

**Examen de Electrónica Avanzada 2**  
**16/12/2024**

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: (37 puntos)**

Se considera el oscilador diferencial de la Figura 1.

- Obtener la condición y la frecuencia de oscilación.
- Calcular la amplitud de la salida diferencial  $V_o = V_{o2} - V_{o1}$ , considerando que  $G_m/g_mQ$  está relacionado con  $x = E_x/V_T$  como se muestra en la Figura 2 siendo  $E_x$  la amplitud de la tensión en el emisor de cada uno de los transistores.
- Basándose en la Figura 2, ¿qué ocurre con la amplitud de salida si disminuye el valor de  $R_1$ ? Justifique claramente.

**Datos:**

$R_1 = 6.8 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 2.2 \text{ k}\Omega$ ,  $R_L = 400 \text{ }\Omega$ ,  $R_E = 820 \text{ }\Omega$ ,  $C_1 = 10 \text{ nF}$ ,  $C_2 = 47 \text{ nF}$ ,  $C = \infty$ ,

$L_1 = 2 \text{ }\mu\text{H}$ ,  $V_{CC} = 10 \text{ V}$ .

$V_{BE} = 0.7 \text{ V}$ ,  $\beta = 200$ ,  $V_A = \infty$ .

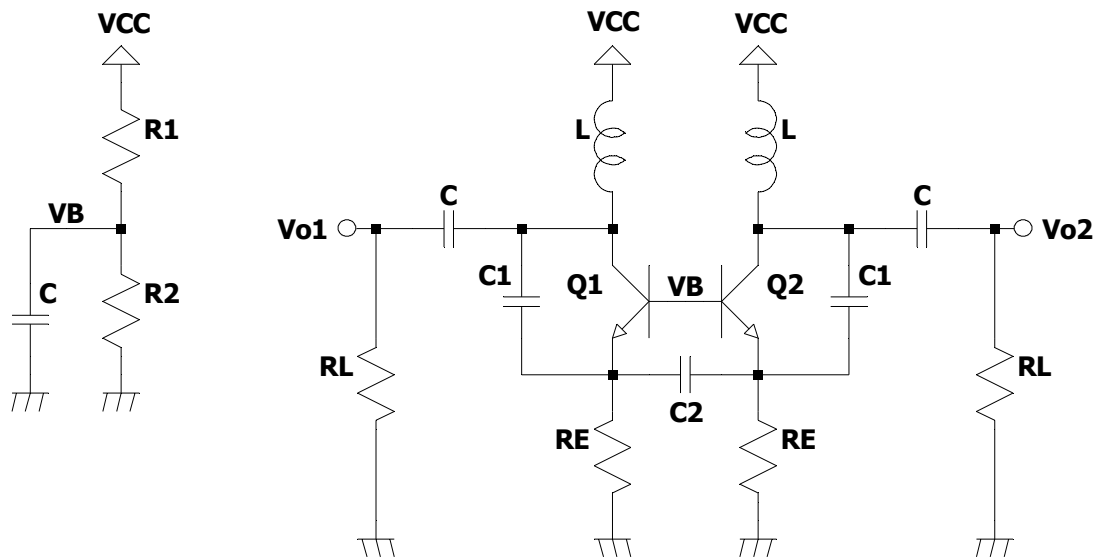


Figura 1

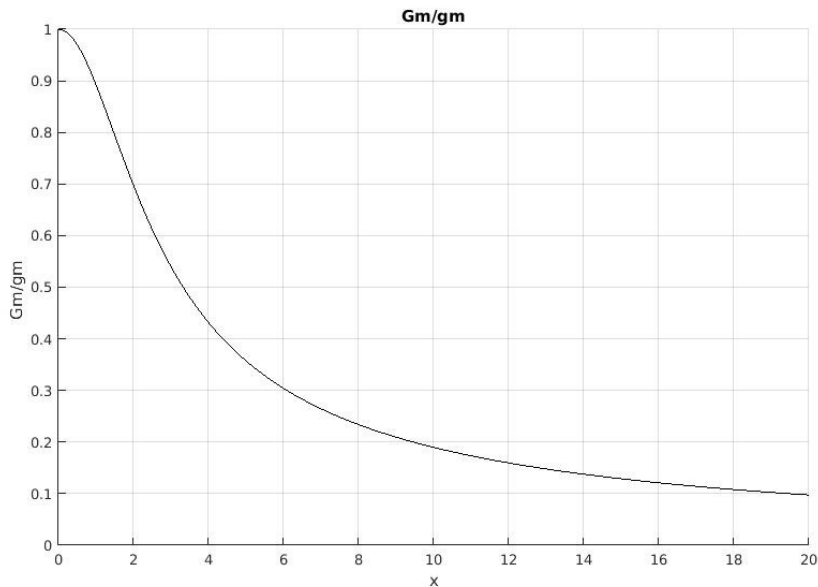


Figura 2

**Problema 2: (37 puntos)**

En el amplificador de la Figura 1,  $V_B$  es tal que la corriente por M5 es  $10\mu A$ . Se pide:

- Calcular la ganancia a bajas frecuencias  $v_{out}/(v_2-v_1)$
- Calcular la frecuencia de ganancia unitaria  $f_T$ .
- Calcular la PSD de ruido equivalente a la entrada considerando sólo el ruido térmico de los transistores y que la fuente de polarización  $V_B$  no aporta ruido.
- El amplificador se conecta como en la Figura 2 para amplificar una señal sinusoidal  $v_{in}$  de  $1mV$  de amplitud pico. Calcular la SNR del sistema.

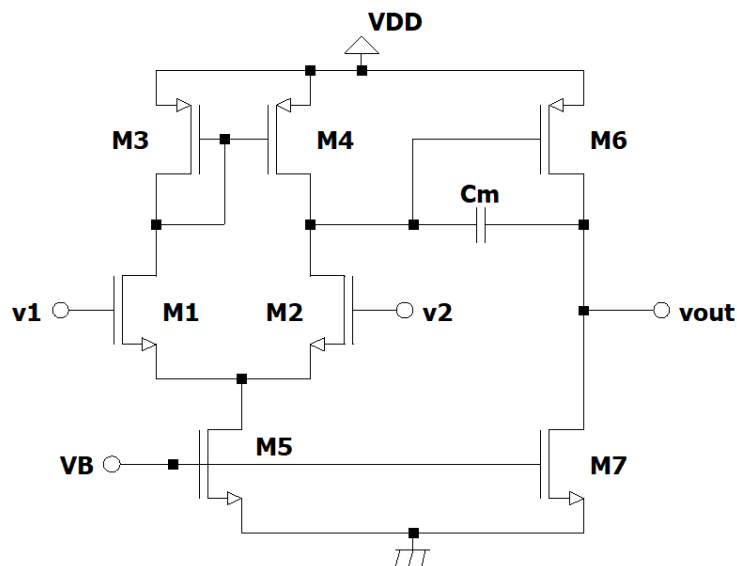


Figura 1

**Datos:**

- $L_1=L_2=1\mu m$ ,  $W_1=W_2=10\mu m$ ,  $L_3=L_4=W_3=W_4=4\mu m$ ,  $L_6=0.5\mu m$ ,  $W_6=20\mu m$ ,  $L_5=L_7=W_5=4\mu m$ ,  $W_7=5W_5$ .
- $\mu_n C_{ox}=60\mu A/V^2$ ,  $\mu_p C_{ox}=25\mu A/V^2$ ,  $n_n=n_p=1.2$ ,  $V_{An}=V_{Ap}=10V/\mu m$
- $C_m=4.5pF$ ,  $R_1=1k\Omega$ ,  $R_2=40k\Omega$
- Constante de Boltzmann:  $k_B=1.38 \times 10^{-23} J/K$ , Temperatura del problema:  $T=300K$

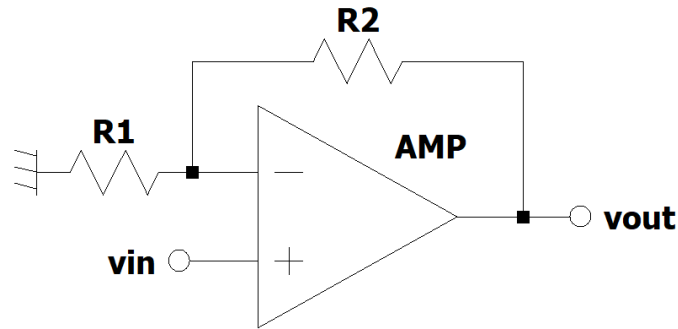


Figura 2

**Pregunta: (26 puntos)**

a) En el circuito de la Figura 1 calcule la ganancia y la resistencia de entrada.

Para no cargar la etapa previa (la cual no se muestra) se requiere aumentar la resistencia de entrada del circuito por lo que se modifica al de la Figura 2.

- b) Identifique los bloques A y  $\beta$ .
- c) En lo que sigue se supondrá que se cumplen las condiciones de unidireccionalidad aproximada de los bloques que permite aplicar la representación por diagrama de bloques A y  $\beta$ . Determine el valor de A y  $\beta$ .
- d) Calcule la nueva resistencia de entrada y ganancia en función de A y  $\beta$ .

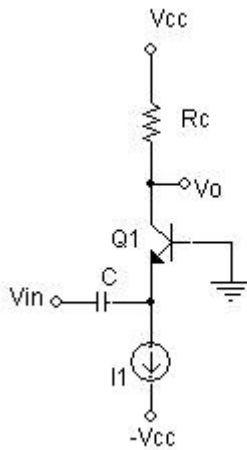


Figura 1

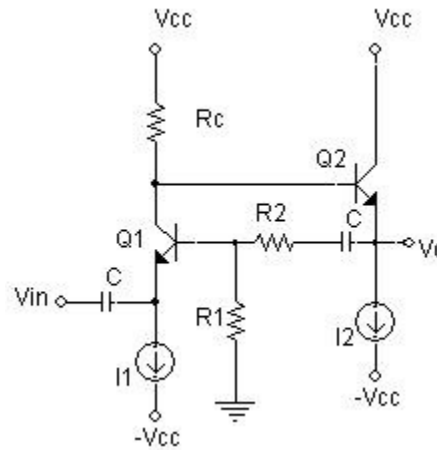
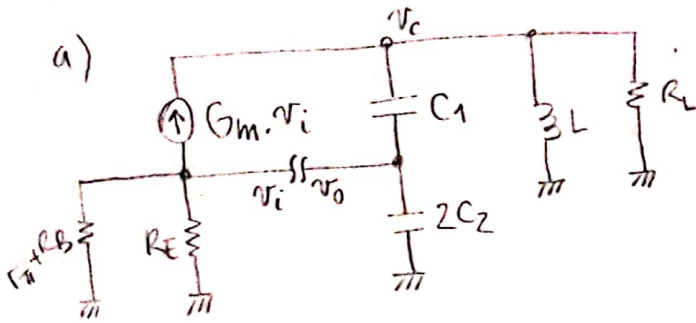


Figura 2

Para todo el problema asuma la tensión de Early de los transistores y el valor de C infinitos. Exprese los resultados en función de los parámetros de pequeña señal de los transistores, indicando claramente a que transistor (Q1 o Q2) corresponden (ej.  $gm1$  o  $gm2$ ).  $\beta$  se asumirá igual para ambos transistores y mucho mayor que 1.



$$\textcircled{H} R_E \parallel \frac{1}{G_m} \parallel (r_i + R_B) \gg \frac{1}{2C_2 s}$$

$$R_B = R_1 \parallel R_2$$

$$v_c = G_m \cdot v_i \cdot \left( \frac{C_1 + 2C_2}{sC_1 2C_2} \parallel L \parallel R_L \right) = \frac{G_m \cdot v_i \cdot L \cdot s \cdot R_L}{R_L \cdot L \cdot C_1 \cdot 2C_2 \cdot s^2 + Ls + R_L} \Rightarrow$$

$$v_o = \frac{v_c \cdot \frac{1}{s2C_2}}{\frac{1}{sC_1} + \frac{1}{2sC_2}} = \frac{v_c \cdot s \cdot C_1}{(C_1 + 2C_2)s} \Rightarrow v_o = \frac{v_c \cdot C_1}{C_1 + 2C_2}$$

$$\Rightarrow \frac{v_o}{v_i} = \frac{C_1}{C_1 + 2C_2} \cdot \left[ \frac{G_m \cdot L \cdot s \cdot R_L}{R_L \cdot L \cdot C_1 \cdot 2 \cdot C_2 \cdot s^2 + Ls + R_L} \right]$$

$$\text{Im} \left\{ \frac{v_o}{v_i} \right\} = 0 \Rightarrow \frac{R_L \cdot L \cdot C_1 \cdot 2 \cdot C_2 \cdot \omega^2}{C_1 + 2C_2} = R_L \Rightarrow \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} ; C = \frac{2C_1 C_2}{C_1 + 2C_2} = 9 \text{ nF}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{2 \mu\text{H} \cdot 9 \text{ nF}}} = 1,2 \text{ MHz} \Rightarrow \boxed{f_0 = 1,2 \text{ MHz}} \quad \text{FRECUENCIA DE OSCILACIÓN}$$

$$\left. \frac{v_o}{v_i} \right|_{\omega_0} = \frac{C_1}{C_1 + 2C_2} \cdot \frac{G_m \cdot L \cdot \omega_0 \cdot R_L}{L \cdot \omega_0} = \frac{C_1 G_m R_L}{C_1 + 2C_2} = 1 \quad \text{CONDICIÓN DE OSCILACIÓN}$$

$$\Rightarrow G_m = \frac{C_1 + 2C_2}{C_1 \cdot R_L} = \frac{10 \text{ nF} + 2 \cdot 47 \text{ nF}}{10 \text{ nF} \cdot 400 \Omega} = 26 \text{ mS} \Rightarrow G_m = 26 \text{ mS}$$

Verificación  $\textcircled{H} R_E \parallel \frac{1}{G_m} \parallel (r_i + R_B) \gg \frac{1}{2C_2 s}$

$$\frac{1}{G_m} \parallel (r_i + R_B) \approx \frac{1}{G_m}$$

$$R_E \parallel \frac{1}{G_m} = 820 \Omega \parallel \frac{1}{26 \text{ mS}} = 37 \Omega$$

$$\frac{1}{2C_2 s} = \frac{1}{2 \cdot 47 \text{ nF} \cdot 2\pi \cdot 1,2 \text{ MHz}} = 1,4 \Omega$$

SE CUMPLE LA  $\textcircled{H}$ .

$$b) V_B = V_{CC} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 10V \cdot \frac{2,2k\Omega}{6,8k\Omega + 2,2k\Omega} = 2,4V$$

$$V_E = V_B - V_{BE} = 2,4V - 0,7V = 1,7V \Rightarrow V_E = 1,7V \Rightarrow I_C = \frac{V_E}{R_E} = \frac{1,7V}{820\Omega} = 2,1mA$$

$$\Rightarrow \boxed{I_C = 2,1mA} \Rightarrow g_{mQ} = \frac{I_C}{V_T} = \frac{2,1mA}{26mV} \Rightarrow \boxed{g_{mQ} = 81mS}$$

$$\frac{G_m}{g_{mQ}} = \frac{26mS}{81mS} = 0,32 \xrightarrow{\text{interpolación}} x = 6$$

$\frac{G_m}{g_{mQ}}$  vs  $x$

$$x = \frac{E_x}{V_T} \Rightarrow E_x = xV_T = 6 \times 26mV = 0,16V$$

$$E_x = \frac{E_T \cdot C_1}{C_1 + 2C_2} \Rightarrow E_T = \frac{E_x \cdot (C_1 + 2C_2)}{C_1} = \frac{0,16V \cdot (10nF + 2 \cdot 47nF)}{10nF} = 1,7V \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \hat{V}_{o2} = \hat{V}_{o1} = 1,7V \Rightarrow \hat{V}_o = 2 \times 1,7V = 3,4V \leftarrow \text{AMPLITUD DE LA SALIDA DIF.}$$

$$c) \text{ Si } R_1 \downarrow \left. \begin{array}{l} \Rightarrow V_B \uparrow \Rightarrow V_E \uparrow \\ V_B = \frac{V_{CC} \cdot R_2}{R_1 + R_2} \\ V_E = R_E \cdot I_C \end{array} \right\} \Rightarrow I_C \uparrow \Rightarrow g_{mQ} \uparrow \left. \begin{array}{l} \Rightarrow \frac{G_m}{g_{mQ}} \downarrow \Rightarrow x \uparrow \\ G_m = \text{cte.} \end{array} \right\}$$

$$\Rightarrow E_x \uparrow \Rightarrow E_T \uparrow \Rightarrow \hat{V}_o \uparrow \text{ Aumenta la amplitud de la salida.}$$

# Solución

Sunday, 28 July 2024 9:48 PM

EXAMEN EAZ

2024/SOL

(e) GANANCIA Amp. Miller 2 etapas:

$$G_1 = \underbrace{g_{m1}(r_{o2} || r_{e1})}_{G_1} \underbrace{g_{m6}(r_{o6} || r_{e7})}_{G_2}$$

DC:

$$I_{D1} = I_{D2} = I_{D3} = I_{D4} = 5 \mu A$$

$$I_{D6} = I_{D7} = 50 \mu A$$

AC:  $\beta = \mu C_{ox} \frac{W}{L} \Rightarrow$

$$\left\{ \begin{array}{l} \beta_1 = \beta_2 = 600 \mu A/V^2 \\ \beta_3 = \beta_4 = 25 \mu A/V^2 \\ \beta_6 = 10 \mu A/V^2 \\ \beta_7 = 300 \mu A/V^2 \end{array} \right.$$

$$g_m = \sqrt{2 \frac{\beta I_D}{m}} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} g_{m1} = g_{m2} = 70,7 \mu A/V \\ g_{m3} = g_{m4} = 14,4 \mu A/V \\ g_{m6} = 288,7 \mu A/V \\ g_{m7} = 158,1 \mu A/V \end{array} \right.$$

$$r_o = \frac{V_A' L}{I_D}$$

$$\Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} r_{o2} = 2 M\Omega \\ r_{o4} = 8 M\Omega \\ r_o = 1000 \mu\Omega \end{array} \right.$$

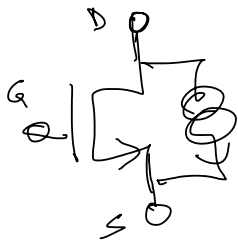
$$\begin{cases} R_{06} = 100 \text{ k}\Omega \\ R_{07} = 400 \text{ k}\Omega \end{cases}$$

$$G_1 = (113,1 \%) \times (25,7 \%) = 29,02 \%$$

$$\boxed{G_1 = 69,3 \text{ dB}}$$

$$(b) f = \frac{1}{2\pi} \frac{g_{m1}}{C_c} = 2,5 \text{ MHz}$$

(c) PSD de ruido térmico en MOS (continuo)



$$S_i = \frac{8}{3} \text{ nA} \sqrt{\text{Hz}} g_m \quad (\text{A}^2/\text{Hz})$$

$$S_{V_{OUT}}^{\text{AMP}} = \sum_k S_{i_k} \times |H_k|^2 \quad k: 1 \dots 7$$

$$M1/M2: H_{1,2} = (R_{02} // R_{04}) g_{m6} (R_{06} // R_{07})$$

$$M3/M4: H_{3,4} = H_{1,2}$$

$$M6: H_6 = R_{06} // R_{07}$$

$$M7: H_7 = H_6$$

M5: M5 sólo genera ruido en modo común, no contribuye

$$\sum V_{in}^{\Delta MP} = \frac{\sum V_{out}^{\Delta MP}}{G^2} = \left(2S_1 + 2S_3\right) \frac{H_1^2}{G^2} + (S_6 + S_7) \frac{H_6^2}{G^2}$$

$$\rightarrow \sum V_{in}^{\Delta MP} = \frac{(2S_1 + 2S_3)}{g_{m1}^2} + (S_6 + S_7) \frac{(v_{gs}/v_{gs})^2}{G^2}$$

$$S_{i1} = S_{i2} = 9,37 \times 10^{-25} \text{ A}^2/\text{Hz}$$

$$S_{i3} = S_{i4} = 1,91 \times 10^{-25} \text{ A}^2/\text{Hz}$$

$$S_{i6} = 38,2 \times 10^{-25} \text{ A}^2/\text{Hz}$$

$$S_{i7} = 21,0 \times 10^{-25} \text{ A}^2/\text{Hz}$$

Quid à la  
2<sup>de</sup> étape  
muy respectado

$$\sum V_{in}^{\Delta MP} = 2,26 \times 10^{-16} \text{ V}^2/\text{Hz} + 5,54 \times 10^{-21} \text{ V}^2/\text{Hz}$$

$$\rightarrow V_{in}^{\Delta MP} = 15,0 \text{ mV}/\sqrt{\text{Hz}}$$

$$\downarrow R_2 = 20 \text{ k}\Omega, R_1 = 1 \text{ k}\Omega : \beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 0,024$$

$$\text{Si } \beta \gg 1 \Rightarrow G_a = 1 + R_2/R_1 = 41 \text{ V/V}$$



$$A_o = g_{m1} (r_{o2} \parallel r_{o1}) g_{m6} (r_{o6} \parallel r_{o7} \parallel (R_1 + R_2))$$

$(G_1 \text{ no carga}) \downarrow$        $(\text{NUEVA } G_2) \downarrow$        $\approx 28,1 \text{ k}\Omega$

$$A_o = 113,1 \text{ } \mu\text{S} \times 8,1 \text{ } \mu\text{S} = 916,1 \text{ } \mu\text{S}$$

$$A_{op} = 22,0 \gg 1 \quad \checkmark$$

Auto AMP no-inversor (resulta de Teoría)

$$\sum_{V_{in}}^{\text{TOT}} = \sum_{V_{in}}^{\Delta P} + 4kT(R_1 \parallel R_2)$$

$2,26 \times 10^{-16} \text{ } \mu\text{V}^2/\text{Hz}$        $\hookrightarrow 0,16 \times 10^{-16} \text{ } \mu\text{V}^2/\text{Hz}$

$$\sum_{V_{in}}^{\text{TOT}} = 2,42 \times 10^{-16} \text{ } \mu\text{V}^2/\text{Hz} \rightarrow V_{ni} = 15,6 \text{ mV}/\sqrt{\text{Hz}}$$

$$N_{mi}^{\text{RMS}} = \sqrt{\sum_{V_{in}}^{\text{TOT}} \cdot B_{eq}}$$

$$f_{3dB} = \frac{f_T}{1 + R_2/R_1} = 61 \text{ kHz}$$

$$\Rightarrow B_{eq} = \frac{f_T}{2} f_{3dB} = 95,8 \text{ kHz}$$

$$\Rightarrow N_{mi}^{\text{RMS}} = \sqrt{\sum_{V_{in}}^{\text{TOT}} \cdot B_{eq}} = \underline{\underline{0,15 \text{ } \mu\text{V}_{\text{RMS}}}}$$

$$N_{i}^{\text{RMS}} = \frac{V_{iRn}}{\sqrt{2}} = 0,71 \text{ mV}_{\text{RMS}}$$

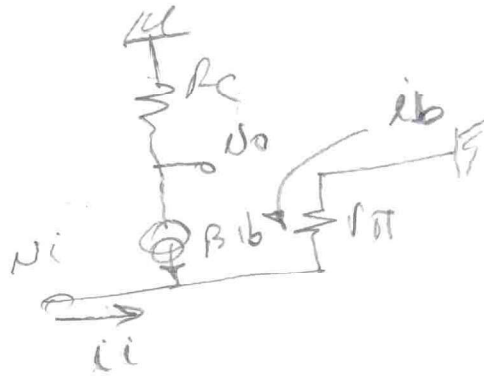
•  $N_{i}^{\text{RMS}}$

52

$$SNR = 20 \log_{10} \left( \frac{N_i \cdot MS}{N_M} \right)$$

$$\Rightarrow SNR = 73.3 \text{ dB}$$

1. En señal:



$$i_b = -\frac{u_i}{r_{\pi}} \quad (1)$$

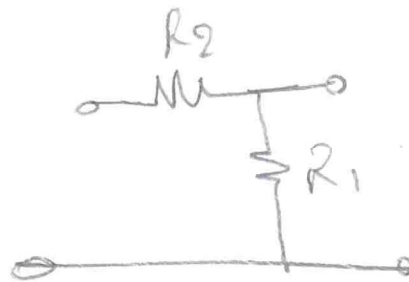
$$i_i = -(\beta + 1) i_b \quad (2)$$

$$u_o = -R_c \beta i_b \quad (3)$$

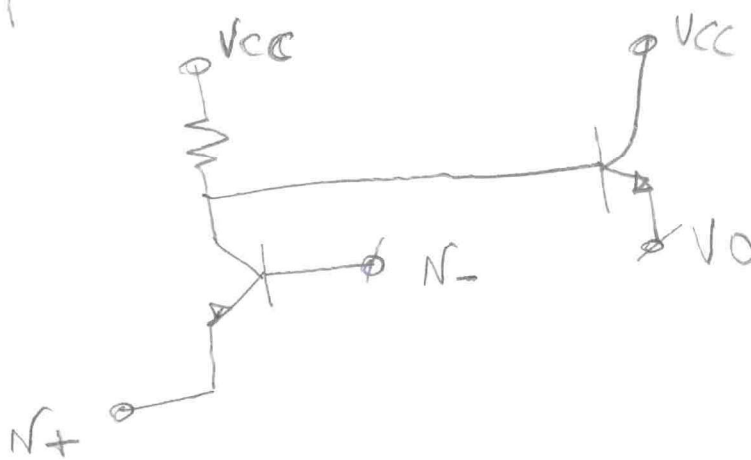
de (1) y (3)  $\Rightarrow u_o = +\frac{R_c \cdot \beta}{r_{\pi}} u_i \Rightarrow \boxed{\frac{u_o}{u_i} = \beta_{m} R_c}$

$i_i = (\beta + 1) \frac{u_i}{r_{\pi}} \Rightarrow R_i = \frac{u_i}{i_i} = \frac{r_{\pi}}{(\beta + 1)} = \frac{1}{\beta_{m}}$   
 (1) y (2)  $\downarrow$   $\beta \gg 1$

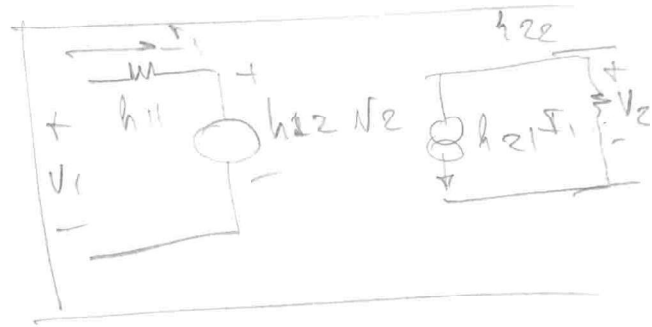
2. Bloque B:



Bloque A:

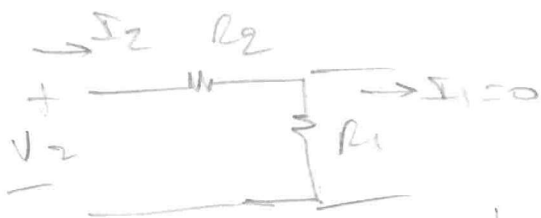


h<sub>11</sub> del bloque B =  $\frac{V_1}{I_1} \Big|_{V_2=0} = R_2 \parallel R_1$  (2)



h<sub>22</sub> del bloque B

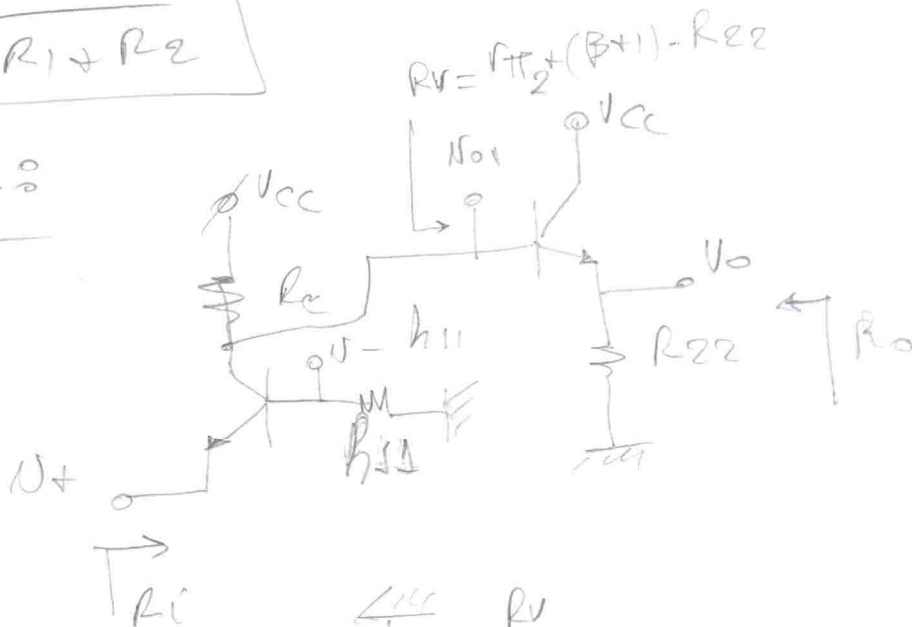
=  $\frac{V_2}{I_2} \Big|_{I_1=0} = R_2 + R_1 = R_{22}$



$\beta = h_{12} = \frac{N_1}{N_2} \Big|_{I_1=0}$

$\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$

Bloque A:



$A = \frac{N_0}{N_+}$



$$i_b = -\frac{v_i}{r_{\pi} + h_{11}} \quad (1) \quad v_i = -(\beta + 1)i_b \quad (2) \quad (3)$$

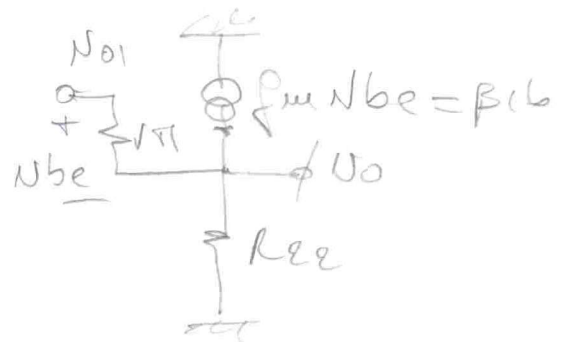
$$v_{o1} = -\beta i_b (R_c \parallel R_L) \quad (3)$$

$$\Rightarrow \frac{v_{o1}}{v_i} = \frac{\beta (R_c \parallel R_L)}{r_{\pi} + R_c \parallel R_L}$$

$$\boxed{R_i = \frac{v_i}{i_i} = \frac{r_{\pi} + R_c \parallel R_L}{\beta + 1}}$$

$$\frac{v_o}{v_{o1}} = \frac{v_o}{v_{o1}} \quad v_o = (\beta + 1) i_b \cdot R_{ee}$$

$$i_b = \frac{v_{o1} - v_o}{r_{\pi}}$$



$$\Rightarrow v_o = \frac{(\beta + 1) (v_{o1} - v_o) R_{ee}}{r_{\pi}}$$

$$\Rightarrow v_o (1 + \beta \frac{R_{ee}}{r_{\pi}}) = \beta \frac{R_{ee}}{r_{\pi}} v_{o1} \Rightarrow \frac{v_o}{v_{o1}} = \frac{\beta \frac{R_{ee}}{r_{\pi}}}{1 + \beta \frac{R_{ee}}{r_{\pi}}}$$

$$\Rightarrow \boxed{A = \frac{\beta (R_c \parallel R_L)}{r_{\pi} + R_c \parallel R_L} \cdot \frac{\beta \frac{R_{ee}}{r_{\pi}}}{1 + \beta \frac{R_{ee}}{r_{\pi}}}}$$

$$\Rightarrow \boxed{G = \frac{A}{1 + AB}}$$

$$\boxed{R_{if} = R_i (1 + AB)}$$

*Amir*