 = i_o$$

$$\Rightarrow G_{m3} = g_{m2} / 2 = 0,46 \text{ mA/V}$$

$$R_{o3} = r_o \parallel R_{u33}$$

$$R_{u33} = r_o \left(1 + \frac{\beta}{r_{d2} + \frac{r_o33}{\beta + 1}} \left(r_{d2} \parallel \frac{2}{g_{m3}} \right) \right), \quad R_{e33} = \frac{r_o}{2} \parallel r_o = \frac{r_o}{3}$$

$$\Rightarrow R_{u33} = r_o \left(1 + \frac{\beta}{r_{d2}} \left(r_{d2} \parallel \frac{r_o}{3} \right) \right) \gg r_o \Rightarrow R_{o3} = r_o = 5,211 \Omega$$

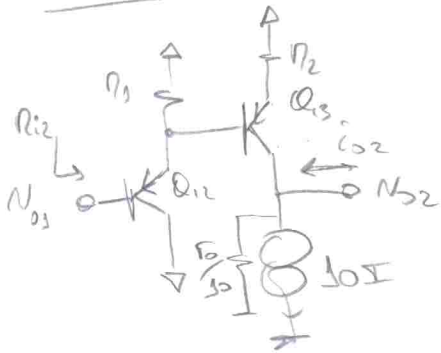
①

(c) (sigue)

3^{er} etapa: Q_{33} es un FOLDED CASCADE que implementa un camino de baja impedancia por el que circula la corriente de señal.



2^{da} etapa:



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

$$G_{m2} = \underbrace{\frac{g_{m12}(R_{13} \parallel R_{B13})}{1 + g_{m12}(R_{13} \parallel R_{B13})}}_{\text{segunda etapa}} \cdot \underbrace{\frac{g_{m13}}{1 + g_{m13}R_2}}_{\text{emisor común}}$$

$$R_{B13} = r_{\pi13} + (\beta + 1)R_2 = 1,34 \text{ k}\Omega \gg R_2 = 100 \Omega$$

$$g_{m12} = \frac{I_{C12}}{V_T} = 0,83 \text{ mA/V} \Rightarrow g_{m12}R_{B13} = 83,4 \gg 1$$

$$g_{m13} = \frac{I_{O1}}{V_T} = 9,27 \text{ mA/V} \Rightarrow g_{m13}R_2 = 53,9 \gg 1$$

$$\Rightarrow G_{m2} = \frac{1}{R_2} = 178,6 \text{ mA/V}$$



$$R_{i2} = \underbrace{r_{\pi12}}_{239 \Omega} + (\beta + 1) \underbrace{(R_{B13} \parallel R_2)}_{\sim 92 \Omega} = 18,6 \text{ k}\Omega$$

$$R_{o2} = r_{o12} \parallel R_{u13}$$

$$R_{u13} = r_{o13} \left(1 + \frac{\beta}{r_{\pi13} + R_{B13}} (r_{\pi13} + R_{B13}) \parallel R_2 \right) \gg r_{o13}$$

$$\Rightarrow R_{o2} \approx 520 \text{ k}\Omega$$

1

(c) (sigue)

Step Solids:



$$R_{i3} = r_{th} + (\beta + 1) R_{B14}$$

$$R_{B14} \cong \frac{\beta R_L // r_o}{\beta + 1} \cong \beta R_L$$

$$\Rightarrow R_{i3} \cong \beta^2 R_L = 80 \pi \Omega$$

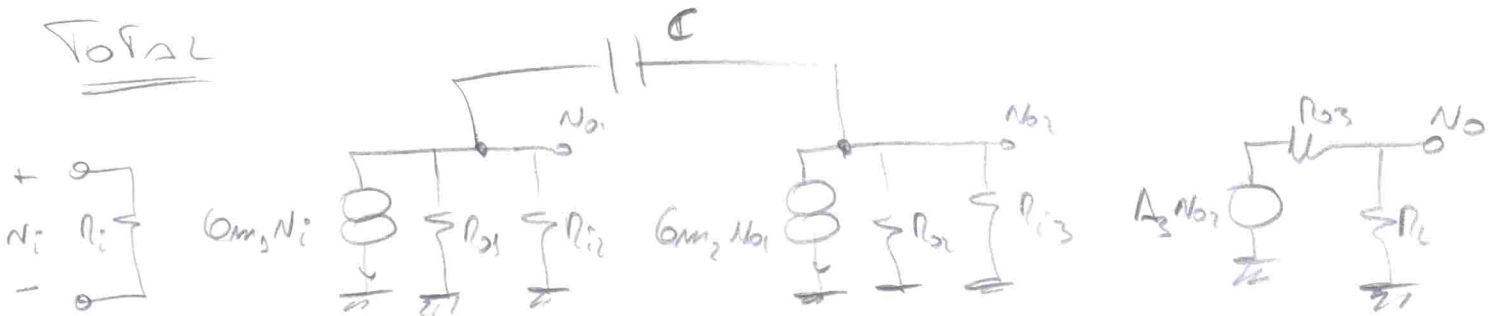
$$A_3 = \frac{N_o}{N_i} \Big|_{i_L = 0} \Rightarrow A_3 = \frac{g_{m14} r_o}{1 + g_{m14} r_o} \cdot 1 \cong 1 \text{ V/V}$$

$$\cong 1 \quad (g_{m14} r_o = 4826 \gg 1)$$

$$R_{o3} = \frac{1}{g_{m15}} + \frac{\frac{1}{g_{m14}} + \frac{R_{o2}}{\beta + 1}}{\beta + 1} \cong \frac{1}{g_{m15}} + 18,4 \Omega \cong 44,3 \Omega \ll R_L$$

~ @ $I_2 = 1 \text{ mA}$
= 25,9 Ω

TOTAL



$$A_{TOT} = g_{m1} (R_{b1} // R_{i2}) \cdot g_{m2} (R_{b2} // R_{i3}) \cdot A_3 \frac{R_L}{R_{o3} // R_L} \cong \frac{g_{m1} (R_{b1} // R_{i2})}{\sim 2870} \cdot \frac{g_{m2} R_{o2}}{\sim 93}$$

$$A_{TOT} = 173,6 \text{ V/mV} = 104,8 \text{ dB}$$

(d) $f_T = \frac{1}{2\pi} \frac{g_{m1}}{C} = 2,93 \text{ MHz}$

2 casos:

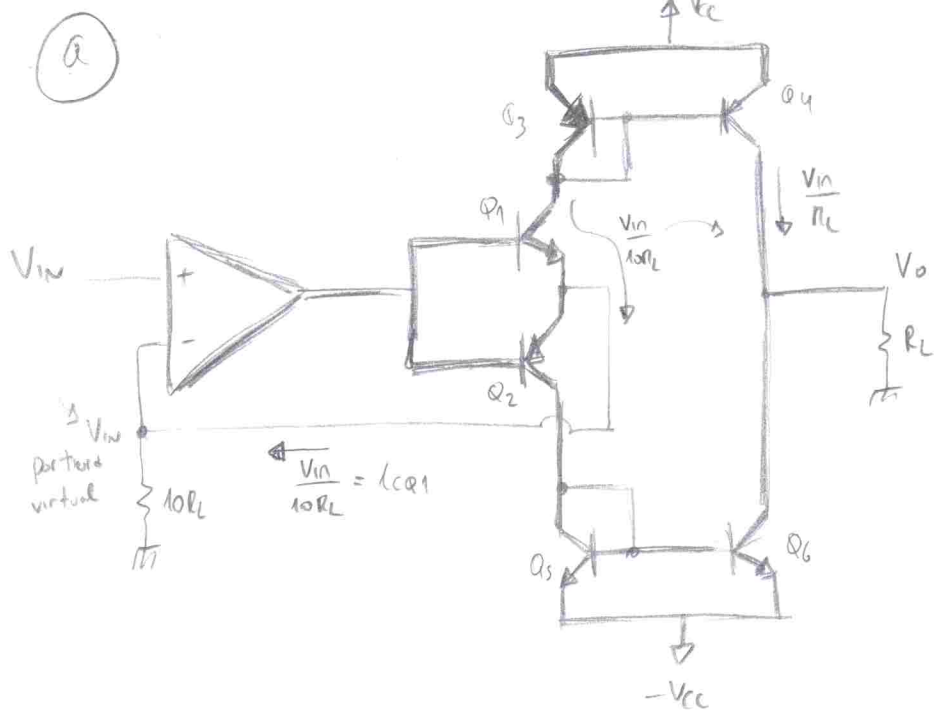
$\rightarrow I_{C2} = 0 \Rightarrow I_{C1} = 2I \Rightarrow I_0 = I$

$\rightarrow I_{C2} = 2I \Rightarrow I_{C1} = 0 \Rightarrow I_0 = -I$

(e) $I_{0, \text{max}} = \pm I \Rightarrow SR = \frac{I}{C}$

$\Rightarrow SR = 0,96 \text{ V/ps}$

J.



Q1 y Q2 → clase B

Análisis por ejemplo para $V_{in} > 0$ (para $V_{in} < 0$ es análogo) ⇒ Q2, Q5 y Q6 cortados
La corriente circula por Q1, Q3 y Q4

$$V_{o\Delta+} = V_{o\Delta-} \text{ (tira a virtual)} \Rightarrow I_{CQ1} = \frac{V_{in}}{10R_L}$$

$$\Rightarrow I_{CQ4} = \frac{V_{in}}{R_L} = \frac{V_{out}}{R_L} \Rightarrow$$

$$I_{S4,6} = 10 I_{S3,5} \Rightarrow I_{CQ4} = 10 I_{CQ3}$$

$$\Rightarrow \boxed{V_{out} = V_{in}}$$

$$P_{fuente} = 2 P_{+V_{cc}} = 2 (P_{+V_{cc}Q1} + P_{+V_{cc}Q3} + P_{+V_{cc}Q4}) = \frac{2 \cdot \hat{V}_o \cdot V_{cc}}{\pi R_L}$$

\uparrow $P_{+V_{cc}} = P_{-V_{cc}}$ \uparrow clase B

$$P_{carga} = \frac{\hat{V}_o^2}{2 R_L}$$

\uparrow clase B

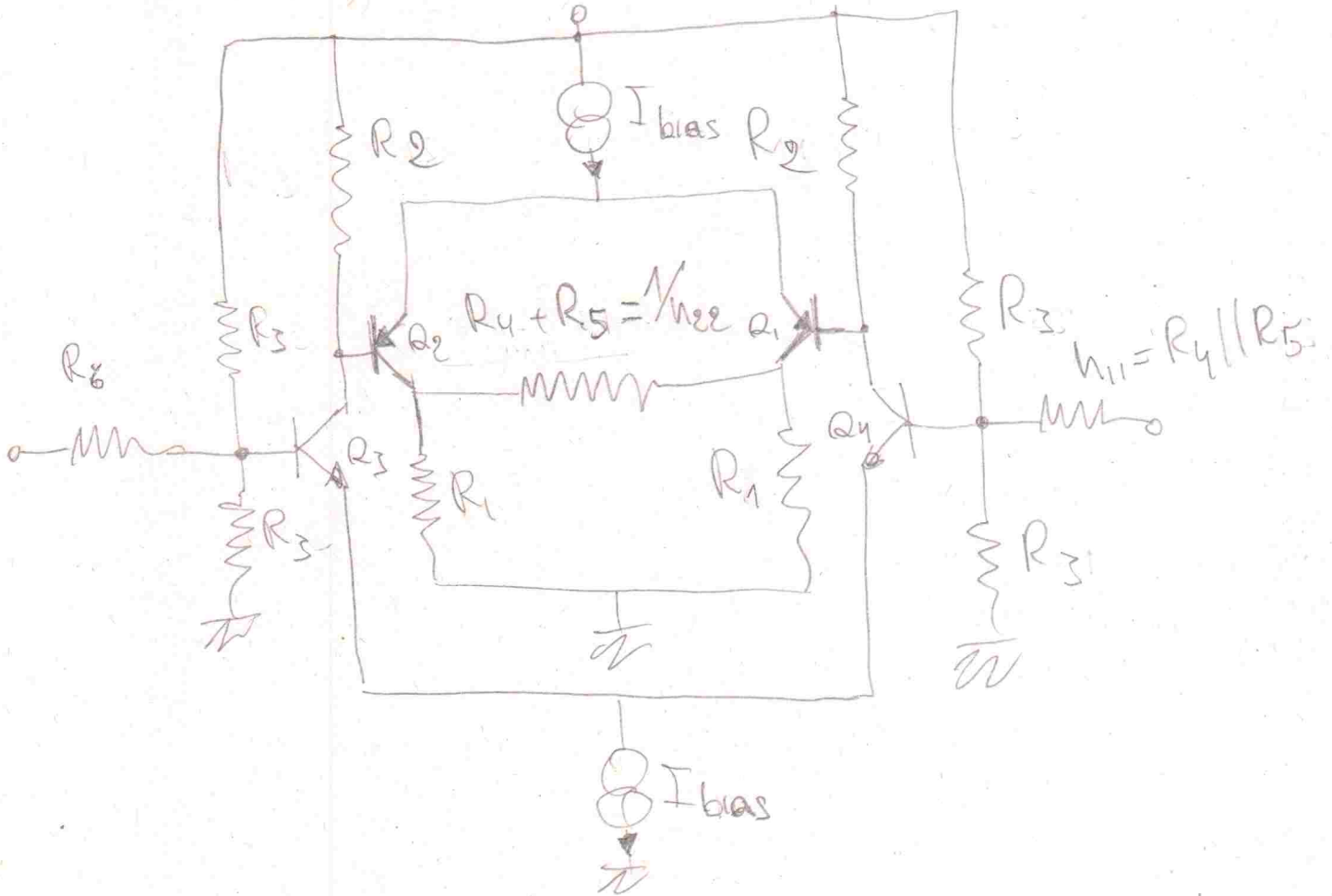
es máximo cuando $\hat{V}_o = V_{cc}$

$$\eta_o = \frac{P_{fuente}}{P_{carga}} = \frac{2 \hat{V}_o V_{cc}}{\pi R_L} \cdot \frac{2 R_L}{\hat{V}_o^2} = \frac{\hat{V}_o \pi}{4 V_{cc}} \Rightarrow \boxed{\eta_o = 78,5\%}$$

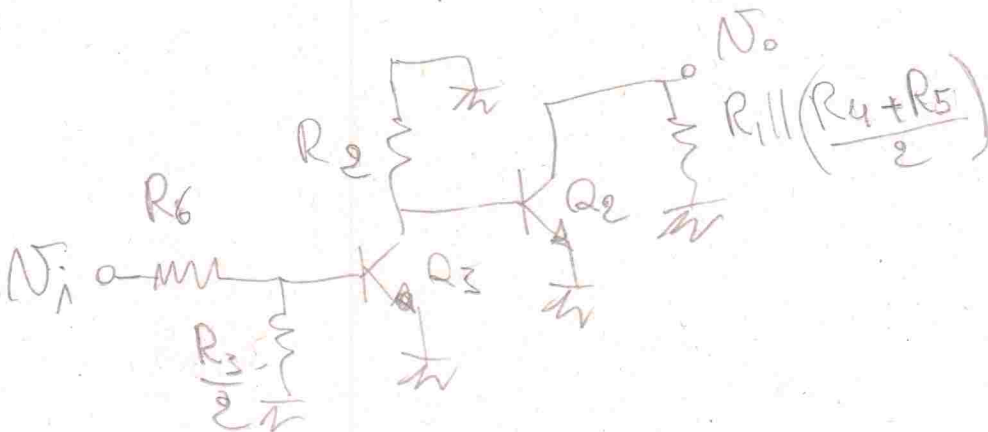
$$P_D = P_{fuente} - P_{carga} = \frac{2 \hat{V}_o V_{cc}}{\pi R_L} - \frac{\hat{V}_o^2}{2 R_L} \text{ max } \Leftrightarrow \hat{V}_o = \frac{2 V_{cc}}{\pi} \text{ y } \boxed{P_D^{total} = \frac{2 V_{cc}^2}{\pi^2 R_L} = 2,53 W}$$

Problema

a) Bloque A'



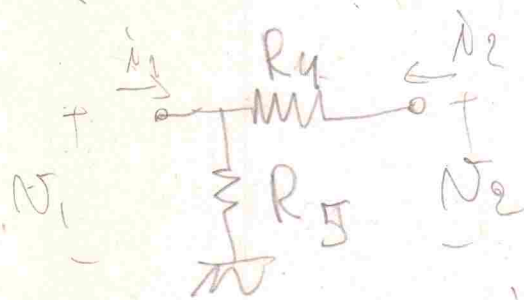
Por simetría puedo analizar medio circuito.



Problema

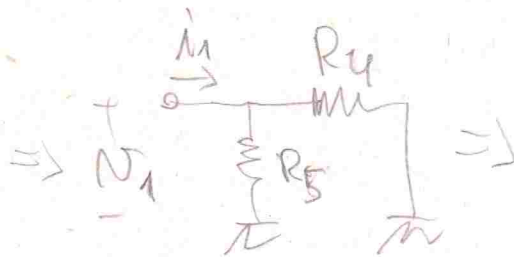
2) Separa los bloques A y B

Bloque B



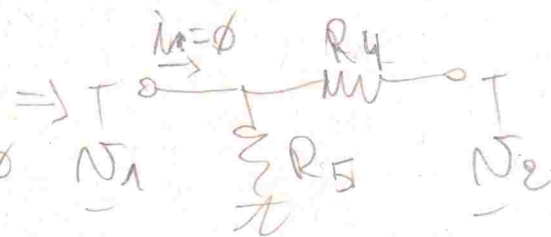
$$\begin{aligned} V_1 &= h_{11} I_1 + h_{12} V_2 \\ I_2 &= h_{21} I_1 + h_{22} V_2 \end{aligned}$$

$$h_{11} = \left. \frac{V_1}{I_1} \right|_{V_2 = 0}$$



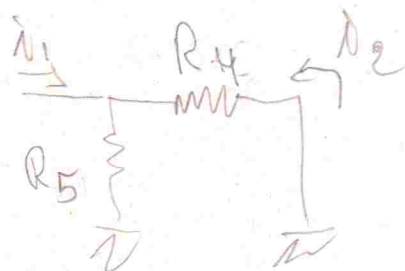
$$\Rightarrow h_{11B} = R_5 \parallel R_4$$

$$h_{12} = \left. \frac{V_1}{V_2} \right|_{I_1 = 0}$$



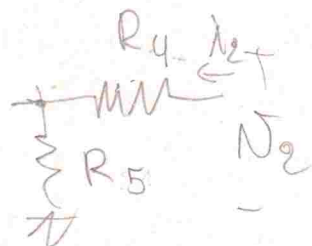
$$\Rightarrow h_{12B} = \frac{R_5}{R_5 + R_4} = \beta$$

$$h_{21} = \left. \frac{I_2}{I_1} \right|_{V_2 = 0}$$



$$\Rightarrow \frac{I_2}{I_1} = \frac{-R_5}{R_5 + R_4} = h_{21B}$$

$$h_{22} = \left. \frac{I_2}{V_2} \right|_{I_1 = 0}$$



$$\Rightarrow h_{22B} = \frac{1}{R_5 + R_4}$$

Problema

$$a) \quad A' = \begin{bmatrix} (R_3 \parallel R_3 \parallel r_{\pi 3}) & g_{m3}(R_2 \parallel r_{\pi 2}) \\ R_6 + (R_3 \parallel R_3 \parallel r_{\pi 3}) & g_{m2}(R_1 \parallel \frac{R_4 + R_5}{2}) \end{bmatrix}$$

$$N_1 = N_i$$

$$N_2 = N_o$$

$$\Rightarrow h_{12A'} = \left. \frac{N_1}{N_2} \right|_{N_i = \phi} = \left. \frac{N_i}{N_o} \right|_{N_i = \phi} = \phi \Rightarrow h_{12A'} = \phi$$

$$h_{21A'} = \left. \frac{i_2}{i_1} \right|_{N_o = \phi} = \left[\frac{R_3 \parallel R_3}{R_3 \parallel R_3 + r_{\pi 3}} \right] \beta_1 \left[\frac{R_2}{R_2 + r_{\pi 2}} \right] \beta_2$$

Verifico direccionalidad

$$\Rightarrow \phi = |h_{12A'}| \ll |h_{12\beta}| = \frac{R_5}{R_5 + R_4} \quad \checkmark$$

$$\frac{R_5}{R_5 + R_4} = |h_{21\beta}| \ll |h_{21A'}| \quad \checkmark$$

$$\Rightarrow G = \frac{A'}{1 + A'\beta}$$

$$A' = 2009 \\ \beta = 0.1 \Rightarrow$$

$$G = 9.95$$

Problema

b) Del teórico se sabe que:

$$\frac{dG}{G} = \frac{1}{1+A'\beta} \frac{dA'}{A'}$$

$$A' = K g_{m1} g_{m2} = K \frac{I_{bias}^2}{V_T^2} \Rightarrow dA' = \frac{K}{V_T} 2 I_{bias} dI_{bias}$$

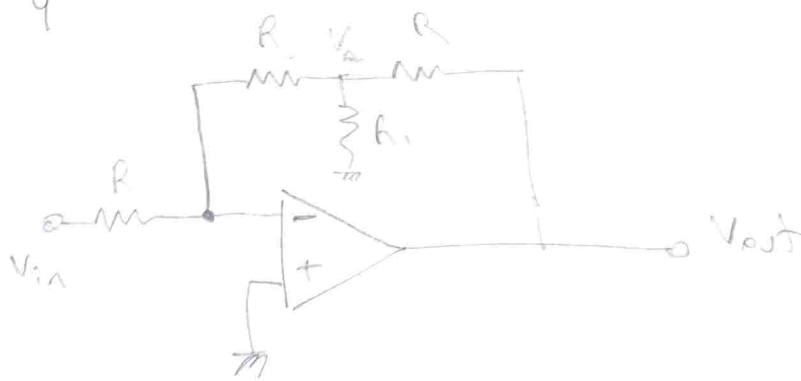
$$\Rightarrow \frac{dA'}{A'} = \frac{2K I_{bias} dI_{bias}}{V_T \frac{K I_{bias}^2}{V_T}} = \frac{2 dI_{bias}}{I_{bias}}$$

$$\Rightarrow \frac{dG}{G} = \frac{2}{1+A'\beta} \frac{dI_{bias}}{I_{bias}} = 1 \times 10^{-3} = 0,001 = 0,1\%$$

\Rightarrow frente a una variación del 10% en las corrientes \Rightarrow obtengo una variación 0,1% en G

$$\Rightarrow \boxed{\frac{dG}{G} = 0,1\%}$$

Problema 4



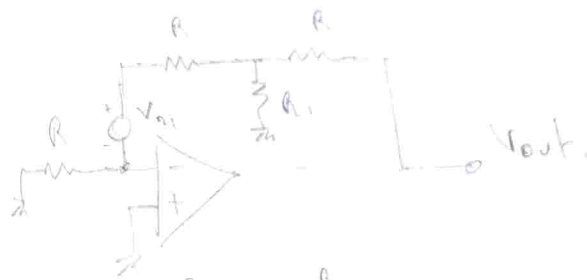
$$\frac{V_A}{R/R_1} = \frac{V_{out} - V_A}{R} \Rightarrow \frac{V_A (R+R_1)}{R \cdot R_1} + \frac{V_A}{R} = \frac{V_{out}}{R}$$

$$\frac{V_A}{R} = -\frac{V_{in}}{R} \Rightarrow V_A = -V_{in}$$

$$V_A \left(2 + \frac{R}{R_1}\right) = V_{out} \Rightarrow V_{out} = \frac{1}{1 + \frac{R}{R_1}} (-V_{in}) = -\frac{R}{R_1} V_{in}$$

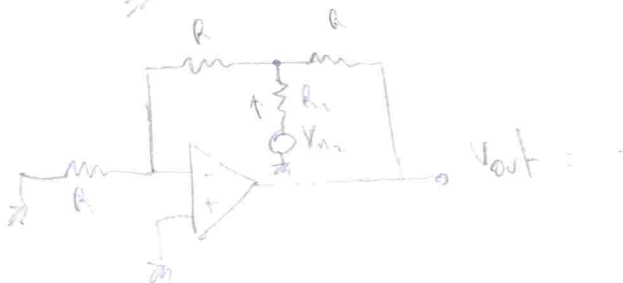
$\frac{R}{R_1} > 2$

$$\Rightarrow G = \frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{R}{R_1}$$

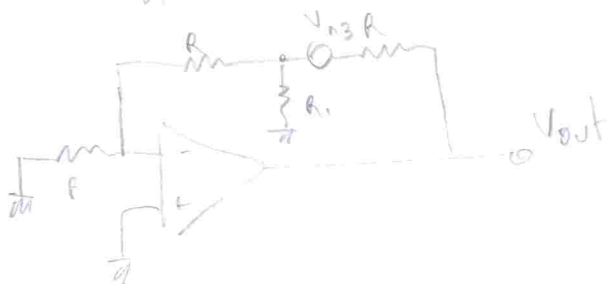


$$V_{out} = V_{n1} \left(1 + \frac{R}{R_1}\right) = \frac{R}{R_1} V_{n1}$$

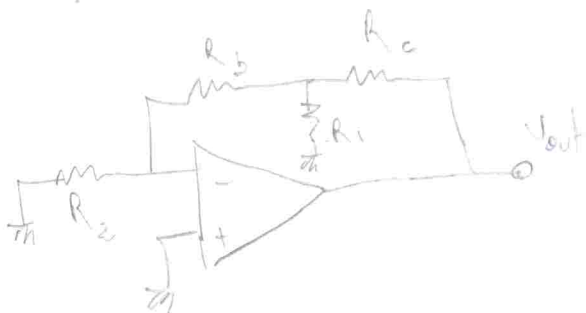
$$\Rightarrow G_1 = \frac{V_{out}}{V_{n1}} = \frac{R}{R_1}$$



$$V_{out} = -V_{n2} \frac{R}{R_1} \Rightarrow G_2 = \frac{V_{out}}{V_{n2}} = -\frac{R}{R_1}$$



$$V_{out} = V_{n3} \Rightarrow G_3 = \frac{V_{out}}{V_{n3}} = 1$$



$$V_{on(rms)} = B \cdot 4kT \cdot (G_2^2 R_2 + G_1^2 R_1 + G_3^2 R_1 + G_3^2 R_c)$$

$$V_{on}^2 (rms) = B \cdot 4kT ((2G^2 + 1)R + G^2 R_1)$$

$$G^2 = G_1^2 = G_2^2$$

$$V_{in}^2 (rms) = \frac{V_{on}^2 (rms)}{G^2} = \frac{B \cdot 4kT (2R + R_1)}{\dots}$$