SISTEMAS ELECTRÓNICOS

Grados en Ingeniería de Sistemas de Comunicaciones, Sistemas Audiovisuales, Telemática y Tecnologías de Telecomunicación

Ejercicios propuestos Tema 2:
“Circuitos Electrónicos Realimentados”

EJERCICIO 1

Dado el amplificador realimentado de la figura 1:

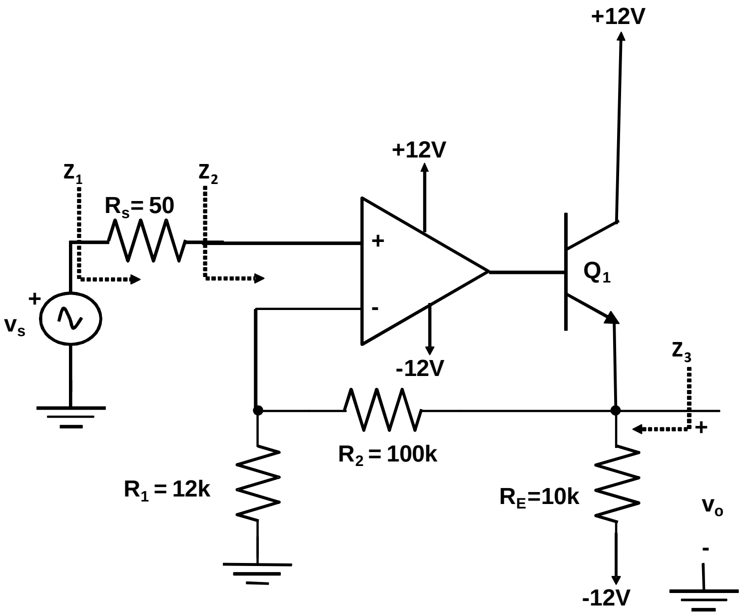


Figura 1

Datos:

Parámetros del amplificador operacional a frecuencias medias:

$$R_i = 1M\Omega, R_o = 150\Omega, A_v = 2 \cdot 10^5 \frac{V}{V}$$

Parámetros del transistor bipolar:

$$\beta = 150$$

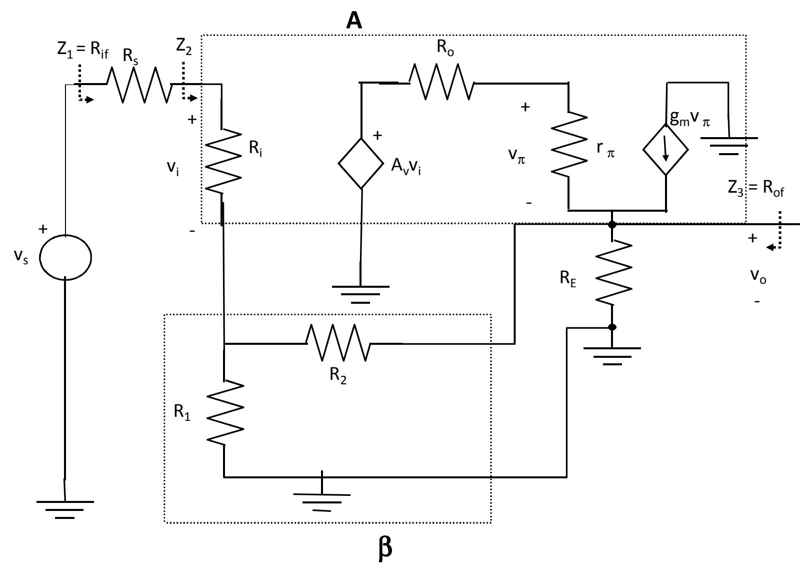
$$g_m = 50m\Omega^{-1} \qquad , r_o = r_{ce} \to \infty$$

SE PIDE:

a) Dibuje el circuito equivalente en pequeña señal a frecuencias medias del amplificador de la figura. Demuestre que existe realimentación negativa, identifique la topología de realimentación e indique sus características significativas.
b) Dibuje la estructura idealizada para esta topología.
c) Obtenga la red A idealizada (A') y calcule su ganancia y sus resistencias de entrada y salida a frecuencias medias.
d) Calcule la ganancia de la red β.
e) Determine v_o/v_S, Z_1, Z_2 y Z_3 a frecuencias medias.

SOLUCIÓN

a) Dibuje el circuito equivalente en pequeña señal a frecuencias medias del amplificador de la figura. Identifique la topología de realimentación e indique sus características significativas.

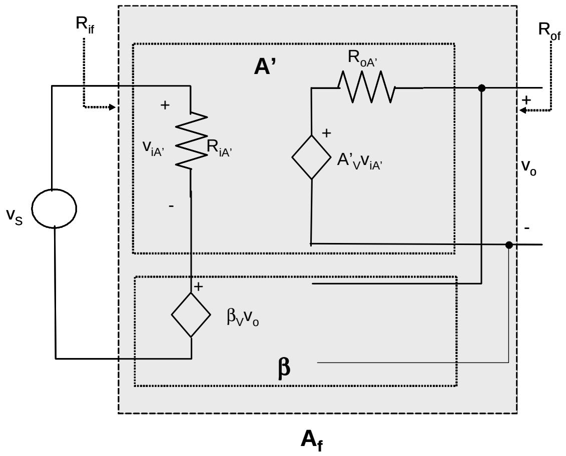


La conexión a la entrada es serie y a la salida es paralelo por lo que se trata de una topología serie-paralelo (Transtensión). Se muestrea tensión a la salida y se realimenta tensión a la entrada. Las magnitudes comunes entre las redes A y β son: en la conexión de entrada (1) del amplificador corriente y en la conexión de salida (2) tensión. Las funciones de transferencia genéricas de las redes A y β y del amplificador realimentado (A_f) son por tanto:

$$A_V = \frac{v_o}{v_i} \qquad \beta_V = \frac{v_f}{v_0} \qquad A_{fV} = \frac{v_o}{v_s}$$

b) Dibuje la estructura idealizada para esta topología.

La estructura idealizada de un amplificador realimentado con topología serie-paralelo es la siguiente:



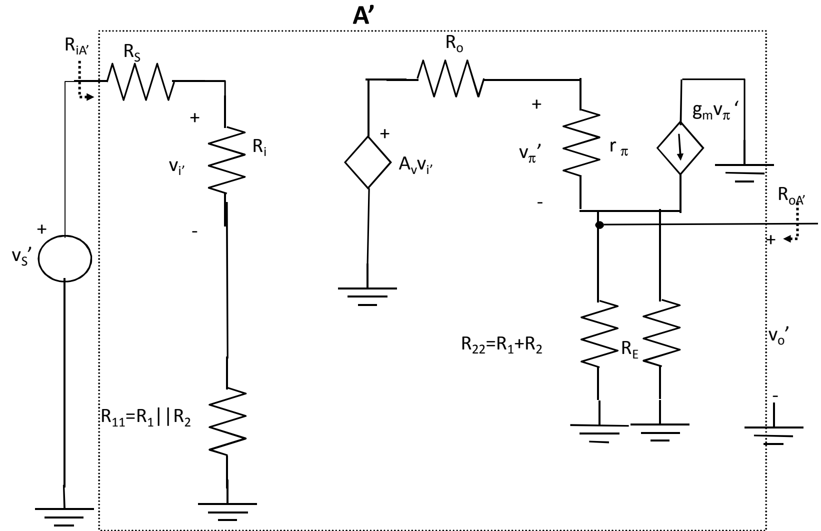
c) Obtenga la red A idealizada (A') y calcule su ganancia y sus resistencias de entrada y salida a frecuencias medias.

Para construir la red A' añadimos los efectos de carga de la fuente, carga y de la red β a la entrada y la salida.

Para hallar el efecto de carga de la red β a la entrada (R_{11}), calculamos la impedancia que se ve desde los terminales de la red β conectados a la entrada del circuito, anulando la magnitud común en la conexión de salida (tensión).

Para hallar el efecto de carga de la red β a la salida (R_{22}) calculamos la impedancia que se ve desde los terminales de la red β conectados a la salida del circuito, anulando la magnitud común en la conexión de entrada (corriente).

Con todo ello la red A' queda como sigue:



Analizando el circuito se tiene:

$$\left.\begin{aligned} v_o' &= A_V v_{i'} \frac{(R_{22} \parallel R_E)\cdot(\beta+1)}{R_O + r_\pi + (R_{22} \parallel R_E)\cdot(\beta+1)} \\ v_{i'} &= v_S' \frac{R_i}{R_S + R_i + R_{11}} \end{aligned}\right\}$$

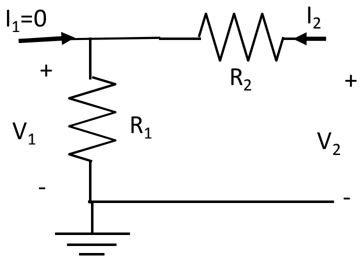
$$\Rightarrow A_v' = \frac{v_o'}{v_S'} = A_V \cdot \frac{(R_{22} \parallel R_E)\cdot(\beta+1)}{R_O + r_\pi + (R_{22} \parallel R_E)\cdot(\beta+1)} \cdot \frac{R_i}{R_S + R_i + R_{11}} \cong A_V = 2\cdot 10^5 \left[\frac{V}{V}\right]$$

Calculando las impedancias de entrada (R_{iA}') y de salida (R_{oA}') de la red A' se tiene:

$$R_{iA}' = R_S + R_i + R_{11} \cong 1M\Omega$$

$$R_{oA}' = R_E \parallel R_{22} \parallel \frac{(R_o + r_\pi)}{\beta+1} \cong \frac{(R_o + r_\pi)}{\beta+1} \cong 22\Omega$$

d) Calcule la ganancia de la red β.



La ganancia de la red β se obtiene como cociente entre la variable de salida de la red β (variable que se realimenta a la entrada del amplificador) y la variable de entrada de la red β (variable que se muestrea a la salida del amplificador) anulando la magnitud común en la conexión de entrada. En este caso nos queda:

$$\beta_v = \left.\frac{V_1}{V_2}\right|_{I_1=0} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 0.107\left[\frac{V}{V}\right]$$

e) Determine v_o/v_s, Z_1, Z_2 y Z_3 a frecuencias medias.

Una vez conocidos todos los parámetros de la estructura idealizada podemos calcular

- La ganancia de tensión del amplificador realimentado, A_{fv}:

$$A_{fv} = \frac{v_0}{v_S} = \frac{A_v'}{1 + A_v'\beta_v} = \frac{2\cdot 10^5}{1 + 21.4\cdot 10^3} \cong \frac{1}{\beta} = 9.3\frac{V}{V}$$ ya que $A_v'\beta_v >> 1$.

- La impedancia de entrada del amplificador realimentado, R_{if}:

$$R_{if} = Z_1 = R_{iA}'(1 + A_v'\beta_v) \cong 21G\Omega$$

Como puede verse en el esquema de pequeña señal del amplificador, la otra impedancia que nos piden calcular, Z_2, está relacionada con $R_{if} = Z_1$ como sigue:

$$Z_1 = R_S + Z_2 \Rightarrow Z_2 = Z_1 - R_S \cong 21G\Omega$$

- La impedancia de salida del amplificador realimentado, R_{of} es:

$$R_{of} = Z_3 = \frac{R_{oA}'}{1 + A_v'\beta_v} \cong 10.3m\Omega$$

EJERCICIO 2

El circuito de la figura 4 es una etapa amplificadora basada en un Amplificador Operacional (AO).

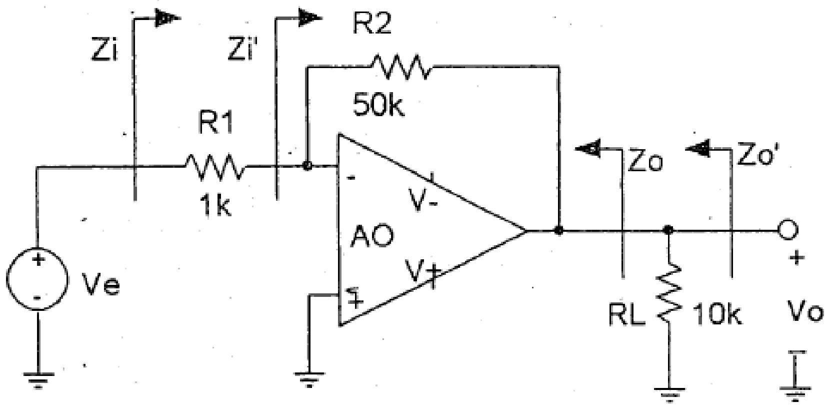


Figura 4

Se pide:

1. Suponiendo ideal el AO ($Ri \to \infty$, $Ro \to 0$, $Av \to \infty$), calcule la función de transferencia Vo/Ve. Justifique las aproximaciones que haga.
2. Vamos a suponer ahora que el AO es real ($Ri=500k\Omega$, $Ro=200\Omega$, $Av=80dB$). En estas condiciones el circuito total es un amplificador realimentado. Se pide:
   a. Demuestre que existe realimentación negativa, indicando claramente la señal que se muestrea a la salida, la señal que se compara a la entrada y la red β que permite pasar de la señal de salida a la señal de entrada.
   b. Indique el tipo de topología, la función que estabiliza y sus parámetros privilegiados.
   c. Obtenga las redes A' y β equivalentes utilizando el método aproximado.
3. A partir del resultado anterior, calcule:
   a. El valor de A' y β
   b. Vo/Ve
   c. Zi, Zi', Zo y Zo'

DATOS:

$R1 = 1\ K\Omega$ $R2 = 50\ K\Omega$ $RL = 10\ K\Omega$

SOLUCIÓN:

1.- Calcular V_o/V_e suponiendo que el Amplificador Operacional es ideal:

$R_i = \infty\,\Omega$, $R_o = 0\,\Omega$ y $A_v = \infty$

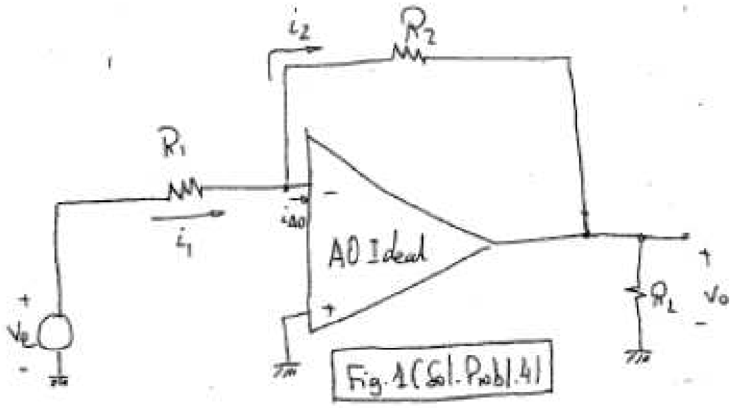


Fig. 1 (Sol. Probl. 4)

Si el Amplificador Operacional es ideal:

(1) $i_1 = i_2 + i_{AO}$ → Si $R_i = \infty$ → $i_{AO} = 0$

Por tanto $\boxed{i_1 = i_2}$

(2) $\dfrac{V_e - V_-}{R_1} = \dfrac{V_- - V_o}{R_2}$ → $A_v(V_+ - V_-) = V_o$. Para que V_o tenga un valor real $\neq \infty$ → Si $A_v = \infty$ → $V_+ - V_- = 0$

Por tanto $\boxed{V_+ = V_- = 0V}$

$$\frac{V_e - 0V}{R_1} = \frac{0V - V_o}{R_2} \rightarrow \frac{V_e}{R_1} = -\frac{V_o}{R_2}$$

$$\boxed{\frac{V_o}{V_e} = -\frac{R_2}{R_1} = -\frac{50k\Omega}{1k\Omega} = -50}$$ → Ganancia de un Amplificador Inversor

2.- Amplificador Operacional Real

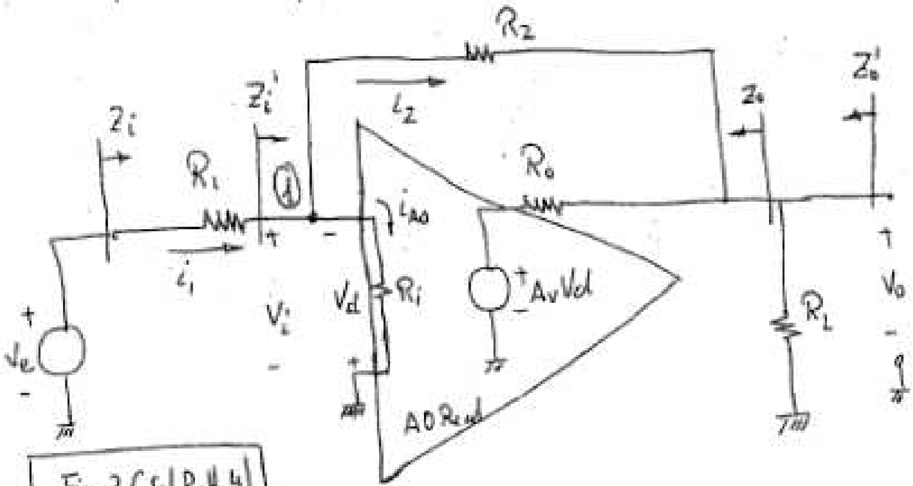


Fig. 2 (Sol. Pall. 4)

a) Demostración de Realimentación Negativa:

$\underbrace{v_o \uparrow}_{①} \rightarrow \underbrace{\frac{V_i - V_o}{R_2} = i_2 \downarrow}_{②}$ En el nudo ① se tiene: $\underbrace{\underbrace{i_1}_{\text{Constante}} = i_{AO} + i_2 \rightarrow i_{AO} \uparrow}_{③}$

① Señal de muestreo a la salida ② Red de realimentación β ③ Comparador de corriente a la entrada $\{ i_1 = i_e$

$V_d = -i_{AO} R_i \downarrow \quad v_o \downarrow$ Realimentación negativa

① Se muestrea la tensión de salida (v_o)

② Se compara a la entrada corriente (Ver nudo 1)

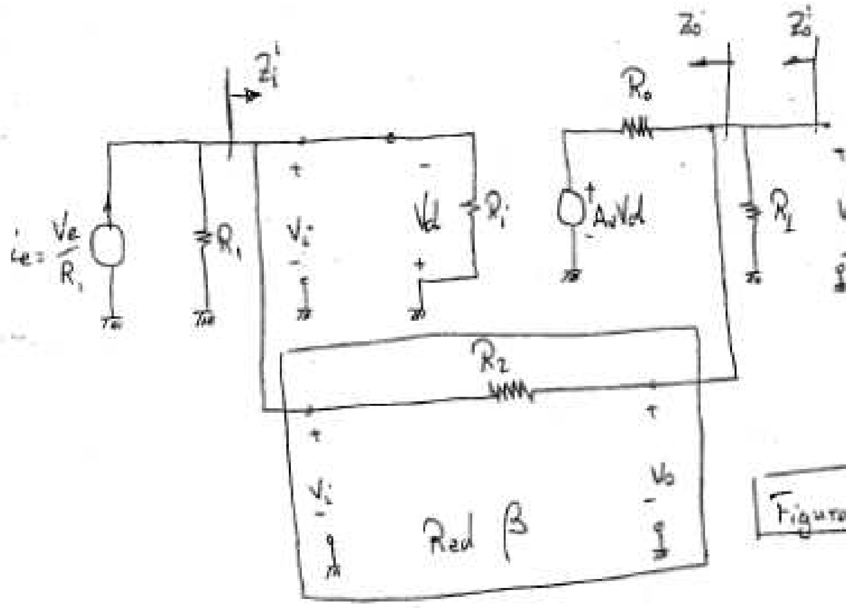
③ La red β que permite pasar de tensión a la salida (v_o) a comparar una corriente a la entrada en la resistencia R_2 mediante i_2

b) ① Paralelo-Paralelo: Muestreo de Tensión (salida) y comparación de corriente (entrada)

② Transimpedancia: $G_Z = \dfrac{A_Z}{1 + A_Z \beta_Y}$

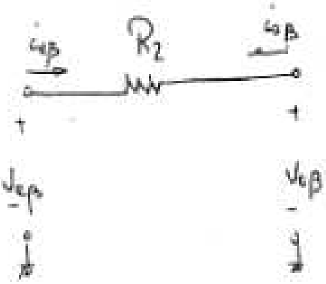
③ Parámetros y

c) Partiendo del circuito de la $\boxed{\text{Figura 2 (Sol. Probl. 4)}}$ tenemos:



$\boxed{\text{Figura 3 (Sol. Probl. 4)}}$

Para obtener la red A' analizamos la red β:



$\boxed{\text{Fig. 4 (Sol. Probl. 4)}}$

$$i_{e\beta} = y_{11\beta} v_{e\beta} + y_{12\beta} v_{o\beta}$$

$$i_{o\beta} = y_{21\beta} v_{e\beta} + y_{22\beta} v_{o\beta}$$

$$\underbrace{\left.\begin{array}{l} \text{Siendo } \; y_{11\beta} = \left.\dfrac{i_{e\beta}}{v_{e\beta}}\right|_{v_{o\beta}=0} = 1/R_2 \\[2ex] y_{22\beta} = \left.\dfrac{i_{o\beta}}{v_{o\beta}}\right|_{v_{e\beta}=0} = 1/R_2 \end{array}\right\}}_{\text{Efecto de carga de la red } \beta \text{ en la red A}}$$

e $\boxed{y_{12\beta} = \left.\dfrac{i_{e\beta}}{v_{o\beta}}\right|_{v_{e\beta}=0} = -\dfrac{1}{R_2} = \beta_Y}$

Por tanto, como sed A' tenemos el siguiente circuito: ④

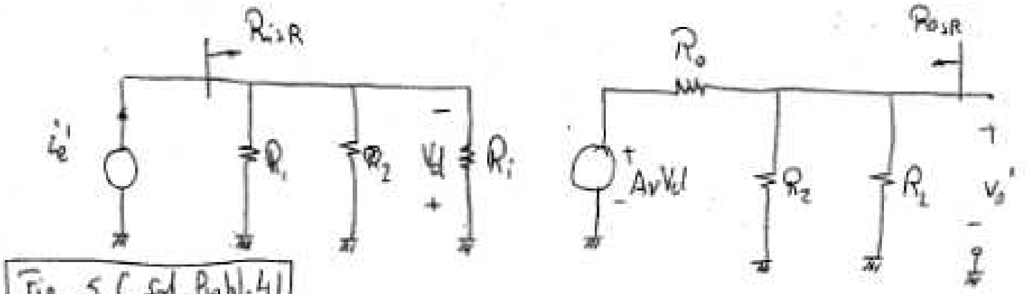


Fig. 5 (Sol. Probl. 4)

3.- a) Valor de A' y β

1) El valor de A' se obtiene a partir del circuito Fig 5 (Sol Probl. 4)

$$A' = \frac{V_o'}{i_e'} = \underbrace{\frac{V_o'}{V_d}}_{①} \times \underbrace{\frac{V_d}{i_e'}}_{②} \qquad ① \quad \frac{V_o'}{A_v V_d} = \frac{R_2 \| R_L}{R_o + R_2 \| R_L} \rightarrow \boxed{\frac{V_o'}{V_d} = A_v \times \frac{R_2 \| R_L}{R_o + R_2 \| R_L}}$$

$$② \quad \boxed{\frac{V_d}{i_e'} = -\, R_i \| R_1 \| R_2}$$

$$\text{Por tanto, } A' = A_Z = A_v \times \underbrace{\left(\frac{R_2 \| R_L}{\underbrace{R_o}_{200\Omega} + \underbrace{R_2 \| R_L}_{8{,}33k\Omega}}\right)}_{\frac{8{,}33k\Omega}{0{,}2k\Omega + 8{,}33k\Omega} = 0{,}976} \times \left(-\underbrace{R_i \| R_1 \| R_2}_{\substack{500k\Omega \| 1k\Omega \| 50k\Omega \\ \simeq \\ 1k\Omega}}\right)$$

$$\boxed{A_Z = -10^4 \times 0{,}976 \times 1k\Omega = -9760k\Omega}$$

Asimismo tenemos: $\boxed{R_{iR} = R_1 \| R_2 \| R_i \simeq 1k\Omega = R_1}$

$\boxed{R_{oR} = R_2 \| R_L \| R_o = 50k\Omega \| 100k\Omega \| 200\Omega = 195\Omega \simeq 200\Omega}$

$\boxed{R_{oR} \simeq R_o}$

2) $\boxed{\beta_Y = y_{12\beta} = -\frac{1}{R_2} = -\frac{1}{50k\Omega} = -0{,}02 \times 10^{-3}\frac{1}{\Omega} = -0{,}02 \times \frac{1}{k\Omega}}$

b) .- V_o/V_e

El circuito resultante que se obtiene partiendo de los circuitos de la Fig 2 (Sol. Probl. 4) y de la Fig. 3 (Sol. Probl. 4) es:

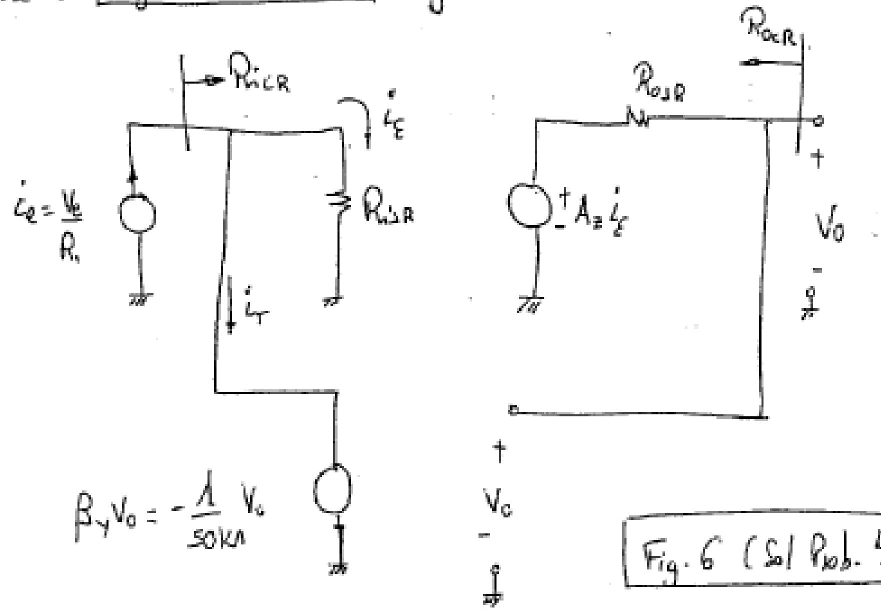


Fig. 6 (Sol Prob. 4)

$$\frac{V_o}{i_e} = G_z = \frac{A_z}{1 + A_z\beta_y} = \frac{-9760k\Omega}{1 + \underbrace{(-9760k\Omega)\times\left(-\frac{1}{50k\Omega}\right)}_{+195{,}22 = A_z\beta_y \gg 1}} = \frac{-9760k\Omega}{1 + 195{,}2}$$

$$\boxed{G_z = -49{,}74k\Omega \simeq -50k\Omega = \frac{1}{\beta_y} = \frac{1}{-\frac{1}{50k\Omega}}}$$

$$\boxed{R_{icR} = \frac{R_{isR}}{1 + A_z\beta_y} = \frac{1k\Omega}{1 + 195{,}2} = 5\Omega}$$

$$\boxed{R_{ocR} = \frac{R_{osR}}{1 + A_z\beta_y} = \frac{200\Omega}{1 + 195{,}2} = 1\Omega}$$

En consecuencia, el circuito de la Fig. 6 (Sol. Probl. 5) es equivalente a:

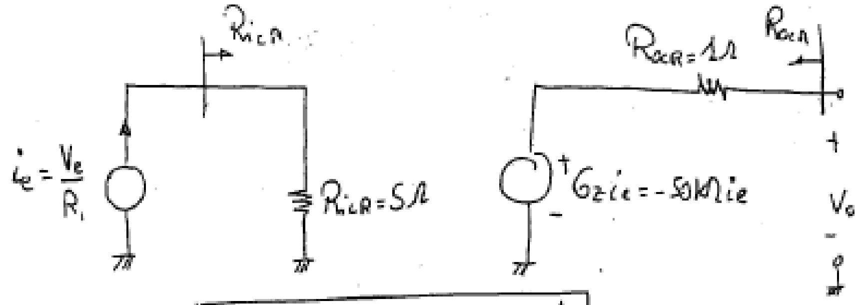


Figura 7 (Sol. Probl. 4)

Por tanto, $\boxed{\frac{V_o}{V_e} = \frac{V_o}{i_e} \times \frac{i_e}{V_e} = G_z \times \frac{1}{R_1} = -50k\Omega \times \frac{1}{1k\Omega} = -50}$

Es de señalar, que el valor obtenido para $\frac{V_o}{V_e}$ es igual al obtenido en el apartado 1 (A O Ideal)

c) Z_i, Z_i', Z_o y Z_o'

① Z_i y Z_i'

Según el esquema de la Fig. 3 (Sol. Probl. 4) y el de la Fig. 7 (Sol. Probl. 4)

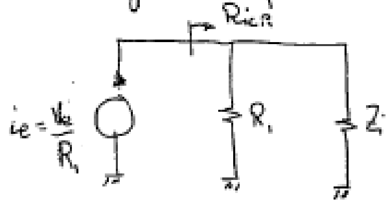


Fig. 8 (Sol. Probl. 4)

$$R_{icR} = R_1 \| Z_i' = \frac{R_1 \times Z_i'}{R_1 + Z_i'}$$

$$R_{icR} R_1 + R_{icR} Z_i' = R_1 \times Z_i'$$

$$Z_i'(R_1 - R_{icR}) = R_1 R_{icR}$$

$$\boxed{Z_i' = \frac{R_1 R_{icR}}{R_1 - R_{icR}} = \frac{1k\Omega \times 5\Omega}{1k\Omega - 5\Omega} \simeq \frac{1k\Omega \times 5\Omega}{1k\Omega} = 5\Omega}$$

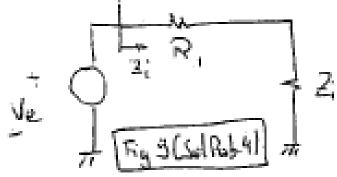


Fig 9 (Sol Prob 4)

Siendo $\boxed{Z_i = R_1 + Z_i' = 1k\Omega + 5\Omega \simeq 1\,k\Omega}$

② Z_o' y Z_o

Según el esquema de la Fig. 3 (Sol. Probl. 4) y el de la Fig. 7 (Sol. Probl. 4).

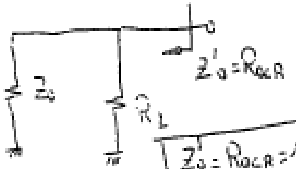


Fig. 10 (Sol Prob. 4)

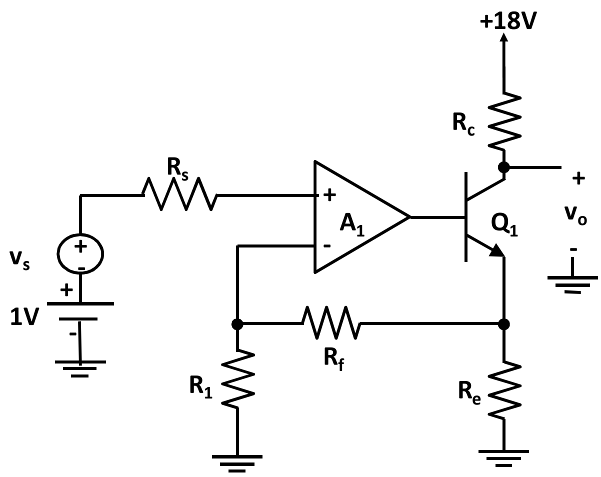
$$Z_o' = Z_o \| R_L = \frac{Z_o \times R_L}{Z_o + R_L} \rightarrow Z_o Z_o' + Z_o' R_L = Z_o' R_L$$

$\boxed{Z_o' = R_{ocR} = 1\Omega}$ $\boxed{Z_o = \frac{Z_o' R_L}{R_L - Z_o'} = \frac{R_{ocR} \times R_L}{R_L - R_{ocR}} = \frac{1\Omega \times 1k\Omega}{1k\Omega - 1\Omega} \simeq 1\Omega}$

EJERCICIO 3

En el amplificador realimentado de la figura se pide:

a. Calcular los valores de I_C y V_{CE} del transistor Q_1.
b. Dibujar el circuito equivalente en pequeña señal a frecuencias medias.
c. Demostrar que existe realimentación negativa. Identificar el tipo de topología y obtener los circuitos equivalentes de las redes A' y β.
d. Calcular el valor numérico de A', β y v_o/v_s.



__Datos:__

Q_1: $V_{BE(activa)} = 0.6V$, $V_{CEsat} = 0.2V$, $\beta = 200$, $v_T = 25mV$, $r_o \rightarrow \infty$

A_1 es un amplificador de tensión con: $A_{1v} = 2 \cdot 10^5$ (V/V), $R_i = 1M\Omega$, $R_o = 150\Omega$

Otros componentes: $R_s = 50\Omega$, $R_1 = 1.1k\Omega$, $R_f = 2.2k\Omega$, $R_c = 6.8k\Omega$ y $R_e = 3.3k\Omega$

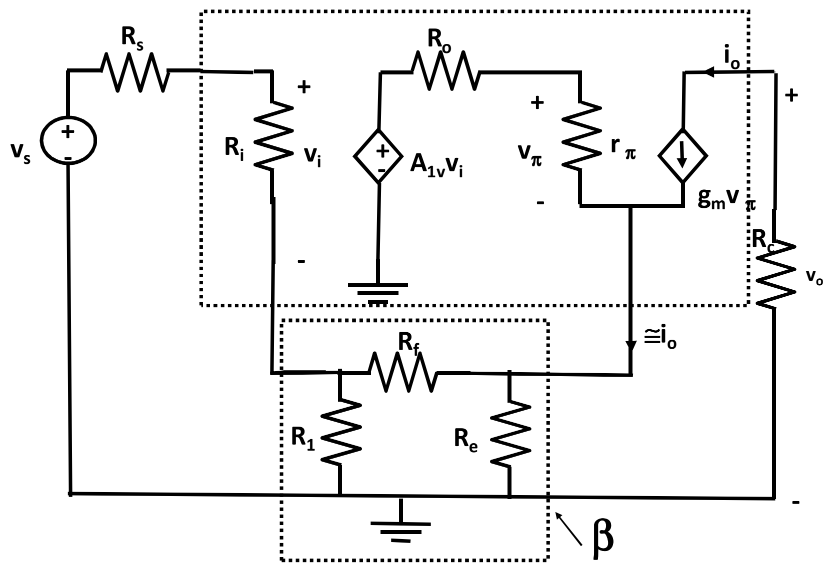
a) Calcular los valores de I_C y V_{CE} del transistor Q_1.

$$I_C \cong 1.8mA \qquad V_{CE} \cong 2.8V$$

$$r_\pi \cong 2.8k\Omega \qquad g_m \cong 0.072\Omega^{-1}$$

__SOLUCIÓN__

a) Dibujar el circuito equivalente en pequeña señal a frecuencias medias

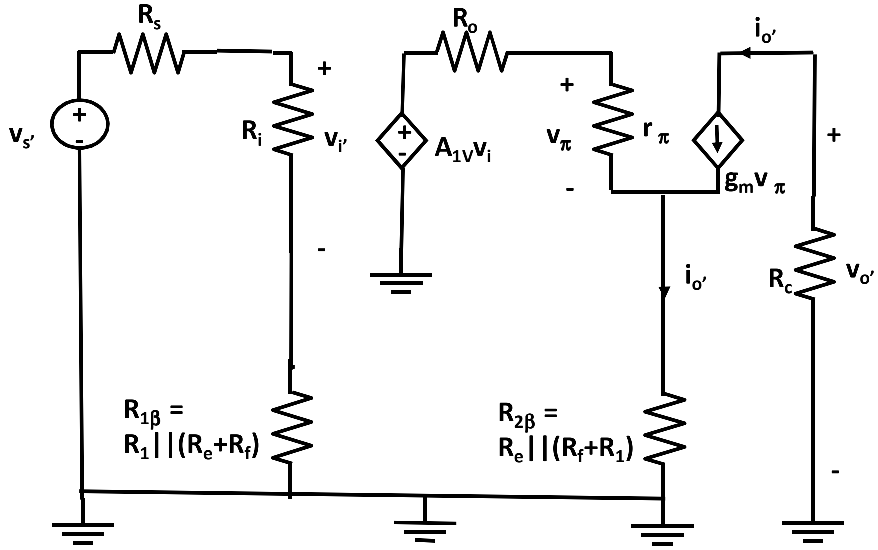


b) Demostrar que existe realimentación negativa. Identificar el tipo de topología y obtener los circuitos equivalentes de las redes A' y β.

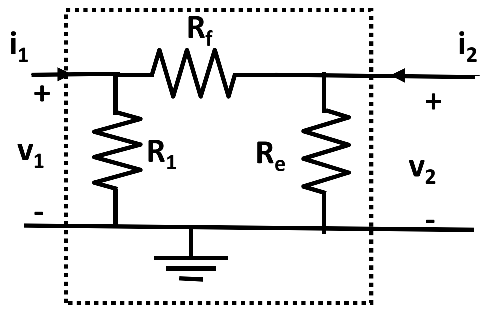
$i_o\uparrow \rightarrow v_{R1}\uparrow \rightarrow v_i\downarrow \rightarrow v_\pi\downarrow \rightarrow i_o\downarrow$

Topología serie (se mezcla tensión a la entrada) **-serie** (se muestrea corriente a la salida). $A_{CR} = \dfrac{i_o}{v_s}$

A':



β:



c) Calcular el valor numérico de A', β y v_o/v_s.

$$A_Y' = \frac{i_o'}{v_s'} \cong \frac{A_{1v}\cdot R_i \cdot \beta}{\left[R_o + r_\pi + R_{2\beta}(\beta+1)\right]\cdot\left[R_s + R_i + R_{1\beta}\right]} \cong \frac{A_{1v}}{R_{2\beta}} \cong 121.2\Omega^{-1}$$

$$\beta_Z = \left.\frac{v_1}{i_2}\right|_{i1=0} \cong \frac{R_1 \cdot R_e}{R_f + R_1 + R_e} \cong 0.55k\Omega$$

$$A_{Y\,CR} = \frac{i_o}{v_s} = \frac{A_Y'}{1 + A_Y'\beta_Z} \cong \frac{1}{\beta_Z} \cong 1.8m\Omega^{-1}$$

$$v_o = -i_o \cdot R_C \Rightarrow \frac{v_o}{v_s} = \frac{-i_o \cdot R_C}{v_s} = -A_{YCR}\cdot R_C \cong -12.2\frac{V}{V}$$

EJERCICIO 4

Para el circuito mostrado en la figura 2 que representa un amplificador de aislamiento acoplado en alterna:

1. a) Demuestre que en el <u>circuito de entrada</u> existe una realimentación negativa. ¿De qué tipo es? Indique la función que estabiliza y sus parámetros privilegiados

   b) Demuestre que en el <u>circuito de salida</u> existe una realimentación negativa. ¿De qué tipo es? Indique la función que estabiliza y sus parámetros privilegiados.

2. a) Obtenga las redes A' y β, sus expresiones y calcule su valor correspondiente al amplificador realimentado <u>del circuito de entrada</u> con el objeto de calcular I_{demi}/V_{in}

.

   b) Obtenga las redes A' y β, sus expresiones y calcule su valor correspondiente al amplificador realimentado <u>del circuito de entrada</u> con el objeto de calcular V_{out}/I_{fot} .

   c) Obtenga la expresión y calcule el valor de: V_o/V_{in} (teniendo en cuenta que I_{fot}/I_{demi} = 0.5), Z1 y Z2 a frecuencias medias.

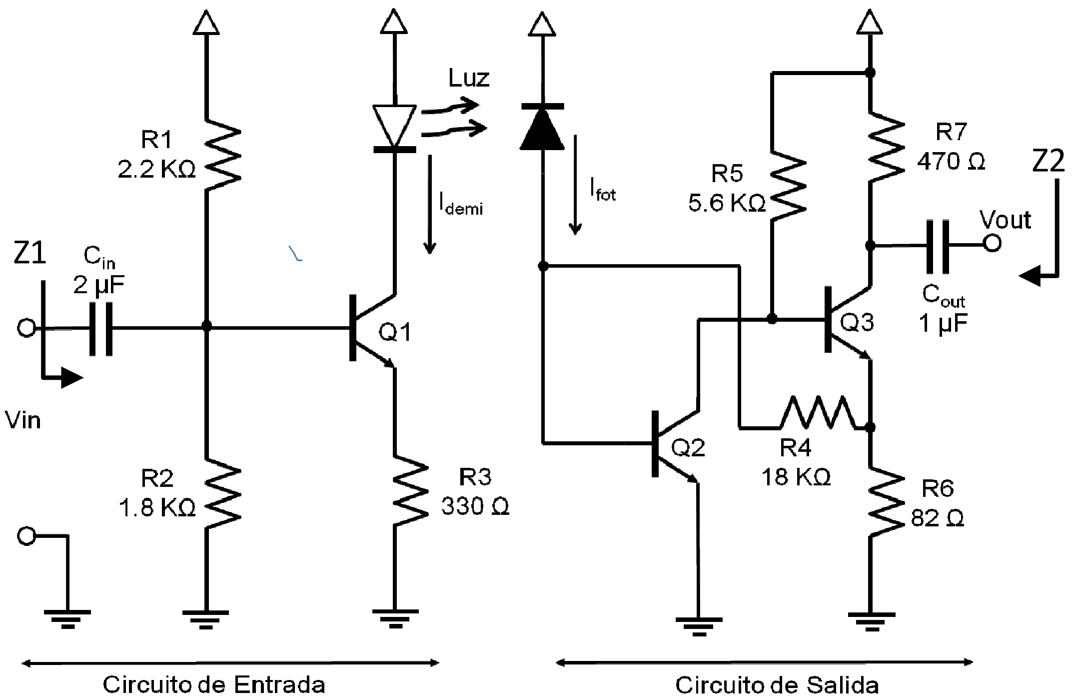


Figura 2

Datos:

$\beta_F = \beta_0 = 100$ $r_o \rightarrow \infty$(en todos los transistores)

Q1: $r_{\pi 1} = 500\Omega$ Q2: $r_{\pi 2} = 3.7k\Omega$ Q3: $r_{\pi 3} = 340\Omega$

Circuito de entrada:
LED en pequeña señal es equivalente a $r_d = 25\Omega$ Variable salida: I_{demi}

Circuito de salida:
Fotodiodo en pequeña señal: Fuente de corriente ideal
Variable entrada $I_{fot} = 0.5\ I_{demi}$

SOLUCIÓN

2.- (a) El circuito de entrada tiene un equivalente en pequeña señal:

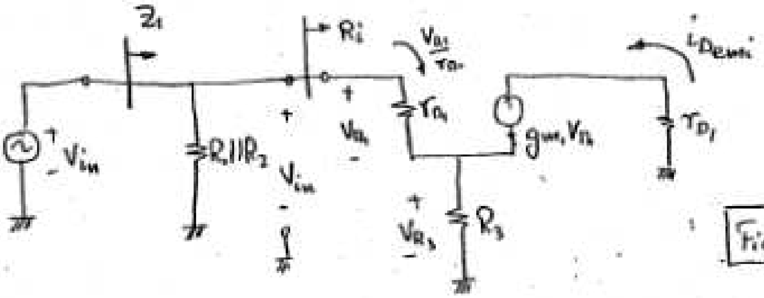


Fig. 1 Sol. Problema 4

Si $i_{Demi}\uparrow$ $\quad g_{m1} V_{\pi 1}\uparrow$ Suponiendo $\frac{V_{\pi 1}}{r_{\pi 1}} \ll g_{m1} V_{\pi 1} \Rightarrow g_{m1} V_{\pi 1} R_3 \simeq V_{R_3}\uparrow$

$\underbrace{V_{in}\,(\text{Constante}) = V_{\pi 1} + V_{R_3}}_{\text{Comparador}} \Rightarrow V_{\pi 1}\downarrow \quad g_{m1} V_{\pi 1}\downarrow \quad i_{Demi}\downarrow$ (Real. Neg)

En consecuencia, muestreamos corriente a la salida y comparamos tensión a la entrada → (Serie – Serie)

La función que estabiliza es una $\boxed{\text{Transadmitancia}: G_Y = \frac{A_Y}{1+A_Y\beta_Z}}$

Los parámetros privilegiados son los $\boxed{Z}$.

(b) El circuito de salida tiene un equivalente en pequeña señal: (3)

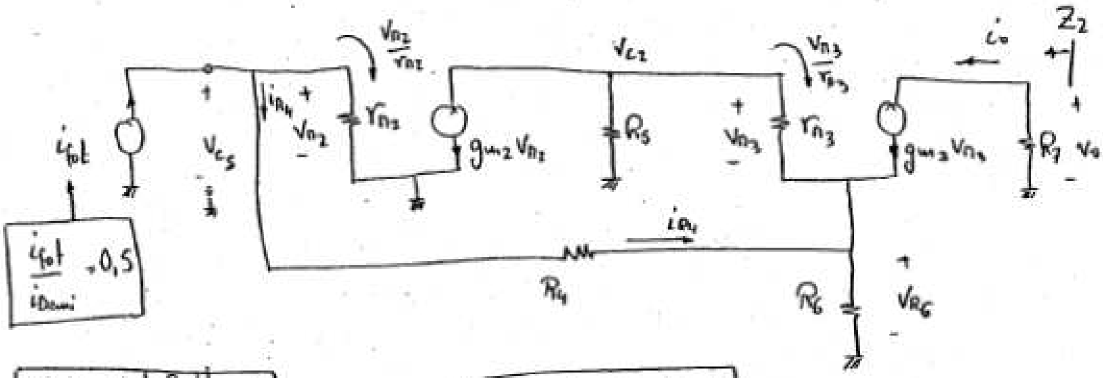


Fig 2. Sol. Problema 4

$R_4\ (18k\Omega) \gg R_6\ (82\Omega)$

Si $i_o \uparrow$ $g_{m3}v_{\pi3}\uparrow$ Suponiendo $\frac{v_{\pi3}}{r_{\pi3}} \ll g_{m3}v_{\pi3} \Rightarrow g_{m3}v_{\pi3}R_6 \simeq v_{R6}\ (R_4 \gg R_6)\uparrow$

$\rightarrow \frac{v_{cs} - v_{R6}}{R_4} = i_{R4}\downarrow$ $\underbrace{i_{fot}\ (\text{Constante}) = i_{R4} + \frac{v_{\pi2}}{r_{\pi2}}}_{\text{Comparador}}$ $\rightarrow \frac{v_{\pi2}}{r_{\pi2}}\uparrow$ $g_{m2}v_{\pi2}\uparrow$ $v_{c2}\downarrow$

$\rightarrow \frac{v_{\pi3}}{r_{\pi3}}\downarrow$ $g_{m3}v_{\pi3}\downarrow$ $i_o\downarrow$ (Realimentación Negativa).

En consecuencia, muestreamos corriente a la salida y comparamos corriente a la entrada $\Rightarrow$ (Paralelo - Serie)

La función que estabiliza es una $\boxed{\text{Transcorriente}: G_I = \frac{A_I}{1+A_I\beta_I}}$

Los parámetros privilegiados son los $\boxed{g}$.

3.- (a) Obtener las redes A' y β correspondientes al circuito de entrada. Obtener sus expresiones y calcular i'_{Demi}/v'_{in} (4)

(a).1.- La Red β correspondiente al circuito de entrada es Fig.1.Sol.Pr.4

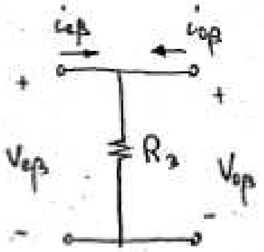


Fig. 3 Sol. Probl. 4

$$v_{e\beta} = z_{11\beta}\, i_{e\beta} + z_{12\beta}\, i_{o\beta}$$

$$v_{o\beta} = z_{21}\, i_{e\beta} + z_{22\beta}\, i_{o\beta}$$

$$z_{11\beta} = \left.\frac{v_{e\beta}}{i_{e\beta}}\right|_{i_{o\beta}=0} = R_3$$

$$z_{22\beta} = \left.\frac{v_{o\beta}}{i_{o\beta}}\right|_{i_{e\beta}=0} = R_3$$

$$z_{12\beta} = \left.\frac{v_{e\beta}}{i_{o\beta}}\right|_{i_{e\beta}=0} = R_3 = \beta_z$$

Por tanto, $\boxed{\beta_z = R_3 = 330\,\Omega}$

(a).2.- La Red A' es por tanto:

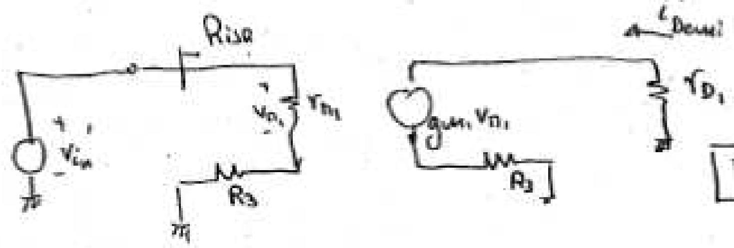


Fig. 4 Sol. Probl. 4

$$A_Y = \frac{i'_{Demi}}{v'_{in}} = \underbrace{\frac{i'_{Demi}}{v_{\pi_1}}}_{①} \cdot \underbrace{\frac{v_{\pi_1}}{v'_{in}}}_{②}$$

① $i'_{Demi} = g_{m_1} v_{\pi_1}$

$$\frac{i'_{Demi}}{v_{\pi_1}} = g_{m_1}$$

② $$\frac{v_{\pi_1}}{v'_{in}} = \frac{r_{\pi_1}}{r_{\pi_1} + R_E}$$

Por tanto, $\boxed{A_Y = g_{m1} \times \frac{r_{\pi 1}}{r_{\pi 1}+R_E} = \frac{\beta_{o1}}{r_{\pi 1}+R_3} = \frac{100}{500\Omega+330\Omega} = 0,12\,\frac{1}{\Omega}}$

(a).3.- Calcular la expresión $\frac{i_{Demi}}{V_{in}}$

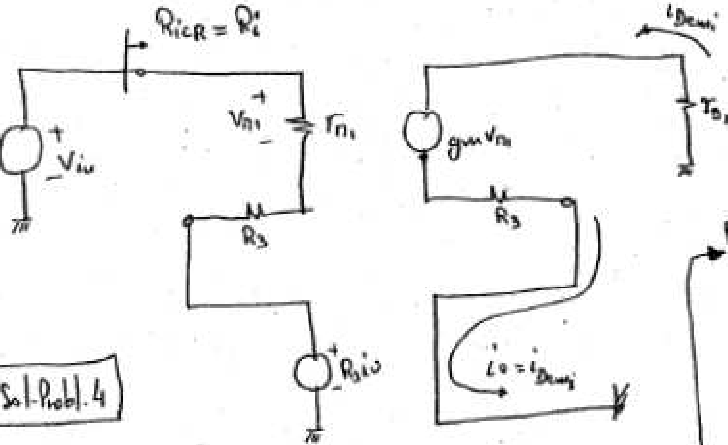


Fig. 5 Sol. Probl. 4

En donde $G_Y = \frac{\frac{\beta_{o1}}{r_{\pi 1}+R_3}}{1+\frac{\beta_{o1}}{r_{\pi 1}+R_3}\times R_3} = \frac{\frac{\beta_{o1}}{r_{\pi 1}+R_3}}{\frac{r_{\pi 1}+R_3+\beta_{o1}R_3}{r_{\pi 1}+R_3}} = \frac{\beta_{o1}}{r_{\pi 1}+R_3(1+\beta_{o1})}$

En este circuito: $\frac{i_{Demi}}{V_{in}} = G_Y = \frac{A_Y}{1+A_Y\beta_Z} = \frac{0,12\,\frac{1}{\Omega}}{1+\underbrace{0,12\,\frac{1}{\Omega}\times 330\,\Omega}_{39,8}}$

$$\boxed{\frac{i_{Demi}}{V_{in}} = \frac{0,12\,1/\Omega}{1+39,8} = 0,0029\,\frac{1}{\Omega} = G_Y}$$

Teniendo en cuenta que $A_Y\beta_Z >> 1 \rightarrow \boxed{G_Y \simeq \frac{1}{\beta_Z} = \frac{1}{330\,\Omega} = 0,0031\,\frac{1}{\Omega}}$

3 (b) Obtener las redes A' y β correspondientes al circuito de salida. Obtener sus expresiones y calcular $\frac{V_{out}}{i_{fot}}$.

(b).1.- La Red β correspondiente al circuito de salida en Fig 2. Sol. Prob. 4:

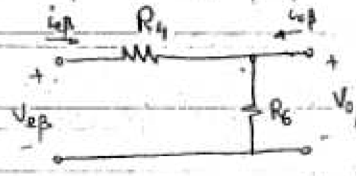


Fig.6 Sol. Probl. 4

$$i_{e\beta} = g_{11\beta} v_{e\beta} + g_{12\beta} i_{o\beta}$$
$$v_{o\beta} = g_{21\beta} v_{e\beta} + g_{22\beta} i_{o\beta}$$

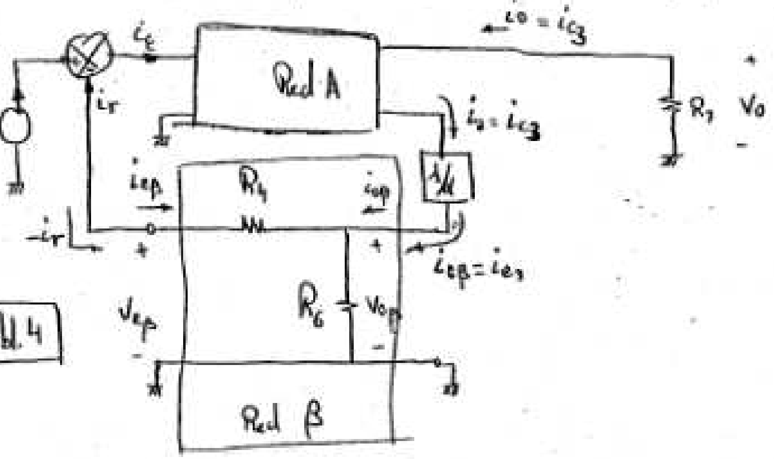
Siendo
$$g_{11\beta} = \left.\frac{i_{e\beta}}{v_{e\beta}}\right|_{i_{o\beta}=0} = \frac{1}{R_4 + R_6}$$

$$g_{22\beta} = \left.\frac{v_{o\beta}}{i_{o\beta}}\right|_{v_{e\beta}=0} = R_4 \| R_6$$

$$g_{12\beta} = \left.\frac{i_{e\beta}}{i_{o\beta}}\right|_{v_{e\beta}=0} = -\frac{R_6}{R_4 + R_6}$$

Para el cálculo de β_I debemos estudiar en el circuito de la $\boxed{\text{Fig. 2 Sol. Problema 1}}$ la relación entre $i_{e\beta}$ e i_o en vez de la relación entre $i_{e\beta}$ e $i_{o\beta}$ obtenida mediante $g_{12\beta}$ $\boxed{\text{Fig. 6 Sol. Probl. 4}}$.

Es decir,

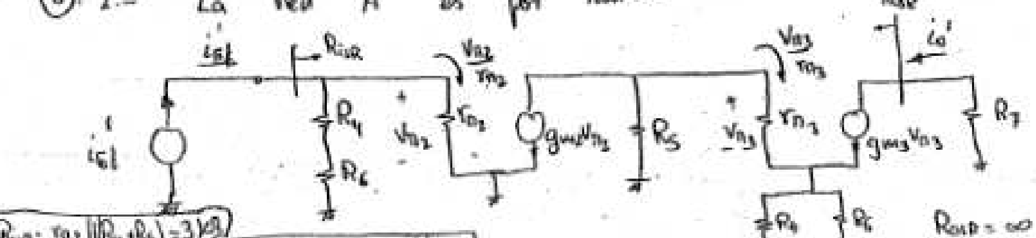


$\boxed{\text{Fig. 7 Sol. Probl. 4}}$

Por tanto,
$$\boxed{\beta_I = \frac{i_{e\beta}}{i_o} = \frac{i_{e\beta}}{i_{o\beta}} \times \frac{i_{o\beta}}{i_o} = -g_{12\beta} \times \frac{i_{e3}}{i_{c3}} = -g_{12} \times \frac{1}{\alpha}}$$

$$\boxed{\beta_I = -\frac{82\,\Omega}{18000\,\Omega + 82\,\Omega} \times \frac{1}{\frac{100}{101}} = -0{,}0046\,\frac{A}{A} \simeq -0{,}005\,\frac{A}{A}}$$

(5).2.– La Red A' es por tanto:



$\boxed{R_{inR} = r_{\pi2} \| (R_4 + R_6) = 3\,k\Omega}$

$\boxed{\text{Fig. 8 Sol. Probl. 4}}$

$$A_I = \frac{i'_o}{i'_{fot}} = \underbrace{\frac{i'_o}{v_{\pi 3}}}_{1} \times \underbrace{\frac{v_{\pi 3}}{v_{\pi 2}}}_{2} \times \underbrace{\frac{v_{\pi 2}}{i'_{fot}}}_{3}$$

Siendo: (1) $i'_o = g_{m3} v_{\pi 3} \longrightarrow \boxed{\dfrac{i'_o}{v_{\pi 3}} = g_{m3}}$

(2) $$\frac{v_{\pi 3}}{r_{\pi 3}} = -g_{m2} v_{\pi 2} \times \frac{R_5}{R_5 + r_{\pi 3} + (R_4 \| R_6)(1+\beta_{o3})}$$

$$\boxed{\frac{v_{\pi 3}}{v_{\pi 2}} = -g_{m2} r_{\pi 3} \times \frac{R_5}{R_5 + r_{\pi 3} + (R_4 \| R_6)(1+\beta_{o3})}}$$

(3) $$\frac{v_{\pi 2}}{r_{\pi 2}} = i'_{fot} \times \frac{R_4 + R_6}{R_4 + R_6 + r_{\pi 2}}$$

$$\frac{v_{\pi 2}}{i'_{fot}} = \frac{r_{\pi 2} \times (R_4 + R_6)}{R_4 + R_6 + r_{\pi 2}} = r_{\pi 2} \,//\, (R_4 + R_6)$$

β_{o3}

Por tanto, $$A_I = g_{m3} \times \left(-g_{m2} r_{\pi 3} \times \frac{R_5}{R_5 + r_{\pi 3} + (R_4 \| R_6)(1+\beta_{o3})} \right) \times \frac{r_{\pi 2} \times (R_4 + R_6)}{R_4 + R_6 + r_{\pi 2}}$$

β_{o2}

$$A_I = -\beta_{o2}\beta_{o3} \times \left(\frac{R_5}{R_5 + r_{\pi 3} + (R_4 \| R_6)(1+\beta_{o3})} \right) \times \left(\frac{R_4 + R_6}{R_4 + R_6 + r_{\pi 2}} \right)$$

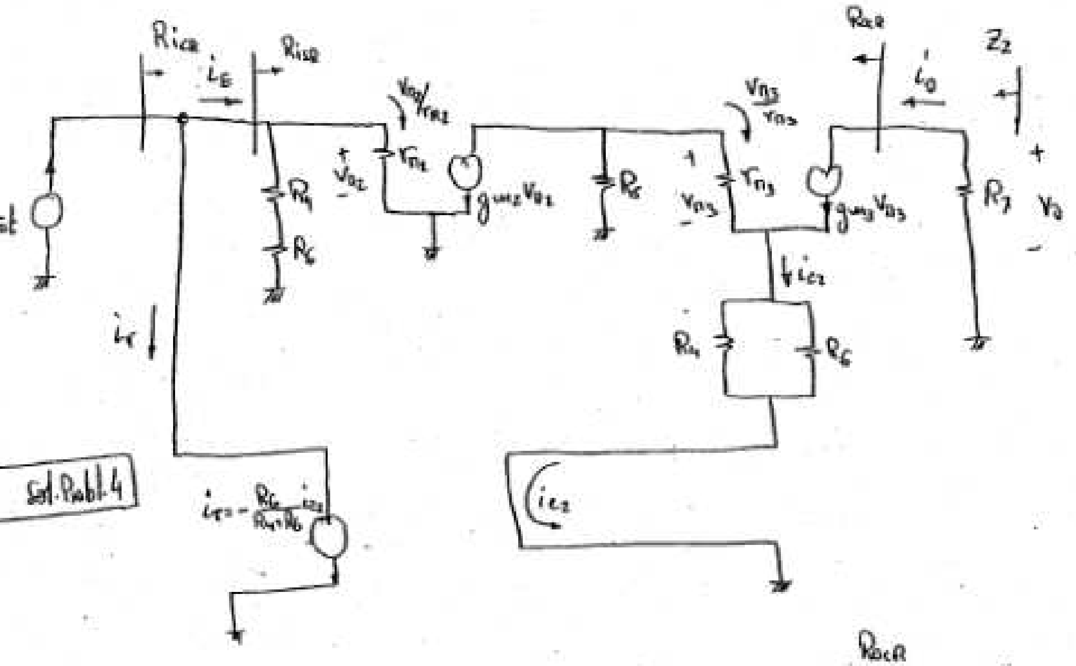
$$\left(\frac{5,6\,k\Omega}{5,6\,k\Omega + 342\,\Omega + \underbrace{18\,k\Omega \| 82\,\Omega}_{82\,\Omega}(101)} \right) = \boxed{0,39}$$

$$\frac{18\,k\Omega + 82\,\Omega}{18\,k\Omega + 82\,\Omega + 3,7\,k\Omega} = \boxed{0,83}$$

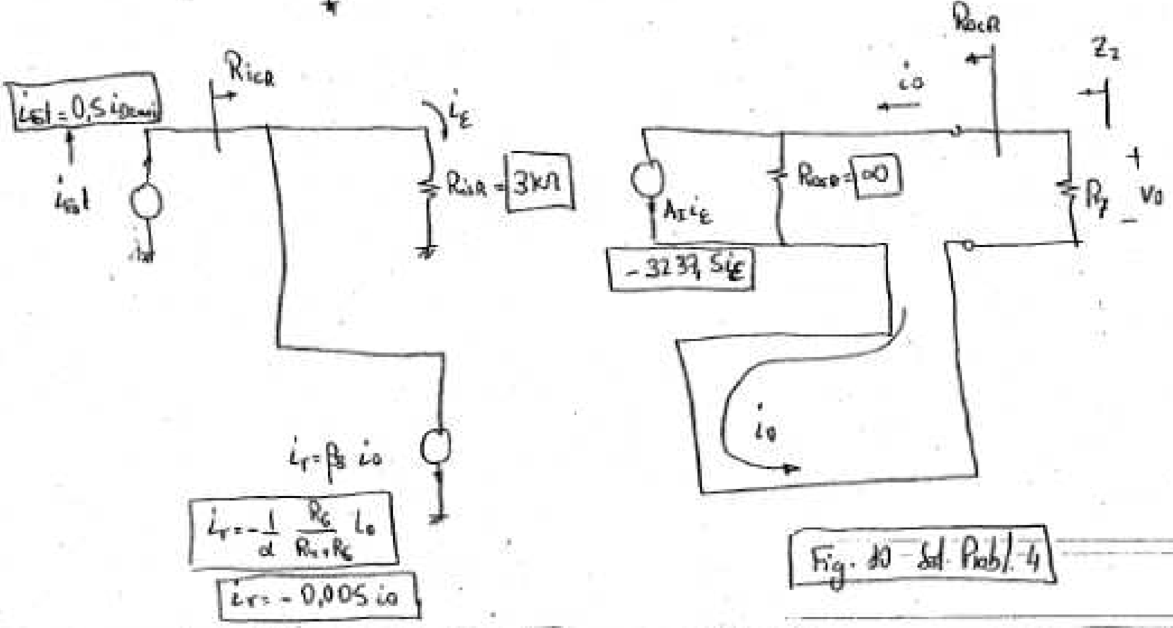
$$\boxed{A_I = -100 \times 100 \times 0,39 \times 0,83 = -3237,5\ A/A}$$

(b). 3.- Calcular la expresión $\frac{V_{out}}{i_{st}}$

Partiendo del circuito de la $\boxed{\text{Fig. 2, Sol. Problema 4}}$ y utilizando el circuito de la Red A' (Fig. 8, Sol. Probl. 4) en el esquema de circuito realimentado de la $\boxed{\text{Fig. 7 Sol. Probl.-4}}$, tenemos:



$\boxed{\text{Fig. 9 Sol. Probl. 4}}$



$\boxed{\text{Fig. 10 Sol. Probl. 4}}$

Por tanto, $\boxed{G_I = \frac{i_o}{i_{st}} = \frac{A_I}{1+A_I\beta_I} = \frac{-3237{,}5\ A/A}{1+(-3237{,}5\ A/A)(-0{,}005\ A/A)} = -203{,}7}$

La expresión y el valor de $\frac{V_o}{i_{fot}}$ se obtienen:

$$\frac{V_o}{i_{fot}} = \frac{V_o}{i_o} \times \frac{i_o}{i_{fot}} = -R_7 \times G_I = -470\,\Omega \times (-188{,}4\ A/A)$$

$$\boxed{\frac{V_o}{i_{fot}} = 95{,}7\ K\Omega}$$

3(c).- Obtener las expresiones y calcular los valores de $\frac{V_o}{V_{in}}$, Z_i y Z_o.

1. $$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{V_o}{i_{fot}} \times \frac{i_{fot}}{i_{Demi}} \times \frac{i_{Demi}}{V_{in}} = 88{,}5\ K\Omega \times 0{,}5 \times 0{,}003\ \frac{1}{\Omega}$$

$$\cancel{\boxed{132{,}8\ V/V}} \qquad \boxed{\frac{V_o}{V_{in}} = 143{,}6\ \frac{V}{V}}$$

NOTA: Este valor de $\frac{V_o}{V_{in}}$ se puede aproximar utilizando las expresiones de $G_I \simeq \frac{1}{\beta_I}\Big|_{A_I\beta_I \gg 1}$ y $G_Y \simeq \frac{1}{\beta_Z}\Big|_{A_Y\beta_Z \gg 1}$

Es decir, $$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{V_o}{i_{fot}} \times \frac{i_{fot}}{i_{Demi}} \times \frac{i_{Demi}}{V_{in}} = \frac{V_o}{i_o} \times \underbrace{\frac{i_o}{i_{fot}}}_{G_I} \times 0{,}5 \times \underbrace{\frac{i_{Demi}}{V_i}}_{G_Y}$$!

$$\frac{V_o}{V_{in}} = -R_7 \times \frac{1}{\beta_I} \times \frac{1}{\beta_Z} \times 0{,}5 = -R_7 \times \frac{1}{-\frac{1}{\alpha} \times \frac{R_C}{R_4+R_6}} \times \frac{1}{R_3} \times 0{,}5$$

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \left(-\frac{R_7}{R_3}\right) \times \left(-\frac{R_4+R_C}{R_6}\right) \times \alpha \times 0{,}5 = \left(-\frac{470\,\Omega}{330\,\Omega}\right) \times \left(-\frac{18000\,\Omega + 82\,\Omega}{82\,\Omega}\right) \times 0{,}99 \times 0{,}5$$

Por tanto $$\boxed{\frac{V_o}{V_{in}} = 155\ V/V}$$

(10)

(2) Para el cálculo de Z_1 utilizamos el circuito de la $\boxed{\text{Fig. 1, Sol. Problema 4}}$:

$$\boxed{Z_1 = R_1 \| R_2 \| R_i}.$$

Siendo $R_i = R_{icR}$ (Ver Circuito $\boxed{\text{Fig. 5, Sol. Probl. 4}}$)

Para obtener el valor de R_{icR} utilizamos la expresión:

$$\boxed{R_{icR} = R_{isR}\,(1 + A_Y\,\beta_Z)}$$

Siendo $R_{isR} = r_{\pi_1} + R_3$ (Ver Circuito $\boxed{\text{Fig. 4, Sol. Probl. 4}}$)

Por tanto, $R_{icR} = (r_{\pi_1} + R_3)\left(1 + \underbrace{\frac{\beta_{01}}{r_{\pi_1}+R_3}}_{A_Y} \times \underbrace{R_3}_{\beta_Z}\right) =$

$$R_{icR} = r_{\pi_1} + R_3 + \left(\frac{\beta_{01}}{\cancel{r_{\pi_1}+R_3}} \times R_3\right)\cancel{(r_{\pi_1}+R_3)} = r_{\pi_1} + R_3 + \beta_{01} R_3$$

$$\boxed{R_i = R_{icR} = r_{\pi_1} + R_3\,(1+\beta_{01}) = 0{,}5\,k\Omega + 330\,\Omega\,(1+100) = 33{,}83\,k\Omega}$$

En consecuencia, $\boxed{Z_1 = \underbrace{2{,}2\,k\Omega \,\|\, 1{,}8\,k\Omega}_{0{,}99\,k\Omega} \,\|\, 33{,}83\,k\Omega = 0{,}96\,k\Omega \simeq R_1\|R_2 = 0{,}99\,k\Omega}$

(3) Para el cálculo de Z_2 utilizamos el circuito de la $\boxed{\text{Fig. 2, Sol. Probl. 4}}$ y el el de la $\boxed{\text{Figura 10 Sol. Problema 4}}$. Partiendo de este último circuito obtenemos:

$$Z_2 = R_7 \| R_{ocR} = R_7 \| R_{osR}(1 + A_Z\beta_Z) = R_7 \| \infty\,(1 + A_Z\beta_Z) = R_7$$

$$\boxed{Z_2 = 470\,\Omega}$$

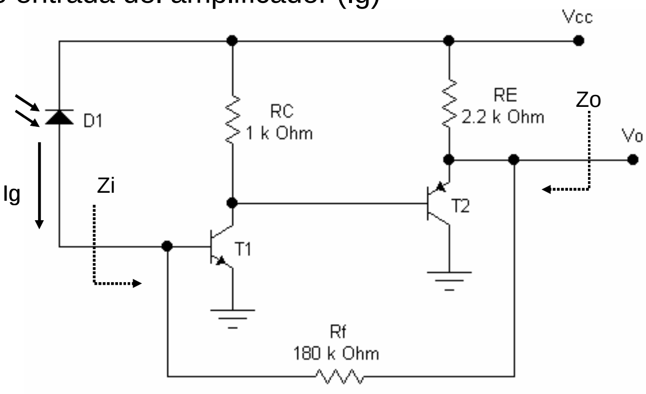
4.- $$\boxed{f_{ci} = \frac{1}{2\pi\, 2\mu F\,(R_g + Z_1)}\Bigg|_{R_g = 0\,\Omega} = \frac{1}{2\pi \times 2\mu F\,(Z_1)} = \frac{1}{2\pi \times 2\mu F \times 0{,}96\,k\Omega} \simeq 83\,Hz}$$

Nota: No se tiene en cuenta el efecto del condensador de $1\mu F$ en el circuito de salida ya que la Resistencia R_L en el circuito de salida es $R_L = \infty$

Es decir, $$\boxed{f_{ci} = \frac{1}{2\pi \times 2\mu F\,(R_g + Z_1)}\Bigg|_{R_g = 0\,\Omega} + \frac{1}{2\pi \times 1\mu F\,(R_7 + \infty)} = 83\,Hz + 0\,Hz = 83\,Hz}$$

EJERCICIO 5

El amplificador realimentado representado por el esquemático de la figura se utiliza como receptor de un canal óptico de comunicaciones, donde el diodo D1 es un fotodiodo (considere que la corriente inversa por el fotodiodo es proporcional a la intensidad de luz incidente en el mismo) que puede considerarse el generador de la señal de entrada del amplificador (Ig)



DATOS:

T1,T2:

$|V_{BE}(\text{activa})| = 0{,}6V$

$|V_{CEsat}| = 0.2V$

$\beta = 200$

$V_T = 26$ mV

$r\pi = |\beta V_T/Ic|$

$gm = |Ic/V_T|$

$ro \rightarrow \infty$

$Vcc = 6$ V

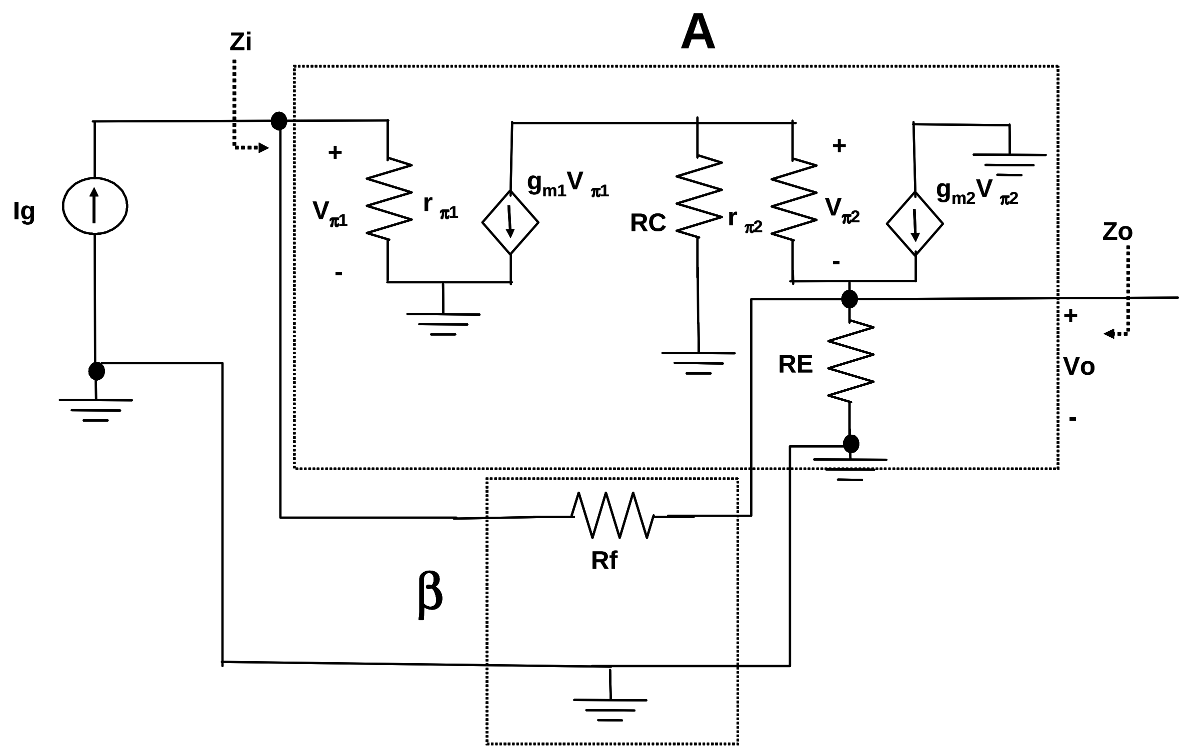
SE PIDE:

Considere en lo que sigue que $I_{CT1} = I_{CT2} = 3$ mA y que los transistores están en zona activa:

a) Obtenga y represente el esquema para pequeña señal del amplificador, a frecuencias medias.
b) Indique el tipo de realimentación existente. Identifique las redes A y β del amplificador realimentado e indique la topología del circuito y sus características más significativas: magnitudes comunes, magnitudes que se muestrean y que se realimentan, así como las funciones de transferencia genéricas de los bloques A y β correspondientes a la topología. Justifique las respuestas de forma razonada.
c) Obtenga las redes A y β idealizadas (A' y β') y la ganancia Vo/Ig.
d) Obtenga el valor de las impedancias Zi y Zo marcadas en el esquemático del amplificador.

<u>**SOLUCIÓN**</u>

a) **Obtenga y represente el esquema para pequeña señal del amplificador, a frecuencias medias.**



donde:

$$g_{m1} = \frac{I_{C1}}{V_T} = \frac{3mA}{26mV} \cong 0.1154S = g_m \quad r_{\pi 1} = \frac{V_T}{I_{B1}} = \frac{\beta \bullet V_T}{I_{C1}} = \frac{200 \bullet 26mV}{3mA} \cong 1.7k\Omega = r_\pi$$

$$g_{m2} = \frac{I_{C2}}{V_T} = \frac{3mA}{26mV} \cong 0.1154S = g_m \quad r_{\pi 2} = \frac{V_T}{I_{B2}} = \frac{\beta \bullet V_T}{I_{C2}} = \frac{200 \bullet 26mV}{3mA} \cong 1.7k\Omega = r_\pi$$

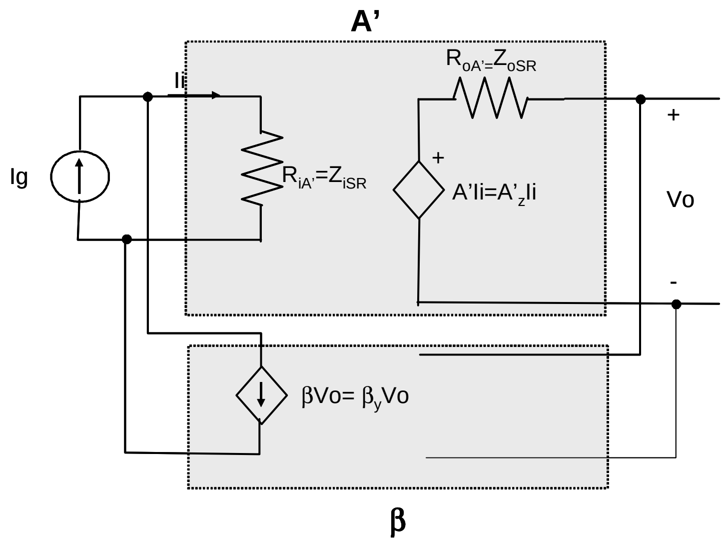
b) Indique el tipo de realimentación existente. Identifique las redes A y β del amplificador realimentado e indique la topología del circuito y sus características más significativas: magnitudes comunes, magnitudes que se muestrean y que se realimentan, así como las funciones de transferencia genéricas de los bloques A y β correspondientes a la topología. Justifique las respuestas de forma razonada.

$$\left.\begin{array}{l} Vo\uparrow \\ \quad Ig = CTE \end{array}\right\} \Rightarrow V_{BE1}\uparrow \rightarrow I_{B1}\uparrow \rightarrow I_{C1}\uparrow \rightarrow V_{B2}\downarrow \rightarrow V_{EB2}\uparrow \rightarrow I_{B2}\uparrow \rightarrow I_{E2}\uparrow \rightarrow Vo\downarrow$$

Red β: Rf
Red A: Resto.
Topología PARALELO-PARALELO (Transimpedancia):

Entrada: Conexión paraleo, se realimenta corriente, la magnitud común es tensión
Salida: Conexión paralelo, se muestrea tensión, la magnitud común es tensión.
Función de transferencia genérica red A: Vo/Ii [V/A] (Az)
Función de transferencia genérica red β: If/Vo [A/V] (βy)

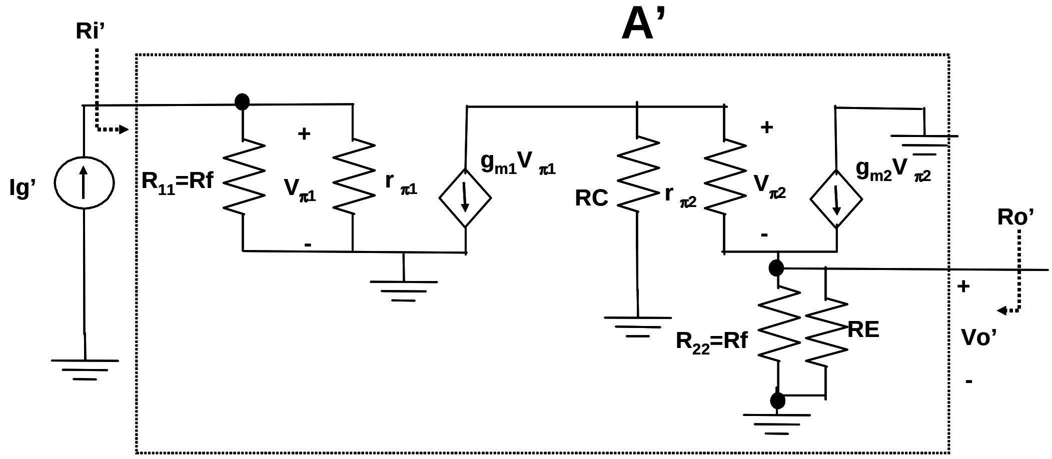
El esquema del amplificador, en el caso ideal, para esta topología es el siguiente:



c) Obtenga las redes A y β idealizadas (A' y β') y la ganancia Vo/Ig.

Para construir la red A' añadimos los efectos de carga de la fuente, carga y de la red β a la entrada y la salida.
Para hallar el efecto de carga de la red β a la entrada (R_{11}), calculamos la impedancia que se ve desde los terminales de la red β conectados a la entrada del circuito, anulando la magnitud común en la conexión de salida (tensión).
Para hallar el efecto de carga de la red β a la salida (R_{22}) calculamos la impedancia que se ve desde los terminales de la red β conectados a la salida del circuito, anulando la magnitud común en la conexión de entrada (tensión).

Con todo ello la red A' queda como sigue:



Analizando el circuito:

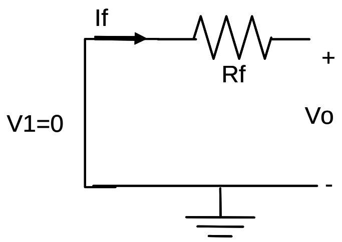
$$\left.\begin{aligned}
&\frac{Vo'}{v_{\pi 2}} = \left(\frac{RE \,||\, R_{22}}{r_\pi}\right)\cdot(\beta+1) \cong gm\cdot RE \cong 254\\
&\frac{v_{\pi 2}}{v_{\pi 1}} = -\frac{g_m\cdot r_\pi\cdot RC}{RC + r_\pi + (R_{22}\,||\,RE)\cdot(\beta+1)} \cong -\frac{RC}{RE} \cong -0.45\\
&\frac{v_{\pi 1}}{Ig'} = R_{11}\,||\,r_\pi \cong r_\pi \cong 1.7k
\end{aligned}\right\} \Rightarrow A' = \frac{Vo'}{Ig'} \cong -194.10^3\left[\frac{V}{A}\right] = -194k\Omega$$

Calculando las impedancias de entrada (Ri') y de salida (Ro') de la red A' se tiene:

$$Ri' = R11\,||\,r_\pi \cong r_\pi = 1.7k\Omega$$

$$Ro' = RE\,||\,R22\,||\,\frac{r_\pi + RC}{\beta+1} \cong \frac{r_\pi + RC}{\beta+1} \cong 13.4\Omega$$

Para poder calcular la ganancia del amplificador realimentado necesitamos calcular previamente la ganancia de la red β.



La ganancia de la red β se obtiene como cociente entre la variable de salida de la red β (variable que se realimenta a la entrada del amplificador) y la variable de entrada de la red β (variable que se muestrea a la salida del amplificador) anulando la magnitud común en la conexión de entrada. En este caso nos queda:

$$\beta = \left.\frac{If}{Vo}\right|_{V1=0} = -\frac{1}{Rf} = -\frac{1}{180k\Omega} \cong -0.0056.10^{-3}\left[\frac{A}{V}\right] = -5.6\mu S$$

Una vez conocidos todos los parámetros de la estructura idealizada podemos calcular

- *La ganancia de tensión del amplificador realimentado, A_{LC}:*

$$A_{LC} = A_{CR} = \frac{Vo}{Ig} = \frac{A'}{1+A'\beta} = \frac{-194k}{1+1.09} \cong -93k\Omega$$

d) Obtenga el valor de las impedancias Zi y Zo marcadas en el esquemático del amplificador.

- *La impedancia de entrada del amplificador realimentado, Ri_{LC}:*

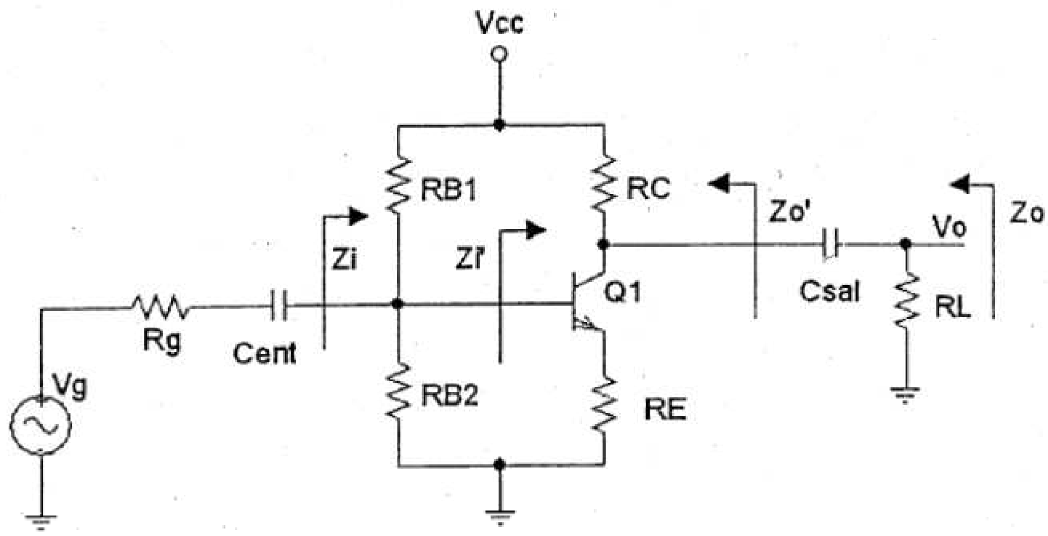
$$Ri_{LC} = Zi_{CR} = Zi = \frac{Ri'}{(1+A'\beta)} \cong 813\Omega$$

- *La impedancia de salida del amplificador realimentado, Ro_{LC} es:*

$$Ro_{LC} = Zo_{CR} = Zo = \frac{Ro'}{1+A'\beta} \cong 6.4\Omega$$

EJERCICIO 6

Dado el circuito realimentado de la figura:



DATOS: $Rg = 50\Omega$ $R_{B1} = 80\ k\Omega$ $R_{B2} = 15\ k\Omega$
$R_C = 8{,}5\ k\Omega$ $R_L = 1\ k\Omega$ $R_E = 2{,}5\ k\Omega$
$C_{ent} = C_{sal} \rightarrow \infty$
$I_{CQ} = 1\ mA$ $V_{CEQ} = 9\ V$ $\beta o = 100$ y $ro \rightarrow \infty$

NOTA: No necesita calcular los valores de continua I_{CQ},V_{CEQ}, ya que son datos del problema.

Se pide:

1. a) Demuestre que en el circuito de la figura existe realimentación negativa, señalando la señal que se muestrea a la salida y las señales que se comparan a la entrada.

   b) Indique el tipo de topología de realimentación.

   c) Indique la función de transferencia que estabiliza.

   d) Indique sus parámetros privilegiados.
2. Represente las redes A' y β equivalentes, obteniendo los valores de A' y β correspondientes.
3. Obtenga los valores de G, Ricr, Rocr y Vo/Vg.
4. Calcule Zi, Zi', Zo y Zo'.
5. Para $ro = 100\ k\Omega$, calcule el nuevo valor de Rocr.

SOLUCIÓN

1.- a) Demostrar que existe realimentación negativa señalando la señal que se muestrea a la salida y las señales que se comparan a la entrada.

El circuito en pequeña señal realimentado correspondiente al amplificador de la Figura es:

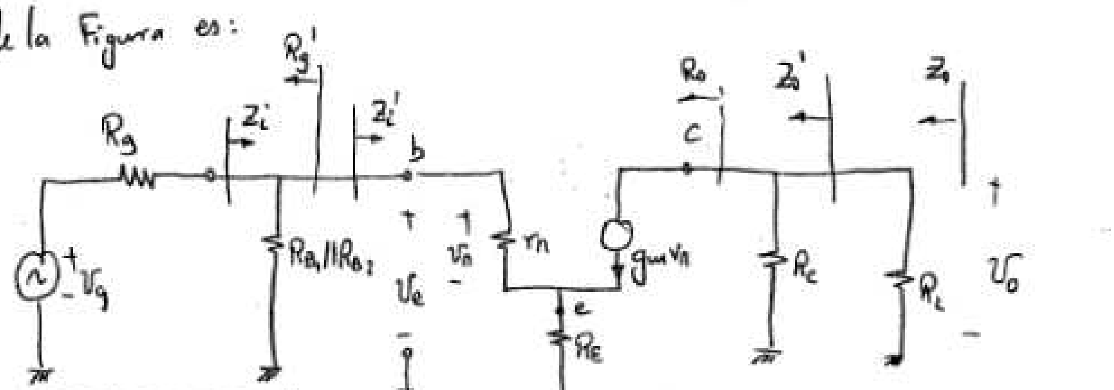


Fig. 1 (Sol. Probl. 4)

Pasamos al circuito equivalente de la Figura:

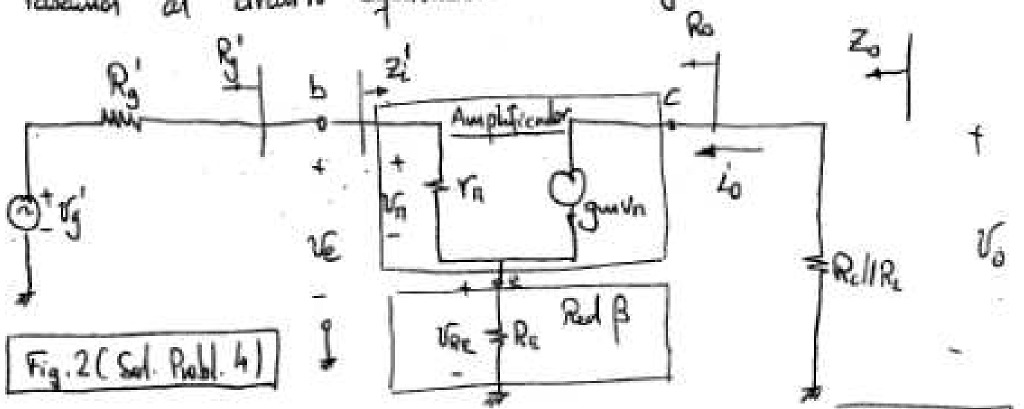


Fig. 2 (Sol. Probl. 4)

Siendo $\boxed{v_g' = V_{Th} = v_g \cdot \frac{R_{B1}\|R_{B2}}{R_g + R_{B1}\|R_{B2}} = v_g \cdot \frac{15\,k\Omega\|80\,k\Omega}{0,05\,k\Omega + 15\,k\Omega\|80\,k\Omega} \simeq v_g \cdot 1 = v_g}$

y $\boxed{R_g' = R_{Th} = R_g \| R_{B1} \| R_{B2} = 0,05\,k\Omega // 15\,k\Omega // 80\,k\Omega \simeq 50\,\Omega}$

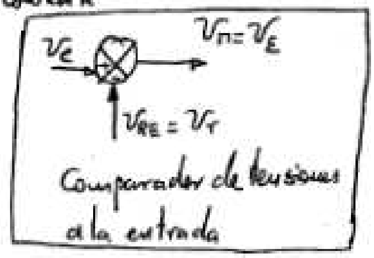
Para demostrar que existe realimentación negativa partimos del circuito realimentado de la $\boxed{\text{Fig. 2 (Sol. Probl. 4)}}$ en donde tenemos:

Si $i_o \uparrow$ $\quad i_o = g_m v_\pi \uparrow \quad V_{RE} \simeq g_m v_\pi R_E \uparrow \quad \underset{\text{Constante}}{v_E} = v_\pi + V_{RE} \rightarrow v_\pi \downarrow$

$\left(\frac{v_\pi}{r_\pi} + \underset{\underset{i_o}{\shortparallel}}{g_m v_\pi} \simeq g_m v_\pi \right)$

Señal de muestreo a la salida

$v_\pi \downarrow \rightarrow g_m v_\pi \downarrow \rightarrow i_o \downarrow$ $\boxed{\text{Realimentación Negativa}}$



b) - Salida Serie (Muestreo de corriente a la salida)
- Entrada Serie (Comparación de tensiones a la entrada)

} En consecuencia, tenemos:

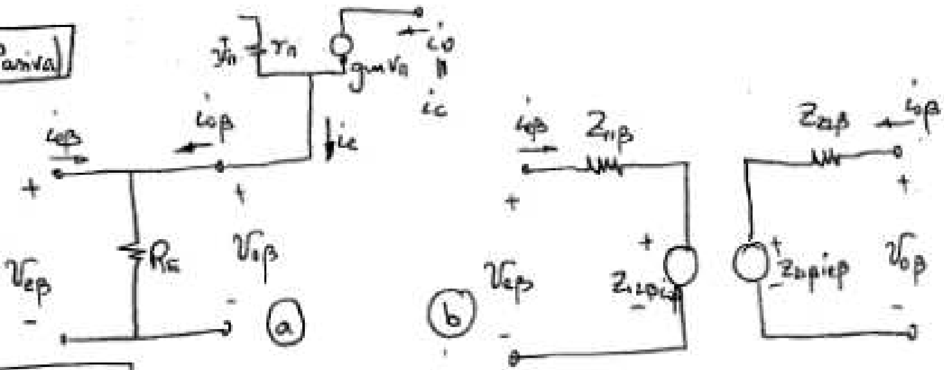
$\boxed{\text{Topología de Realimentación Serie - Serie}}$

c) La función que estabiliza es una función de Transadmitancia.

$$\boxed{\frac{i_o}{v_E} = G_Y = \frac{A_Y}{1 + A_Y \beta_Z}}$$

d) Los parámetros privilegiados son los parámetros: Z

2.- a) $\boxed{\text{Red } \beta \text{ (Pasiva)}}$



$\boxed{\text{Fig. 3 (Sol. Probl. 4)}}$

En donde: $\quad v_{e\beta} = Z_{11\beta} i_{e\beta} + Z_{12\beta} i_{o\beta}$

$\qquad\qquad v_{o\beta} = Z_{21\beta} i_{e\beta} + Z_{22\beta} i_{o\beta}$

Obteniendo para nuestra red β:

$\boxed{Z_{11\beta} = \left.\frac{v_{e\beta}}{i_{e\beta}}\right|_{i_{o\beta}=0} = R_E = 2{,}5\,k\Omega}$ y $\boxed{Z_{22\beta} = \left.\frac{v_{o\beta}}{i_{o\beta}}\right|_{i_{e\beta}=0} = R_E = 2{,}5\,k\Omega}$

$$\boxed{Z_{12\beta} = \left.\frac{v_{e\beta}}{i_{o\beta}}\right|_{i_{e\beta}=0} = R_E = 2{,}5\,k\Omega}$$

No obstante, $\beta_z = \left.\frac{v_{e\beta}}{i_o}\right|_{\boxed{\text{Ver Fig. 3 (Sol. Probl. 4)}}} = \frac{v_{e\beta}}{i_{o\beta}} \times \frac{i_{o\beta}}{i_o} = Z_{12\beta} \times \frac{i_e}{i_c}$

Siendo i_e = corriente de emisor del transistor = $i_{o\beta}$ y $i_c = \alpha_F \times i_e$
e i_c = corriente de colector del transistor = i_o

Por tanto, $\boxed{\beta_z = Z_{12\beta} \times \frac{1}{\alpha_F} \simeq Z_{12\beta} = R_E = 2{,}5\,k\Omega}$

b) Red A'

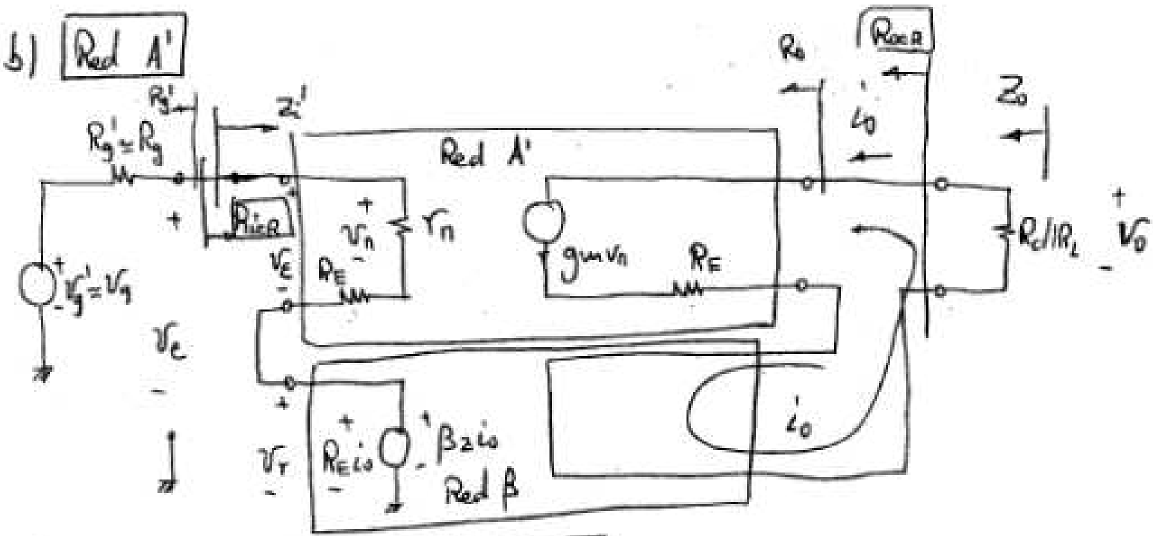


Fig. 4 (Sol. Problema 4)

Es de señalar 3 cosas importantes del circuito de la Fig. 4 (Sol. Probl. 4).

(1): El circuito de la Fig. 4 (Sol. Problema 4), obtenido utilizando los conceptos de realimentación aplicados en amplificadores electrónicos, es equivalente al circuito de la Fig. 2 (Sol. Problema 4).
En consecuencia (Ver circuito Fig. 4 (Sol. Probl. 4)) $\boxed{Z_i' = R_{icR} \text{ y } R_o = R_{ocR}}$

(2): La red A' del circuito de la Fig. 4 (Sol. Probl. 4) incluye los efectos de carga de la Red β [Fig. 3 (Sol. Probl. 4)] tanto a la entrada como a la salida.

(3): La red β del circuito de la Fig. 4 (Sol. Probl. 4) incluye el generador de tensión que se realimenta a la entrada y no carga a la red A'.

En consecuencia, a partir del circuito de la Red A' del circuito de la $\boxed{\text{Fig. 4 (Sol. Problema 4)}}$, tenemos:

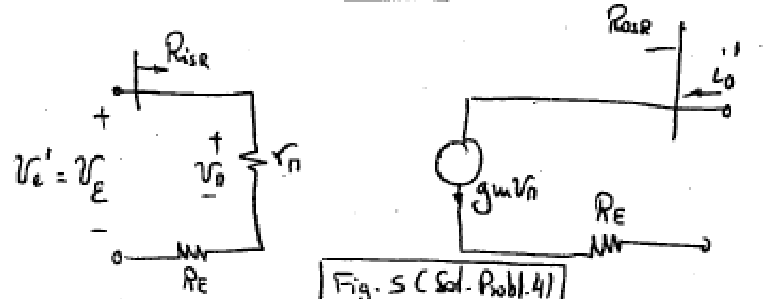


Fig. 5 (Sol. Probl. 4)

$$\boxed{R_{isR} = r_\pi + R_E} \quad y \quad \boxed{R_{osR} = \infty}$$

$$y \quad \boxed{A' = A_Y = \frac{i_o''}{v_e'} = \frac{i_o'}{v_\pi} \times \frac{v_\pi}{v_e'} = g_m \times \frac{r_\pi}{R_E + r_\pi} = \frac{\beta_0}{R_E + r_\pi}}$$

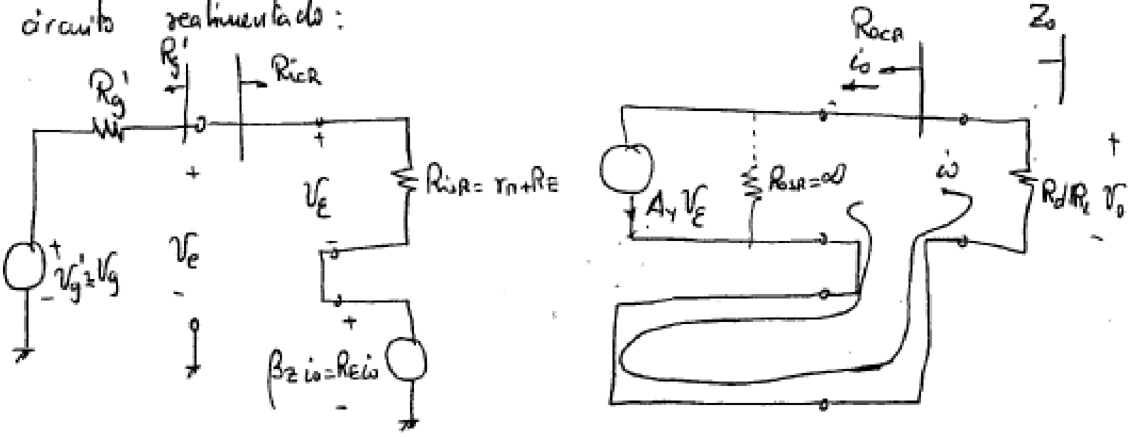
$$\boxed{i_o' = g_m v_\pi \quad y \quad \frac{v_\pi}{v_e'} = \frac{r_\pi}{R_E + r_\pi}}$$

Por tanto $\boxed{A' = A_Y = \frac{100}{2{,}5K\Omega + 2{,}5K\Omega} = \frac{100}{5K\Omega} = 0{,}02\ \frac{1}{\Omega}}$

$$100 = \beta_0 \qquad 2{,}5K\Omega = R_E \qquad 2{,}5K\Omega = r_\pi = \frac{V_T}{I_{CQ}} \times \beta_0 = \frac{25mV}{1mA} \times 100$$

3.– Obtener los valores de G, R_{icR}, R_{ocR} y $\frac{v_o}{v_g}$

A partir del circuito de la Fig. 4 (Sol. Probl. 4) obtenemos el nuevo circuito realimentado:



$\boxed{\text{Fig. 6 (Sol. Probl. 4)}}$

A partir del circuito de la Fig. 6 (Sol. Probl. 4) tenemos.

1) $R_{icR} = R_{isR}\,(1 + A_Y\beta_Z) = (r_\pi + R_E)\left(1 + \dfrac{\beta_0}{r_\pi + R_E} \times R_E\right)$

$$\boxed{R_{icR} = r_\pi + R_E + \beta_0 R_E = r_\pi + R_E(1+\beta_0) = 2{,}5\,k\Omega + 2{,}5\,k\Omega\,(101) = 255\,k\Omega}$$

Es de señalar que según el circuito de la Fig. 2 (Sol. Probl. 4) y el circuito de la Fig 4 (Sol. Probl. 4), $Z_i' = R_{icR}$.
Del estudio de amplificadores de esta asignatura sabemos que $Z_i' = r_\pi + R_E(1+\beta_0)$ al ser la impedancia de entrada de un transistor en Emisor Común con R_E. Pues bien, este mismo valor de Z_i' se obtiene a través de la teoría de la realimentación ya que $\boxed{Z_i' = R_{icR}}$

2) $$\boxed{R_{ocR} = R_{osR}\,(1 + A_Y\beta_Z) = \infty\,(1 + A_Y\beta_Z) = \infty.}$$

Este valor de $R_{ocR} = \infty$ lo causamos también del estudio de la impedancia de salida de un TRT en EC con R_E cuando $r_o = \infty$ ($R_o = \infty$ en el circuito de la Fig. 2 (Sol. Probl. 4)).

3) $G_Y = \dfrac{i_o}{v_e} = \dfrac{A_Y}{1 + A_Y\beta_Z} = \dfrac{\dfrac{\beta_0}{R_E + r_\pi}}{1 + \dfrac{\beta_0}{R_E + r_\pi} \times R_E} = \dfrac{\dfrac{\beta_0}{\cancel{R_E + r_\pi}}}{\dfrac{R_E + r_\pi + \beta_0 R_E}{\cancel{R_E + r_\pi}}}$

$$\boxed{G_Y = \frac{i_o}{v_e} = \frac{\beta_0}{r_\pi + R_E(1+\beta_0)} = \frac{100}{255\,k\Omega} = 2{,}92 \times 10^{-4}\,\frac{1}{\Omega} = 0{,}392\,\frac{1}{k\Omega}}$$

En consecuencia, obtenemos el siguiente circuito:

Fig. 7 (Sol. Probl. 4)

4) Cálculo de $\frac{v_o}{v_g}$

Según el esquema de la $\boxed{\text{Fig. 7 (Sol. Probl. 4)}}$, tenemos:

$$\frac{v_o}{v_g} = \frac{v_o}{i_o} \times \frac{i_o}{v_e} \times \frac{v_e}{v_g'} \times \frac{v_g'}{v_g} = \underbrace{\left(-R_C \| R_L\right)}_{\frac{v_o}{i_o}} \times G_T \times \underbrace{\frac{R_{icA}}{R_g' + R_{icA}}}_{R_g' \simeq R_g} \times \underbrace{(\simeq 1)}_{v_g' \simeq v_g}$$

$$\frac{v_o}{v_g} = -R_C \| R_L \times \frac{\beta_o}{\cancel{r_\pi + R_E(1+\beta_o)}} \times \frac{\cancel{r_\pi + R_E(1+\beta_o)}}{R_g + r_\pi + R_E(1+\beta_o)}$$

$$\boxed{\frac{v_o}{v_g} = -\frac{\beta_o \times R_C \| R_L}{R_g + r_\pi + R_E(1+\beta_o)}}$$

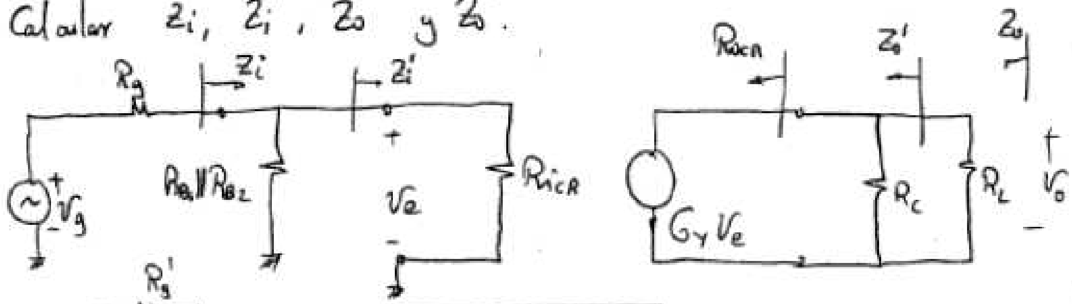
Es de señalar que esta expresión de $\boxed{\frac{v_o}{v_g} = -\frac{\beta_o \times R_C \| R_L}{R_g + r_\pi + R_E(1+\beta_o)}}$ la

conocemos también del estudio de un amplificador en Emisor Común con resistencia de Emisor (R_E).

Por tanto, $\frac{v_o}{v_g} \simeq -\frac{\beta_o \; R_C \| R_L}{R_E(1+\beta_o)} \Bigg|_{\text{ya que } R_g + r_\pi \ll R_E(1+\beta_o)} \simeq \frac{\beta_o \; R_C \| R_L}{R_E \beta_o}$

$$\boxed{\frac{v_o}{v_g} = -\frac{R_C \| R_L}{R_E}} \Bigg|_{\text{Para } \begin{cases} R_C = 8{,}5\,K\Omega \\ R_L = 10\,K\Omega \\ R_E = 2{,}5\,K\Omega \end{cases}} \boxed{\simeq -1{,}84 \simeq -2}$$

4.- Calcular Z_i, Z_i', Z_o y Z_o'.



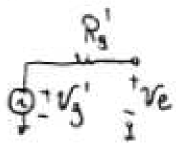


Fig. 8 (Sol. Probl. 4)

Según el circuito de la $\boxed{\text{Fig. 8 (Sol. Probl. 4)}}$, tenemos:

$$Z_i' = R_{icR} = r_\pi + R_E(1+\beta) = 255\,k\Omega$$

$$\boxed{Z_i = R_{B_1} \| R_{B_2} \| Z_i'} = \begin{cases} R_{B_1} \| R_{B_2} \| r_\pi + R_E(1+\beta) \\ \underbrace{15k\Omega \| 180k\Omega}_{12{,}63k\Omega} \| 255k\Omega \end{cases} = 12{,}63k\Omega \| 255k\Omega \simeq \boxed{12{,}63k\Omega}$$

$$\boxed{Z_o' = R_{ocR} \| R_C = \infty \| R_C = R_C = 8{,}5k\Omega}$$

$$\boxed{Z_o = R_L \| Z_o' = R_L \| R_C = 10k\Omega \| 8{,}5k\Omega \simeq 4{,}6k\Omega}$$

5.- Para $r_o = 100k\Omega$, calcule el nuevo valor de R_{ocR}

El nuevo circuito realimentado para $r_o = 100k\Omega$ corresponde al circuito de la $\boxed{\text{Fig. 4 (Sol. Probl. 4)}}$ en donde ~~se~~ sustituye el valor de $r_o = \infty$ por el de $r_o = 100k\Omega$.

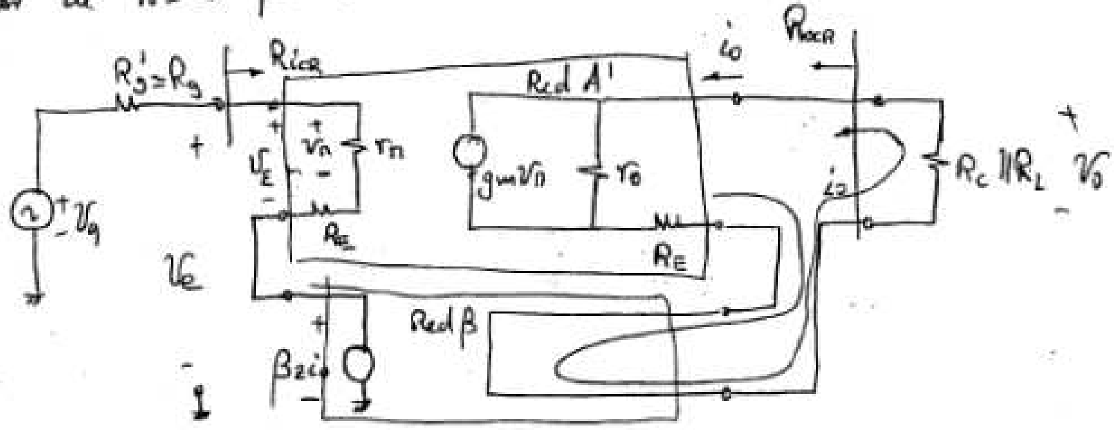


Fig. 9 (Sol. Problema 4)

A partir del nuevo circuito de la red A' obtenemos los nuevos valores de R_{isR}, R_{osR} y A_Y. Es decir:

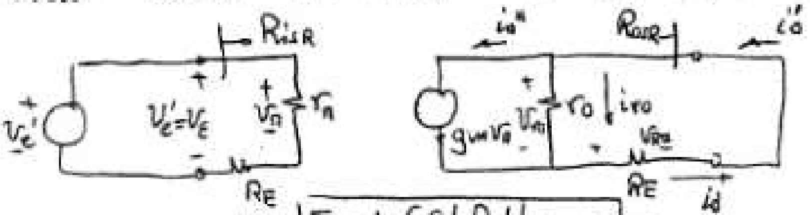


Fig. 10 (Sol. Problema 4)

En donde:

$$\boxed{R_{isR} = r_\pi + R_E} \quad y \quad \boxed{R_{osR} = R_E + r_o}$$

Para el cálculo del nuevo valor de A_y tenemos:

$$A_y = \frac{i_o'}{v_e'} = \underbrace{\frac{i_o'}{i_o''}}_{1} + \underbrace{\frac{i_o''}{v_\pi}}_{2} + \underbrace{\frac{v_\pi}{v_e'}}_{3}$$

1 : $i_o = i_o' + i_{ro} = i_o' + \frac{V_{ro}}{r_o}$. Siendo $V_{ro} + V_{RE} = 0$. Es decir: $V_{ro} = V_{RE}$

Por tanto, $i_o = i_o' + \left(-\frac{V_{RE}}{r_o}\right)$. En donde $V_{RE} = i_o R_E$

Es decir, $i_o = i_o' - \frac{i_o R_E}{r_o} \rightarrow i_o + \frac{i_o R_E}{r_o} = i_o'$

$$i_o' = i_o + i_o \frac{R_E}{r_o} = i_o \left(\frac{r_o + R_E}{r_o}\right)$$

Por tanto, $\boxed{\frac{i_o'}{i_o} = \frac{r_o}{r_o + R_E}}$

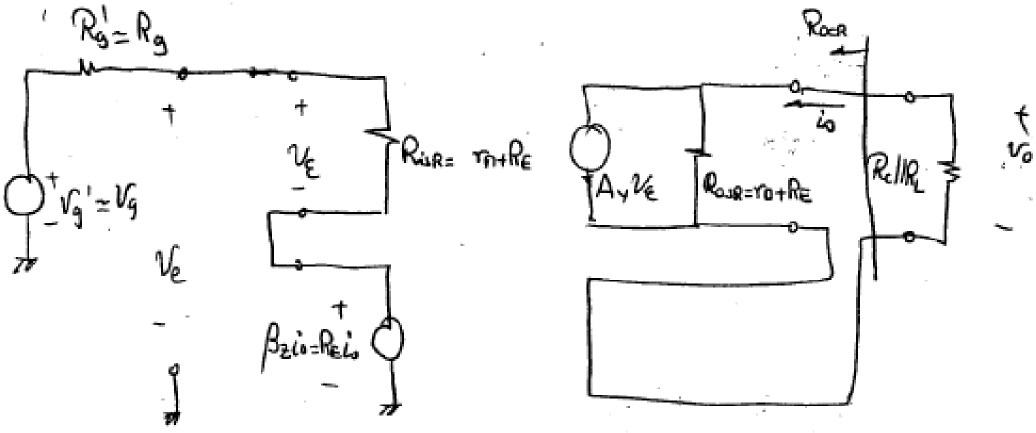
2 $i_o'' = g_m v_\pi \rightarrow \boxed{\frac{i_o''}{v_\pi} = g_m}$

3 $\boxed{\frac{v_\pi}{v_e'} = \frac{r_\pi}{r_\pi + R_E}}$

En consecuencia, tenemos:

$$\boxed{A_y = \frac{i_o'}{v_e'} = \frac{r_o}{r_o + R_E} \times g_m \times \frac{r_\pi}{r_\pi + R_E} = \frac{\beta_o r_o}{(r_o + R_E)(r_\pi + R_E)} = A'}$$

En consecuencia, el circuito de la [Fig. 9 (Sol. Problema 4)] se transforma (9)
en el siguiente circuito similar al circuito de la [Fig. 6 (Sol. Probl 4)]:



[Fig. 11 (Sol. Problema 4)]

A partir del circuito de la [Fig 11 (Sol. Probl. 4)], tenemos:

$$R_{ocR} = \left.\frac{v_o}{i_o}\right|_{V_g' = V_g = 0} \quad \text{Siendo} \quad \boxed{i_o = \frac{V_o}{R_{osR}} + A_Y V_E} \rightarrow \boxed{V_o = (i_o - A_Y V_E) R_{os}}$$

$$\text{y} \quad \left\{ \begin{array}{l} V_E + \beta_z i_o + \dfrac{V_E}{R_{isR}} \cdot R_g = 0 \\ V_E \left(\dfrac{R_{isR} + R_g}{R_{isR}} \right) + \beta_z i_o = 0 \end{array} \right\} \rightarrow \boxed{V_E = -\beta_z i_o \times \frac{R_{isR}}{R_g + R_{isR}}}$$

Por tanto, $V_o = i_o + A_Y \times \left(\beta_z i_o \times \dfrac{R_{isR}}{R_g + R_{isR}} \right) \times R_{osR}$

$$V_o = i_o \left(1 + A_Y \beta_z \times \frac{R_{isR}}{R_g + R_{isR}} \right) \times R_{osR}$$

Es decir, $\dfrac{v_o}{i_o} = R_{ocR} = (r_o + R_E) \left(1 + \dfrac{\beta_o r_o}{(r_o + R_E)(\cancel{r_\pi + R_E})} \times R_E \times \dfrac{\overbrace{\cancel{R_{isR}}}^{= r_\pi + R_E}}{R_g + \underbrace{R_{isR}}_{= r_\pi + R_E}} \right)$

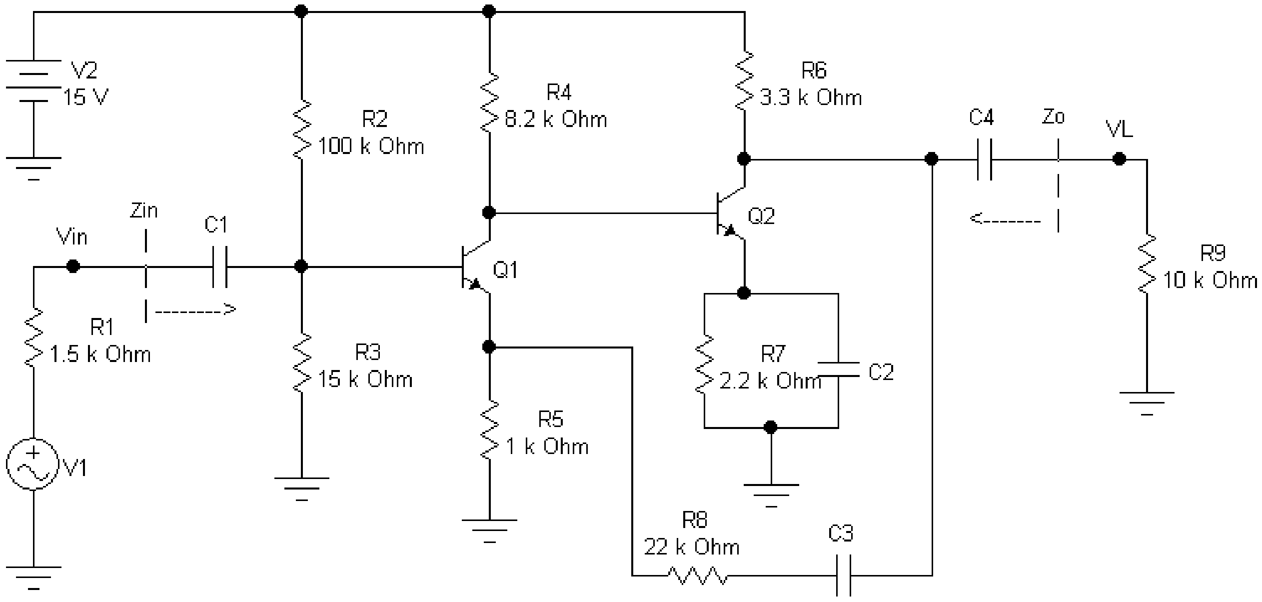
$$\frac{v_o}{i_o} = (r_o + R_E) + \frac{\beta_o r_o (\cancel{r_o + R_E})}{(\cancel{r_o + R_E})} \times R_E \times \frac{1}{R_g + r_\pi + R_E} = r_o \left(1 + \frac{\beta_o R_E}{R_g + r_\pi + R_E} \right) + R_E$$

NOTA: Del estudio de un TRT en EC (con R_E) obtenemos la misma expresión

$$\boxed{R_{ocR} = \frac{v_o}{i_o} \simeq r_o \left(1 + \beta_o \frac{R_E}{R_g + r_\pi + R_E} \right) \simeq 100\,k\Omega \left(1 + 100 \times \frac{2{,}5\,k\Omega}{5\,k\Omega} \right) = 5{,}1\,M\Omega}$$

EJERCICIO 7

En el amplificador realimentado representado por el esquemático de la figura:



DATOS:

$$g_{m1} = 48.5mS \quad r_{\pi1} = 7.22k\Omega$$
$$g_{m2} = 69.2mS \quad r_{\pi2} = 5.1k\Omega$$

SE PIDE:

a) Obtenga y represente el esquema para pequeña señal del amplificador, a frecuencias medias.

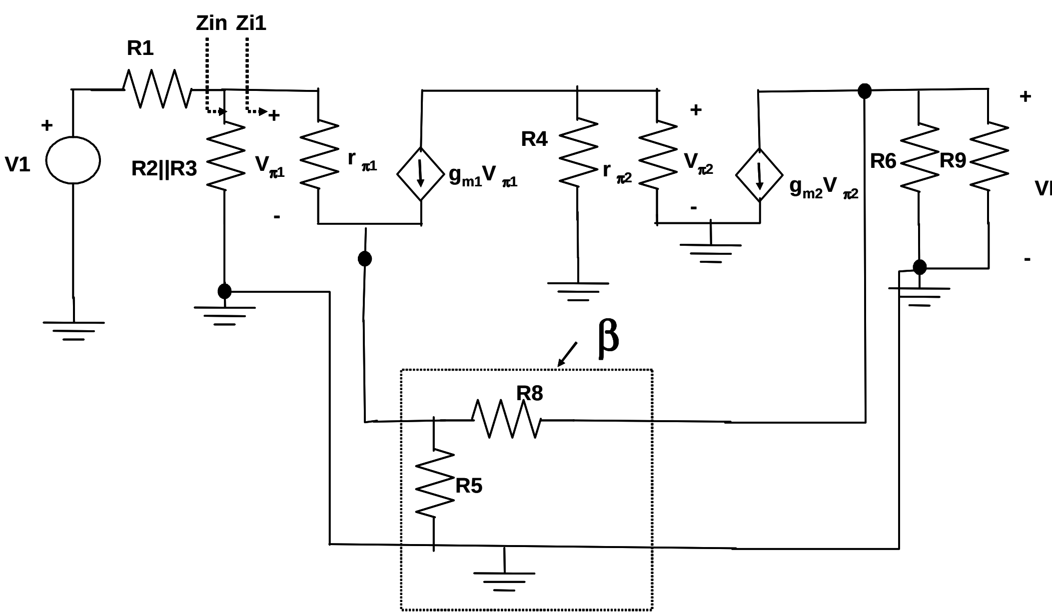
b) Identifique las redes A y β del amplificador realimentado e indique la topología del circuito y sus características más significativas: magnitudes que se muestrean y que se realimentan, así como las funciones de transferencia genéricas de los bloques A y β. Justifique las respuestas de forma razonada.

c) Obtenga las redes A y β idealizadas (A' y β') y la ganancia VL/V1.

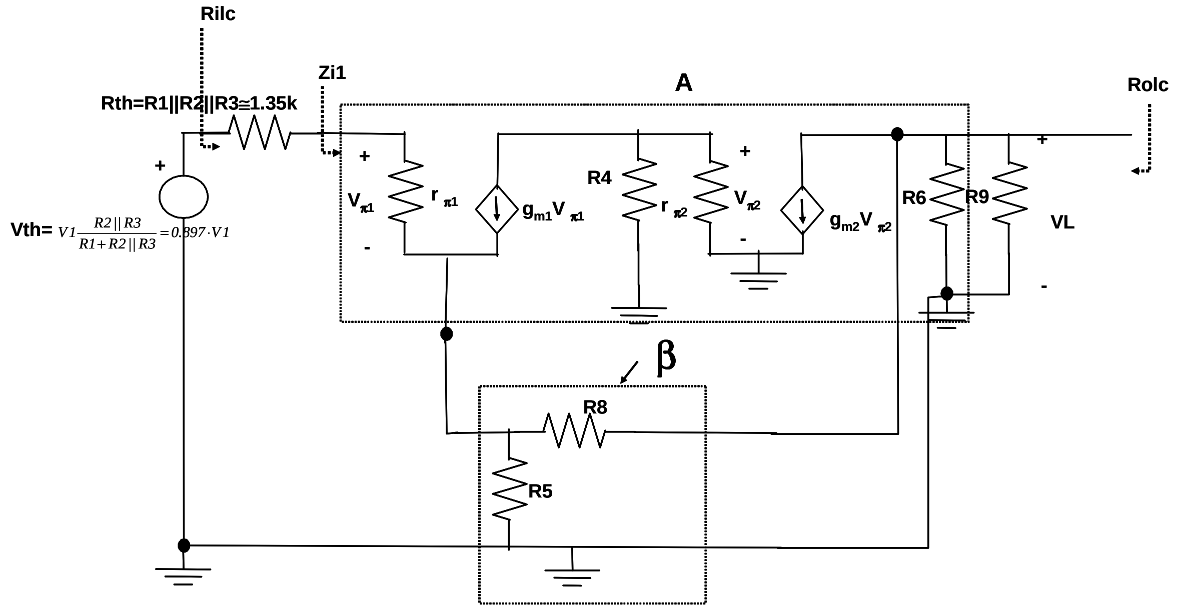
d) Obtenga el valor de las impedancias Zin (Vista desde el nudo Vin a derechas) y Zo (Vista desde el nudo VL a izquierdas).

SOLUCIÓN

a) Obtenga y represente el esquema para pequeña señal del amplificador, a frecuencias medias.



⇔



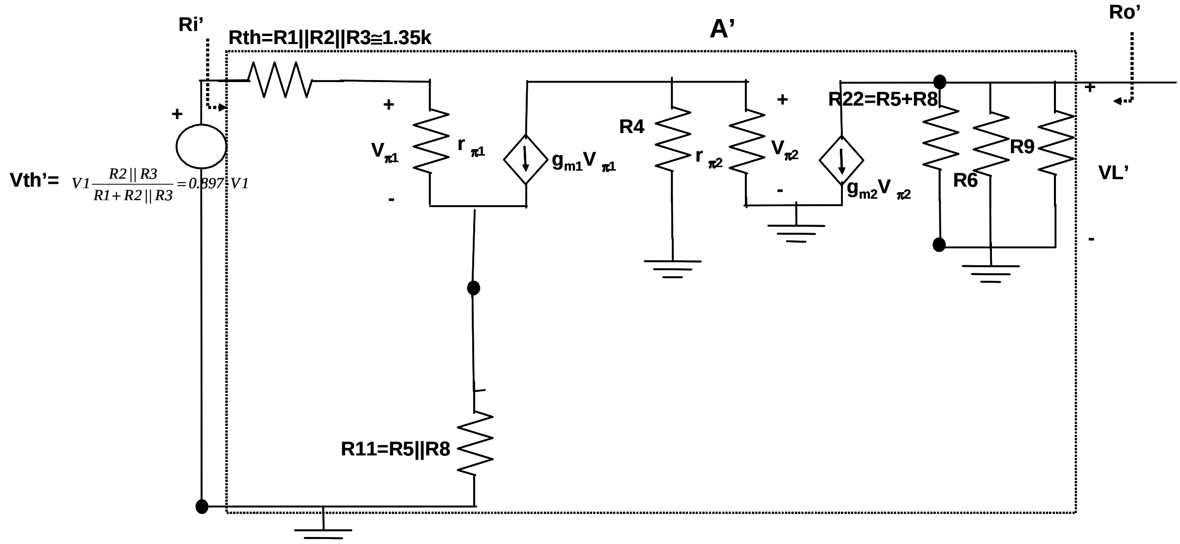
b) **Identifique las redes A y β del amplificador realimentado e indique la topología del circuito y sus características más significativas: magnitudes comunes, magnitudes que se muestrean y que se realimentan, así como las funciones de transferencia genéricas de los bloques A y β. Justifique las respuestas de forma razonada.**

Red β: R5, R8 (C3)
Red A: Resto.
Topología SERIE-PARALELO (Transtensión):
Entrada: Conexión serie, se realimenta tensión, la magnitud común es corriente
Salida: Conexión paralelo, se muestrea tensión, la magnitud común es tensión.
Función de transferencia genérica red A: Vo/Vi [V/V] (Av)
Función de transferencia genérica red β: vf/Vo [V/V] (βv)

c) **Obtenga las redes A y β idealizadas (A' y β') y la ganancia VL/V1.**

Para construir la red A' añadimos los efectos de carga de la fuente, carga y de la red β a la entrada y la salida.
Para hallar el efecto de carga de la red β a la entrada (R_{11}), calculamos la impedancia que se ve desde los terminales de la red β conectados a la entrada del circuito, anulando la magnitud común en la conexión de salida (tensión).
Para hallar el efecto de carga de la red β a la salida (R_{22}) calculamos la impedancia que se ve desde los terminales de la red β conectados a la salida del circuito, anulando la magnitud común en la conexión de entrada (corriente).

Con todo ello la red A' queda como sigue:



Analizando el circuito se tiene:

$$\left.\begin{array}{l} \dfrac{VL'}{v_{\pi 2}} = -g_{m2} \cdot \left(R22 \,||\, R6 \,||\, R9 \right) \\ \dfrac{v_{\pi 2}}{v_{\pi 1}} = -g_{m1} \cdot \left(R4 \,||\, r_{\pi 2} \right) \\ \dfrac{v_{\pi 1}}{Vth'} = \dfrac{r_{\pi 1}}{Rth + r_{\pi 1} + (\beta + 1) \cdot R11} \end{array}\right\}$$

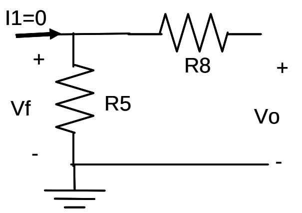
$$\Rightarrow A' = \frac{VL'}{Vth'} = -g_{m2} \cdot \left(R22 \,||\, R6 \,||\, R9 \right) \cdot -g_{m1} \cdot \left(R4 \,||\, r_{\pi 2} \right) \cdot \frac{r_{\pi 1}}{Rth + r_{\pi 1} + (\beta + 1) \cdot R11} \cong 493 \left[\frac{V}{V} \right]$$

Calculando las impedancias de entrada (Ri') y de salida (Ro') de la red A' se tiene:

$$Ri' = Rth + r_{\pi 1} + (\beta + 1) R11 \cong 345.5 k\Omega$$

$$Ro' = R6 \,||\, R22 \,||\, R9 \cong 2.24 k\Omega$$

Para poder calcular la ganancia del amplificador realimentado necesitamos calcular previamente la ganancia de la red β.



La ganancia de la red β se obtiene como cociente entre la variable de salida de la red β (variable que se realimenta a la entrada del amplificador) y la variable de entrada de la red β (variable que se muestrea a la salida del amplificador) anulando la magnitud común en la conexión de entrada. En este caso nos queda:

$$\beta = \left. \frac{Vf}{Vo} \right|_{I1=0} = \frac{R5}{R5 + R8} = \frac{1}{23} \cong 0.0435 \left[\frac{V}{V} \right]$$

Una vez conocidos todos los parámetros de la estructura idealizada podemos calcular

- *La ganancia de tensión del amplificador realimentado, A_{LC}:*

$$A_{LC} = A_{CR} = \frac{VL}{VTH} = \frac{A'}{1 + A'\beta} = \frac{493}{1 + 21.43} \cong 22$$

Por lo tanto la ganancia VL/V1 será:

$$\frac{VL}{V1} = \frac{VL}{Vth} \cdot \frac{Vth}{V1} = 22 \cdot 0.897 \cong 19.73 \left[\frac{V}{V} \right]$$

d) Obtenga el valor de las impedancias Zin (Vista desde el nudo Vin a derechas) y Zo (Vista desde el nudo VL a izquierdas).

- *La impedancia de entrada del amplificador realimentado, Ri_{LC}:*

$$Ri_{LC} = Zi_{CR} = Ri' \left(1 + A'\beta \right) \cong 7.75 M\Omega$$

Como puede verse en el esquema de pequeña señal del amplificador la impedancia Zi1 está relacionada con Ri_{LC} como sigue:

$$Ri_{LC} = Rth + Zi1 \Rightarrow Zi1 = Ri_{LC} - Rth \cong Rilc = 7.75 M\Omega$$

La impedancia que nos piden calcular, Zin está relacionada con Zi1 como sigue:

$$\left.\begin{array}{l} Zin = R2 \,||\, R3 \,||\, Zi1 \\ Zi1 >> R2 \,||\, R3 \end{array}\right\} \Rightarrow Zin \cong R2 \,||\, R3 \cong 13 k\Omega$$

- *La impedancia de salida del amplificador realimentado, Ro_{LC} es:*

$$Ro_{LC} = Zo_{CR} = \frac{Ro'}{1 + A'\beta} \cong 100 \Omega$$

La impedancia que nos piden calcular, Zo, está relacionada con Rolc como sigue:

$$\left.\begin{array}{l} Rolc = R9 \,||\, Zo \\ R9 >> Zo \end{array}\right\} \Rightarrow Zo \cong Rolc = 100 \Omega$$

EJERCICIO 8

Dado el circuito Amplificador realimentado de la Figura 1.

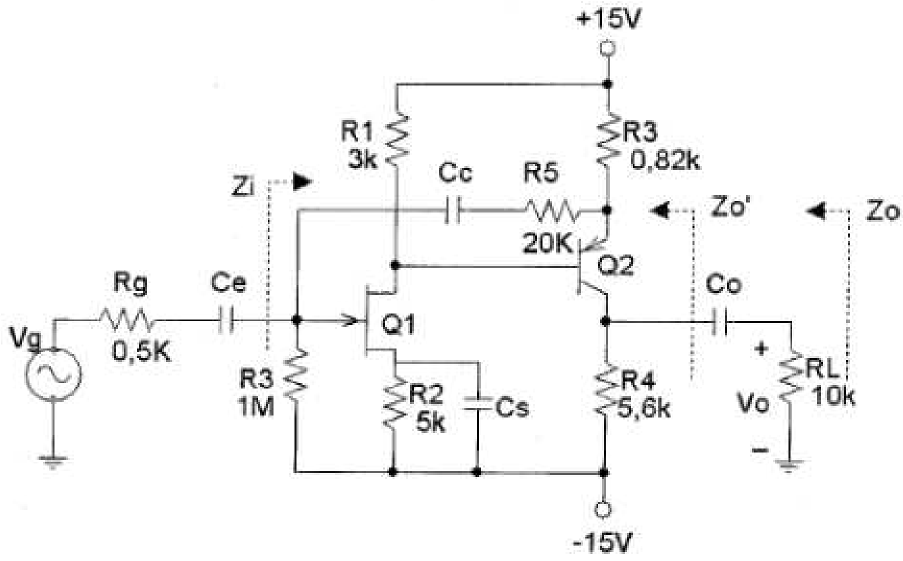


Figura 1

NOTA: Considere que la corriente de polarización del transistor bipolar es: I_{C2} = 3 mA.

Se pide:

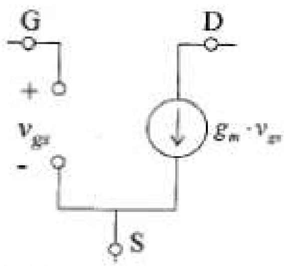
1. Demuestre que en el circuito de la Figura 1 existe una realimentación negativa e indique de qué tipo es, los parámetros que se han de utilizar y la función de transferencia que estabiliza.
2. Represente las redes A' y β equivalentes y obtenga los valores de A', β y Vo/Vg.
3. Calcule Zi. Zo' v Zo.

DATOS:

JFET:
Gm = $(1.5\ k\Omega)^{-1}$, Cgs = 1 pF, Cgd = 0 pF.

BIPOLAR:
V_{BE} = 0,6 V V_T = 25 mV βo = 100
$C\pi$ = 1 pF $C\mu$ = 0 pF

OTROS
Ce = 5 μF   Co = 1 μF
Cc$\rightarrow\infty$ Cs$\rightarrow\infty$



Equivalente del MOSFET en pequeña señal

SOLUCIÓN

A.- Demostrar que existe realimentación negativa, tipo de realimentación, los parámetros a utilizar y la función de transferencia que estabiliza.

Circuito Equivalente en Pequeña Señal (AC)

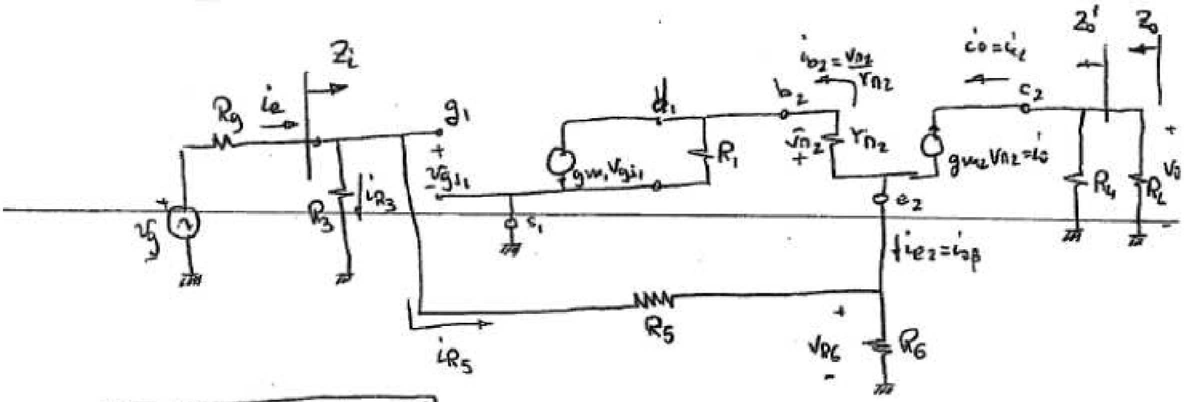


Fig. 2 (Sol. Problema 1)

Partiendo del circuito de la Fig. 2 (Sol. Problema 1), tenemos:

① Demostración de Realimentación Negativa (RN):

$i_o \uparrow \; g_{m_2} v_{\pi_2} \downarrow \; v_{R_6} \big| \simeq -g_{m_2} v_{\pi 2} R_6 \uparrow \quad i_{R_5} = \frac{v_{gs} - v_{R_6}}{R_5} \downarrow \quad \boxed{\underbrace{i_e = i_{R_3} + i_{R_5}}_{\text{Constante}}} \rightarrow i_{R_3} \uparrow$

$\frac{v_{\pi 2}}{r_{\pi 2}} = i_{b_2} \ll g_{m_2} v_{\pi 2} = i_{c_2}$

Comparador de corrientes a la entrada

$v_{R_3} \uparrow \; v_{gs_1} \uparrow \; g_{m_1} v_{gs_1} \uparrow \; \frac{v_{\pi 2}}{r_{\pi 2}} \uparrow \; g_{m_2} v_{\pi_2} \uparrow \; i_o \downarrow \rightarrow$ Demostración de RN

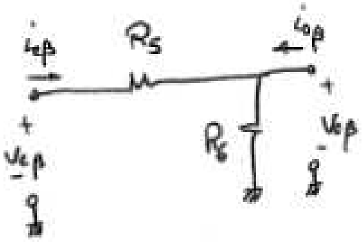
② Topología: $\boxed{\text{Paralelo - Serie}}$: { Muestreo de corriente a la salida; Realimentación de corriente a la entrada }

③ Parámetros privilegiados: $\boxed{g}$

④ Función que estabiliza: $\boxed{\text{TRANSCORRIENTE}: G_I = \frac{A_I}{1 + A_I \beta_I}}$

3.- Representar las redes A' y β equivalentes.

3.1 Red β:



$$i_{e\beta} = g_{11\beta} v_{e\beta} + g_{12\beta} i_{o\beta}$$
$$v_{o\beta} = g_{21\beta} v_{e\beta} + g_{22\beta} i_{o\beta}$$

$\boxed{\text{Fig. 3 (Sol. Problema 1)}}$

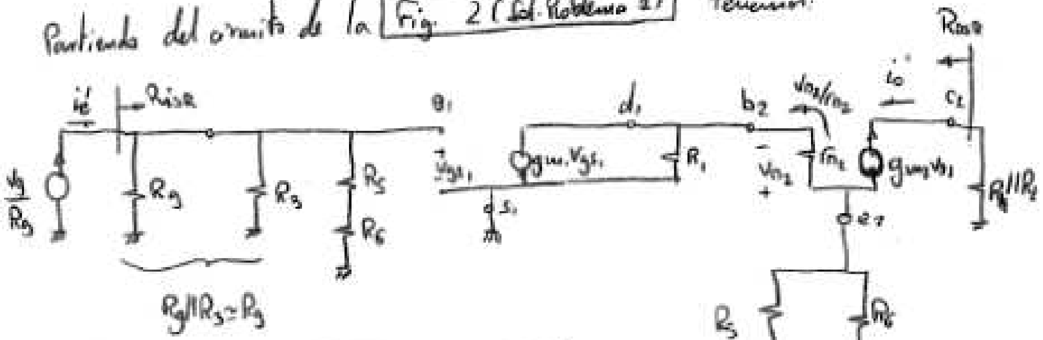
En donde:

$$\boxed{g_{11\beta} = \left.\frac{i_{e\beta}}{v_{e\beta}}\right|_{i_{o\beta}=0} = \frac{1}{R_5+R_6}} \quad y \quad \boxed{g_{12\beta} = \left.\frac{i_{e\beta}}{i_{o\beta}}\right|_{v_{e\beta}=0} = -\frac{R_6}{R_5+R_6}}$$

$$\boxed{g_{22\beta} = \left.\frac{v_{o\beta}}{i_{o\beta}}\right|_{v_{e\beta}=0} = R_5 // R_6}$$

3.2.- Red A':

Partiendo del circuito de la $\boxed{\text{Fig. 2 (Sol. Problema 1)}}$ tenemos:



$\boxed{\text{Fig 4 (Sol. Problema 1)}}$

3.3.- Cálculo de β:

$$\beta = \frac{i_{e\beta}}{i_o} = \underbrace{\frac{i_{e\beta}}{i_{o\beta}}}_{\boxed{\text{Ver Fig 3 (Sol Probl. 1)}}} \times \underbrace{\frac{i_{o\beta}}{i_o}}_{} = -\frac{R_6}{R_5+R_6} \times \underbrace{\frac{i_{e2}}{i_{c2}}}_{\boxed{\text{Ver Fig 2 (Sol Probl. 1)}}} = -\frac{R_6}{R_5+R_6} \times \frac{1}{\alpha}$$

Siendo $\boxed{\alpha = \frac{\beta}{1+\beta}}$

$$\boxed{\beta_2 = -\frac{0{,}82\,k\Omega}{3\,k\Omega + 0{,}82\,k\Omega} \times \frac{100}{101} = 0{,}215 \times 0{,}99 \simeq -0{,}213\ A/A}$$

2.3. Cálculo de A':

$$A_I = A' = \underbrace{\frac{i_o'}{i_e'}}_{\boxed{\text{Ver Fig 4 (Sol Probl 1)}}} = \underbrace{\frac{i_o'}{v_{\pi 2}}}_{(1)} \times \underbrace{\frac{v_{\pi 2}}{v_{g1}}}_{(2)} \times \underbrace{\frac{v_{g1}}{i_e'}}_{(3)}$$

~~(1): $\frac{i_o'}{v_{\pi 2}} \rightarrow \boxed{\frac{i_o'}{v_{\pi 2}} = -g_{m2}}$~~

(2): $\frac{v_{\pi 2}}{v_{g1}} \rightarrow \frac{v_{\pi 2}}{r_{\pi 2}} = g_{m1} v_{g1} \times \frac{R_1}{R_1 + r_{\pi 2} + (R_S \| R_C)(1+\beta_{02})}$ | Es un divisor de corriente

$$\frac{v_{\pi 2}}{v_{g1}} = \frac{g_{m1} r_{\pi 2} R_1}{R_1 + r_{\pi 2} + (R_S \| R_C)(1+\beta_{02})}$$

(3): $\frac{v_{g1}}{i_e'} \rightarrow v_{g1} = i_e' \left(R_g \| (R_S + R_C)\right) \rightarrow \frac{v_{g1}}{i_e'} = R_g \| (R_S + R_C)$

Por tanto, $A_I = -g_{m2} \times \frac{\overbrace{g_{m1} r_{\pi 2}}^{\beta_{02}} R_1}{R_1 + r_{\pi 2} + (R_S \| R_C)(1+\beta_{02})} \times R_g \| (R_S + R_C)$

$$A_I = -g_{m1} \times R_g \| (R_S + R_C) \times \frac{\beta_{02}\, R_1}{R_1 + r_{\pi 2} + (R_S \| R_C)(1+\beta_{02})}$$

Siendo $\boxed{r_{\pi 2}} = \beta_{02} \times \frac{V_T}{I_{CQ2}} = 100 \times \frac{25\,mV}{2{,}93\,mA} = 853\,\Omega \simeq \boxed{0{,}85\,k\Omega}$

En consecuencia, $A_I = -0{,}7\,\frac{mA}{V} \times \underbrace{\left(5\,k\Omega \| \underbrace{(3\,k\Omega + 0{,}82\,k\Omega)}_{3{,}82\,k\Omega}\right)}_{2{,}2\,k\Omega} \times \frac{100 \times 3\,k\Omega}{\underbrace{3\,k\Omega + 0{,}85\,k\Omega + \underbrace{(3\,k\Omega \| 0{,}82\,k\Omega)(101)}_{65\,k\Omega}}_{\sim 69\,k\Omega}} =$

$$A_I = -0{,}7\,\frac{1}{k\Omega} \times 2{,}2\,k\Omega \times \underbrace{\frac{300\,k\Omega}{69\,k\Omega}}_{4{,}34}$$

$$\boxed{A_I = -0{,}7\,\frac{1}{\cancel{k\Omega}} \times 2{,}2\,\cancel{k\Omega} \times 4{,}34\ A/A = -6{,}7\ A/A}$$

2.- Cálculo de $\frac{v_o}{v_g}$

El circuito realimentado que se obtiene es:

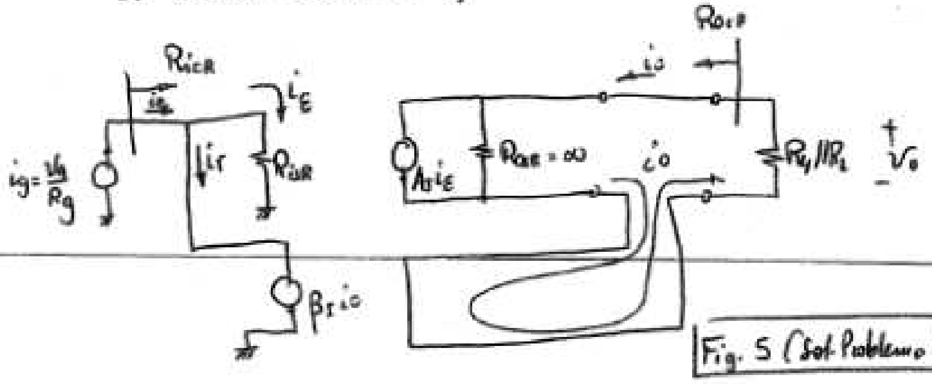


Fig. 5 (Sol. Problema 1)

Siendo $R_{isR} = R_g // (R_5 + R_6) = 5K\Omega // (3K\Omega + 0{,}82K\Omega) \simeq 2{,}2K\Omega$

$R_{osR} = \infty$

$A_I = -6{,}7\ A/A$

$\beta_I = -0{,}21\ A/A$

$\boxed{A_I \beta_I} = (-6{,}7\ A/A)(-0{,}21\ A/A) = \boxed{1{,}42}$

El circuito al que llegamos es:

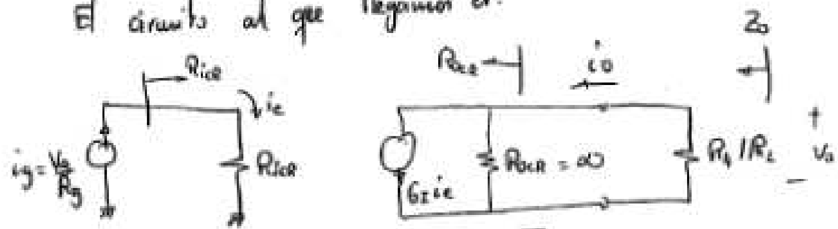


Fig. 6 (Sol. Problema 1)

$$\boxed{R_{icR} = \frac{R_{isR}}{1 + A_I\beta_I} = \frac{2{,}2K\Omega}{1 + 1{,}42} = 0{,}9K\Omega}$$

$$R_{ocR} = R_{osR}(1 + A_I\beta_I) = \infty$$

$$\boxed{G_I = \frac{i_o}{i_e} = \frac{A_I}{1 + A_I\beta_I} = \frac{-6{,}7\ A/A}{1 + 1{,}42} = -2{,}76\ A/A}$$

Por tanto, $\frac{v_o}{v_g} = \frac{v_o}{i_o} \times \frac{i_o}{i_e} \times \frac{i_e}{v_g} = (-R_4 // R_L) \times G_I \times \frac{1}{R_g} = -5{,}6//100K\Omega \times (-2{,}76\frac{A}{A}) \times \frac{1}{5K\Omega}$

$$\boxed{\frac{v_o}{v_g} = 5{,}3K\Omega \times 2{,}76 \times 1/5K\Omega = 3}$$

3- Cálculo de Z_i, Z_o' y Z_o.

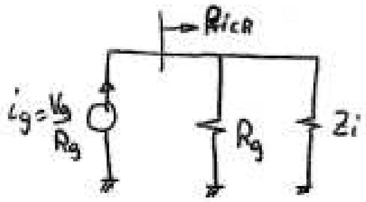


Fig. 7 (Sol. Problema 1)

Según este circuito $\boxed{\text{Fig. 7 (Sol. Probl. 1)}}$,

$$R_{icR} = R_g \| Z_i \rightarrow R_{icR} = \frac{R_g \times Z_i}{R_g + Z_i}$$

$$R_{icR} \times R_g + R_{icR}\, Z_i = R_g \times Z_i$$

$$Z_i\,(R_g - R_{icR}) = R_{icR} \times R_g$$

(1) $$\boxed{Z_i = \frac{R_g \times R_{icR}}{R_g - R_{icR}} = \frac{5k\Omega \times 0{,}9k\Omega}{5k\Omega - 0{,}9k\Omega} \simeq 1k\Omega}$$

Por otro lado, para el cálculo de Z_o' y Z_o tenemos:

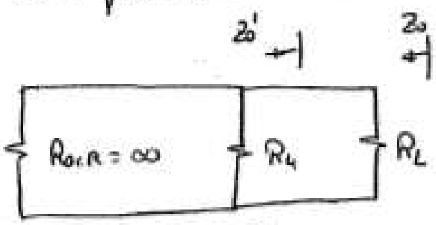


Fig. 8 (Sol. Problema 1)

$$Z_o' = R_4 \| R_{ocR} = 5{,}6k\Omega \| \infty$$

(2) $$\boxed{Z_o' = 5{,}6k\Omega}$$

$$Z_o = R_4 \| R_L \| R_{ocR} \Big|_{R_{ocR} = \infty} = R_4 \| R_L$$

(3) $$\boxed{Z_o = 5{,}6k\Omega \| 100k\Omega \simeq 5{,}3k\Omega}$$

EJERCICIO 9

Dado el circuito amplificador realimentado de la figura 1.

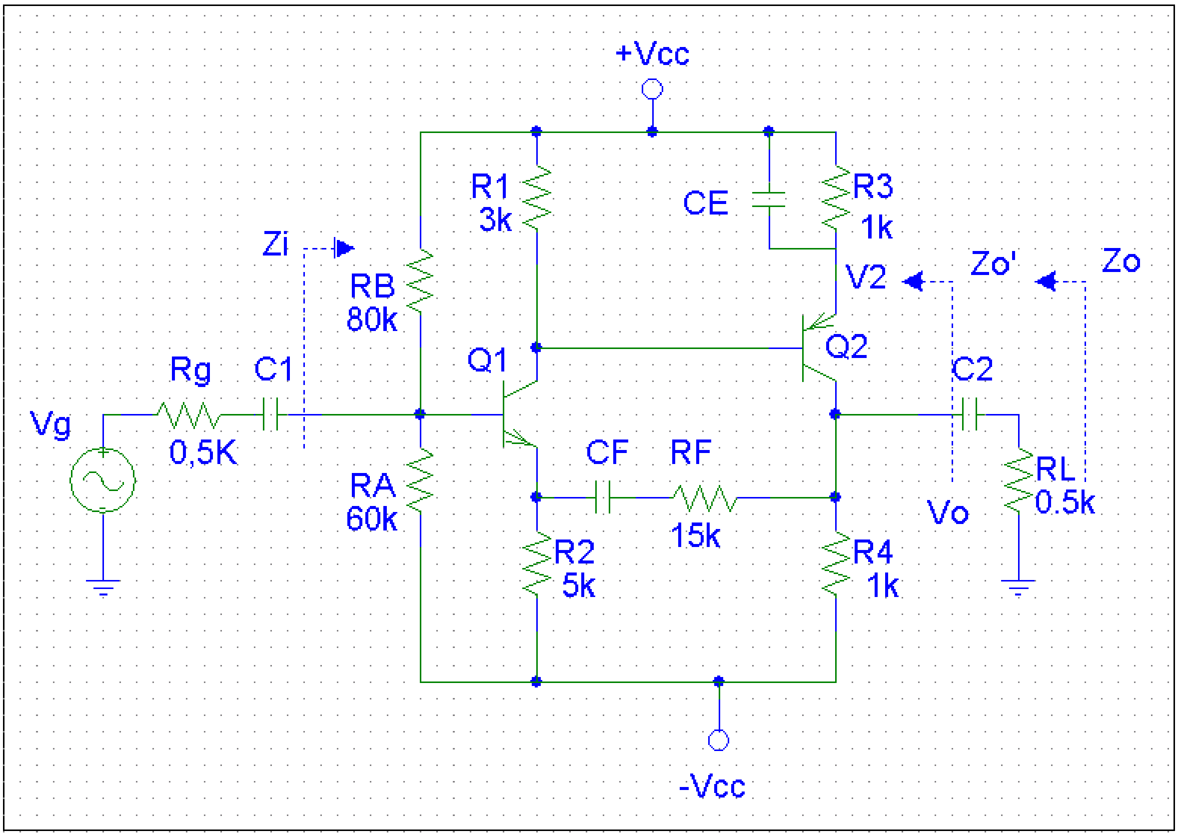


Figura 1

Se pide:

1.
   a. Demuestre que en el circuito de la Figura 1 existe una realimentación negativa
   b. Indique de qué tipo es dicha realimentación
   c. Indique la función de transferencia que estabiliza
2. Represente las redes A' y β equivalentes.
3. Obtenga los valores de A', β y Vo/Vg.
4. Calcule Zi, Zo' y Zo

DATOS:

$r_{\pi1}$ = 1kΩ $\quad$ g_{m1} = 100mA/V

$r_{\pi2}$ = 370Ω $\quad$ g_{m2} = 270mA/V

$C_1 \rightarrow \propto$ $\quad$ $C_2 \rightarrow \propto$ $\quad$ $C_E \rightarrow \propto$ $\quad$ $C_F \rightarrow \propto$

SOLUCIÓN

SOLUCION.

1. Circuito en pequeña señal (AC)

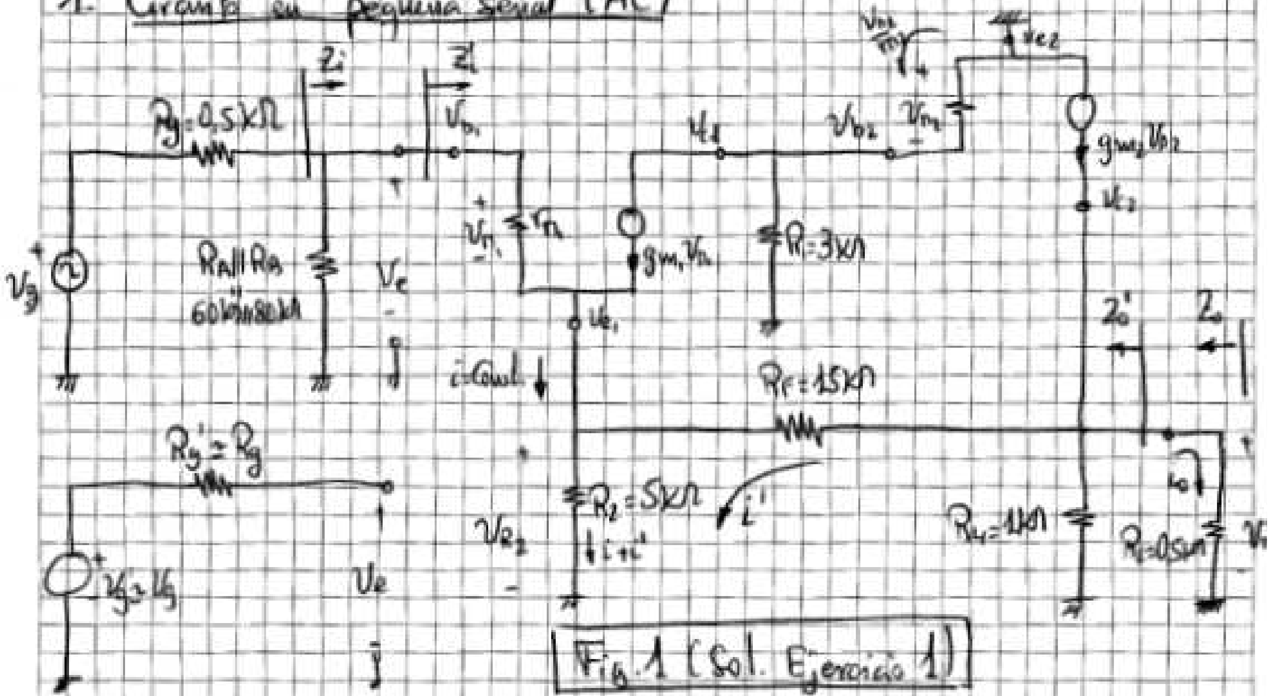


Fig. 1 (Sol. Ejercicio 1)

① $V_g' = \dfrac{R_A // R_B}{R_g + R_A // R_B} \cdot V_g = \dfrac{60\,k\Omega // 80\,k\Omega}{0,5\,k\Omega + 60\,k\Omega // 80\,k\Omega} \cdot V_g \simeq \underline{V_g}$

② $R_g' = R_g // R_A // R_B = 0,5\,k\Omega // 60\,k\Omega // 80\,k\Omega \simeq \underline{0,5\,k\Omega = R_g}$

a.- Demostrar que en el circuito del amplificador realimentado de la Fig 1 existe realimentación negativa.

Según el circuito de la Fig 1 (Sol. Ejercicio 1) tenemos:

Si $V_g \uparrow \rightarrow V_{R_2} \uparrow$ {ya que $\Delta V_{R_2} = i' R_2 \uparrow$ ver Nota*} $\rightarrow \underbrace{V_e = V_{\pi 1} + V_{R_2}}_{\text{Comparador de Tensiones a la entrada}} \rightarrow V_{\pi 1} \downarrow \rightarrow g_{m1}V_{\pi 1} \downarrow\ g_{m1}V_{\pi 1}R_1 \uparrow$

$V_e = Cont.$

Papel ecológico

$\rightarrow g_{m_1} v_{\pi_1} \downarrow \; \frac{v_{\pi_2}}{r_{\pi_2}} \downarrow \; g_{m_2} v_{\pi_2} \downarrow \rightarrow \underline{\underline{V_0}} = i_o R_L \downarrow$ Demostración de Realimentación Negativa

Nota*

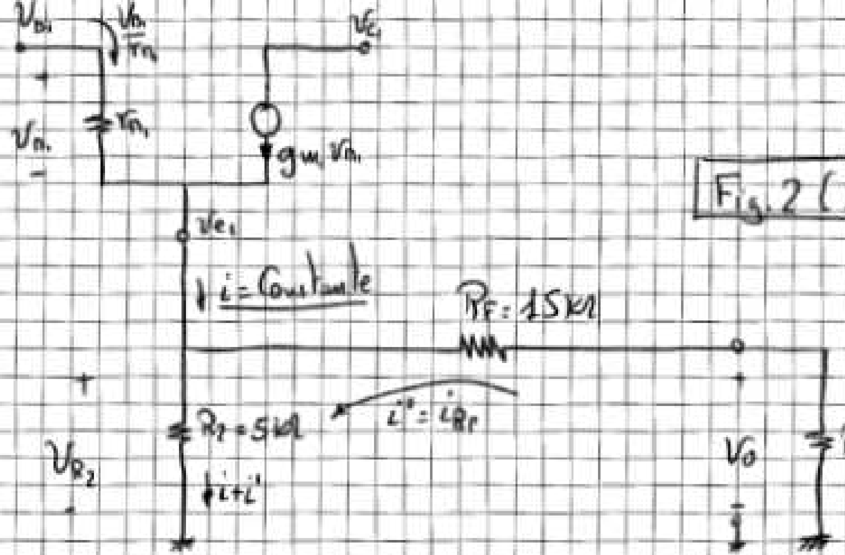


Fig. 2 (Sol. Ejercicio 1)

$\underline{V_{R_2} = (i+i')R_2 \rightarrow \Delta V_{R_2} \downarrow = i' R_2 \downarrow \text{ ya que } i = \text{Constante}}$

Siendo $i = \frac{v_{\pi_1}}{r_{\pi_1}} + g_{m_1} v_{\pi_1} \simeq g_{m_1} v_{\pi_1}$ = Generador de corriente Suponemos Constante

$$\boxed{i' = \frac{V_0}{R_2 + R_F}}$$

b.- Indicar el tipo de Realimentación.

Realimentación negativa: Muestreo de tensión a la salida y Realimentación (ó comparación) de tensión a la entrada

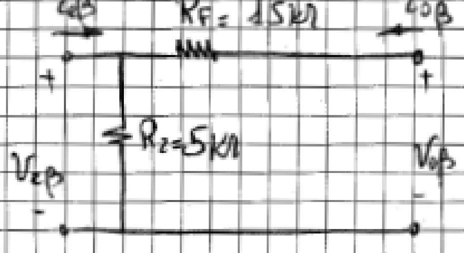
Topología: Serie-Paralelo

Parámetros privilegiados: "h"

c.- Función de Transferencia que estabiliza: Estabiliza una Función de Transferencia de Transtensión: $\boxed{G_V = \left.\frac{A_V}{1 + A_V \beta_V}\right|_{A_V\beta_V \gg 1} \simeq \frac{1}{\beta_V}}$

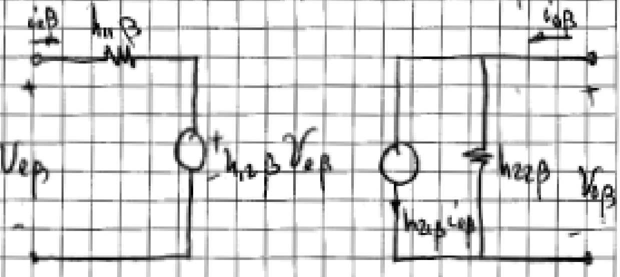
2.- Representar las Redes A' y β Equivalentes.

2a.- Red β



$\boxed{\text{Fig. 3a (Sol. Ejercicio 1)}}$

Cuadripolo equivalente y matriz de parámetros "h" para la red β



$\boxed{\text{Fig. 3b (Sol. Ejercicio 1)}}$

Aplicando las ecuaciones de la matriz de parámetros "h" al circuito de la $\boxed{\text{Fig. 3a (Sol. Ejercicio 1)}}$

Siendo:

$$\boxed{\begin{aligned} V_{e\beta} &= h_{11\beta}\, i_{e\beta} + h_{12\beta}\, V_{o\beta} \\ i_{o\beta} &= h_{21\beta}\, i_{e\beta} + h_{22\beta}\, V_{o\beta} \end{aligned}}$$

$$\boxed{h_{11\beta} = \left.\frac{V_{e\beta}}{i_{e\beta}}\right|_{V_{o\beta}=0} = R_2 \parallel R_F} \quad y \quad \boxed{h_{22\beta} = \left.\frac{i_{o\beta}}{V_{o\beta}}\right|_{i_{e\beta}=0} = \frac{1}{R_2 + R_F}}$$

Asimismo tenemos:

$$\boxed{h_{12\beta} = \left.\frac{V_{e\beta}}{V_{o\beta}}\right|_{i_{e\beta}=0} \left(\frac{V}{V}\right) = \frac{R_2}{R_2 + R_F} = \beta_V = \frac{5K\Omega}{5K\Omega + 15K\Omega} = \frac{5}{20} = 0{,}25 \frac{V}{V}}$$

2b - Red A'

Para obtener la red A' equivalente, tendremos en cuenta el circuito realimentado en pequeña señal (AC) de la Fig. 1 (Sol Ejercicio 1) de la página ①. En consecuencia, y para simplificar este circuito tenemos:

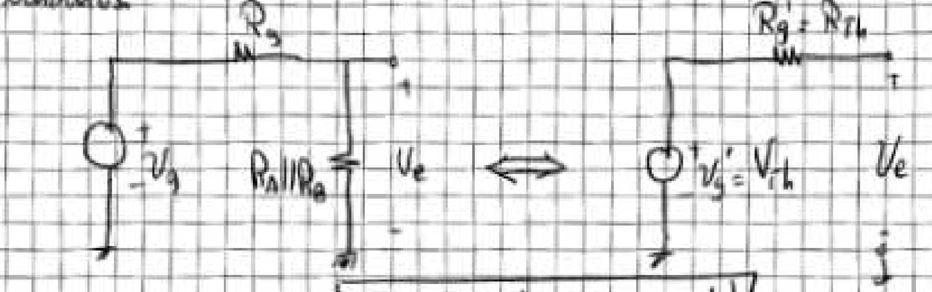


Fig. 4 (Sol Ejercicio 1)

Siendo: ① $V_g' = V_{Th} = V_g \cdot \frac{R_A//R_B}{R_g + R_A//R_B} = V_g \cdot \frac{60K\Omega//80K\Omega}{0,5K\Omega + 60K\Omega//80K\Omega} = V_g \cdot \frac{34,28K\Omega}{0,5K\Omega + 34,28K\Omega} = V_g \cdot 0,98$

$$\boxed{V_g' = V_g \cdot 0,98 \simeq V_g}$$

② $R_g' = R_{Th} = R_g//R_A//R_B = 0,5K\Omega//60K\Omega//80K\Omega = 0,5K\Omega//34,28K\Omega = \frac{17,14K\Omega^2}{34,78K\Omega} = 0,49K\Omega$

$$\boxed{R_g' = 0,49K\Omega \simeq R_g}$$

En consecuencia, tenemos para la red A' el siguiente circuito:

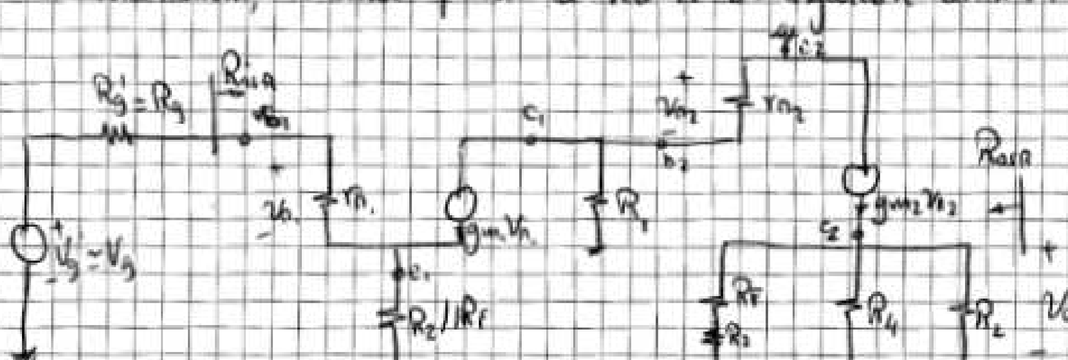


Fig. 5 (Sol Ejercicio 1)

3.- Obtener los valores de A', β y v_o/v_g

1.- $\boxed{\beta_v = h_{r2}}$ (Ver Fig. ③) $= \dfrac{R_2}{R_2+R_F} = \dfrac{5k\Omega}{5k\Omega+15k\Omega} = \dfrac{5}{20} = 0{,}25\ V/V$

2.- $A_v' = \dfrac{v_o'}{v_g'} = \underbrace{\dfrac{v_o'}{v_{\pi 2}}}_{①} \cdot \underbrace{\dfrac{v_{\pi 2}}{v_{\pi 1}}}_{②} \cdot \underbrace{\dfrac{v_{\pi 1}}{v_g'}}_{③}$ Calculado en el circuito de la $\boxed{\text{Fig. 5 (Sol Ejercicio 1)}}$

Siendo ① $\dfrac{v_o'}{v_{\pi 2}}$; $v_o' = g_{m2}\, v_{\pi 2} \cdot (R_F+R_2)\|R_4\|R_L$

$$\boxed{\frac{v_o}{v_{\pi 2}} = g_{m2}\cdot (R_F+R_2)\|R_4\|R_L} \quad ①$$

② $\dfrac{v_{\pi 2}}{v_{\pi 1}}$; $\dfrac{v_{\pi 2}}{r_{\pi 2}} = g_{m1}\, v_{\pi 1} \cdot \dfrac{R_1}{R_1+r_{\pi 2}}$

$$\boxed{\frac{v_{\pi 2}}{v_{\pi 1}} = g_{m1}\, r_{\pi 2}\cdot \frac{R_1}{R_1+r_{\pi 2}} = g_{m1}\cdot r_{\pi 2}\|R_1} \quad ②$$

$$③\quad \boxed{\frac{v_{\pi 1}}{v_g'} = \frac{r_{\pi 1}}{R_g'+r_{\pi 1}+(R_2\|R_F)(1+\beta_{o1})}} \quad ③$$

Por tanto, $A_v' = ①\cdot②\cdot③ = \left(g_{m2}\cdot (R_F+R_2)\|R_4\|R_L\right)\cdot\left(g_{m1}\cdot r_{\pi 2}\|R_1\right)\cdot \dfrac{r_{\pi 1}}{R_g'+r_{\pi 1}+(R_2\|R_F)(1+\beta_{o1})}$

$$A_v' = \underbrace{\beta_{o2}\cdot\frac{(R_F+R_2)\|R_4\|R_L}{R_1+r_{\pi 2}}}_{\text{Ganancia 2ª Etapa en EC}} \cdot \underbrace{\beta_{o1}\cdot\frac{R_1}{R_g'+r_{\pi 1}+(R_2\|R_F)(1+\beta_{o1})}}_{\text{Ganancia 1ª Etapa en EC con } R_E}$$

Sin ... $\boxed{(R_F + R_2) \| R_4 \| R_L} = (\underbrace{15k\Omega + 5k\Omega}_{20k\Omega}) \| \underbrace{1k\Omega \| 0{,}5k\Omega}_{0{,}33k\Omega} = 20k\Omega \| 0{,}33k\Omega \approx \boxed{0{,}33k\Omega}$

② $R_g' + r_{\pi_1} + R_2 \| R_F (1+\beta_{o_1}) = 0{,}5k\Omega + 1k\Omega + 5k\Omega \| 15k\Omega\,(1+\underbrace{g_{m_1} r_{\pi_1}}_{\beta_{o_1} = 100}) =$

$R_g' \approx R_g$

$= 1{,}5k\Omega + 3{,}75k\Omega\,(101) =$

$\boxed{R_g' + r_{\pi_1} + R_2 \| R_F (1+\beta_{o_1}) = 1{,}5k\Omega + 378{,}75k\Omega = 380{,}25k\Omega}$

Por tanto, $A_v' = 100 \times \underbrace{\dfrac{0{,}33k\Omega}{3k\Omega + 0{,}37k\Omega}}_{0{,}097 \approx 0{,}1} \times 100 \times \underbrace{\dfrac{3k\Omega}{380{,}25k\Omega}}_{0{,}0078 \approx 0{,}008}$

$$\boxed{A' = 10^4 \times 0{,}1 \times 0{,}008 = 8\,V/V}$$

En consecuencia, tenemos como circuito realimentado equivalente al circuito real de la Fig. 1 (Sol. Ejercicio 1):

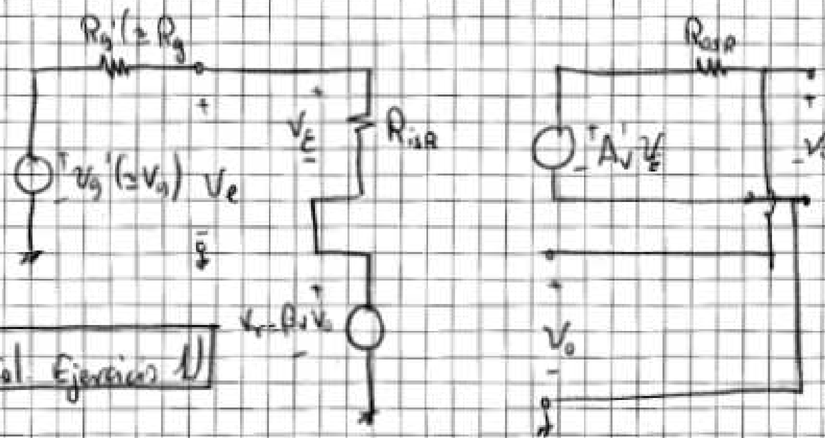


Fig. 6 (Sol. Ejercicio 1)

A partir del circuito de la Fig. 6 (Sol. Ejercicio 1) tenemos:

$\boxed{R_{iA} = r_{\pi_1} + (R_2 \| R_F)(1+\beta_{o_1}) = 1k\Omega + \underbrace{5k\Omega \| 15k\Omega\,(1+\beta_{o_1})}_{378{,}75k\Omega} = 379{,}75k\Omega \approx 380k\Omega}$

$\boxed{R_{oA} = (R_F + R_2) \| R_4 \| R_L = (\underbrace{15k\Omega + 5k\Omega}_{20k\Omega}) \| \underbrace{1k\Omega \| 0{,}5k\Omega}_{0{,}33k\Omega} = 20k\Omega \| 0{,}33k\Omega = 0{,}33k\Omega}$

$\boxed{A' = 8\,V/V}$

$\boxed{\beta_v = 0{,}25\,V/V}$

$\boxed{\underset{A_v}{A'} \cdot \beta_v = 8\,V/V \cdot 0{,}25\,V/V = 2}$ → Nota: Este valor debe ser mucho mayor para que $A_v \beta_v \gg 1$

Por tanto, tendremos como circuito realimentado más simplificado

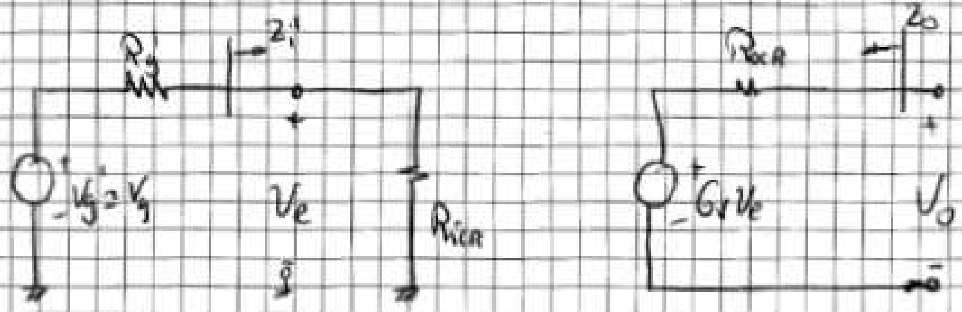


Fig. 7 (Sol. Ejercicio 1)

Donde: $R_{icR} = R_{isR}(1 + A_v\beta_v) = 380k\Omega(\underbrace{1 + 8\frac{V}{V}\cdot 0{,}25\frac{V}{V}}_{3})$

$\boxed{R_{icR} = 1140\ k\Omega = 1{,}14\ M\Omega}$

$\boxed{R_{ocR} = \frac{R_{osR}}{1 + A_v\beta_v} = \frac{0{,}33k\Omega}{1+2} = 110\ \Omega}$

$\boxed{G_v = \frac{A_v'}{1 + A_v'\beta_v} = \frac{8\ V/V}{1 + 8\frac{V}{V} \times 0{,}25\ V/V} = \frac{8\ V/V}{3} = 2{,}67\ V/V}$

Nota: Si $A_v\beta_v >> 1$

$\boxed{G_v = \frac{1}{\beta_v} = \frac{1}{0{,}25} = 4\ V/V}$ Valor Aproximado

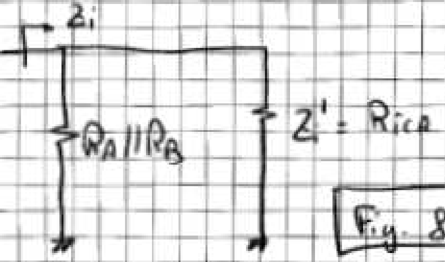
Por tanto, $\boxed{\frac{V_o}{V_g} = \frac{V_o}{V_e}\times\frac{V_e}{V_g'} = G_v \times \underbrace{\frac{R_{icR}}{R_g' + R_{icR}}}_{\approx 1} \times \frac{V_g'}{V_g} = 2{,}67 \times 1 \times 0{,}98 = 2{,}6\ \frac{V}{V}}$

Ver Pag (4)

4.- Calcular Z_i, Z_o' y Z_o

1.- Cálculo de Z_i

Según los esquemas de la [Fig. 1 (Sol. Ejercicio 1)] y de la [Fig. 7 (Sol. Ejercicio 1)] tenemos:



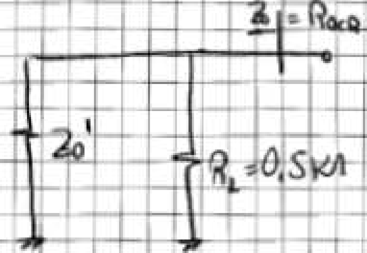
[Fig. 8 (Sol. Ejercicio 1)]

$$Z_i = R_A \| R_B \| \underset{Z_i'}{R_{icR}} = \underbrace{60 k\Omega \| 80 k\Omega}_{34{,}28 k\Omega \| 1140 k\Omega} \| 1140 k\Omega = 33{,}3 k\Omega$$

NOTA: Siendo $\boxed{Z_i = 33{,}3 k\Omega \simeq R_A \| R_B = 34{,}28 k\Omega}$

2.- Cálculo de Z_o'

De nuevo según el circuito de la [Fig. 1 (Sol. Ejercicio 1)] y el de la [Fig. 7 (Sol. Ejercicio 1)] tenemos:



$$Z_o = Z_o' \| R_L = \frac{Z_o' \cdot 0{,}5 k\Omega}{Z_o' + 0{,}5 k\Omega} \rightarrow Z_o' = \frac{Z_o \cdot 0{,}5 k\Omega}{0{,}5 k\Omega - Z_o} = \frac{110 \Omega \cdot 0{,}5 k\Omega}{0{,}5 k\Omega - 110 \Omega}$$

$$\boxed{Z_o' = 141 \Omega}$$

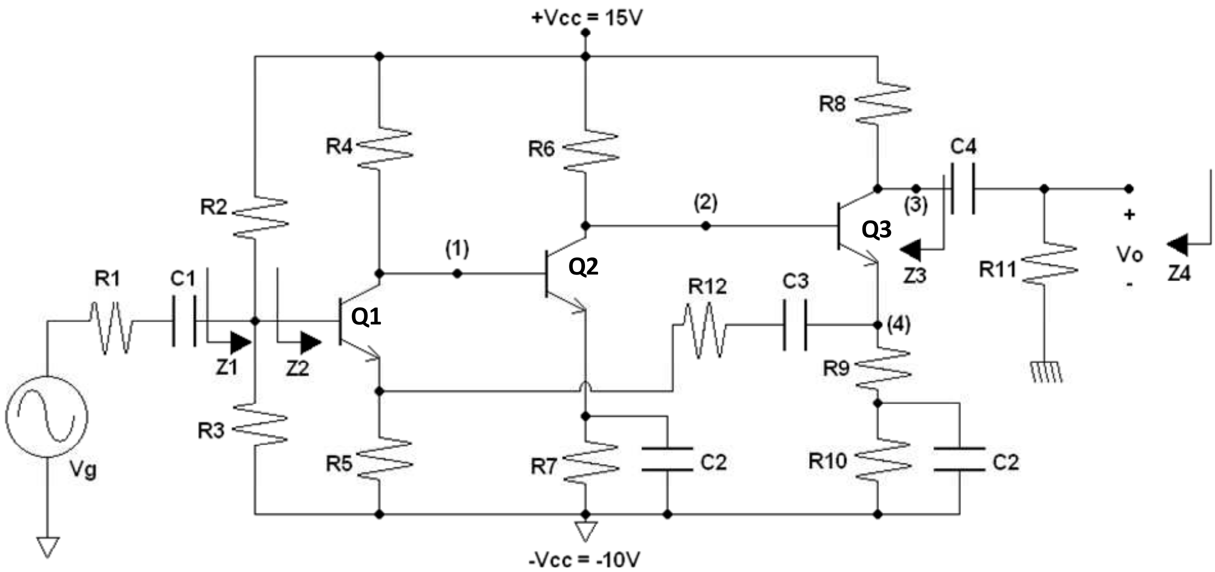
3.- Cálculo de Z_o

$\boxed{Z_o = R_{ocR} = 110 \Omega}$ (Ver Circuitos [Fig 1 (Sol. Ejer. 1)] y [Fig 7 (Sol. Ejer. 1)])

EJERCICIO 10

1. Demuestre que en el circuito de la Figura 1 existe una realimentación negativa. ¿De qué tipo es? Indique la función que estabiliza.
2. Obtenga las redes A' y β, calculando su valor, del amplificador equivalente realimentado de la Figura 1.
3. Calcule V_0/Vg, Z1 y Z4.
4. Si la tensión de salida se toma en el punto (4), comente qué tipo de realimentación negativa es. Indique la función que estabiliza.

DATOS: $r_o \rightarrow \infty$, β = 100, $r_{\pi 1}$ = 2.5 kΩ; $r_{\pi 2}$ = 2.5 kΩ; $r_{\pi 3}$ = 1.25 kΩ



R1 = 50Ω	R5 = 1KΩ	R9 = 1KΩ	C1 → ∞
R2 = 184KΩ	R6 = 10KΩ	R10 = 3.7KΩ	C2 → ∞
R3 = 16KΩ	R7 = 5.4KΩ	R11 = 2KΩ	C3 → ∞
R4 = 14KΩ	R8 = 3KΩ	R12 = 50KΩ	C4 → ∞

Figura 1

SOLUCIÓN

1_(a) Demostrar que en el circuito existe una realimentación negativa. ¿De qué tipo es? Indique la función que estabiliza y sus parámetros privilegiados

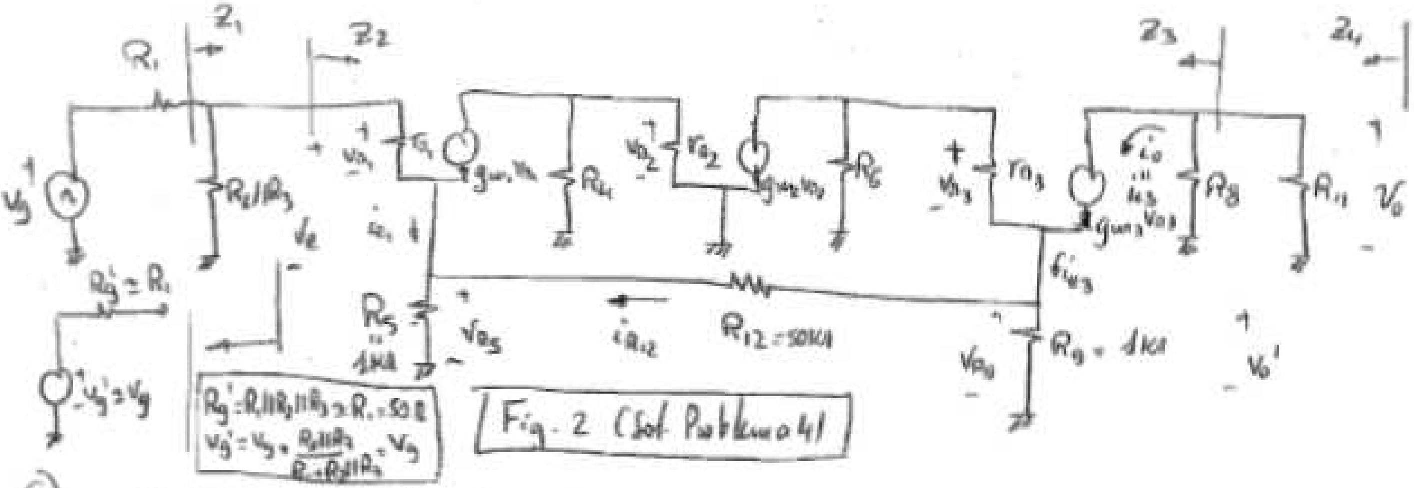


Fig. 2 (Sol. Problema 4)

(1) Si $i_o \uparrow \rightarrow g_{m_3} v_{\pi_3} \uparrow \rightarrow i_{e_3} \simeq i_3 = g_3 v_{\pi_3} \uparrow$ $\quad v_{R_9} = R_9 \cdot i_{e_3} \Big|_{R_9 \ll R_{12}} \rightarrow v_{R_9} \uparrow \quad i_{R_{12}} \uparrow$

$\underbrace{i_{R_{12}} \times R_5 = v_{R_5} \uparrow}_{\text{Suponiendo } i_{e_1} \simeq g_{m_1} v_{\pi_1} = \text{Constante}} \longrightarrow \underbrace{v_{e_1} = v_{\pi_1} + v_{R_5}}_{\text{Constante}} \rightarrow v_{\pi_1} \downarrow \quad g_{m_1} v_{\pi_1} \downarrow \quad v_{\pi_2} \uparrow \quad g_{m_2} v_{\pi_2} \uparrow \rightarrow$

$\rightarrow v_{\pi_3} \downarrow \quad g_{m_3} v_{\pi_3} = i_o \downarrow \longrightarrow$ Existe realimentación negativa.

(2) - Muestreamos corriente a la salida
- Comparamos tensión a la entrada

$\Big\} \rightarrow \boxed{\frac{i_o}{V_e} = \frac{A_Y}{1 + A_Y \beta_Z} = G_Y}$

Es decir, tenemos una topología Serie - Serie

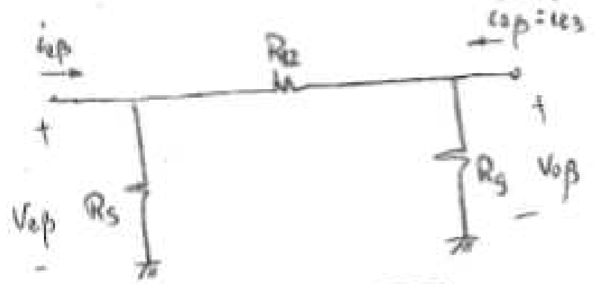
(3) Estabilizamos una función de transadmitancia G_Y

(4) Los parámetros privilegiados son los parámetros "z"

2.- Obtener las redes A y β calculando su valor

① Red β.

Según el circuito de la $\boxed{\text{Figura 2 (Sol. Probl. 4)}}$, la red β para que nos permite muestrear la corriente de salida y comparar a la entrada tensión es la red formada por las resistencias R_S, R_{12} y R_9 es decir:



$\boxed{\text{Fig. 3 (Sol Problema 4)}}$

Siendo las corrientes de salida y de entrada los elementos comunes a la red A y red β del circuito realimentado. Por tanto tenemos:

$$V_{e\beta} = z_{11\beta}\, i_{e\beta} + z_{12\beta}\, i_{o\beta}$$

$$V_{o\beta} = z_{21\beta}\, i_{e\beta} + z_{22\beta}\, i_{o\beta}$$

Elemento común a la entrada

Elemento común a la salida

Por tanto,

$$\boxed{z_{11\beta} = \left.\frac{V_{e\beta}}{i_{e\beta}}\right|_{i_{o\beta}=0} = R_S \| (R_{12} + R_9) = 1k\Omega \| 50k\Omega + 1k\Omega = 0{,}98k\Omega \simeq 1k\Omega}$$

$$\boxed{z_{22\beta} = \left.\frac{V_{o\beta}}{i_{o\beta}}\right|_{i_{e\beta}=0} = R_9 \| (R_{12} + R_S) = 1k\Omega \| 50k\Omega + 1k\Omega = 0{,}98k\Omega \simeq 1k\Omega}$$

$$\boxed{z_{12\beta} = \left.\frac{V_{e\beta}}{i_{o\beta}}\right|_{i_{e\beta}=0} = \frac{R_9}{R_S + R_{12} + R_9} \cdot R_S = \frac{1k\Omega}{1k\Omega + 50k\Omega + 1k\Omega} \cdot 1k\Omega = 19\,\Omega}$$

② Cálculo del valor de β_Z.

El valor de $Z_{12\beta} = 19\Omega$ corresponde al cálculo de $\frac{v_{e\beta}}{i_{o\beta}} = \frac{v_{e\beta}}{i_{e3}}$.

No obstante, $\beta_Z = \frac{v_{e\beta}}{i_o} = \frac{v_{e\beta}}{i_{o\beta}} \cdot \frac{i_{o\beta}}{i_o}$ $\left\{ \text{Siendo } i_{o\beta} = i_{e3} \text{ y } i_o = i_{c3} \right\}$ Ver $\boxed{\text{Fig. 2 (Sol. Problema 4)}}$

Por tanto, $\frac{i_{o\beta}}{i_o} = \frac{i_{e3}}{i_{c3}} = \frac{1}{\alpha_F}$ — $\alpha_F = \frac{\beta_F}{1+\beta_F} = \frac{100}{1+100} = 0{,}99$

Un esquema circuital que puede representar el efecto del factor $1/\alpha_F$ en la red β es:

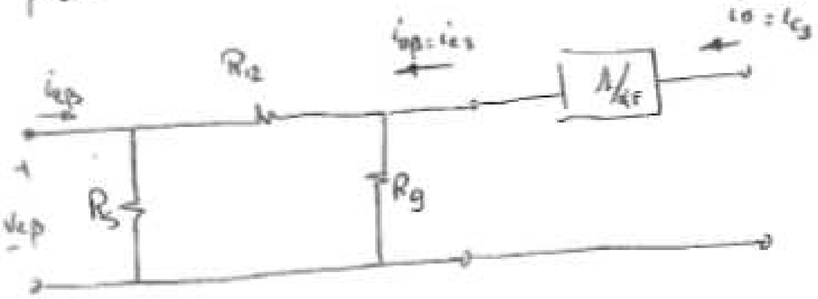
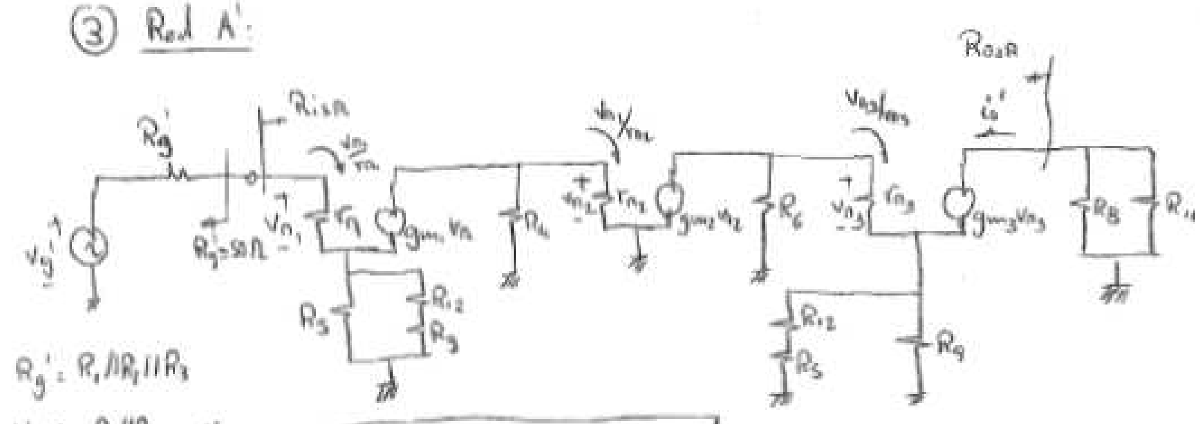


Fig 4. (Sol. Problema 4)

En consecuencia, $\beta_Z = \frac{v_{e\beta}}{i_o} = \frac{v_{e\beta}}{i_{o\beta}} \cdot \frac{i_{o\beta}}{i_o} = Z_{12\beta} \cdot \frac{1}{\alpha_F} = 19\Omega \cdot \frac{1}{0{,}99} \simeq 19{,}2\Omega$

$$\boxed{\beta_Z = 19{,}2\Omega \simeq 19\Omega = Z_{12\beta}}$$

③ Red A':



$R_g' = R_1 \| R_2 \| R_3$

$v_g' = v_g \cdot \frac{R_2 \| R_3}{R_1 + R_2 \| R_3} \simeq v_g$

Fig 5. (Sol. Problema 4)

$\boxed{R_1 \| R_2 \| R_3 = 50\Omega \| 84k\Omega \| 16k\Omega \simeq 50\Omega}$

(4) Cálculo del valor de $A' = A_V$

$$A' = A_V = \frac{i_o'}{v_g'}\Bigg|_{\text{Circuito } \boxed{\text{Fig 5 (Sol. Problema 4)}}} = \underbrace{\frac{i_o'}{v_{\pi 3}}}_{(1)} \cdot \underbrace{\frac{v_{\pi 3}}{v_{\pi 2}}}_{(2)} \cdot \underbrace{\frac{v_{\pi 2}}{v_{\pi 1}}}_{(3)} \cdot \underbrace{\frac{v_{\pi 1}}{v_g'}}_{(4)}$$

(1) $i_o' = g_{m3} v_{\pi 3} \rightarrow \boxed{\frac{i_o'}{v_{\pi 3}} = g_{m3}}$

(2) $\frac{v_{\pi 3}}{v_{\pi 2}} = \frac{-g_{m2} v_{\pi 2} R_6}{R_6 + r_{\pi 3} + [R_3 \| (R_2 + R_5)](1+\beta_{03})}$ → Ecuación de un divisor de corriente

$$\boxed{\frac{v_{\pi 3}}{v_{\pi 2}} = \frac{-g_{m2} r_{\pi 3} R_6}{R_6 + r_{\pi 3} + [R_3 \| (R_2 + R_5)](1+\beta_{03})}}$$

(3) $\frac{v_{\pi 2}}{v_{\pi 1}} = -g_{m1} v_{\pi 1} \cdot \frac{R_4}{R_4 + r_{\pi 2}}$ → Ecuación de un divisor de corriente

$$\boxed{\frac{v_{\pi 2}}{v_{\pi 1}} = -\frac{g_{m1} r_{\pi 2} R_4}{R_4 + r_{\pi 2}} = -g_{m1} \cdot r_{\pi 2} \| R_4}$$

(4) $\frac{v_{\pi 1}}{v_g'} = \frac{r_{\pi 1}}{R_g' + r_{\pi 1} + [R_5 \| (R_2 + R_3)](1+\beta_{01})}$ → Ecuación de un divisor de tensión

$$\boxed{\frac{v_{\pi 1}}{v_g'} = \frac{r_{\pi 1}}{R_g' + r_{\pi 1} + [R_5 \| (R_2 + R_3)](1+\beta_{01})}}$$

Por tanto, tenemos:

$$A_V = g_{m3} \cdot \left(\frac{+g_{m2} r_{\pi 3} R_6}{R_6 + r_{\pi 3} + [R_3 \| (R_2 + R_5)](1+\beta_{03})} \right) \cdot \left(\frac{+g_{m1} r_{\pi 2} R_4}{R_4 + r_{\pi 2}} \right) \cdot \left(\frac{r_{\pi 1}}{R_g' + r_{\pi 1} + [R_5 \| (R_2 + R_3)](1+\beta_{01})} \right)$$

β_{03} β_{02} β_{01}

$$A_V = \beta_{01} \cdot \beta_{02} \cdot \beta_{03} \cdot \frac{R_6}{R_6 + r_{\pi 3} + [R_3 \| (R_2 + R_5)](1+\beta_{03})} \cdot \frac{R_4}{R_4 + r_{\pi 2}} \cdot \frac{1}{R_g' + r_{\pi 1} + [R_5 \| (R_2 + R_3)](1+\beta_{01})}$$

Siendo, $r_{\pi 1} = \beta_{01} \cdot \frac{V_T}{I_{C1}} = 100 \cdot \frac{25\,mV}{1\,mA} = 2,5\,k\Omega$

$r_{\pi 2} = \beta_{02} \cdot \frac{V_T}{I_{C2}} = 100 \cdot \frac{25\,mV}{1\,mA} = 2,5\,k\Omega$

$r_{\pi 3} = \beta_{03} \cdot \frac{V_T}{I_{C3}} = 100 \cdot \frac{25\,mV}{2\,mA} = 1,25\,k\Omega$

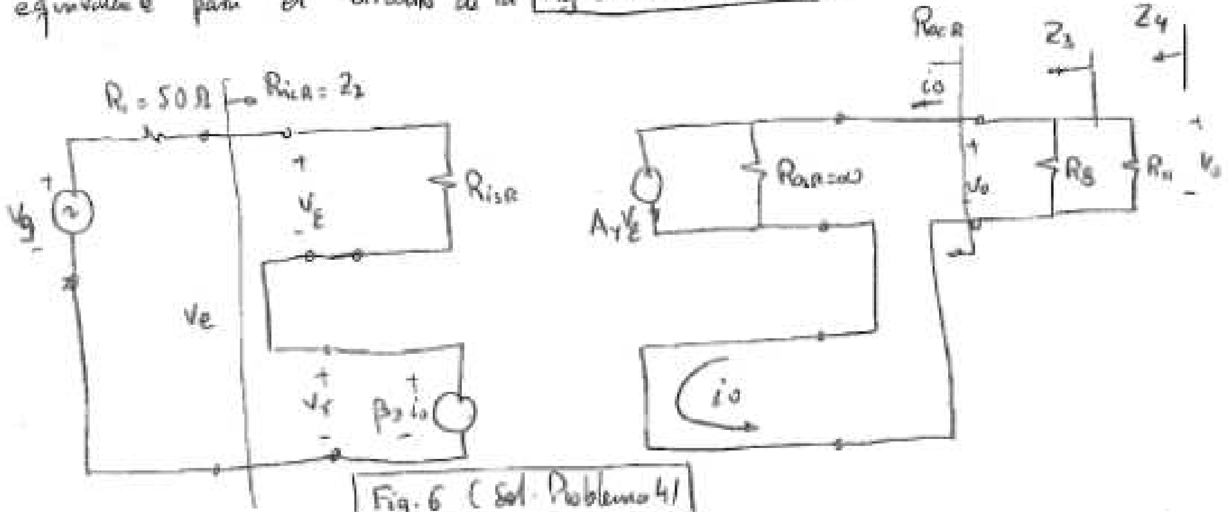
Por tanto,

$$A_Y = 100^3 \times \underbrace{\frac{10k\Omega}{10k\Omega + 1{,}25k\Omega + [\underbrace{1k\Omega(50k\Omega + 1k\Omega)}_{\sim 1k\Omega}](1+100)}}_{0{,}089} \times \underbrace{\frac{14k\Omega}{14k\Omega + 1{,}25k\Omega}}_{0{,}92} \times \underbrace{\frac{1}{50\Omega + 2{,}5k\Omega + \underbrace{(1k\Omega // 5k\Omega)(1+100)}_{\sim 101k\Omega}}}_{\sim 10^{-2}\frac{1}{k\Omega} \approx 10^{-5}\frac{1}{\Omega}}$$

$$A_Y = 10^6 \times 0{,}089 \times 0{,}92 \times 10^{-5}\frac{1}{\Omega} \simeq 0{,}8\ \frac{1}{\Omega}$$

B.- Calcular $\frac{V_0}{V_g}$, Z_1, Z_2, Z_3 y Z_4

Según el esquema de la $\boxed{\text{Figura 5 (Sol. Problema 4)}}$ tenemos como esquema equivalente para el circuito de la $\boxed{\text{Fig. 2 (Sol. Problema 4)}}$:



$\boxed{\text{Fig. 6 (Sol. Problema 4)}}$

Siendo R_{isR} (Ver Fig 5 (Sol Problema 4)) $= r_{\pi 1} + [R_3 // (R_{12} + R_9)](1+\beta_{01}) = 2{,}5k\Omega + 1k\Omega(101)$

$R_{isR} = 2{,}5k\Omega + 101k\Omega = 103{,}5k\Omega$

$R_{oR} = \infty$

$A_Y = 0{,}8\ 1/\Omega$ y $\beta_Z = 19{,}2\ \Omega \rightarrow \boxed{A_Y \beta_Z = 0{,}8\frac{1}{\Omega} \times 19{,}2\Omega = 15{,}36}$

En donde: $\boxed{\frac{i_0}{V_e}}\Big|_{R_1 << R_{icR}} = \frac{i_0}{V_g} = G_Y = \frac{A_Y}{1+A_Y\beta_Z} = \frac{0{,}8\ 1/\Omega}{1+A_Y\beta_Z} = \frac{0{,}8\ 1/\Omega}{1+15{,}36} = \boxed{0{,}05\frac{1}{\Omega}}$

Teniendo en cuenta que $A_Y\beta_Z >> 1 \rightarrow \boxed{\frac{i_0}{V_e}} \simeq \frac{1}{\beta_Z} = \frac{1}{19{,}2\Omega} = \boxed{0{,}052\frac{1}{\Omega}}$

Asimismo tenemos:

$$\boxed{R_{icA} = R_{iA}\,(1 + A_2\beta_1) = 103{,}5\,k\Omega\,(1 + 15{,}36) = 1693{,}26\,k\Omega \simeq 1{,}7\,M\Omega}$$

$$\boxed{R_{ocA} = R_{oA}\,(1 + A_2\beta_1) = \infty\,(1 + 15{,}36) = \infty}$$

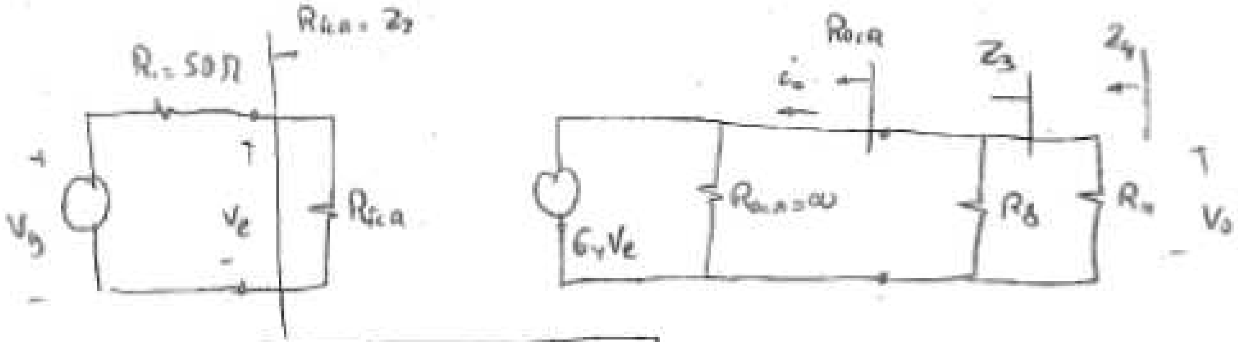


Fig. 7 (Sol. Problema 4)

En consecuencia,
$$\frac{V_o}{V_g} = \frac{V_o}{i_o} \times \frac{i_o}{V_e} \times \frac{V_e}{V_g} = -(R_8 \| R_L) \times G_T \times \underbrace{\frac{R_{icA}}{R_1 + R_{icA}}}_{\sim 1}$$

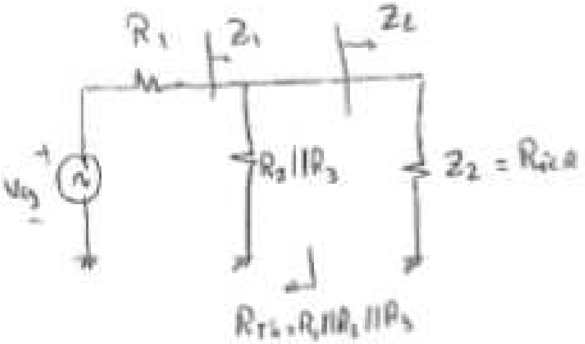
$$\frac{V_o}{V_g} = -(R_8 \| R_L) \times 0{,}05\,\frac{1}{\Omega} = -\underbrace{(3\,k\Omega \| 2\,k\Omega)}_{1{,}2\,k\Omega} \times 0{,}05\,\frac{1}{\Omega} = -60$$

$Z_2 = R_{icA} = 1{,}7\,M\Omega$

$Z_3 = R_8 \| R_{ocA} = 3\,k\Omega \| \infty = 3\,k\Omega$

$Z_4 = R_L \| Z_3 = 2\,k\Omega \| 3\,k\Omega = 1{,}2\,k\Omega$

Para el cálculo de Z_1 tomamos el siguiente circuito:



Por tanto $Z_1 = R_2 \| R_3 \| R_{icA}$

$$Z_1 = \underbrace{184\,k\Omega \| 16\,k\Omega}_{\substack{14{,}7\,k\Omega \\ \simeq \\ 15\,k\Omega}} \| 1{,}7\,M\Omega$$

$$\underbrace{15\,k\Omega \| 1{,}7\,M\Omega}_{\sim 15\,k\Omega}$$

$$\boxed{Z_1 \simeq 15\,k\Omega}$$

4.- (1) Si la tensión de salida la tomamos en el punto (4) = v_o', (Ver Fig 2 (del Prob 4)

implica que: - muestreamos tensión a la salida
- comparamos tensión a la entrada } → $\boxed{\dfrac{v_o'}{v_e} = \dfrac{A_v}{1 + A_v \beta_v} = G_v}$

(2) - Es decir, tenemos una topología serie - paralelo

(3) - Estabilizamos una función de transtensión : G_v

(4) - Los parámetros privilegiados son los parámetros "h"

EJERCICIO 11

Dado el amplificador realimentado de la figura 3,

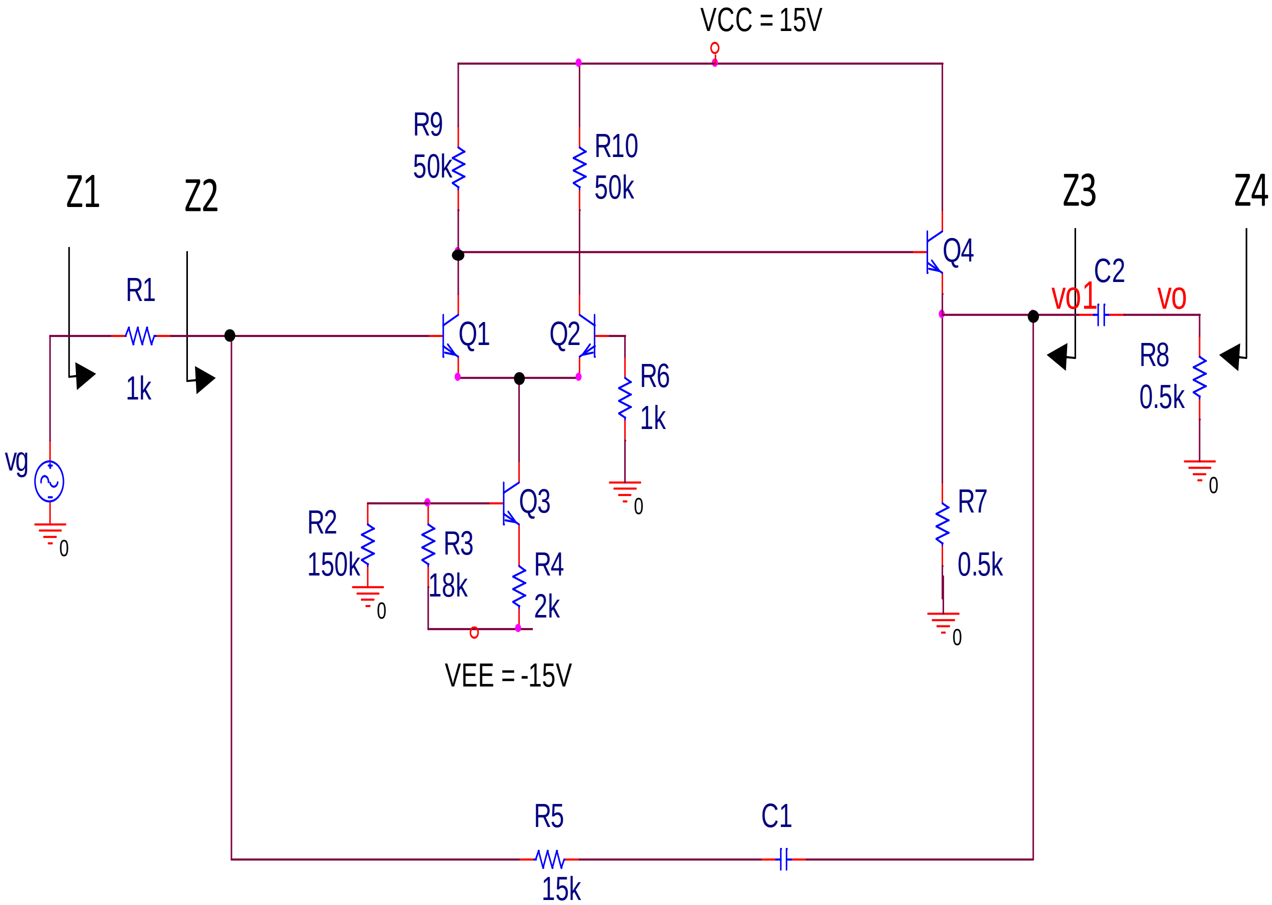


Figura 3

<u>DATOS:</u>

C1, C2→∞
Q1 a Q4: β =250 $r_o \rightarrow \infty$
Corrientes en DC: $I_{CQ1} = I_{CQ2} = 0.25mA$ $I_{CQ4} = 3.8mA$

Se pide:

a) Demuestre que en el circuito de la Figura 3 existe una realimentación negativa. ¿De qué tipo es? Indique la función que estabiliza y sus parámetros privilegiados
b) Obtenga las redes A' y β, sus expresiones y calcule su valor correspondiente al amplificador realimentado de la Figura 3
c) Calcule vo/vg, Z1, Z2, Z3 y Z4

SOLUCIÓN

1.- (a) Demostrar que en el circuito de la Fig 3 existe realimentación negativa. (b) Tipo de realimentación. (c) Parámetros característicos y (d) la función de transferencia que estabiliza.

Circuito en pequeña señal:

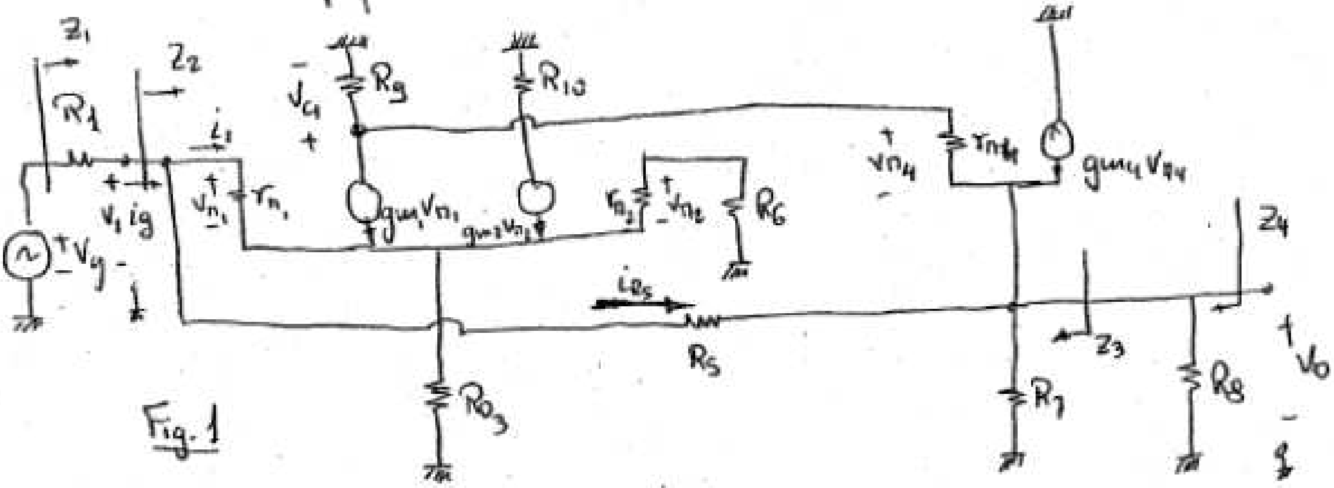


Fig. 1

Siendo $R_{o3} = r_{o3}\left(1+\dfrac{\beta_{o2}\, R_4}{R_2 \| R_3 + r_{o3} + R_4}\right)$

Esquema comparador de corrientes a la entrada

(a) Si $V_o \uparrow$ $\quad i_{R_5} = \dfrac{v_g - V_o}{R_5} \downarrow$ $\quad i_{R_5} + i_g = i_1$, siendo i_g = constante $\downarrow$ → $i_1 \uparrow$ $i_{b1} \uparrow$ $i_{c1} \uparrow$ $v_{c1} \downarrow$

$i_g \rightarrow \otimes \rightarrow i_1$, $\uparrow i_{R_5}$

$i_{b4} = \dfrac{v_{\pi 4}}{r_{\pi 4}} \downarrow$ $\quad g_{m4} v_{\pi 4} \downarrow$ $\quad V_o \downarrow$

(b) Muestreo de tensión a la salida y comparación de corrientes a la entrada: Paralelo - Paralelo

(c) Parámetros "y"

(d) Transimpedancia: A_z, β_y y G_z siendo: $\boxed{G_z = \dfrac{A_z}{1+A\beta}}$

2- Redes A' y β del amplificador realimentado, calculando sus valores correspondientes.

ⓐ <u>La red β</u> es la que permite pasar de la señal de salida (en este caso v_S) a la señal de realimentación (en este caso i_{R_S}). Es decir, la resistencia R_S:

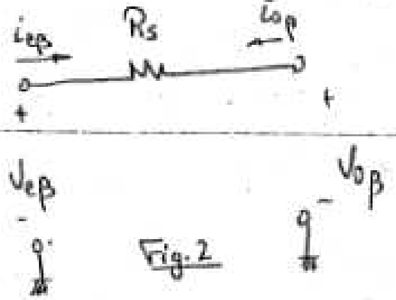


Fig. 2

$$i_{e\beta} = y_{11\beta} v_{e\beta} + y_{12\beta} v_{o\beta}$$

$$i_{o\beta} = y_{21\beta} v_{e\beta} + y_{22\beta} v_{o\beta}$$

Siendo
$$y_{11\beta} = \left.\frac{i_{e\beta}}{v_{e\beta}}\right|_{v_{o\beta}=0} = \frac{1}{R_S} = \frac{1}{15K\Omega} = 0{,}067\,(K\Omega)^{-1}$$

$$y_{22\beta} = \left.\frac{i_{o\beta}}{v_{o\beta}}\right|_{v_{e\beta}=0} = \frac{1}{R_S} = \frac{1}{15K\Omega} = 0{,}067\,(K\Omega)^{-1}$$

$$\boxed{y_{12\beta} = \left.\frac{i_{e\beta}}{v_{o\beta}}\right|_{v_{e\beta}=0} = -\frac{1}{R_S} = -\frac{1}{15K\Omega} = -0{,}067\,(K\Omega)^{-1} = \beta}$$

ⓑ <u>Red A'</u>.

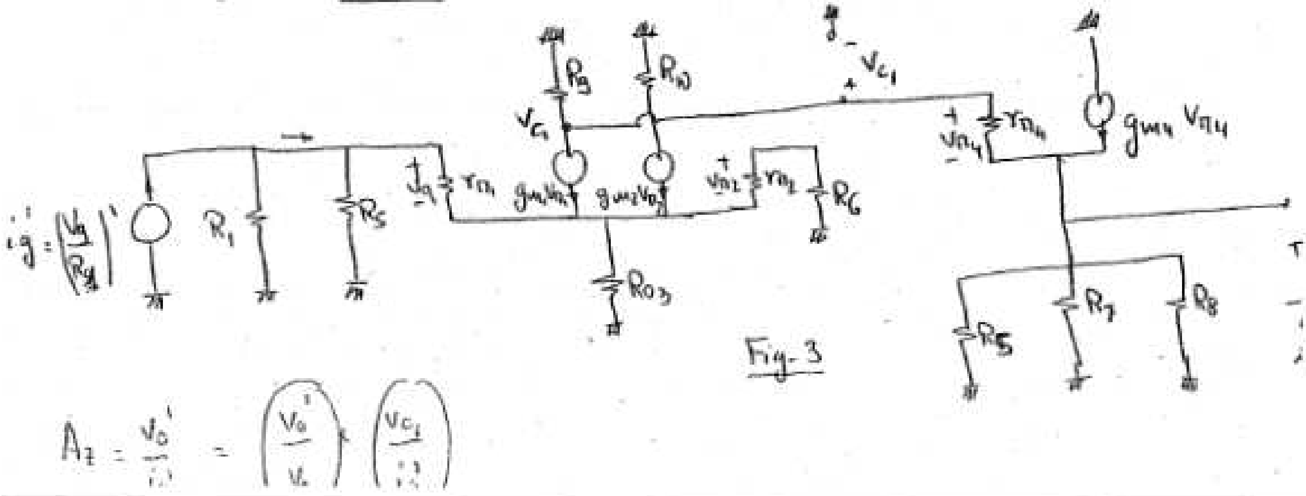


Fig. 3

$$A_z = \frac{v_o'}{i_i'} = \left(\frac{v_o'}{v_i}\right)\left(\frac{v_{c_1}}{i_i'}\right)$$

Para obtener las expresiones (1) $\frac{v_o'}{v_{c_1}}$ y (2) $\frac{v_{c_1}}{i_g'}$ el circuito de la Fig. 3 lo dividimos en 2 subcircuitos

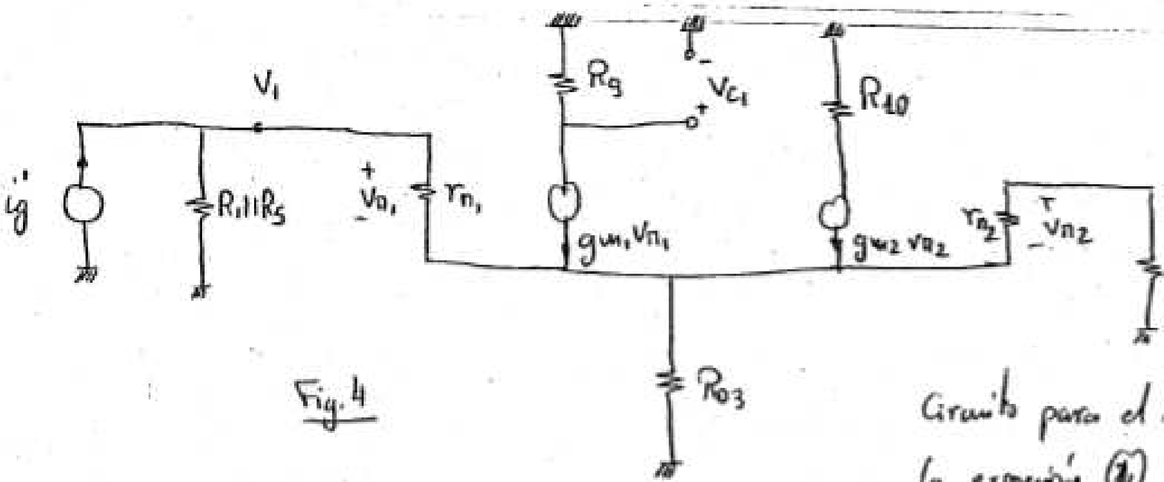


Fig. 4

Circuito para el cálculo de la expresión (2) $\frac{v_{c_1}}{i_g'}$

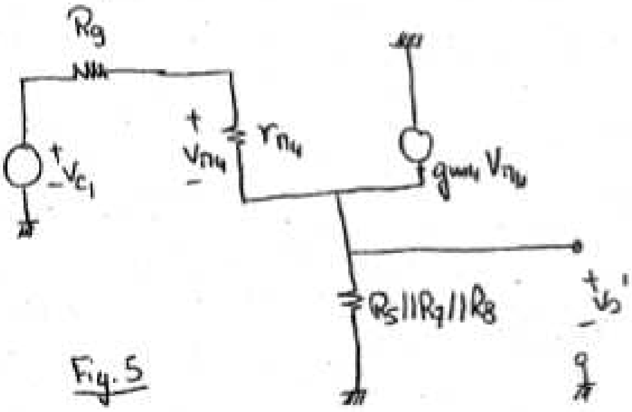


Fig. 5

Circuito para el cálculo de la expresión (1) $\frac{v_o'}{v_{c_1}}$

(1) $$\frac{v_o'}{v_{c_1}} = \frac{(R_5 \| R_7 \| R_8)(1+\beta_{o4})}{R_9 + r_{\pi_4} + (R_5 \| R_7 \| R_8)(1+\beta_{o4})} = \frac{(1{,}5k\Omega \| 0{,}5k\Omega \| 0{,}5k\Omega)(1+250)}{50k\Omega + 1{,}6k\Omega + (1{,}5k\Omega \| 0{,}5k\Omega \| 0{,}5k\Omega)(2\ldots}$$

Siendo $r_{\pi_4} = \beta_{o4} \times \frac{V_T}{I_{CQ4}} = 250 \times \frac{25mV}{3{,}8mA} = 1{,}6k\Omega$

$$\boxed{\frac{v_o'}{v_{c_1}}} \simeq \frac{0{,}25k\Omega\,(1+250)}{51{,}6k\Omega + 0{,}25k\Omega\,(251)} = \frac{62{,}75k\Omega}{51{,}6k\Omega + 62{,}75k\Omega} = \boxed{0{,}55}$$

(2) $$\frac{v_{c_1}}{i_g'} = \left(\frac{v_{c_1}}{v_{\pi_1}}\right) \times \left(\frac{v_{\pi_1}}{i_g'}\right)$$
(2a) (2b)

En donde $v_{c_1} = -g_{m_1} v_{\pi_1} R_9$

$$\boxed{\frac{v_{c_1}}{v_{\pi_1}} = -g_{m_1} R_9} \leftarrow (2a)$$

(2b) Como divisor de corriente a la entrada tenemos (Ver Circuito Fig. 4)

$v_{\pi_1} \ldots R_1 \| R_5 \ldots \rightarrow \frac{v_{\pi_1}}{i_g'} = \frac{r_{\pi_1} \times (R_1 \| R_5)}{\ldots R_1 \| R_5}$

(2b)

$$1.-\quad V_1 = V_{\pi_1} + R_{o3}\left(\frac{V_{\pi_1}}{r_{\pi_1}} + g_{m1}V_{\pi_1} + g_{m2}V_{\pi_2} + \frac{V_{\pi_2}}{r_{\pi_2}}\right)$$

$$2.-\quad V_1 = V_{\pi_1} - V_{\pi_2} - \frac{V_{\pi_2}}{r_{\pi_2}} \cdot R_6 \qquad 2.- \longrightarrow V_1 = V_{\pi_1} - V_{\pi_2}\left(\frac{r_{\pi_2}+R_6}{r_{\pi_2}}\right)$$

$$3.-\quad i_g' = \frac{V_1}{R_1 \| R_5} + \frac{V_{\pi_1}}{r_{\pi_1}} \qquad 3.- \longrightarrow i_g' = \frac{V_{\pi_1} - V_{\pi_2}\left(\frac{r_{\pi_2}+R_6}{r_{\pi_2}}\right)}{R_1 \| R_5}$$

Sustituyendo 2 en 1 tenemos

$$\cancel{V_{\pi_1}} - V_{\pi_2}\left(\frac{r_{\pi_2}+R_6}{r_{\pi_2}}\right) = \cancel{V_{\pi_1}} + R_{o3}(1+\beta_{o1})\frac{V_{\pi_1}}{r_{\pi_1}} + R_{o3}(1+\beta_{o2})\frac{V_{\pi_2}}{r_{\pi_2}}$$

$$R_{o3}(1+\beta_{o1})\frac{V_{\pi_1}}{r_{\pi_1}} = -\frac{V_{\pi_2}}{r_{\pi_2}}\left(\cancel{r_{\pi_2}+R_6} + R_{o3}(1+\beta_{o2})\right)$$

$$R_{o3}\cancel{(1+\beta_{o1})}\frac{V_{\pi_1}}{r_{\pi_1}} \approx -\frac{V_{\pi_2}}{r_{\pi_2}} R_{o3}\cancel{(1+\beta_{o2})}$$

$$\frac{V_{\pi_1}}{r_{\pi_1}} \approx -\frac{V_{\pi_2}}{r_{\pi_2}} \quad \text{como } r_{\pi_1} = r_{\pi_2} \rightarrow \boxed{V_{\pi_1} = -V_{\pi_2}}$$

Tenemos, por tanto en la expresión 3: $i_g' = \dfrac{V_{\pi_1} + V_{\pi_1}\left(\frac{r_{\pi_2}+R_6}{r_{\pi_2}}\right)}{R_1 \| R_5} + \dfrac{V_{\pi_1}}{r_{\pi_1}}$

Como $r_{\pi_1} = r_{\pi_2} \rightarrow i_g' = V_{\pi_1}\left(\dfrac{2r_{\pi_1} + R_6 + R_1\|R_5}{(R_1\|R_5)\cdot r_{\pi_1}}\right)$

Por tanto: $\boxed{\dfrac{V_{\pi_1}}{i_g'} = \dfrac{(R_1\|R_5)\cdot r_{\pi_1}}{2r_{\pi_1} + R_6 + R_1\|R_5}}$

(2) $\boxed{\dfrac{V_{C_1}}{i_g'} = -g_{m1} R_9 \cdot \dfrac{(R_1\|R_5)\cdot r_{\pi_1}}{2r_{\pi_1} + R_6 + R_1\|R_5} = -\beta_{o1} R_9 \cdot \dfrac{R_1\|R_5}{2r_{\pi_1} + R_6 + R_1\|R_5}}$

$$r_{\pi_1} = \beta_{o1} \cdot \frac{V_T}{I_{CQ_1}} = 250 \cdot \frac{25\,mV}{0{,}25\,mA} = 250 \cdot 100\,\Omega = 25\,k\Omega$$

$$\frac{V_{C_1}}{i_g'} = -250 \cdot 50\,k\Omega \cdot \frac{1\,k\Omega \| 1{,}5\,k\Omega}{\ldots} = -225{,}62\,k\Omega$$

Portanto: $\boxed{A_Z = \frac{v_o'}{i_g'} = \frac{v_o'}{v_{c_1}} \cdot \frac{v_{c_1}}{i_g'} = (0{,}55) \cdot (-225{,}62\ k\Omega) = -124\ k\Omega}$

3. Cálculo de v_o/v_g, Z_1, Z_2, Z_3 y Z_4.

El Amplificador realimentado que hemos obtenido es:

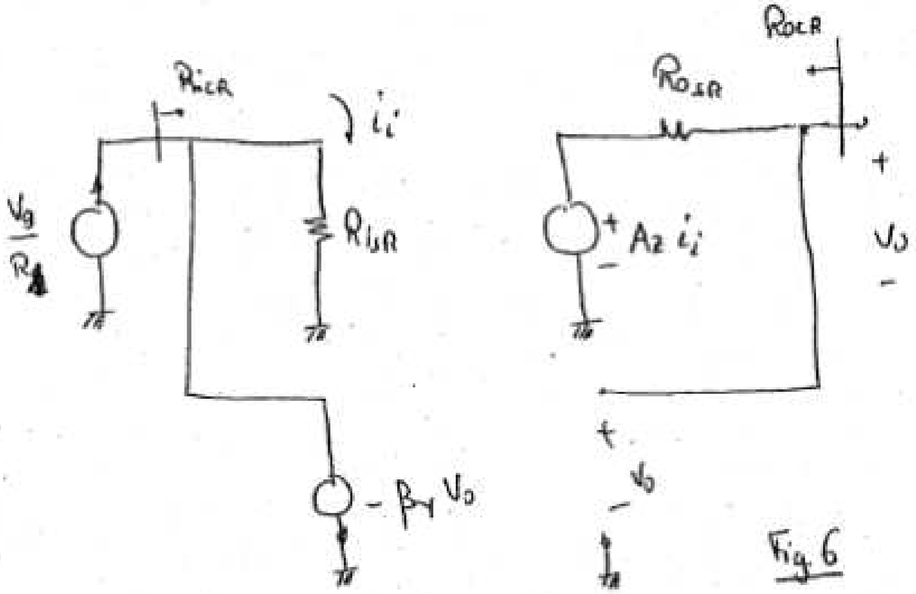


Fig. 6

Siendo: $\boxed{R_{isR}} = R_1 || R_5 || (r_{\pi_1} + r_{\pi_2} + R_6) = 1k\Omega || 15k\Omega || \frac{25k\Omega + 25k\Omega + 1k\Omega}{51k\Omega} \simeq 0{,}92$

$\boxed{R_{osR}} = R_5 || R_7 || R_8 || \left(\frac{r_{\pi_4} + R_9}{1 + \beta_{o4}}\right) = 15k\Omega || 0{,}5k\Omega || 0{,}5k\Omega || \left(\frac{1{,}6k\Omega + 50k\Omega}{1 + 250}\right) \simeq$

$A_Z = -124\ k\Omega$

$\beta_Y = -0{,}067\ \frac{1}{k\Omega}$

$A_Z \beta_Y = (-124\ k\Omega) \cdot \left(-0{,}067 \frac{1}{k\Omega}\right) =$

El Amplificador realimentado semejante es:

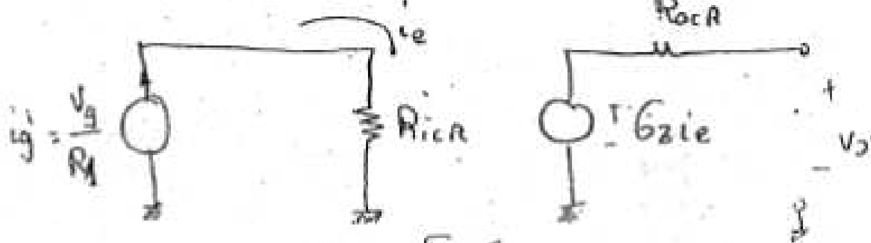


Fig. 7

6

En donde tenemos:

$$\boxed{R_{icR} = \frac{R_{isR}}{1+A_Z\beta_Y} = \frac{0{,}92\,k\Omega}{1+8{,}3} \simeq 98\,\Omega}$$

$$\boxed{R_{ocR} = \frac{R_{osR}}{1+A_Z\beta_Y} = \frac{0{,}11\,k\Omega}{1+8{,}3} = 11{,}8\,\Omega}$$

$$\boxed{G_Z = \frac{A_Z}{1+A_Z\beta_Y} = \frac{-124\,k\Omega}{1+8{,}3} = -13{,}3\,k\Omega}$$

ⓐ El cálculo de v_o/v_g se realiza a través de la siguiente transformación en el Amplificador realimentado de la Fig. 7

$$\boxed{\frac{V_o}{V_g} = \frac{V_o}{i_g'} \times \frac{i_g'}{V_g} = G_Z \times \frac{1}{R_1} = \frac{-13{,}3\,k\Omega}{1\,k\Omega} = -13{,}3}$$

ⓑ Para el cálculo de Z_1 y Z_2 utilizamos el circuito de la Fig. 7 y el del enunciado del problema Figura 3.

$\Longleftrightarrow$

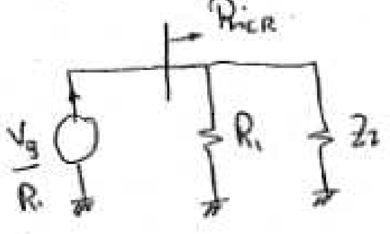


Figura 3 (Enunciado del Problema)

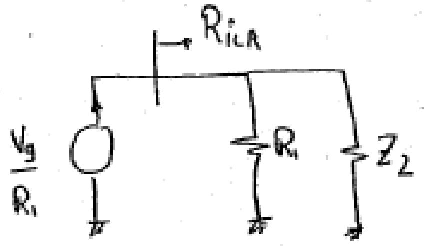
Fig. 7

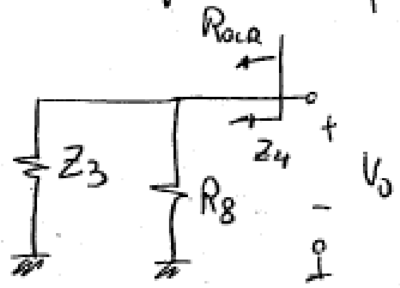
$$R_{icR} = R_1 \| Z_2 = \frac{R_1 \times Z_2}{R_1 + Z_2} \rightarrow \begin{array}{l} R_{icR} R_1 + R_{icR} Z_2 = R_1 \times Z_2 \\ Z_2 (R_1 - R_{icR}) = R_{icR} R_1 \end{array}$$

$$\boxed{Z_2 = \frac{R_1 R_{icR}}{R_1 - R_{icR}} = \frac{1\,k\Omega \cdot 98\,\Omega}{1\,k\Omega - 98\,\Omega} \simeq 108\,\Omega}$$

ⓒ $\boxed{Z_4 = R_{OCR}\Big|_{\text{ver Fig. 7}} = 11{,}8\,\Omega}$

Para el cálculo de Z_3 utilizamos el siguiente esquema circuit
similar al de la entrada





$$Z_4 = Z_3 \parallel R_8 = \frac{Z_3 \times R_8}{Z_3 + R_8} \rightarrow Z_3 Z_4 + Z_4 R_8 = Z_3 \times R_8$$

$$Z_3 (R_8 - Z_4) = Z_4 R_8$$

$$Z_3 = \frac{Z_4\, R_8}{R_8 - Z_4} = \frac{500\,\Omega \times 11{,}8\,\Omega}{500\,\Omega - 11{,}8\,\Omega}$$

$$\boxed{Z_3 = 12\,\Omega}$$