

SISTEMAS ELECTRÓNICOS

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

Ejercicios propuestos Tema 2:
“Circuitos Electrónicos Realimentados”

The logo for Cartagena99 features the text 'Cartagena99' in a stylized, blue, serif font. The text is set against a light blue, starburst-like background that tapers to the right. Below the text is a horizontal orange bar with a slight gradient and a drop shadow effect.

**CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70**

**ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70**

EJERCICIO 1

Dado el amplificador realimentado de la figura 1:

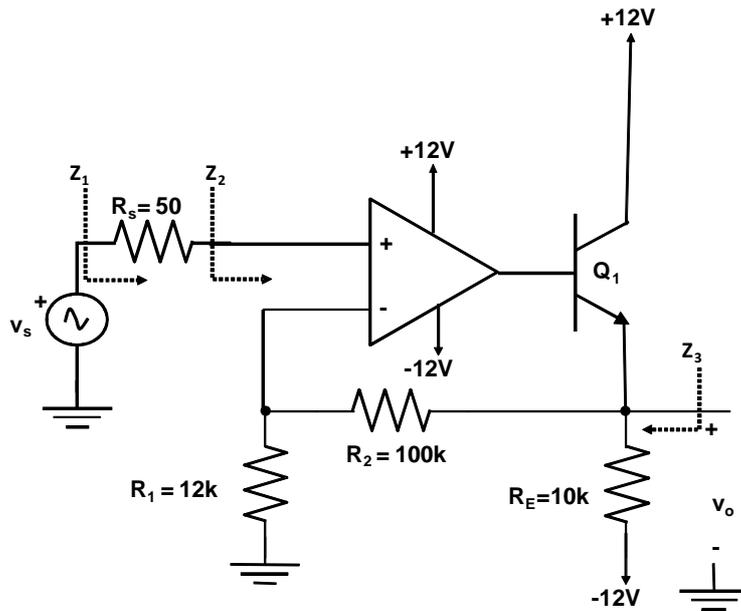


Figura 1

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:

$$\beta = 150$$

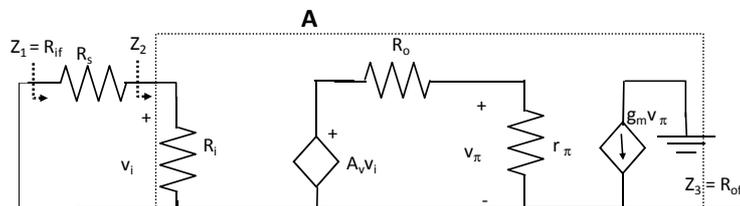
$$g_m = 50m\Omega^{-1}, r_o = r_{ce} \rightarrow \infty$$

SE PIDE:

- 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.
- Dibuje la estructura idealizada para esta topología.
- Obtenga la red A idealizada (A') y calcule su ganancia y sus resistencias de entrada y salida a frecuencias medias.
- Calcule la ganancia de la red β .
- Determine v_o/v_s , Z_1 , Z_2 y Z_3 a frecuencias medias.

SOLUCIÓN

- 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.**



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

β

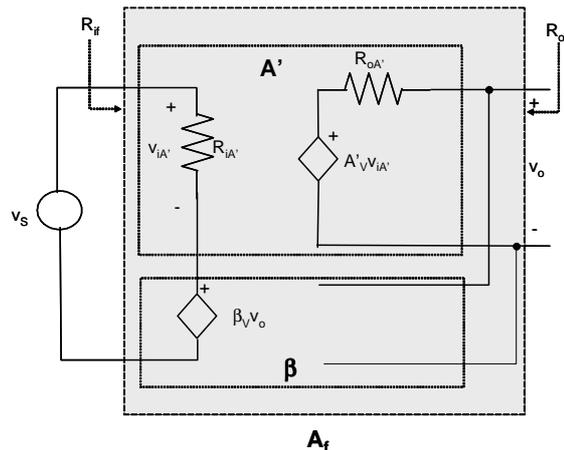
Cartagena99

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:

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

b) Dibuje la estructura idealizada para esta topología.

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



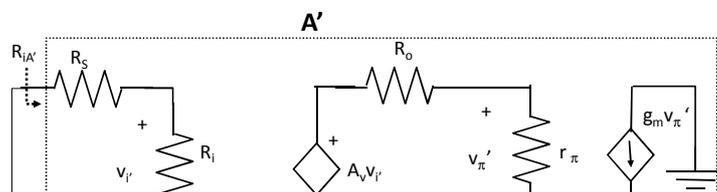
c) Obtenga la red A idealizada (A') y calcule su ganancia y sus resistencias de entrada y salida a frecuencias medias.

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:



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Analizando el circuito se tiene:



$$\left. \begin{aligned} v_o' &= A_v v_i' \cdot \frac{(R_{22} \parallel R_E) \cdot (\beta + 1)}{R_o + r_\pi + (R_{22} \parallel R_E) \cdot (\beta + 1)} \\ v_i' &= v_s' \cdot \frac{R_i}{R_s + R_i + R_{11}} \end{aligned} \right\}$$

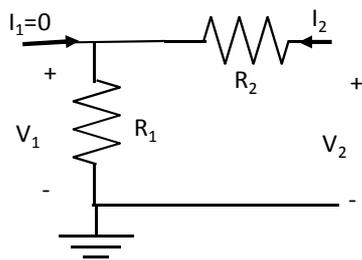
$$\Rightarrow A_v' = \frac{v_o'}{v_s'} = A_v \cdot \frac{(R_{22} \parallel R_E) \cdot (\beta + 1)}{R_o + r_\pi + (R_{22} \parallel R_E) \cdot (\beta + 1)} \cdot \frac{R_i}{R_s + R_i + R_{11}} \cong A_v = 2 \cdot 10^5 \left[\frac{V}{V} \right]$$

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 muestra 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} :

$$A_{fv} = \frac{v_o}{v_s} = \frac{A_v'}{1 + A_v' \beta_v} = \frac{2 \cdot 10^5}{1 + 21.4 \cdot 10^3} \cong \frac{1}{\beta} = 9.3 \frac{V}{V} \text{ ya que } A_v' \beta_v \gg 1.$$

- 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:

$$R_{of} = Z_3 = \frac{R_{oA}'}{\beta} \cong 10.3m\Omega$$

**CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70**

**ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70**



EJERCICIO 2

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

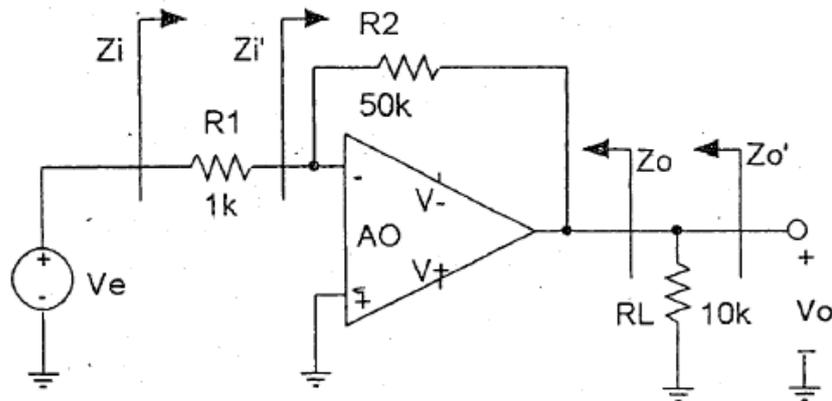


Figura 4

Se pide:

- Suponiendo ideal el AO ($R_i \rightarrow \infty$, $R_o \rightarrow 0$, $A_v \rightarrow \infty$), calcule la función de transferencia V_o/V_e . Justifique las aproximaciones que haga.
- Vamos a suponer ahora que el AO es real ($R_i=500k\Omega$, $R_o=200\Omega$, $A_v=80dB$). En estas condiciones el circuito total es un amplificador realimentado. Se pide:
 - 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.
 - Indique el tipo de topología, la función que estabiliza y sus parámetros privilegiados.
 - Obtenga las redes A' y β equivalentes utilizando el método aproximado.
- A partir del resultado anterior, calcule:
 - El valor de A' y β
 - V_o/V_e
 - Z_i , Z_i' , Z_o y Z_o'

DATOS:

$$R_1 = 1 \text{ K}\Omega$$

$$R_2 = 50 \text{ K}\Omega$$

$$R_L = 10 \text{ K}\Omega$$

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

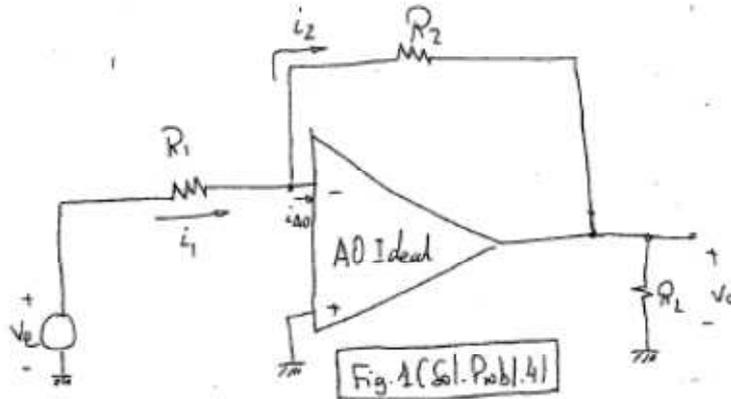
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Cartagena99

SOLUCIÓN:

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

$$R_i = \infty \Omega, R_o = 0 \Omega \text{ y } A_v = \infty$$



Si el Amplificador Operacional es ideal:

$$(1) \quad i_1 = i_2 + i_{Ao} \rightarrow \text{Si } R_i = \infty \rightarrow i_{Ao} = 0$$

$$\text{Por tanto } \boxed{i_1 = i_2}$$

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

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

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

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

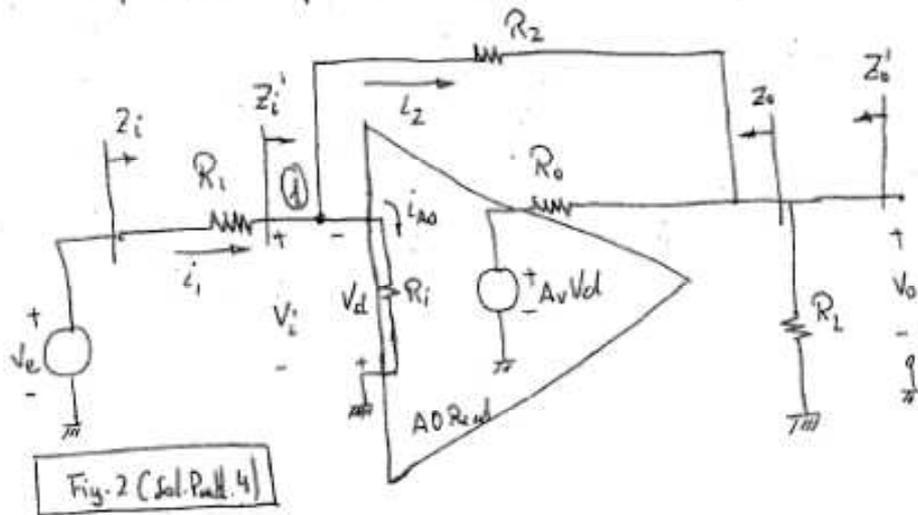
Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

2.- Amplificador Operacional Real

(2)



a) Demostración de Realimentación Negativa:

$$V_e \uparrow \rightarrow \frac{V_i - V_o}{R_2} = i_2 \downarrow \quad \text{En el nodo 1 se tiene: } i_1 = i_{Ao} + i_2 \rightarrow i_{Ao} \uparrow$$

- ① Señal de muestra a la salida
 ② Red de realimentación β
 ③ Comparador de corriente a la entrada

$$V_d = -i_{Ao} R_i \quad V_o \downarrow \quad \text{Realimentación negativa}$$

- ① Se muestra la tensión de salida (V_o)
- ② Se compara a la entrada corriente (V_o en nodo 1)
- ③ La señal β que permite pasar de tensión a la salida (V_o) a comparar una corriente a la entrada es la resistencia R_2 mediante i_2 .

b) - ① Paralelo-Paralelo: Muestra de tensión (salida) y comparación de corriente (entrada)

② Transimpedancia:
$$G_2 = \frac{A_2}{1 + A_2 \beta_v}$$

③ Parámetros 4

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Cartagena99

c) Partiendo del circuito de la **Figura 2 (Sol. Probl. 4)** tenemos: **(3)**

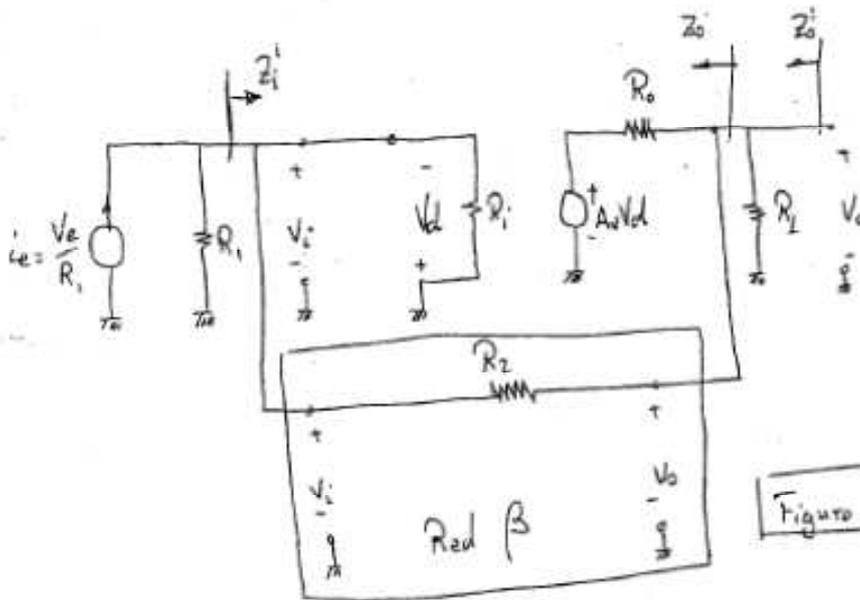


Figura 3 (Sol. Probl. 4)

Para obtener la red A' analizamos la red β :

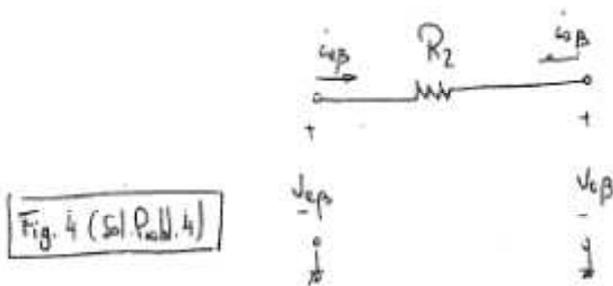


Fig. 4 (Sol. Probl. 4)

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

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

$$\left. \begin{aligned} \text{Siendo } y_{11\beta} &= \frac{i_{\beta}}{v_{\beta}} \Big|_{v_{\beta}=0} = 1/R_2 \\ y_{22\beta} &= \frac{i_{\beta}}{v_{\beta}} \Big|_{v_{\beta}=0} = 1/R_2 \end{aligned} \right\}$$

$$e \quad y_{12\beta} = \frac{i_{\beta}}{v_{\beta}} \Big|_{v_{\beta}=0} = -\frac{1}{R_2} = \beta_T$$

Efecto de carga de la red β en la red A

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Por tanto, como sea A' tenemos el siguiente circuito:

(4)

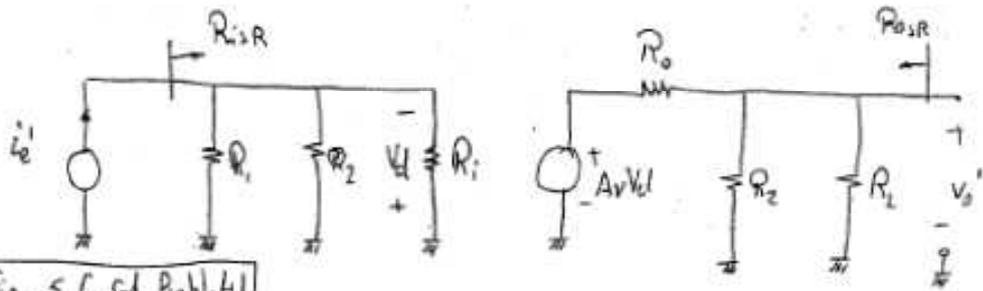


Fig. 5 (Sol. Probl. 4)

3.- a) Valor de A' y β

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

$$A' = \frac{v_o'}{i_e'} = \frac{v_o'}{v_d} \times \frac{v_d}{i_e'} \quad \text{①} \quad \frac{v_o'}{A_v v_d} = \frac{R_2 \parallel R_L}{R_0 + R_2 \parallel R_L} \rightarrow \boxed{\frac{v_o'}{v_d} = A_v \frac{R_2 \parallel R_L}{R_0 + R_2 \parallel R_L}}$$

$$\text{②} \quad \boxed{\frac{v_d}{i_e'} = - R_i \parallel R_1 \parallel R_2}$$

Por tanto, $A' = A_z = A_v \left(\frac{R_2 \parallel R_L}{R_0 + R_2 \parallel R_L} \right) \times \left(- \frac{R_i \parallel R_1 \parallel R_2}{1} \right)$

$$\frac{3.23 \text{ k}\Omega}{0.2 \text{ k}\Omega + 3.33 \text{ k}\Omega} = 0.976 \quad \frac{500 \text{ k}\Omega \parallel 1 \text{ k}\Omega \parallel 50 \text{ k}\Omega}{1 \text{ k}\Omega}$$

$$\boxed{A_z = - 10^4 \cdot 0.976 \cdot 1 \text{ k}\Omega = - 9760 \text{ k}\Omega}$$

Además tenemos: $\boxed{R_{i\beta} = R_i \parallel R_1 \parallel R_2 = 1 \text{ k}\Omega = R_i}$

$$\boxed{R_{o\beta} = R_0 \parallel R_2 \parallel R_L = 50 \text{ k}\Omega \parallel 100 \text{ k}\Omega \parallel 200 \Omega = 195 \Omega \approx 200 \Omega}$$

$$\boxed{R_{o\beta} \approx R_0}$$

$$\text{2) } \boxed{\beta = \frac{v_o'}{v_d} = - \frac{1}{1} = - 1 = - 0.02 \cdot 10^{-3} \text{ A} = - 0.02 \text{ A}}$$



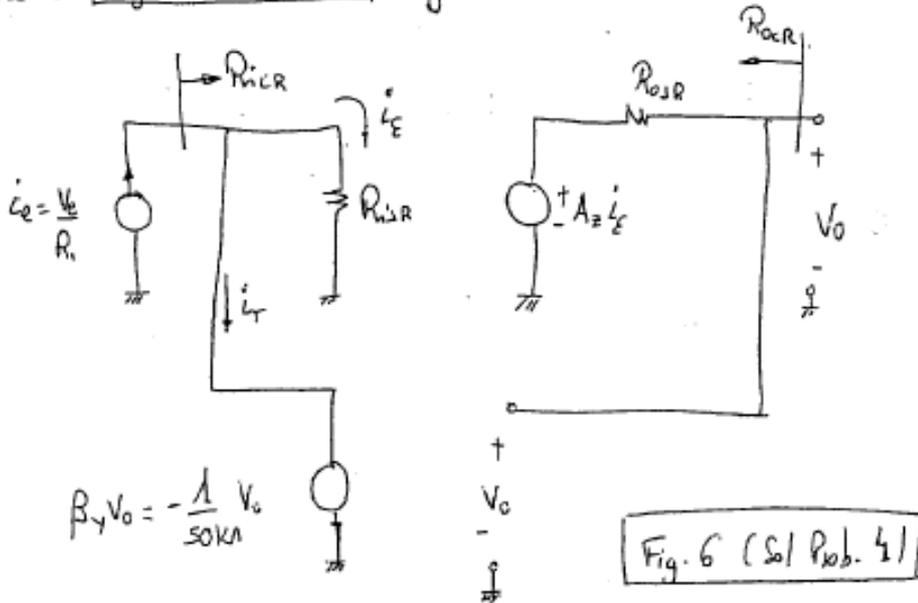
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

 ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

b). - V_o/V_e

(5)

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:



$$\frac{V_o}{i_e} = G_2 = \frac{A_2}{1 + A_2 \beta_v} = \frac{-9760 \text{ k}\Omega}{1 + (-9760 \text{ k}\Omega) \cdot \left(-\frac{1}{50 \text{ k}\Omega}\right)} = \frac{-9760 \text{ k}\Omega}{1 + 195,2}$$

$+ 195,22 = A_2 \beta_v \gg 1$

$$G_2 = -49,74 \text{ k}\Omega \approx -50 \text{ k}\Omega = \frac{1}{\beta_v} = \frac{1}{-\frac{1}{50 \text{ k}\Omega}}$$

$$R_{iCR} = \frac{R_{iSR}}{1 + A_2 \beta_v} = \frac{1 \text{ k}\Omega}{1 + 195,2}$$

$$R_{oCR} = \frac{R_{oSR}}{1 + A_2 \beta_v} = \frac{200 \Omega}{1 + 195,2} = 1 \Omega$$

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70



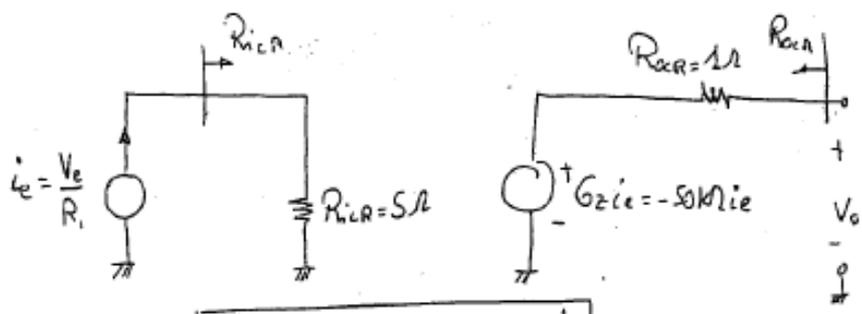


Figura 7 (Sol. Probl. 4)

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

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

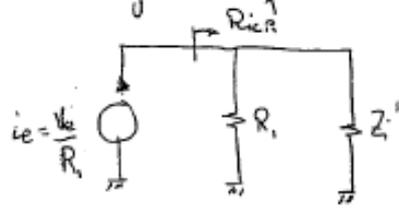


Fig. 8 (Sol. Probl. 4)

$$R_{iCR} = R_i \parallel Z_i' = \frac{R_i \times Z_i'}{R_i + Z_i'}$$

$$R_{iCR} R_i + R_{iCR} Z_i' = R_i \times Z_i'$$

$$Z_i' (R_i - R_{iCR}) = R_i R_{iCR}$$

$$Z_i' = \frac{R_i R_{iCR}}{R_i - R_{iCR}} = \frac{1k \times 5\Omega}{1k - 5\Omega} = \frac{1k \times 5\Omega}{1k} = 5\Omega$$

Siendo $Z_i = R_i + Z_i' = 1k + 5\Omega \approx 1k\Omega$

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)



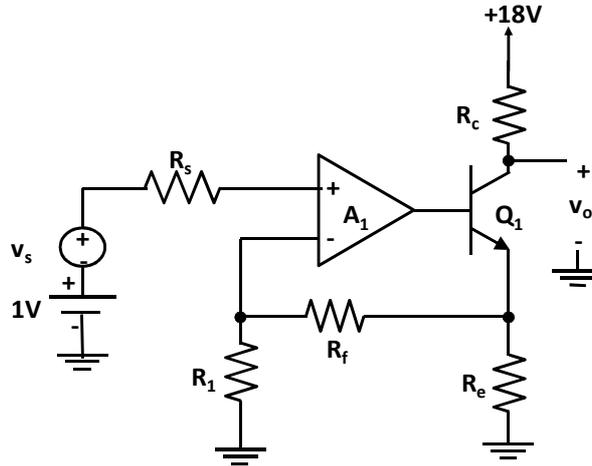
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

EJERCICIO 3

En el amplificador realimentado de la figura se pide:

- Calcular los valores de I_C y V_{CE} del transistor Q_1 .
- Dibujar el circuito equivalente en pequeña señal a frecuencias medias.
- Demostrar que existe realimentación negativa. Identificar el tipo de topología y obtener los circuitos equivalentes de las redes A' y β .
- 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 $R_e = 3.3k\Omega$

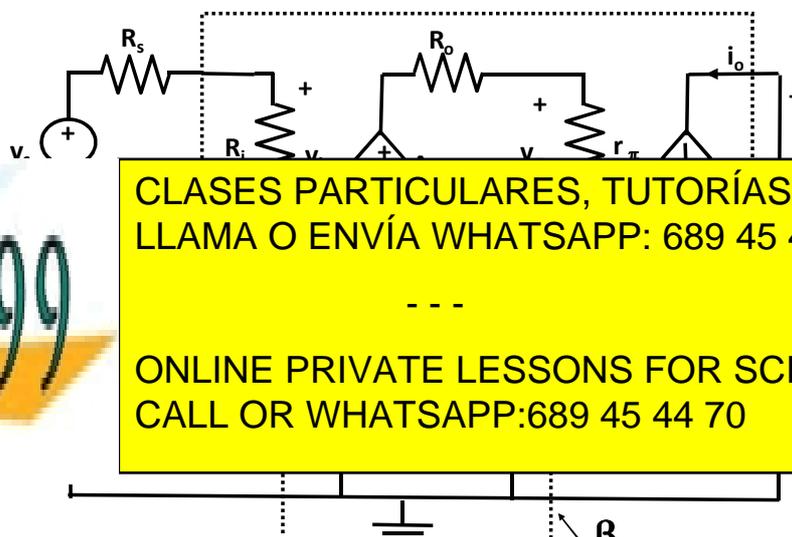
- Calcular los valores de I_C y V_{CE} del transistor Q_1 .

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

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

SOLUCIÓN

- Dibujar el circuito equivalente en pequeña señal a frecuencias medias



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

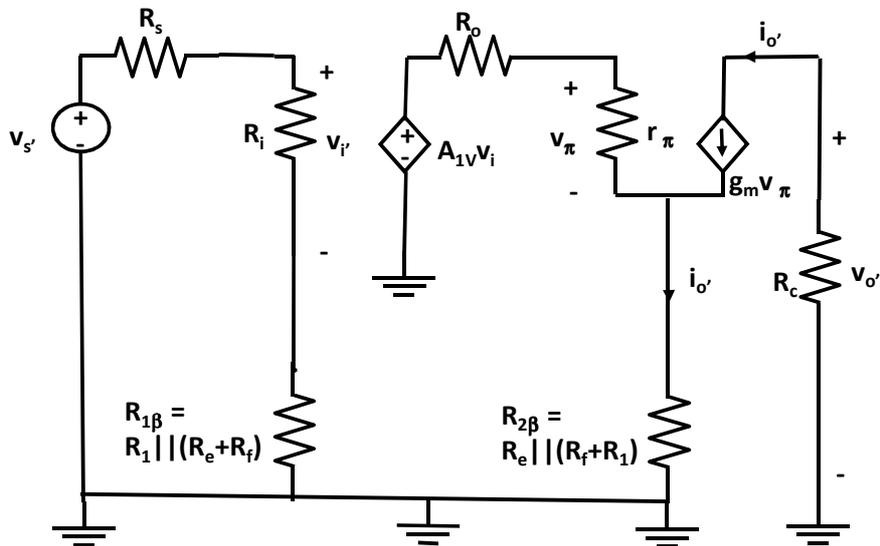
b) Demostrar que existe realimentación negativa. Identificar el tipo de topología y obtener los circuitos equivalentes de las redes A' y β.

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

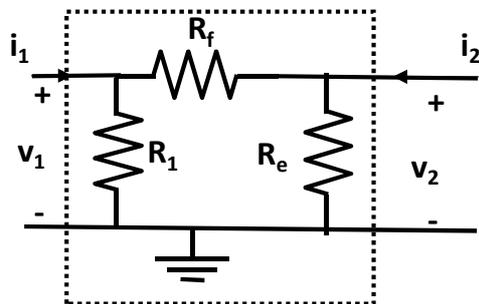
Topología serie (se mezcla tensión a la entrada) -serie (se muestrea corriente a la

salida). $A_{CR} = \frac{i_o}{v_s}$

A':



β:



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

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

$$\beta = \frac{v_1}{v_2} \cong \frac{R_1 \cdot R_e}{R_1 + R_e} \cong 0.55 k\Omega$$

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Cartagena99

EJERCICIO 4

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

- Demuestre que en el circuito de entrada existe una realimentación negativa. ¿De qué tipo es? Indique la función que estabiliza y sus parámetros privilegiados
 - Demuestre que en el circuito de salida existe una realimentación negativa. ¿De qué tipo es? Indique la función que estabiliza y sus parámetros privilegiados.
- Obtenga las redes A' y β , sus expresiones y calcule su valor correspondiente al amplificador realimentado del circuito de entrada con el objeto de calcular I_{demi}/V_{in}
 - Obtenga las redes A' y β , sus expresiones y calcule su valor correspondiente al amplificador realimentado del circuito de entrada con el objeto de calcular V_{out}/I_{fot} .
 - 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.

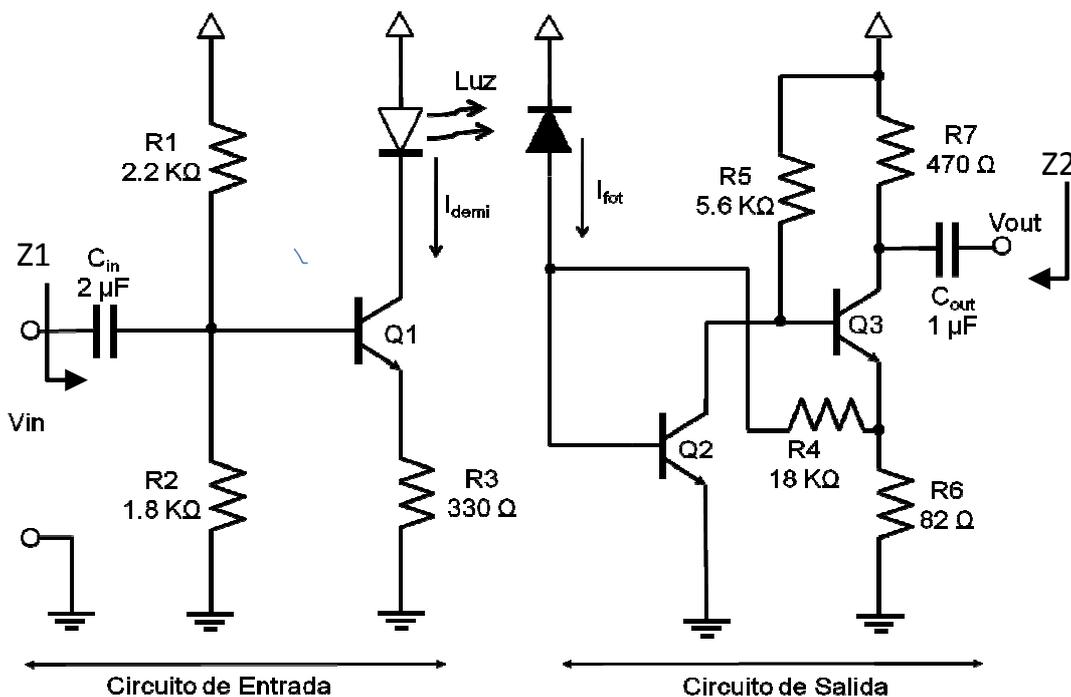


Figura 2

Datos:

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

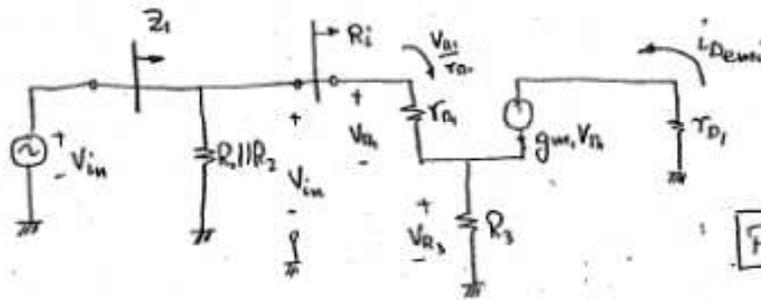
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Cartagena99

0.5 Idemi

SOLUCIÓN

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



Si $i_{Dem} \uparrow \Rightarrow g_m, V_{n1} \uparrow$ Suponiendo $\frac{V_{n1}}{r_{n1}} \ll g_m, V_{n1} \Rightarrow g_m, V_{n1} R_S \approx V_{n1} \uparrow$

$$\underbrace{V_{in}(\text{Causante})}_{\text{Comparador}} = V_{n1} + V_{R_S} \Rightarrow V_{n1} \uparrow \Rightarrow g_m, V_{n1} \uparrow \Rightarrow i_{Dem} \uparrow \quad (R_{D1}, R_{D2})$$

En consecuencia, muestreamos corriente a la salida y comparamos tensión a la entrada \rightarrow (Serie - Serie)

La función que estabiliza es una Transadmittancia: $G_y = \frac{A_T}{1 + A_T \beta_2}$

Los parámetros privilegiados son los \boxed{z} .

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

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

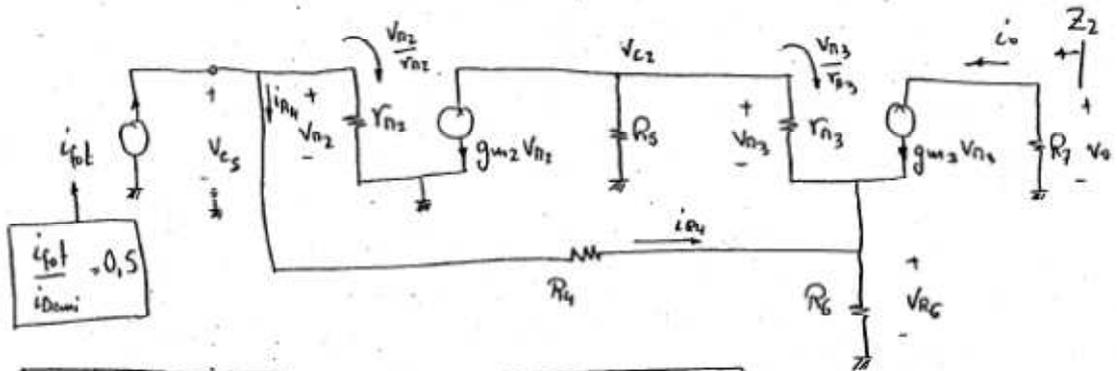


Fig 2. Sol. Problema 4.

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

Si $i_o \uparrow \Rightarrow g_{m3} v_{b3} \uparrow$ Suponiendo $\frac{v_{b3}}{r_{\pi 3}} \ll g_{m3} v_{b3} \Rightarrow g_{m3} v_{b3} R_6 \approx v_{c2} (R_4 \gg R_6) \uparrow$

$$\rightarrow \frac{v_{c1} - v_{R6}}{R_4} = i_{R4} \quad i_{fol} (\text{Constante}) = i_{R4} + \frac{v_{b2}}{r_{\pi 2}} \rightarrow \frac{v_{b2}}{r_{\pi 2}} \uparrow \Rightarrow g_{m2} v_{b2} \uparrow \Rightarrow v_{c1} \uparrow$$

Comparador

$\rightarrow \frac{v_{b3}}{r_{\pi 3}} \uparrow \Rightarrow g_{m3} v_{b3} \downarrow \Rightarrow i_o \downarrow$ (Realimentación Negativa).

En consecuencia, mediremos corriente a la salida y compararemos corriente a la entrada \Rightarrow (Paralelo-Serie)

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

Los parámetros privilegiados son los g .



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

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

(a.1.- La Red β correspondiente al circuito de entrada es Fig. 3. Sol. Probl. 4

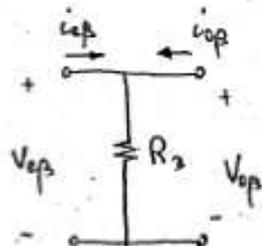


Fig. 3 Sol. Probl. 4

$$V_{ep} = Z_{11\beta} i_{ep} + Z_{12\beta} i_{op}$$

$$V_{op} = Z_{21} i_{ep} + Z_{22\beta} i_{op}$$

$$Z_{11\beta} = \left. \frac{V_{ep}}{i_{ep}} \right|_{i_{op}=0} = R_3$$

$$Z_{22\beta} = \left. \frac{V_{op}}{i_{op}} \right|_{i_{ep}=0} = R_3$$

$$Z_{12\beta} = \left. \frac{V_{ep}}{i_{op}} \right|_{i_{ep}=0} = R_3 = \beta_2$$

Por tanto, $\beta_2 = R_3 = 330 \Omega$

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

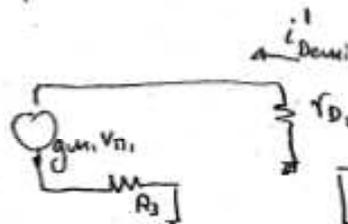
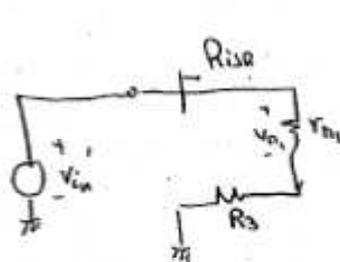


Fig. 4 Sol. Probl. 4

(1) $i_{Demi} = g_m V_{n1}$

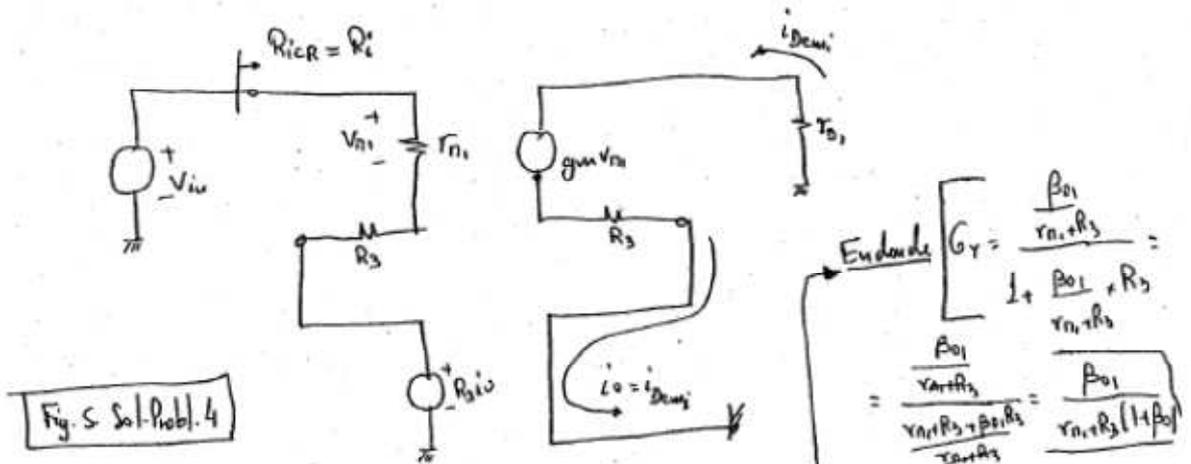
Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Por tanto,
$$A_v = g_{m1} \times \frac{r_{n1}}{r_{n1} + R_E} = \frac{\beta_{01}}{r_{n1} + R_E} = \frac{100}{500\Omega + 330\Omega} = \boxed{0,12 \frac{1}{\Omega}} \quad (5)$$

a.3.- Calcular la expresión $\frac{i_{Dem1}}{V_{in}}$



En este Circuito:

$$\frac{i_{Dem1}}{V_{in}} = G_Y = \frac{A_1}{1 + A_1 \beta_2} = \frac{0,12 \frac{1}{\Omega}}{1 + 0,12 \frac{1}{\Omega} + 330\Omega} = \frac{0,12 \frac{1}{\Omega}}{39,8}$$

$$\frac{i_{Dem1}}{V_{in}} = \frac{0,12 \frac{1}{\Omega}}{1 + 39,8} = 0,0029 \frac{1}{\Omega} = G_Y$$

Teniendo en cuenta que $A_1 \beta_2 \gg 1 \rightarrow G_Y \approx \frac{1}{\beta_2} = \frac{1}{330\Omega} = 0,0031 \frac{1}{\Omega}$

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

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

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

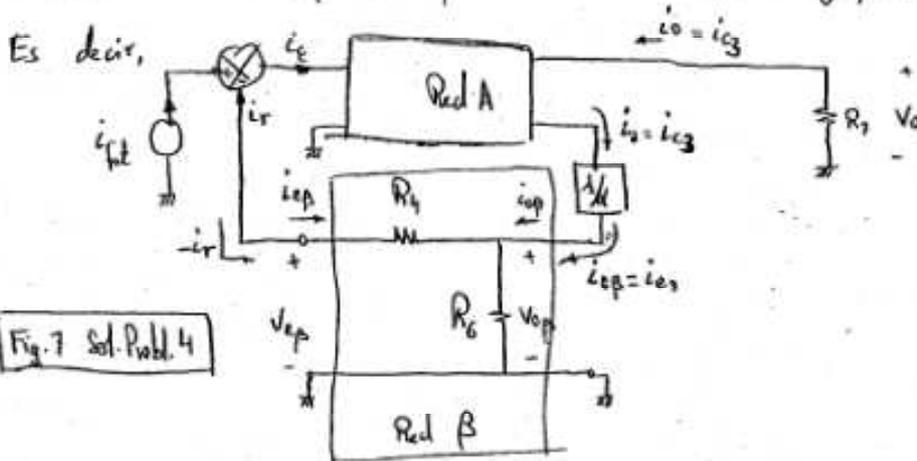
Cartagena99

$$\text{Siendo } g_{np} = \left. \frac{i_{cp}}{v_{cp}} \right|_{i_{cp}=0} = \frac{1}{R_4 + R_6} \quad (6)$$

$$g_{zp} = \left. \frac{v_{cp}}{i_{cp}} \right|_{v_{cp}=0} = R_4 \parallel R_6$$

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

Para el cálculo de β_I debemos estudiar en el circuito de la **Fig. 2 Sol. Problema 1** la relación entre i_{cp} e i_o en vez de la relación entre i_{cp} e i_{op} obtenida mediante g_{12p} **Fig. 6 Sol. Probl. 4**.

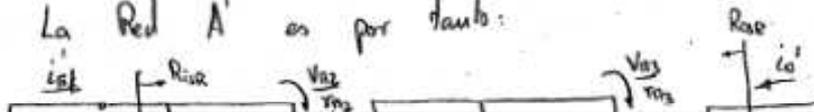


Por tanto,

$$\beta_I = \frac{i_{cp}}{i_o} = \frac{i_{cp}}{i_{cp}} \times \frac{i_{cp}}{i_o} = -g_{12p} \times \frac{i_{cp}}{i_{cp}} = -g_{12} \times \frac{1}{\alpha}$$

$$\beta_I = -\frac{82 \Omega}{18000 \Omega + 82 \Omega} \times \frac{1}{\frac{100}{10A}} = -0,0046A \approx -0,005 \frac{A}{A}$$

6. 2.- La Red A' es por tanto:



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Cartagena99

$$A_z = \frac{i_o'}{i_{tot}'} = \frac{i_o'}{v_{n3}} \times \underbrace{\frac{v_{n3}}{v_{n2}}}_{(2)} \times \underbrace{\frac{v_{n2}}{i_{tot}'}}_{(3)} \quad (7)$$

Siendo: (1) $i_o' = g_{m3} v_{n3} \rightarrow \boxed{\frac{i_o'}{v_{n3}} = g_{m3}}$

(2) $\frac{v_{n3}}{v_{n2}} = -g_{m2} v_{n2} \times \frac{R_5}{R_5 + r_{n3} + (R_4 \parallel R_6)(1 + \beta_{o3})}$

$$\boxed{\frac{v_{n3}}{v_{n2}} = -g_{m2} r_{n3} + \frac{R_5}{R_5 + r_{n3} + (R_4 \parallel R_6)(1 + \beta_{o3})}}$$

(3) $\frac{v_{n2}}{i_{tot}'} = \frac{R_4 + R_6}{R_4 + R_6 + r_{n2}}$

$$\frac{v_{n2}}{i_{tot}'} = \frac{r_{n2} \times (R_4 + R_6)}{R_4 + R_6 + r_{n2}} = r_{n2} \parallel (R_4 + R_6)$$

Por tanto, $A_z = (g_{m3} \times (-g_{m2} r_{n3}) \times \frac{R_5}{R_5 + r_{n3} + (R_4 \parallel R_6)(1 + \beta_{o3})}) \times \frac{r_{n2} \times (R_4 + R_6)}{R_4 + R_6 + r_{n2}}$

$$A_z = -\beta_{o2} \beta_{o3} \times \left(\frac{R_5}{R_5 + r_{n3} + (R_4 \parallel R_6)(1 + \beta_{o3})} \right) \times \left(\frac{R_4 + R_6}{R_4 + R_6 + r_{n2}} \right)$$

$$\left(\frac{5,6 \text{ k}\Omega}{5,6 \text{ k}\Omega + 342 \Omega + \frac{18 \text{ k}\Omega \parallel 82 \Omega (101)}{82 \Omega}} \right) \times \frac{18 \text{ k}\Omega + 82 \Omega}{18 \text{ k}\Omega + 82 \Omega + 3,7 \text{ k}\Omega} = 0,83$$

$$\boxed{0,39}$$

$$\boxed{A_z = -100 \times 100 \times 0,39 \times 0,83 = -3237,5 \frac{V}{V}}$$

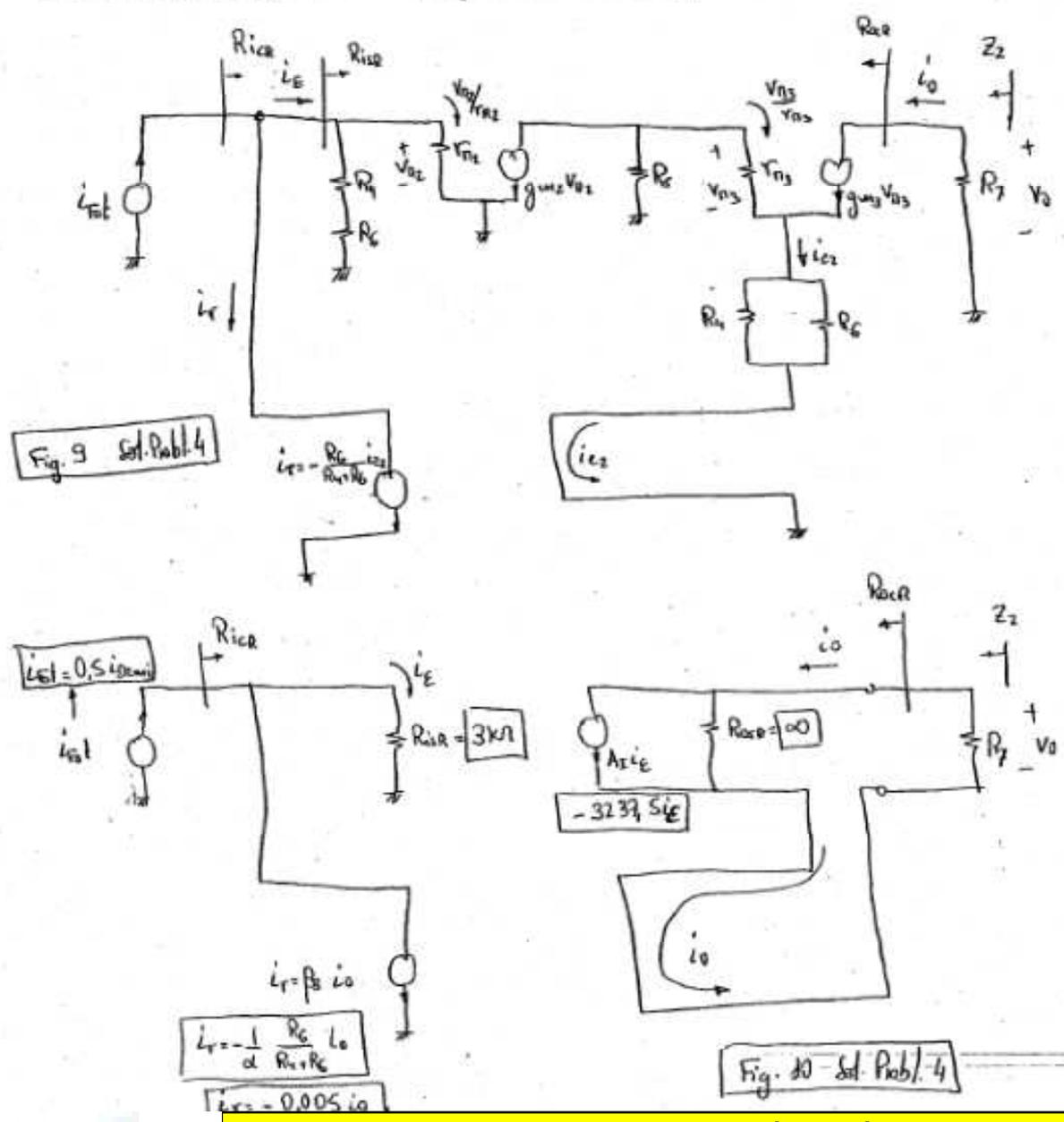
Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

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

Partiendo del circuito de la Fig. 2, Sol. Problema 4 y utilizando el circuito de la Red A' (Fig. 8, Sol. Probl. 4) en el esquema de circuitos realimentados de la Fig. 7 Sol. Probl. 4, tenemos:



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70



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

(9)

$$\frac{V_o}{i_{tot}} = \frac{V_o}{i_o} \times \frac{i_o}{i_{tot}} = -R_T \times G_T = -470 \Omega \times (-188,4 \text{ A/A})$$

$$\frac{V_o}{i_{tot}} = 95,7 \text{ k}\Omega$$

3E). Obtener las expresiones y calcular los valores de $\frac{V_o}{V_{in}}$, Z_1 , y Z_2 .

$$\textcircled{1} \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{V_o}{i_{tot}} \times \frac{i_{tot}}{i_{Demi}} \times \frac{i_{Demi}}{V_{in}} = 88,5 \text{ k}\Omega \times 0,5 \times 0,003 \frac{1}{\Omega}$$

~~$$\frac{V_o}{V_{in}} = 132,5 \text{ V/V}$$~~

$$\frac{V_o}{V_{in}} = 143,6 \frac{\text{V}}{\text{V}}$$

Nota: Este valor de $\frac{V_o}{V_{in}}$ se puede aproximar utilizando las expresiones de $G_T \approx \frac{1}{\beta_2} \mid A_2 \beta_2 \gg 1$ y $G_T \approx \frac{1}{\beta_2} \mid A_1 \beta_2 \gg 1$

Es decir, $\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{V_o}{i_{tot}} \times \frac{i_{tot}}{i_{Demi}} \times \frac{i_{Demi}}{V_{in}} = \frac{V_o}{i_o} \times \frac{i_o}{i_{tot}} \times 0,5 \times \frac{i_{Demi}}{V_{in}}$

$$\frac{V_o}{V_{in}} = -R_T \times \frac{1}{\beta_2} + \frac{1}{\beta_2} \times 0,5 = -R_T \times \frac{1}{-\frac{1}{\alpha} \frac{R_C}{R_4 + R_6}} + \frac{1}{R_3} \times 0,5$$

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

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

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

② Para el cálculo de Z_1 , utilizamos el circuito de la Fig. 1, Sol. Problema 4⁽¹⁰⁾:

$$\boxed{Z_1 = R_1 \parallel R_2 \parallel R_i}$$

Siendo $R_i = R_{iCA}$ (Ver Circuito Fig. 5, Sol. Probl. 4)

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

$$\boxed{R_{iCA} = R_{iSA} (1 + A_v \beta_2)}$$

Siendo $R_{iSA} = r_{n1} + R_3$ (Ver Circuito Fig. 4, Sol. Probl. 4)

$$\text{Por tanto, } R_{iCA} = (r_{n1} + R_3) \left(1 + \frac{\beta_{01}}{r_{n1} + R_3} \times R_3 \right) =$$

$$R_{iCA} = r_{n1} + R_3 + \left(\frac{\beta_{01}}{r_{n1} + R_3} \times R_3 \right) (r_{n1} + R_3) = r_{n1} + R_3 + \beta_{01} R_3$$

$$\boxed{R_i = R_{iCA} = r_{n1} + R_3 (1 + \beta_{01}) = 0,5 \text{ k}\Omega + 330 \Omega (1 + 100) = 33,83 \text{ k}\Omega}$$

$$\text{En consecuencia, } \boxed{Z_1 = \frac{2,2 \text{ k}\Omega \parallel 1,8 \text{ k}\Omega}{0,99 \text{ k}\Omega} \parallel 33,83 \text{ k}\Omega = 0,96 \text{ k}\Omega \approx R_1 \parallel R_2 = 0,99 \text{ k}\Omega}$$

③ Para el cálculo ^{de Z_2} utilizamos el circuito de la Fig. 2, Sol. Probl. 4 y el de la Figura 10 Sol. Problema 4. Partiendo de este último circuito

obtenemos: $Z_2 = R_7 \parallel R_{oCA} = R_7 \parallel R_{oSA} (1 + A_v \beta_2) = R_7 \parallel \infty (1 + A_v \beta_2) = R_7$

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

$$4.- \quad \boxed{f_{ci} = \frac{1}{2\pi \cdot 2\mu\text{F} (R_g + Z_1)} = \frac{1}{2\pi \cdot 2\mu\text{F} (Z_1)} = \frac{1}{2\pi \cdot 2\mu\text{F} \cdot 0,96 \text{ k}\Omega} \approx 83 \text{ Hz}}$$

$|R_g = 0 \Omega$

11. No se tiene en cuenta el efecto del condensador de $1\mu\text{F}$ en el

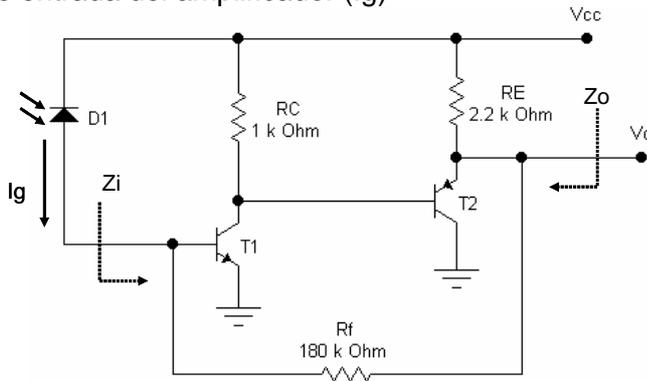
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Cartagena99

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 (I_g)



DATOS:

T1, T2:

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

$$|V_{CE(\text{sat})}| = 0,2V$$

$$\beta = 200$$

$$V_T = 26 \text{ mV}$$

$$r_{\pi} = |\beta V_T / I_c|$$

$$g_m = |I_c / V_T|$$

$$r_o \rightarrow \infty$$

$$V_{CC} = 6 \text{ V}$$

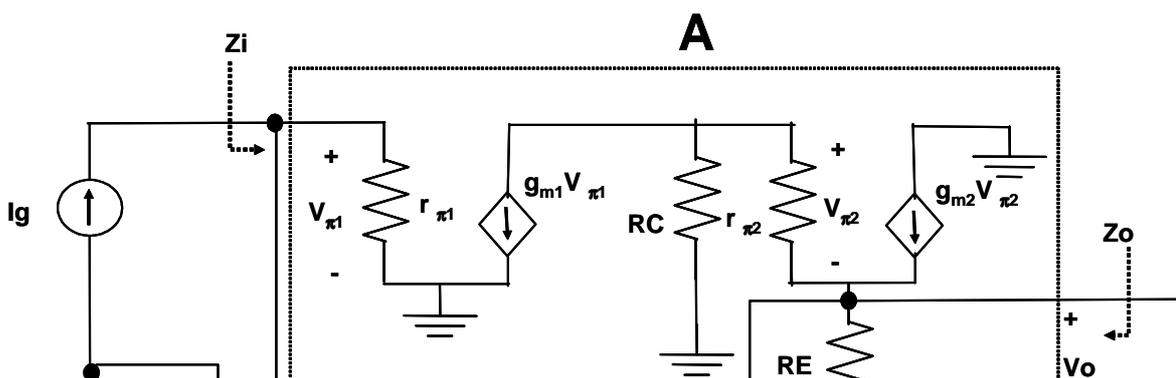
SE PIDE:

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

- Obtenga y represente el esquema para pequeña señal del amplificador, a frecuencias medias.
- 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.
- Obtenga las redes A y β idealizadas (A' y β') y la ganancia V_o/I_g .
- Obtenga el valor de las impedancias Z_i y Z_o marcadas en el esquemático del amplificador.

SOLUCIÓN

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



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70



Cartagena99

donde:

$$g_{m1} = \frac{I_{C1}}{V_T} = \frac{3mA}{26mV} \cong 0.1154S = g_m \quad r_{\pi1} = \frac{V_T}{I_{B1}} = \frac{\beta \cdot V_T}{I_{C1}} = \frac{200 \cdot 26mV}{3mA} \cong 1.7k\Omega = r_{\pi}$$

$$g_{m2} = \frac{I_{C2}}{V_T} = \frac{3mA}{26mV} \cong 0.1154S = g_m \quad r_{\pi2} = \frac{V_T}{I_{B2}} = \frac{\beta \cdot V_T}{I_{C2}} = \frac{200 \cdot 26mV}{3mA} \cong 1.7k\Omega = r_{\pi}$$

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.

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

Red β : Rf

Red A: Resto.

Topología PARALELO-PARALELO (Transimpedancia):

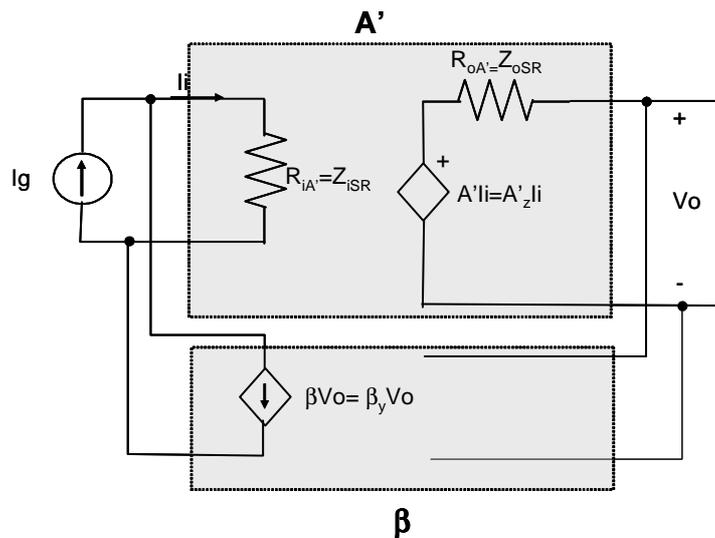
Entrada: Conexión paralelo, se realimenta corriente, la magnitud común es tensión

Salida: Conexión paralelo, se muestrea tensión, la magnitud común es tensión.

Función de transferencia genérica red A: V_o/I_i [V/A] (A_z)

Función de transferencia genérica red β : I_f/V_o [A/V] (β_y)

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 V_o/I_g .

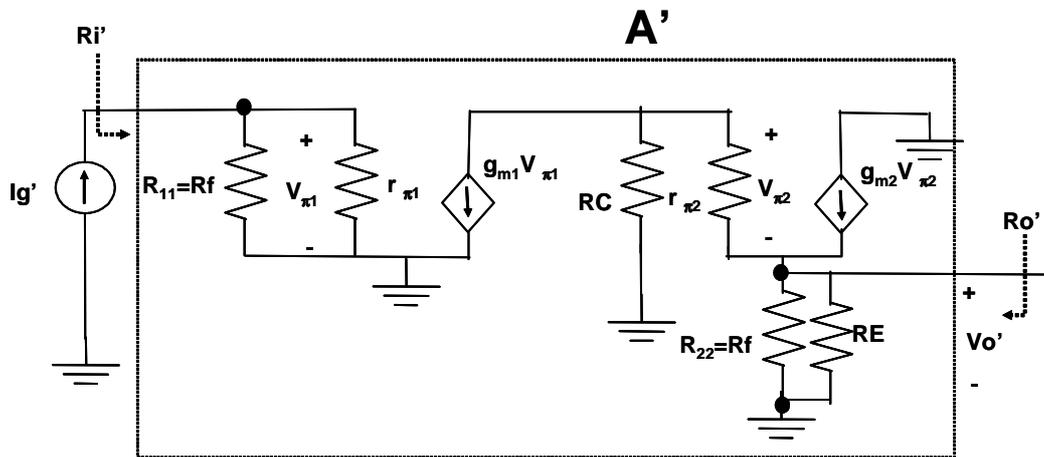
Para construir la red A' añadimos los efectos de carga de la fuente, carga y de la red β a la entrada y la salida.

Para hallar el efecto de carga de la red β a la entrada (R_{11}), calculamos la impedancia que se

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Cartagena99



Analizando el circuito:

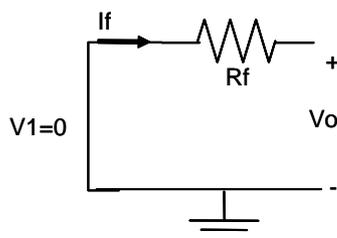
$$\left. \begin{aligned} \frac{V_{o'}}{v_{\pi 2}} &= \left(\frac{RE \parallel R_{22}}{r_{\pi}} \right) \cdot (\beta + 1) \cong gm \cdot RE \cong 254 \\ \frac{v_{\pi 2}}{v_{\pi 1}} &= -\frac{g_m \cdot r_{\pi} \cdot RC}{RC + r_{\pi} + (R_{22} \parallel RE) \cdot (\beta + 1)} \cong -\frac{RC}{RE} \cong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

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

$$Ri' = R_{11} \parallel r_{\pi} \cong r_{\pi} = 1.7k\Omega$$

$$Ro' = RE \parallel R_{22} \parallel \frac{r_{\pi} + RC}{\beta + 1} \cong \frac{r_{\pi} + RC}{\beta + 1} \cong 13.4\Omega$$

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 muestra a la salida del amplificador) anulando la magnitud común en la conexión de entrada. En este caso nos queda:

$$\beta = \frac{I_f}{V_{o1=0}} = -\frac{1}{R_f} = -\frac{1}{180k\Omega} \cong -0.0056 \cdot 10^{-3} \left[\frac{A}{V} \right] = -5.6 \mu S$$

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

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

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

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

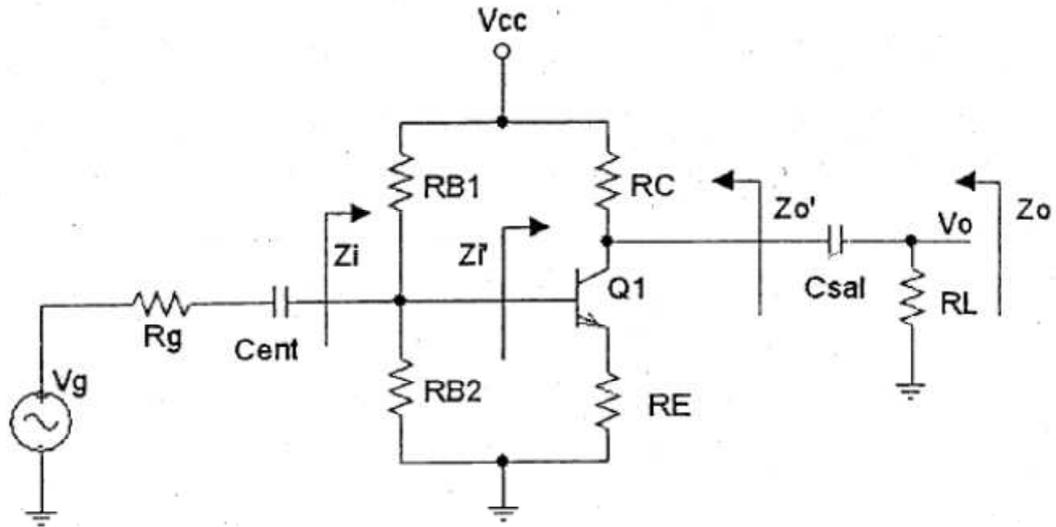
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

$$R_{o_{LC}} = Z_{o_{CR}} = Z_o = \frac{R_{o'}}{1 + A' \beta} \cong 6.4\Omega$$

EJERCICIO 6

Dado el circuito realimentado de la figura:



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

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

Se pide:

- 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.
 - Indique el tipo de topología de realimentación.
 - Indique la función de transferencia que estabiliza.
 - Indique sus parámetros privilegiados.
- Represente las redes A' y β equivalentes, obteniendo los valores de A' y β correspondientes.
- Obtenga los valores de G , R_{icr} , R_{ocr} y V_o/V_g .
- Calcule Z_i , Z_i' , Z_o y Z_o' .
- Para $r_o = 100\text{ k}\Omega$, calcule el nuevo valor de R_{ocr} .

Cartagena99

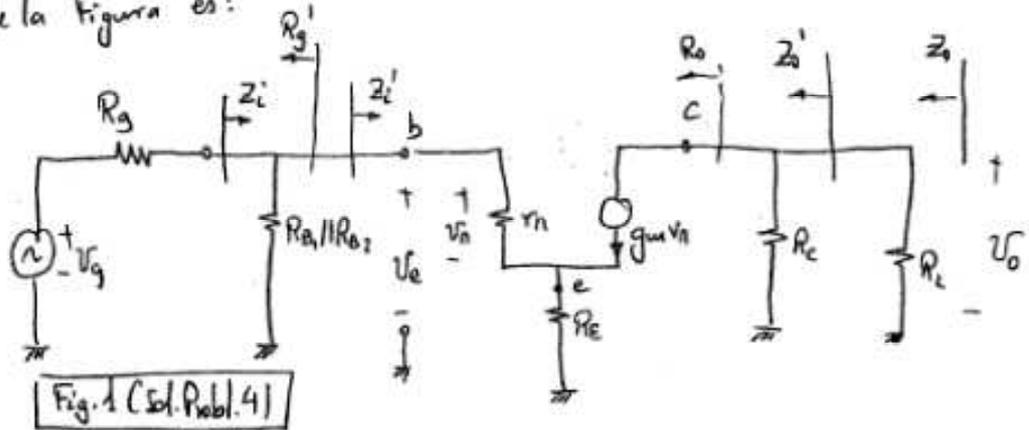
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

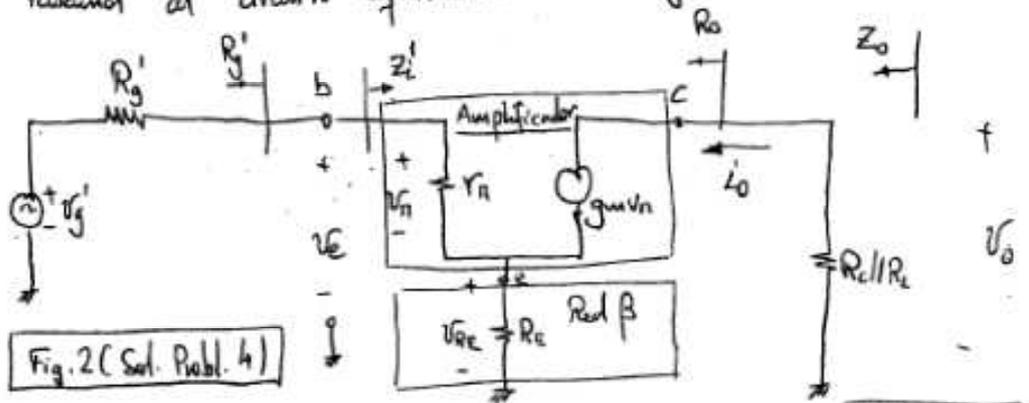
SOLUCIÓN

1.- a) Demostrar que existe realimentación negativa señalando la señal que se muestra 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:



Pasamos al circuito equivalente de la Figura:



$$\text{Siendo } v_g' = v_{Th} = v_g \cdot \frac{R_{B1} R_{B2}}{R_g + R_{B1} R_{B2}} = v_g \cdot \frac{15k\Omega \cdot 80k\Omega}{0,05k\Omega + 15k\Omega \parallel 80k\Omega} \approx v_g \cdot 1 = v_g$$

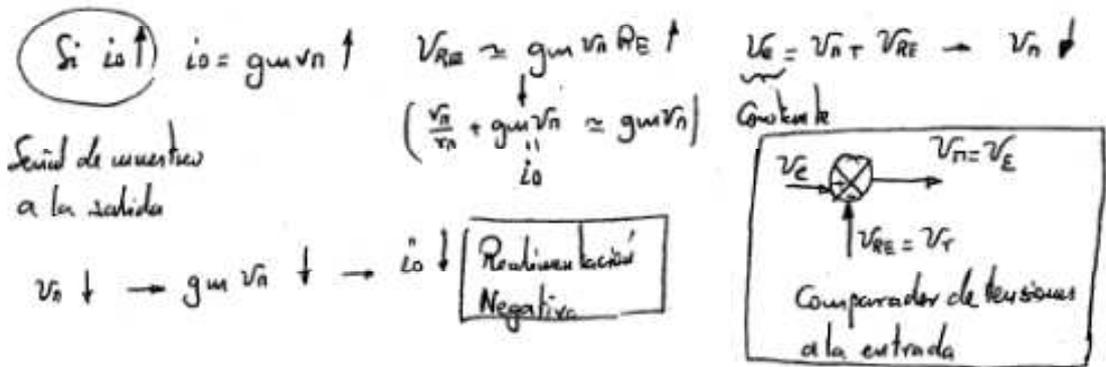
$$\text{y } R_g' = R_{Th} = R_g \parallel R_{B1} \parallel R_{B2} = 0,05k\Omega \parallel 15k\Omega \parallel 80k\Omega \approx 50\Omega$$



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Para demostrar que existe realimentación negativa partimos del circuito ⁽²⁾ reabundado de la Fig. 2 (Sol. Pobl. 4) en donde tenemos:



- b) - Salida Serie (Muestra de corriente a la salida) } En consecuencia,
 - Entrada Serie (Comparación de tensiones a la entrada) } tenemos:

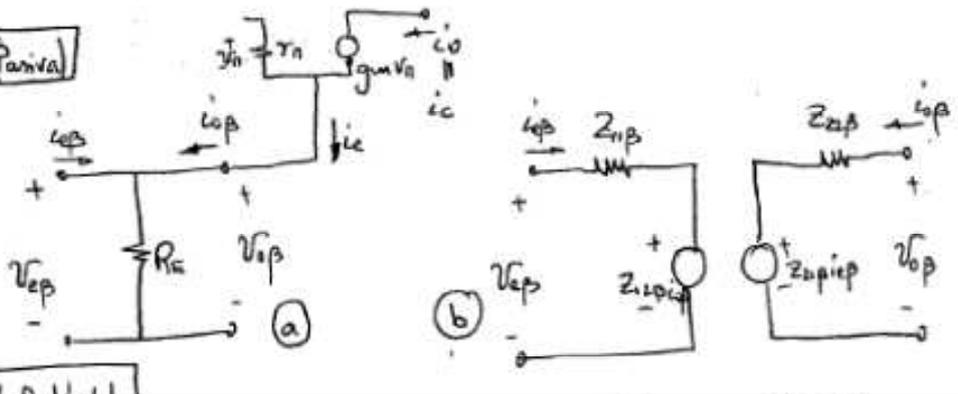
Topología de Realimentación Serie-Serie

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

$$\frac{i_o}{v_E} = G_T = \frac{A_T}{1 + A_T \beta_T}$$

d) los parámetros privilegiados son los parámetros: Z

2. a) Red β Parcial



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Cartagena99

$$Z_{i2\beta} = \left. \frac{v_{e\beta}}{i_{o\beta}} \right|_{i_{e\beta}=0} = R_E = 2,5 \text{ k}\Omega$$

(3)

No obstante, $\beta_z = \frac{v_{e\beta}}{i_o} \left[\text{Ver Fig. 3 (Sol. Probl. 4)} \right] = \frac{v_{e\beta}}{i_{o\beta}} \times \frac{i_{o\beta}}{i_o} = Z_{i2\beta} \times \frac{i_e}{i_c}$

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, $\beta_z = Z_{i2\beta} \times \frac{1}{\alpha_F} \approx Z_{i2\beta} = R_E = 2,5 \text{ k}\Omega$

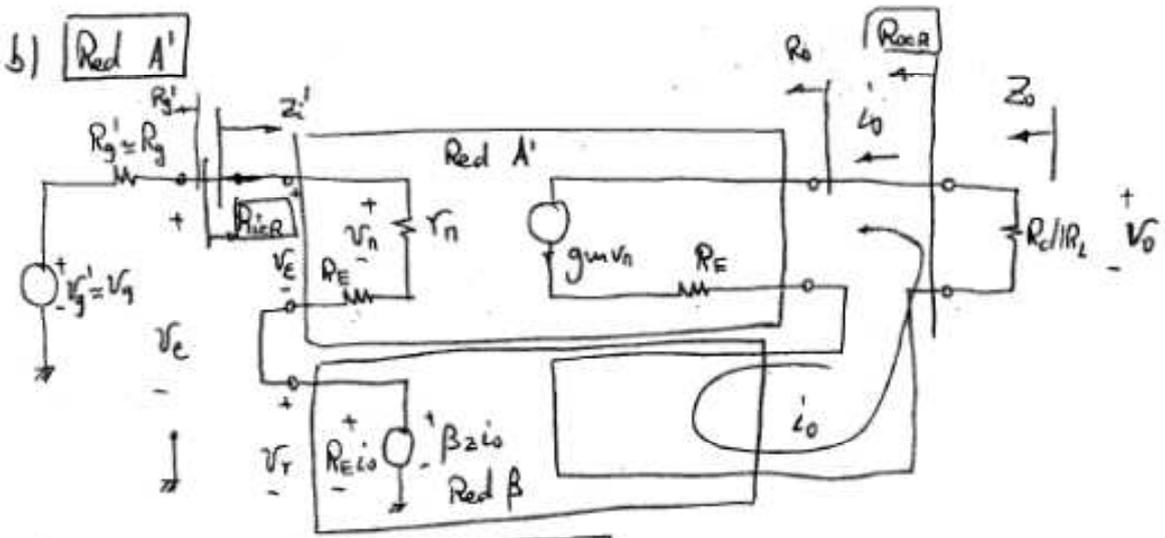


Fig. 4 (Sol. Problema 4)

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

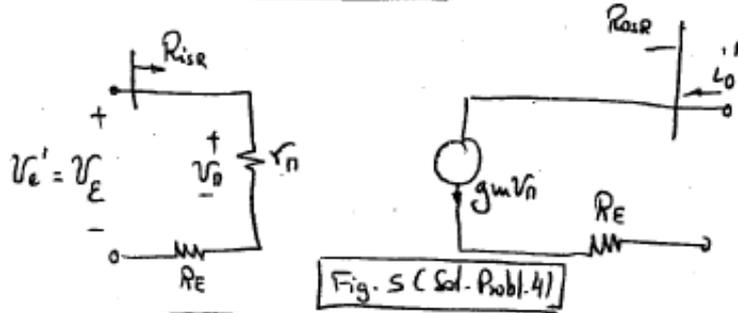
En consecuencia (Ver Circuito Fig. 4 (Sol. Probl. 4)) $Z_i' = R_i \alpha_F$ y

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70



En consecuencia, a partir del circuito de la Red A' del circuito (4) de la Fig. 4 (Sol. Problema 4), tenemos:



$R_{i_sR} = r_n + R_E$ y $R_{o_sR} = \infty$

y $A' = A_v = \frac{i_o'}{v_e'} = \frac{i_o'}{v_n} + \frac{v_n}{v_e'} = g_m \times \frac{r_n}{R_E + r_n} = \frac{\beta_0}{R_E + r_n}$

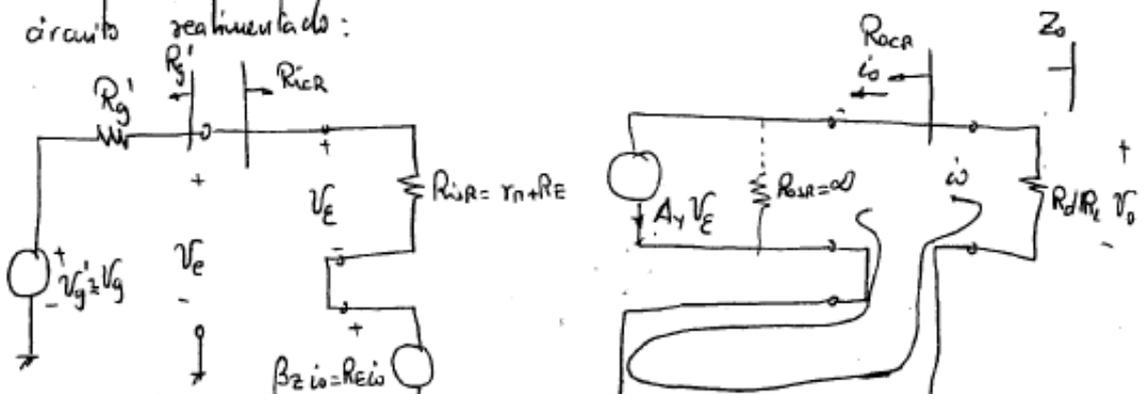
$i_o' = g_m v_n$ y $\frac{v_n}{v_e'} = \frac{r_n}{R_E + r_n}$

Por tanto $A' = A_v = \frac{100 = \beta_0}{2,5k\Omega + 2,5k\Omega} = \frac{100}{5k\Omega} = 0,02 \frac{1}{\Omega}$

$r_n = \frac{V_T}{I_{CQ}} \times \beta_0 = \frac{25mV}{1\mu A} \times 100$

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. Problema 4) obtenemos el nuevo circuito reemplazado:



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70



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

(5)

$$1) R_{iCR} = R_{iCR} (1 + A_V \beta_2) = (r_n + R_E) \left(1 + \frac{\beta_0}{r_n + R_E} \times R_E \right)$$

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

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 configuración sabemos que

$Z_i' = r_n + R_E (1 + \beta_0)$ 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 $\boxed{Z_i' = R_{iCR}}$

$$2) \boxed{R_{oCR} = R_{oCE} (1 + A_V \beta_2) = \infty (1 + A_V \beta_2) = \infty}$$

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)).

$$3) G_V = \frac{i_o}{v_e} = \frac{A_V}{1 + A_V \beta_2} = \frac{\frac{\beta_0}{R_E + r_n}}{1 + \frac{\beta_0}{R_E + r_n} \times R_E} = \frac{\frac{\beta_0}{R_E + r_n}}{\frac{R_E + r_n + \beta_0 R_E}{R_E + r_n}}$$

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

En consecuencia, obtenemos el siguiente circuito:

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Cartagena99

4) Cálculo de $\frac{V_o}{V_g}$

Según el esquema de la Fig. 7 (Sol. Probl. 4), tenemos:

$$\frac{V_o}{V_g} = \frac{V_o}{i_o} \times \frac{i_o}{V_e} \times \frac{V_e}{V_g'} \times \frac{V_g'}{V_g} = \underbrace{\left(- \frac{R_c // R_L}{i_o} \right)}_{\frac{V_o}{i_o}} \times \underbrace{G_m}_{\frac{i_o}{V_e}} \times \underbrace{\frac{R_{icR}}{R_g' + R_{icR}}}_{\frac{V_e}{V_g'}} \times \underbrace{(1)}_{\frac{V_g'}{V_g}}$$

$$\frac{V_o}{V_g} = - \frac{R_c // R_L}{r_{\pi} + R_E (1 + \beta_0)} \times \frac{\beta_0}{R_g + r_{\pi} + R_E (1 + \beta_0)}$$

$$\frac{V_o}{V_g} = - \frac{\beta_0 \times R_c // R_L}{R_g + r_{\pi} + R_E (1 + \beta_0)}$$

Es de señalar que esta expresión de $\frac{V_o}{V_g} = - \frac{\beta_0 \times R_c // R_L}{R_g + r_{\pi} + R_E (1 + \beta_0)}$ la

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

Por tanto, $\frac{V_o}{V_g} \approx - \frac{\beta_0 R_c // R_L}{R_E (1 + \beta_0)}$ ya que $R_g + r_{\pi} \ll R_E (1 + \beta_0)$

$\frac{V_o}{V_g} = - \frac{R_c // R_L}{R_E}$

Para $\left\{ \begin{array}{l} R_c = 8,5K\Omega \\ R_L = 10K\Omega \\ R_E = 2,5K\Omega \end{array} \right\}$ $\approx -1,84 \approx -2$

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



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Según el circuito de la Fig. 8 (Sol. Probl. 4), tenemos: (7)

$$Z_i' = R_{iCA} = r_n + R_E (1 + \beta) = 2551 \Omega$$

$$Z_i = R_{B1} \parallel R_{B2} \parallel Z_i' = R_{B1} \parallel R_{B2} \parallel r_n + R_E (1 + \beta) = 12,63 \text{ k}\Omega \parallel 2551 \Omega \approx 12,63 \text{ k}\Omega$$

$\left. \begin{array}{l} 15 \text{ k}\Omega \parallel 30 \text{ k}\Omega \\ 12,63 \text{ k}\Omega \end{array} \right\}$

$$Z_o' = R_{oCA} \parallel R_c = \infty \parallel R_c = R_c = 8,5 \text{ k}\Omega$$

$$Z_o = R_L \parallel Z_o' = R_L \parallel R_c = 10 \text{ k}\Omega \parallel 8,5 \text{ k}\Omega \approx 4,6 \text{ k}\Omega$$

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

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

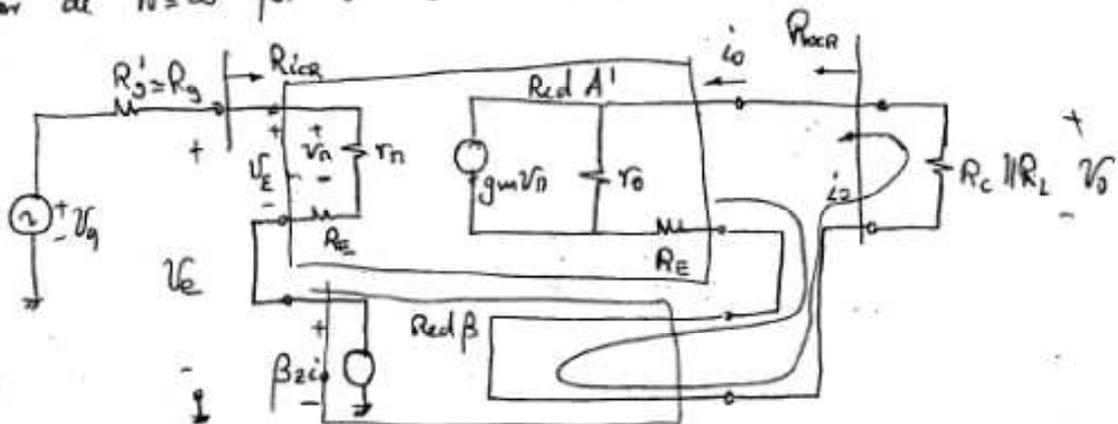


Fig. 9 (Sol. Problema 4)

A partir del nuevo circuito de la red A' obtenemos

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Cartagena99

En donde:

$$R_{i,R} = r_n + R_E$$

y

$$R_{o,R} = R_E + r_o$$

Para el cálculo del nuevo valor de A_v tenemos:

$$A_v = \frac{i_o'}{v_e'} = \underbrace{\frac{i_o'}{i_o''}}_{(1)} + \underbrace{\frac{i_o''}{v_n}}_{(2)} + \underbrace{\frac{v_n}{v_e'}}_{(3)}$$

①: $i_o = i_o' + i_{r_o} = i_o' + \frac{v_{r_o}}{r_o}$. Siendo $v_{r_o} + v_{R_E} = 0$. Es decir: $v_{r_o} = -v_{R_E}$

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

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

② $i_o'' = g_m v_n \rightarrow \frac{i_o''}{v_n} = g_m$

③ $\frac{v_n}{v_e'} = \frac{r_n}{r_n + R_E}$

En consecuencia, tenemos:

$$A_v = \frac{i_o'}{v_e'} = \frac{r_o}{r_o + R_E} \times g_m \times \frac{r_n}{r_n + R_E} = \frac{\beta_0 r_o r_n}{(r_o + R_E)(r_n + R_E)} = A_v'$$

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Cartagena99

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)**:

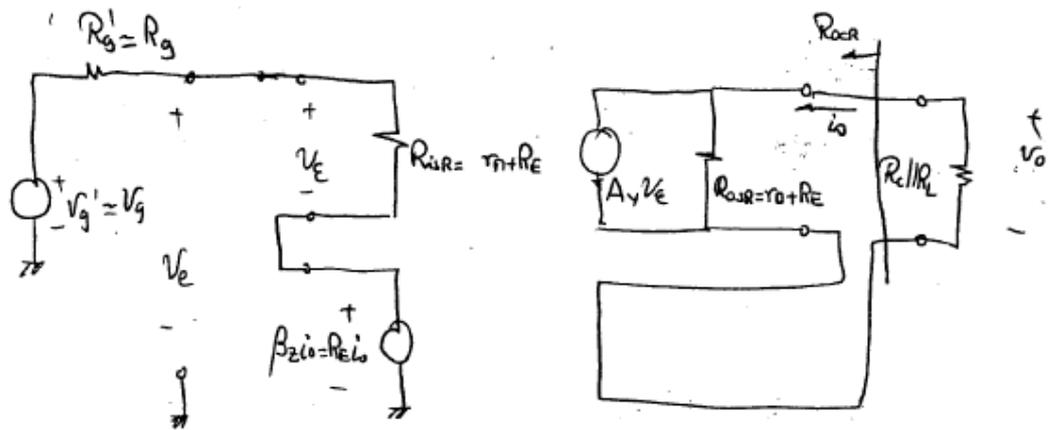


Fig. 11 (Sol. Problema 4)

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

$$R_{oCR} = \frac{v_o}{i_o} \Big|_{v_g' = v_g = 0} \quad \text{Siendo} \quad \boxed{i_o = \frac{v_o}{R_{oCR}} + A_y v_E} \rightarrow \boxed{v_o = (i_o - A_y v_E) R_{oCR}}$$

$$\text{y} \left\{ \begin{array}{l} v_E + \beta z i_o + \frac{v_E}{R_{iR}} + R_g = 0 \\ v_E \left(\frac{R_{iR} + R_g}{R_{iR}} \right) + \beta z i_o = 0 \end{array} \right. \rightarrow \boxed{v_E = - \beta z i_o \times \frac{R_{iR}}{R_g + R_{iR}}}$$

$$\text{Por tanto, } v_o = i_o + A_y \times \left(\beta z i_o \times \frac{R_{iR}}{R_g + R_{iR}} \right) \times R_{oCR}$$

$$v_o = i_o \left(1 + A_y \beta z \times \frac{R_{iR}}{R_g + R_{iR}} \right) \times R_{oCR}$$

$$\text{Es decir, } \frac{v_o}{i_o} = R_{oCR} = (r_{o1} + R_E) \left(1 + \frac{\beta_0 r_{o1}}{(r_{o1} + R_E)(r_{i1} + R_E)} \times R_E \times \frac{R_{iR}}{R_g + R_{iR}} \right)$$

NOTA:
Del estudio de un
TRT en EC con R_E

$$\frac{v_o}{i_o} = (r_{o1} + R_E) + \frac{\beta_0 r_{o1} (r_{o1} + R_E)}{(r_{o1} + R_E)} \times R_E \times \frac{1}{R_g + r_{i1} + R_E} = r_{o1} \left(1 + \frac{\beta_0 R_E}{R_g + r_{i1} + R_E} \right) + R_E$$

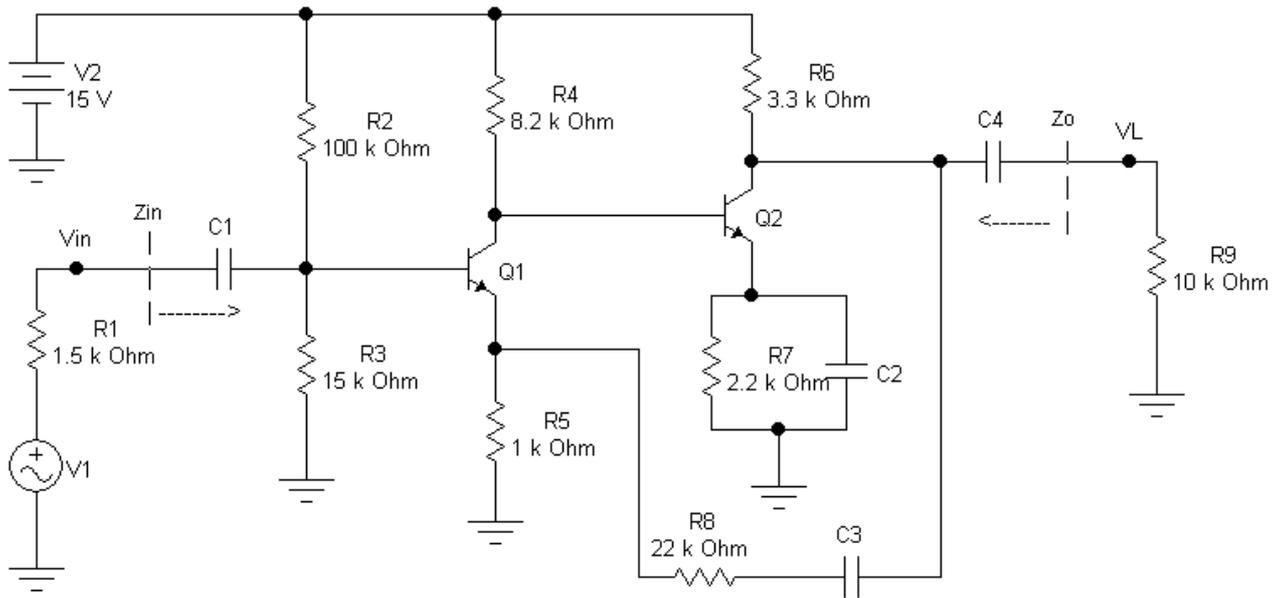
**CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70**

**ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70**

Cartagena99

EJERCICIO 7

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



DATOS:

$$g_{m1} = 48.5 \text{ mS} \quad r_{\pi1} = 7.22 \text{ k}\Omega$$

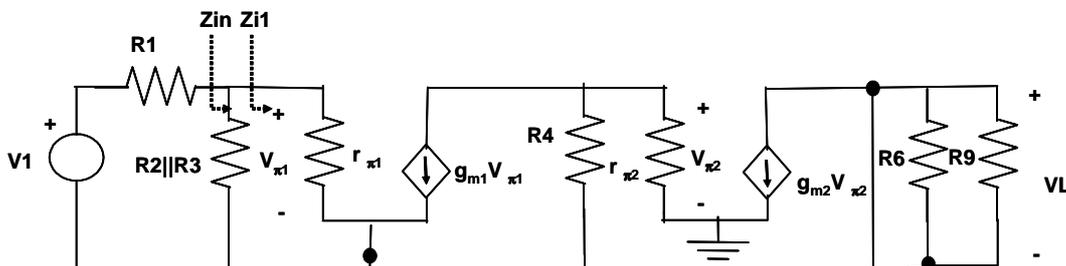
$$g_{m2} = 69.2 \text{ mS} \quad r_{\pi2} = 5.1 \text{ k}\Omega$$

SE PIDE:

- Obtenga y represente el esquema para pequeña señal del amplificador, a frecuencias medias.
- 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.
- Obtenga las redes A y β idealizadas (A' y β') y la ganancia V_L/V_1 .
- Obtenga el valor de las impedancias Z_{in} (Vista desde el nudo V_{in} a derechas) y Z_o (Vista desde el nudo V_L a izquierdas).

SOLUCIÓN

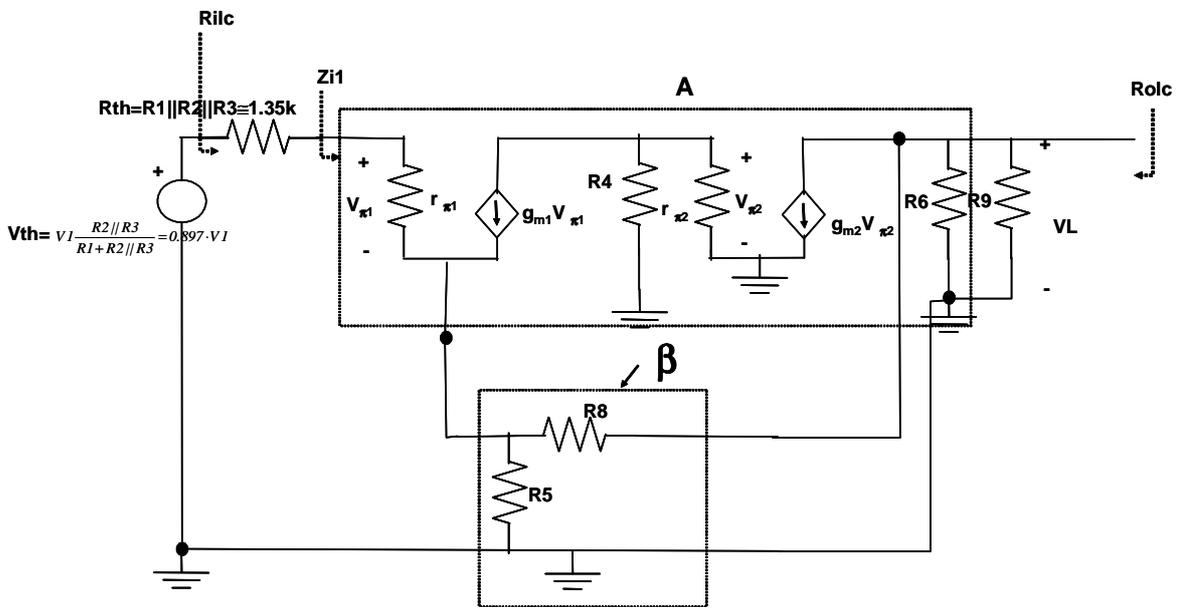
- Obtenga y represente el esquema para pequeña señal del amplificador, a frecuencias medias.



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Cartagena99



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: V_o/V_i [V/V] (A_v)

Función de transferencia genérica red β : v_f/V_o [V/V] (β_v)

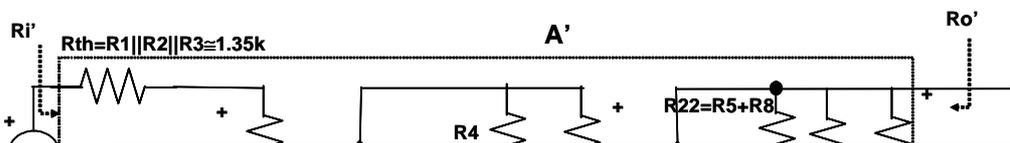
c) Obtenga las redes A y β idealizadas (A' y β') y la ganancia V_L/V_1 .

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:



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Cartagena99

Analizando el circuito se tiene:

$$\left. \begin{aligned} \frac{VL'}{v_{\pi 2}} &= -g_{m2} \cdot (R22 \parallel R6 \parallel R9) \\ \frac{v_{\pi 2}}{v_{\pi 1}} &= -g_{m1} \cdot (R4 \parallel r_{\pi 2}) \\ \frac{v_{\pi 1}}{V_{th}'} &= \frac{r_{\pi 1}}{R_{th} + r_{\pi 1} + (\beta + 1) \cdot R11} \end{aligned} \right\}$$

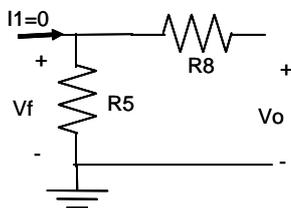
$$\Rightarrow A' = \frac{VL'}{V_{th}'} = -g_{m2} \cdot (R22 \parallel R6 \parallel R9) \cdot -g_{m1} \cdot (R4 \parallel r_{\pi 2}) \cdot \frac{r_{\pi 1}}{R_{th} + r_{\pi 1} + (\beta + 1) \cdot R11} \cong 493 \left[\frac{V}{V} \right]$$

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

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

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

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} :

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

Por lo tanto la ganancia $VL/V1$ será:

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

- 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} :

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

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

$$Ri_{LC} = R_{th} + Zi1 \Rightarrow Zi1 = Ri_{LC} - R_{th} \cong Ri_{LC} = 7.75M\Omega$$

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

$$Zin = R2 \parallel R3 \parallel Zi1 \Rightarrow Zin \cong R2 \parallel R3 \cong 13k\Omega$$

**CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70**

**ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70**

$R9 \gg Z0$

Cartagena99

EJERCICIO 8

Dado el circuito Amplificador realimentado de la Figura 1.

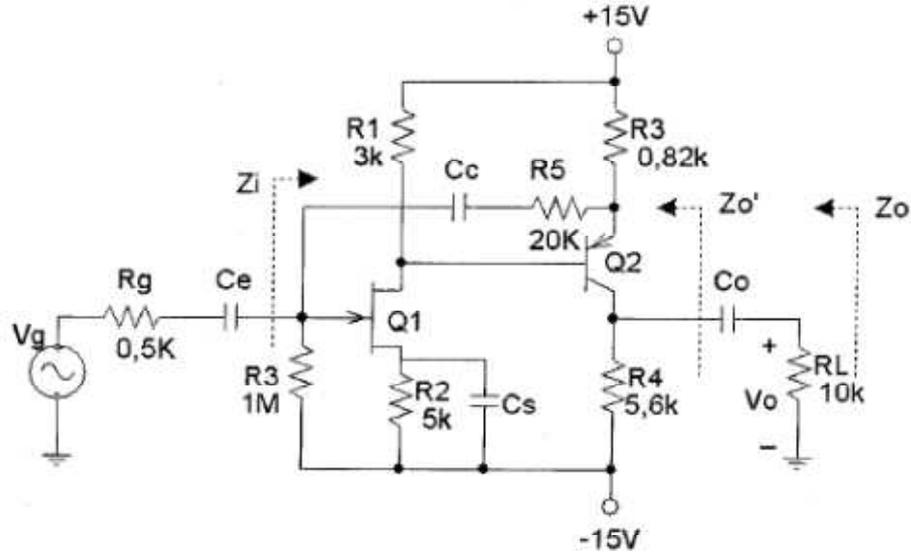


Figura 1

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

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 V_o/V_g .
3. Calcule Z_i , Z_o' v Z_o .

DATOS:

JFET:

$$G_m = (1.5 \text{ k}\Omega)^{-1}, C_{gs} = 1 \text{ pF}, C_{gd} = 0 \text{ pF}.$$

BIPOLAR:

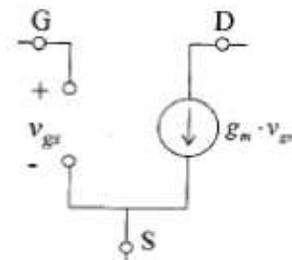
$$V_{BE} = 0,6 \text{ V} \quad V_T = 25 \text{ mV} \quad \beta_o = 100$$

$$C_{\pi} = 1 \text{ pF} \quad C_{\mu} = 0 \text{ pF}$$

OTROS

$$C_e = 5 \text{ }\mu\text{F} \quad C_o = 1 \text{ }\mu\text{F}$$

$$C_c \rightarrow \infty \quad C_s \rightarrow \infty$$



Equivalente del MOSFET en pequeña señal

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Cartagena99

SOLUCIÓN

(1)

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)

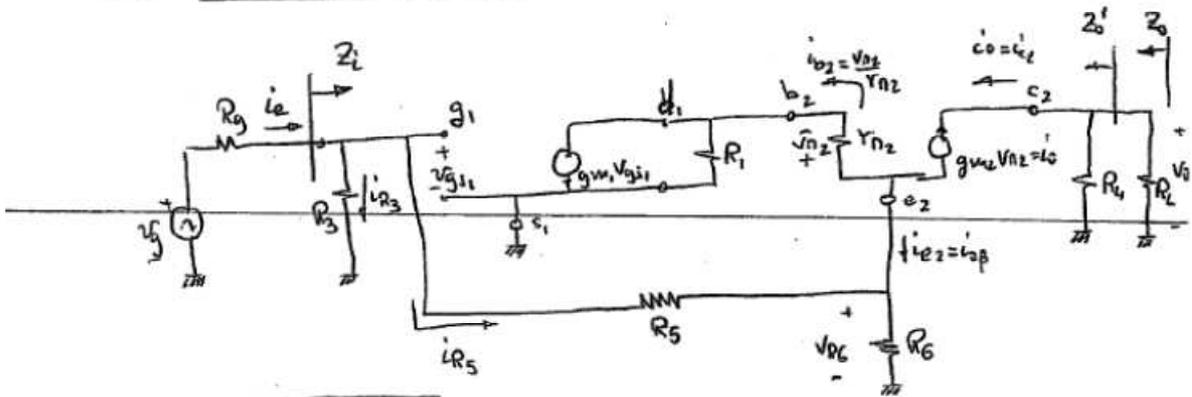


Fig. 2 (Sol. Problema 1)

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

① Demostración de Realimentación Negativa (RN):

$$i_o \uparrow \text{ gm}_2 v_{n2} \uparrow v_{ns} \approx -\text{gm}_2 v_{n2} R_5 \uparrow \quad i_{R5} = \frac{v_{gs} - v_{RC}}{R_5} \uparrow \quad \left\{ \begin{array}{l} i_e = i_{R3} + i_{R5} \rightarrow i_{R3} \uparrow \\ \text{Constante} \end{array} \right.$$

Compartidos de corriente a la entrada

$$v_{R3} \uparrow v_{gs} \uparrow \text{ gm}_1 v_{gs1} \uparrow v_{n2} \uparrow \text{ gm}_2 v_{n2} \uparrow i_o \uparrow \rightarrow \text{Demostración de RN}$$

② Topología: Paralelo-Serie } Muestro de corriente a la salida
Realimentación de corriente a la entrada }

③ Parámetros privilegiados: g

④ Función que estabiliza: TRANSCORRIENTE: $G_2 = \frac{A_F}{1+A_1\beta_1}$

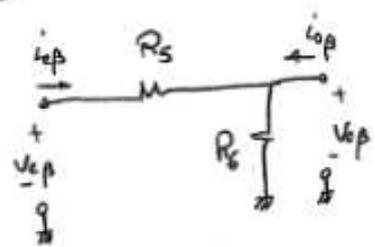


CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

2.- Representar las sales A' y β equivalentes.

3.1 Real β :



$$i_p = g_{cp} v_p + g_{ep} v_p$$

$$v_p = g_{ep} v_p + g_{op} i_p$$

Fig. 3 (Sol. Problema 1)

En donde:

$$g_{cp} = \frac{i_p}{v_p} \Big|_{i_o=0} = \frac{1}{R_s + R_c}$$

$$g_{ep} = \frac{i_p}{v_p} \Big|_{v_p=0} = -\frac{R_c}{R_s + R_c}$$

$$g_{op} = \frac{i_o}{i_p} \Big|_{v_p=0} = R_c // R_e$$

3.2. Real A' :

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

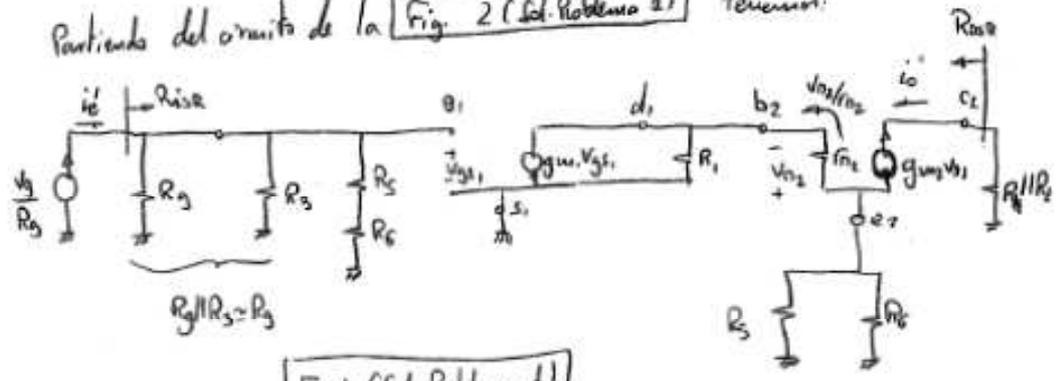


Fig. 4 (Sol. Problema 1)

3.3. Cálculo de β :

$$\beta = \frac{i_o}{i_0} = \frac{i_o}{i_{oB}} + \frac{i_o}{i_o} = -\frac{R_c}{R_s + R_c} \times \frac{i_{o2}}{i_{o1}} = -\frac{R_c}{R_s + R_c} \times \frac{1}{\alpha}$$



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

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

2.3. Cálculo de A':

$$A_2 = A' = \frac{i_o'}{i_e'} = \frac{i_o'}{v_{i2}} \times \frac{v_{i2}}{v_{g2}} \times \frac{v_{g2}}{i_e'}$$

(1) (2) (3)

(Ver Fij + (sol Probl 4))

(1): $\frac{i_o'}{v_{i2}} = -g_{m2}$

(2): $\frac{v_{i2}}{v_{g2}} = \frac{v_{i2}}{v_{i2}} = g_{m1} v_{g2} \times \frac{R_1}{R_1 + r_{o2} + (R_S // R_G // (1 + \beta_2))}$ | Ecuación de un divisor de voltaje

$$\frac{v_{i2}}{v_{g2}} = \frac{g_{m1} r_{o2} R_1}{R_1 + r_{o2} + (R_S // R_G // (1 + \beta_2))}$$

(3): $\frac{v_{g2}}{i_e'} \rightarrow v_{g2} = i_e' (R_G // (R_S + R_G)) = \frac{v_{g2}}{i_e'} = R_G // (R_S + R_G)$

Por tanto, $A_2 = -g_{m2} \times \frac{g_{m1} r_{o2} R_1}{R_1 + r_{o2} + (R_S // R_G // (1 + \beta_2))} \times R_G // (R_S + R_G)$

$$A_2 = -g_{m1} \times R_G // (R_S + R_G) \times \frac{\beta_2 R_1}{R_1 + r_{o2} + (R_S // R_G // (1 + \beta_2))}$$

Siendo $r_{o2} = \beta_2 \times \frac{V_T}{I_{E2}} = 100 \times \frac{25mV}{2,93\mu A} = 853\Omega \approx \underline{0,85k\Omega}$

En consecuencia, $A_2 = -0,7 \frac{mA}{V} \times \left(\frac{5k\Omega // (3k\Omega + 0,82k\Omega)}{3,82k\Omega} \right) \times \frac{100 \times 3k\Omega}{3k\Omega + 0,85k\Omega + \frac{(3k\Omega // 0,82k\Omega)(101)}{65\mu A}}$

$$A_2 = -0,7 \frac{1}{k\Omega} \times 2,2k\Omega \times \frac{300k\Omega}{69k\Omega} \times \frac{1}{4,34} \approx \underline{-0,213 A/A}$$

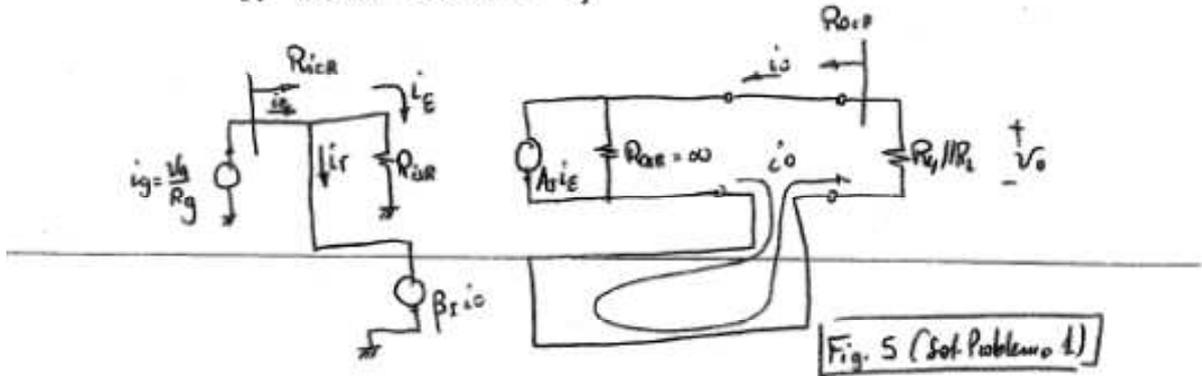
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70



24. Cálculo de $\frac{v_o}{v_g}$

El circuito reemplazado que se obtiene es:



Siendo $R_{i,c} = R_g || (R_5 + R_6) = 5k\Omega || (2k\Omega + 0,82k\Omega) \approx 2,2k\Omega$

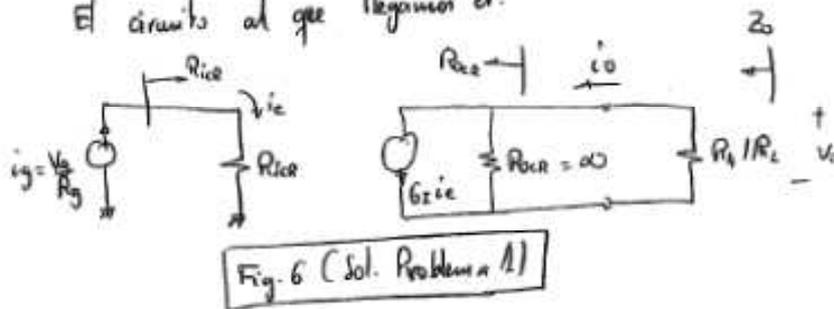
$R_{o,c} = \infty$

$A_2 = -6,7 A/A$

$\beta_1 = -0,21 A/A$

$A_2 \beta_1 = (-6,7 A/A)(-0,21 A/A) = 1,42$

El circuito al que llegamos es:



$R_{i,c} = \frac{R_{i,c}}{1 + A_2 \beta_1} = \frac{2,2k\Omega}{1 + 1,42} = 0,9k\Omega$

$R_{o,c} = R_{o,c} (1 + A_2 \beta_1) = \infty$

$G_2 = \frac{i_o}{i_e} = \frac{A_2}{1 + A_2 \beta_1} = \frac{-6,7 A/A}{1 + 1,42} = -2,76 A/A$

**CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70**

**ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70**



B- Cálculo de Z_i , Z_o' y Z_o .

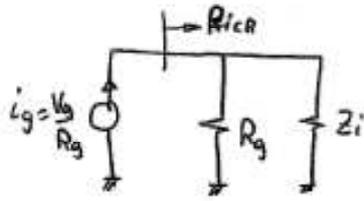


Fig. 7 (Sol. Problema 1)

Según este circuito **Fig. 7 (Sol. Probl. 1)**,

$$R_{icR} = R_g \parallel Z_i \rightarrow R_{icR} = \frac{R_g \cdot Z_i}{R_g + Z_i}$$

$$R_{icR} \cdot R_g + R_{icR} \cdot Z_i = R_g \cdot Z_i$$

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

$$\textcircled{1} \quad Z_i = \frac{R_g + R_{icR}}{R_g - R_{icR}} = \frac{5k\Omega + 0,9k\Omega}{5k\Omega - 0,9k\Omega} = 1k\Omega$$

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

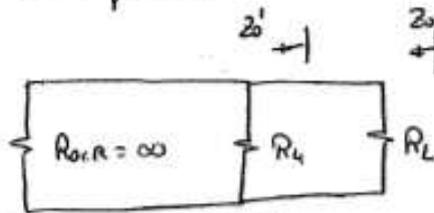


Fig. 8 (Sol. Problema 1)

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

$$\textcircled{2} \quad Z_o' = 5,6k\Omega$$

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

$$\textcircled{3} \quad Z_o = 5,6k\Omega \parallel 100k\Omega = 5,3k\Omega$$



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

EJERCICIO 9

Dado el circuito amplificador realimentado de la figura 1.

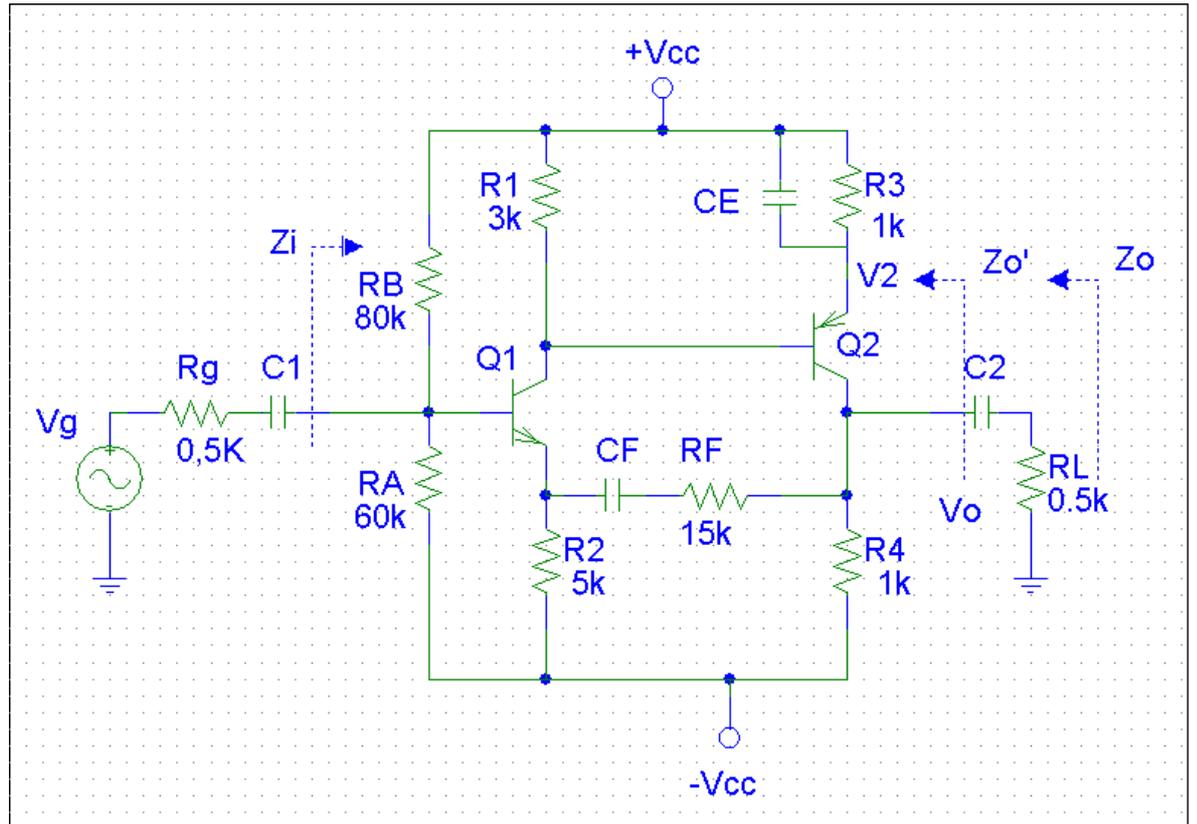


Figura 1

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 V_o/V_g .
4. Calcule Z_i , Z_o' y Z_o

DATOS:

$$r_{\pi 1} = 1\text{k}\Omega$$

$$g_{m1} = 100\text{mA/V}$$

$$r_{\pi 2} = 370\Omega$$

$$g_{m2} = 270\text{mA/V}$$

$$C_1 \rightarrow \infty$$

$$C_2 \rightarrow \infty$$

$$C_E \rightarrow \infty$$

$$C_F \rightarrow \infty$$

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Cartagena99

SOLUCIÓN

SOLUCION:

1. Circuito en pequeña señal (AC)

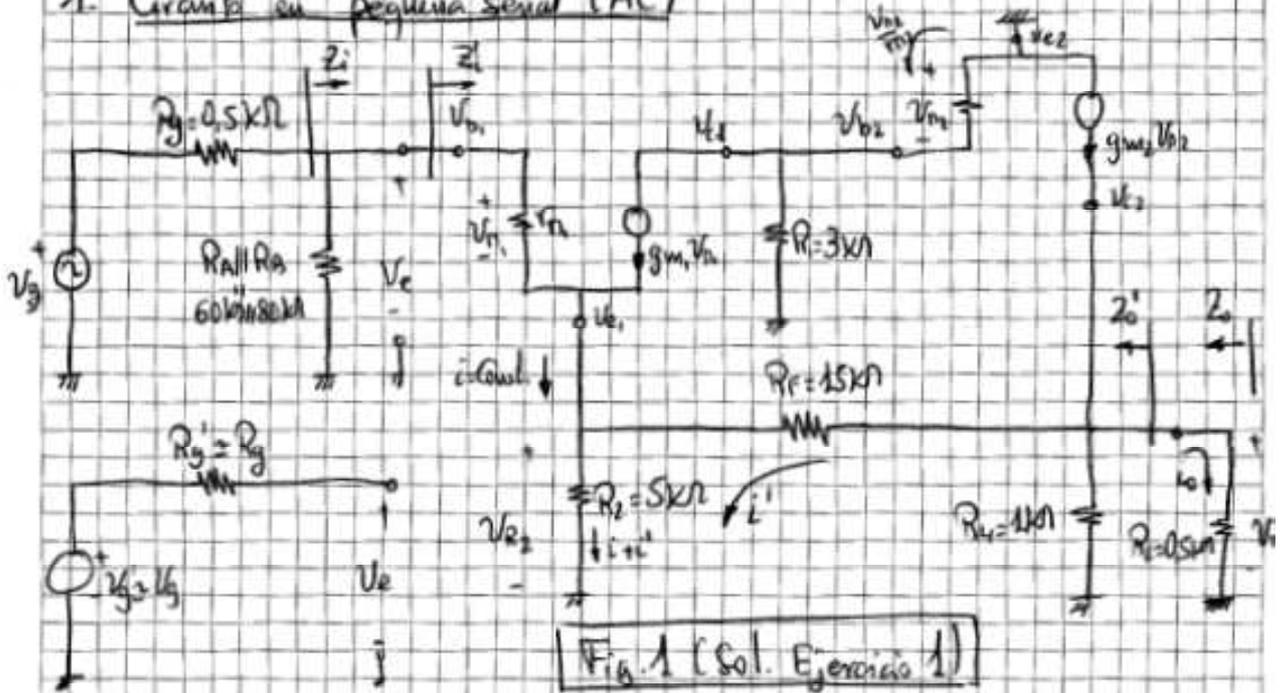


Fig. 1 (Sol. Ejercicio 1)

$$① V_g' = \frac{R_1 // R_2}{R_g + R_1 // R_2} \cdot v_3 = \frac{60k // 80k}{0.5k + 60k // 80k} \cdot v_3 = v_3$$

$$② R_g' = R_g // R_1 // R_2 = 0.5k // 60k // 80k \approx 0.5k = R_g$$

a.- Demstrar 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 $v_3 \uparrow \rightarrow v_0 \uparrow$ ya que $\Delta v_{ce} = i' R_c \uparrow \rightarrow v_{ce} = v_{be} + v_{ce} \rightarrow v_{be} \downarrow \rightarrow g_m v_{be} \downarrow g_m v_{be} R_c \downarrow$
Ver nota
 $v_{ce} = \text{const.}$ Compartidos de tensiones a la entrada

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70



$$\rightarrow g_m v_{b1} + \frac{v_{R2}}{r_{\pi}} + g_m v_{b2} \rightarrow \underline{v_o} = i_o R_L$$
Demostración de Realimentación Negativa

Nota

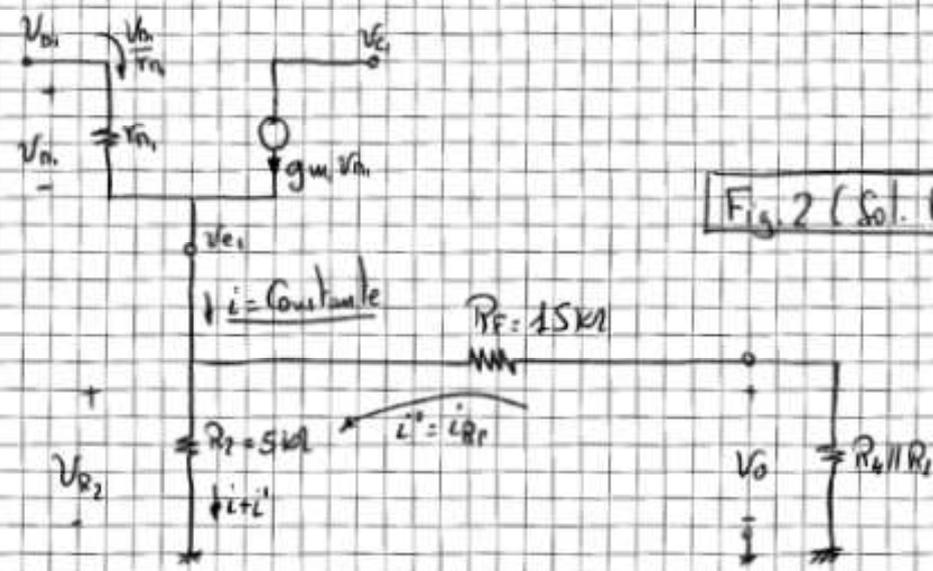


Fig. 2 (Sol. Ejercicio 1)

$$v_{R2} = (i + i') R_2 \rightarrow \Delta v_{R2} = i' R_2 \text{ ya que } i = \text{Constante}$$

Sabiendo $i = \frac{v_{in}}{r_{\pi}} + g_m v_{in} \approx g_m v_{in} = \underline{\text{Generador de corriente}}$
Suponemos Constante

$$i' = \frac{v_o}{R_2 + R_F}$$

b.- Judicar el tipo de Realimentación.

Realimentación negativa. Muestra de tensión a la salida y Realimentación (o comparación) de tensión a la entrada



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

 ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

2. Representar las Redes A' y B Equivalentes.

2a. Red B

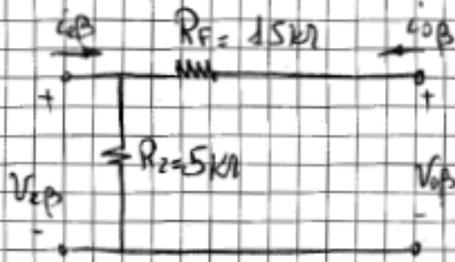


Fig 3a (Sol. Ejercicio 1)

Condensar equivalente y matriz de parámetros "h" para la red B

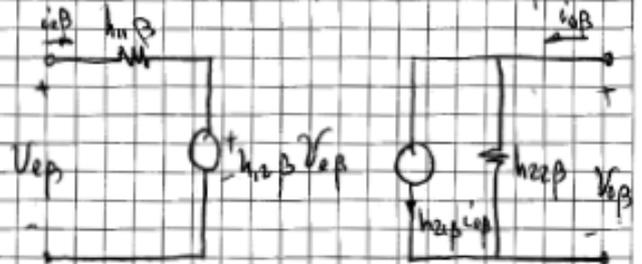


Fig 3b (Sol. Ejercicio 1)

Aplicando las ecuaciones de la matriz de parámetros "h" al circuito de la Fig. 3a (Sol. Ejercicio 1)

Siendo:

$$V_{eB} = h_{11B} i_{eB} + h_{12B} V_{oB}$$

$$i_{oB} = h_{21B} i_{eB} + h_{22B} V_{oB}$$

$$h_{11B} = \left. \frac{V_{eB}}{i_{eB}} \right|_{V_{oB}=0} = R_2 \parallel R_F$$

y

$$h_{22B} = \left. \frac{i_{oB}}{V_{oB}} \right|_{i_{eB}=0} = \frac{1}{R_2 + R_F}$$

Además tenemos:

$$\boxed{h_{12B} = \left. \frac{V_{eB}}{V_{oB}} \right|_{i_{eB}=0} = \frac{R_2}{R_2 + R_F} = \beta_V = \frac{5k\Omega}{5k\Omega + 15k\Omega} = \frac{5}{20} = 0,25 \frac{V}{V}}$$

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

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:

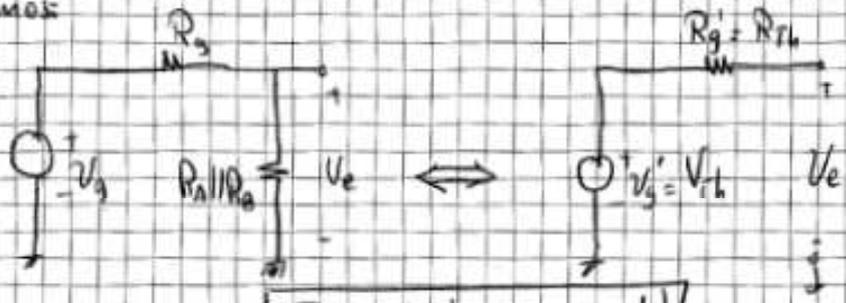


Fig. 4 (Sol. Ejercicio 1)

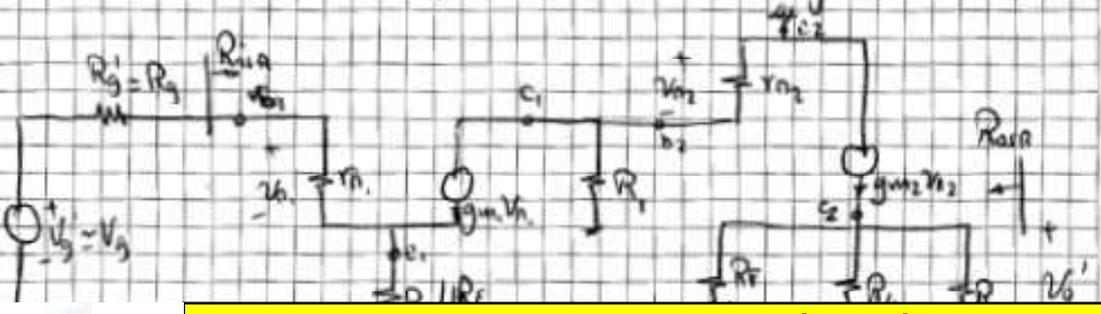
$$\text{Dando: } V_g' = V_{th} = V_g \cdot \frac{R_A // R_B}{R_g + R_A // R_B} = V_g \cdot \frac{60k\Omega // 80k\Omega}{0.5k\Omega + 60k\Omega // 80k\Omega} = V_g \cdot \frac{34.28k\Omega}{0.5k\Omega + 34.28k\Omega} = V_g \cdot 0.98$$

$$V_g' = V_g + 0.98 \approx V_g$$

$$R_g' = R_{th} = R_g // R_A // R_B = 0.5k\Omega // 60k\Omega // 80k\Omega = 0.5k\Omega // 34.28k\Omega = \frac{17.14k\Omega^2}{34.78k\Omega} = 0.49k\Omega$$

$$R_g' = 0.49k\Omega = R_g$$

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



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

3. Obtener los valores de A_v , β y V_o/V_g

$$1. \beta_v = h_{fe} \text{ (Ver Pág. ③)} = \frac{R_z}{R_z + R_F} = \frac{5k\Omega}{5k\Omega + 15k\Omega} = \frac{5}{20} = 0,25 \checkmark$$

$$2. A_v' = \frac{V_o'}{V_g'} = \frac{V_o'}{V_{n2}} \cdot \frac{V_{n2}}{V_{n1}} \cdot \frac{V_{n1}}{V_g'} \quad \text{Calculado en el circuito de la Fig. 5 (Sol. Ejercicio 1)}$$

Secund ① $\frac{V_o'}{V_{n2}} = g_{m2} \cdot V_{n2} \cdot (R_F + R_z) \parallel R_4 \parallel R_L$

$$\frac{V_o'}{V_{n2}} = g_{m2} \cdot (R_F + R_z) \parallel R_4 \parallel R_L \quad \text{①}$$

② $\frac{V_{n2}}{V_{n1}} = \frac{V_{n2}}{r_{n2}} = g_{m1} \cdot V_{n1} \cdot \frac{R_1}{R_1 + r_{n2}}$

$$\frac{V_{n2}}{V_{n1}} = g_{m1} \cdot r_{n2} \cdot \frac{R_1}{R_1 + r_{n2}} = g_{m1} \cdot r_{n2} \parallel R_1 \quad \text{②}$$

③ $\frac{V_{n1}}{V_g'} = \frac{r_{n1}}{R_g' + r_{n1} + (R_2 \parallel R_3) \parallel (1 + \beta_{o1})}$ ③

Por tanto, $A_v' = \text{①} \cdot \text{②} \cdot \text{③} = \left(g_{m2} \cdot (R_F + R_z) \parallel R_4 \parallel R_L \right) \cdot \left(g_{m1} \cdot r_{n2} \parallel R_1 \right) \cdot \frac{r_{n1}}{R_g' + r_{n1} + (R_2 \parallel R_3) \parallel (1 + \beta_{o1})}$

$$A_v' = \underbrace{\beta_{o2} \cdot \frac{(R_F + R_z) \parallel R_4 \parallel R_L}{R_1 + r_{o2}}}_{\text{Ganancia 2ª Etapa en EC}} \cdot \underbrace{\beta_{o1} \cdot \frac{R_1}{R_g' + r_{n1} + (R_2 \parallel R_3) \parallel (1 + \beta_{o1})}}_{\text{Ganancia 1ª Etapa en EC con Re}}$$

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Cartagena99

$$\text{Sim. } R_{eq} = (R_F + R_2) \parallel R_1 \parallel R_2 = (15k\Omega + 5k\Omega) \parallel 1k\Omega \parallel 0,5k\Omega = 20k\Omega \parallel 0,33k\Omega = 0,33k\Omega$$

$$R_g' = r_{in} + R_2 \parallel R_F (1 + \beta_{01}) = 0,5k\Omega + 1k\Omega + 5k\Omega \parallel 15k\Omega (1 + g_{m1} r_{n1}) =$$

$\beta_{01} = 100$

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

$$R_g' + r_{in} + R_2 \parallel R_F (1 + \beta_{01}) = 1,5k\Omega + 378,75k\Omega = 380,25k\Omega$$

Por tanto, $A_v' = 100 \times \frac{0,33k\Omega}{3k\Omega + 0,33k\Omega} \times 100 \times \frac{3k\Omega}{380,25k\Omega}$

$0,097 \approx 0,1$ $0,0078 \approx 0,008$

$$A_v' = 10^4 \times 0,1 \times 0,008 = 80$$

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

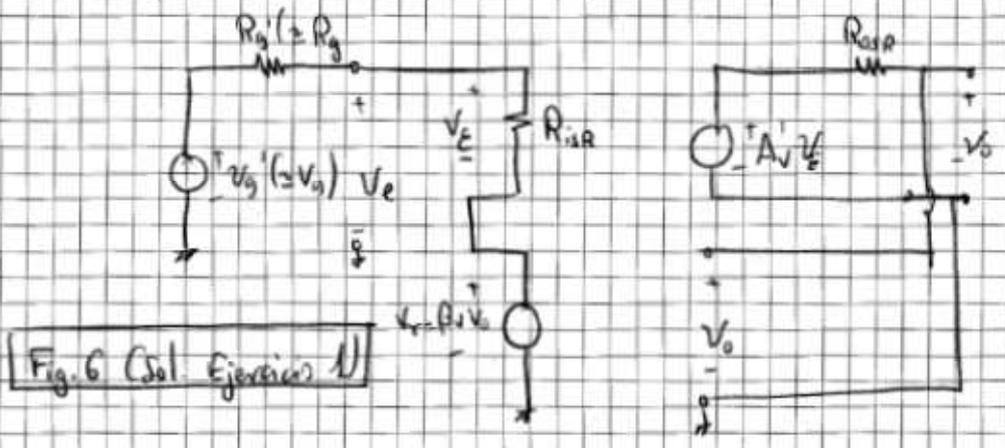


Fig. 6 (Sol. Ejercicio 1)

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

$$R_{iA} = r_{in} + (R_2 \parallel R_F) (1 + \beta_{01}) = 1k\Omega + 5k\Omega \parallel 15k\Omega (1 + \beta_{01}) = 379,75k\Omega \approx 380k\Omega$$

$$R_{oA} = (R_F + R_2) \parallel R_1 \parallel R_2 = (15k\Omega + 5k\Omega) \parallel 1k\Omega \parallel 0,5k\Omega = 20k\Omega \parallel 0,33k\Omega = 0,33k\Omega$$



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

...

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Por tanto, tendremos como circuito realimentado más simplificado

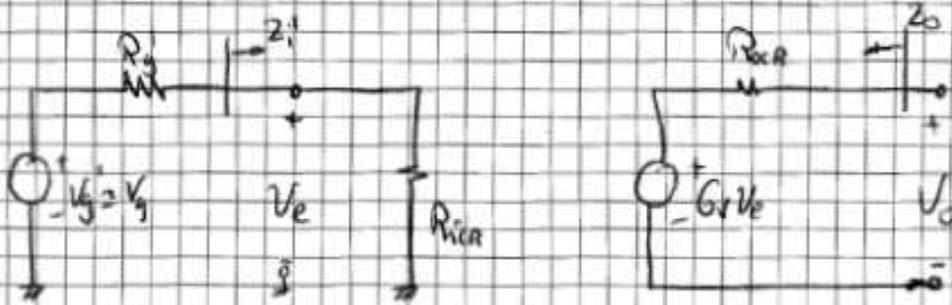


Fig. 7 (Sol. Ejercicio 1)

Donde: $R_{10} = R_{10} (1 + A_v \beta_v) = 380 \text{ k}\Omega (1 + \frac{8 \text{ V/V} \cdot 0,25 \text{ V/V}}{3})$

$R_{10} = 1140 \text{ k}\Omega = 1,14 \text{ M}\Omega$

$R_{10} = \frac{R_{10}}{1 + A_v \beta_v} = \frac{0,33 \text{ k}\Omega}{1 + 2} = 110,0 \Omega$

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

Nota: Si $A_v \beta_v \gg 1$

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

Por tanto, $\frac{V_o}{V_g} = \frac{V_o}{V_e} \cdot \frac{V_e}{V_g} = G_v \cdot \frac{R_{10}}{R_g + R_{10}} \cdot \frac{V_g}{V_g} = 2,67 \cdot 1 \cdot 0,98 = 2,6 \text{ V/V}$



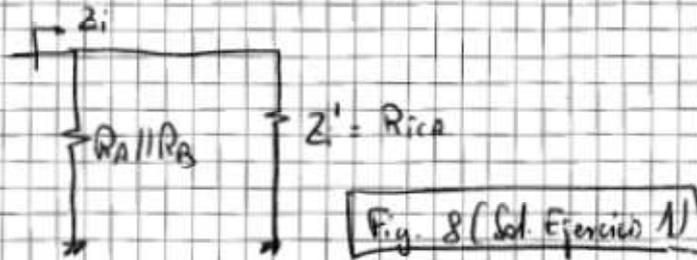
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

4.- Calcular Z_i , Z_0' y Z_0

1.- Cálculo de Z_i

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

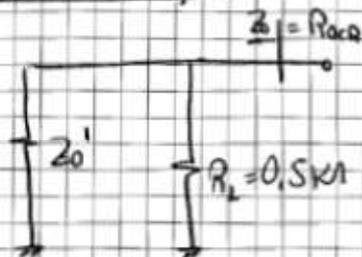


$$Z_i = R_A // R_B // R_{1c2} = \frac{60 \text{ kN} // 80 \text{ kN} // 1140 \text{ kN}}{34,28 \text{ kN} // 1140 \text{ kN}} = 33,3 \text{ kN}$$

Nota: siendo $Z_i = 33,3 \text{ kN} = R_A // R_B = 34,28 \text{ kN}$

2.- Cálculo de Z_0'

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



$$Z_0 = Z_0' // R_2 = \frac{Z_0' \times 0,5 \text{ kN}}{Z_0' + 0,5 \text{ kN}} \rightarrow Z_0 = \frac{Z_0' \times 0,5 \text{ kN}}{0,5 \text{ kN} - Z_0} = \frac{110 \text{ N} \times 0,5 \text{ kN}}{0,5 \text{ kN} - 110 \text{ N}}$$

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70



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_o/V_g , Z_1 y Z_4 .
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: $r_o \rightarrow \infty$, $\beta = 100$, $r_{\pi 1} = 2.5 \text{ k}\Omega$; $r_{\pi 2} = 2.5 \text{ k}\Omega$; $r_{\pi 3} = 1.25 \text{ k}\Omega$

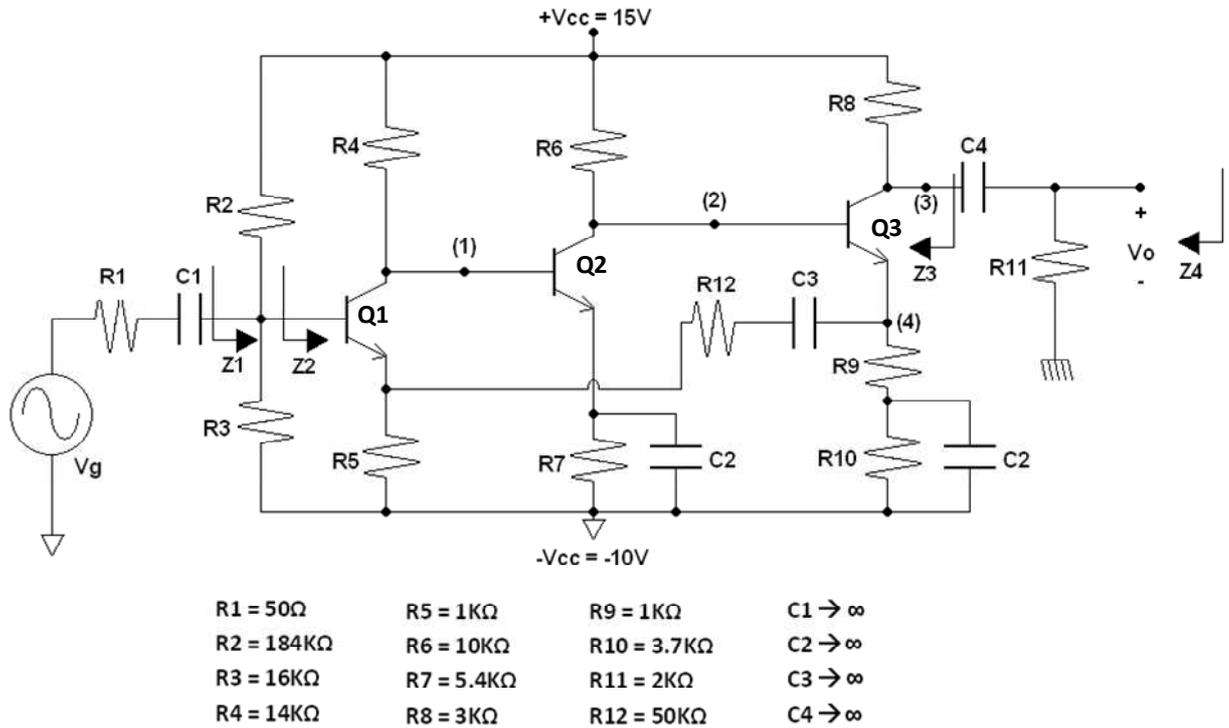


Figura 1

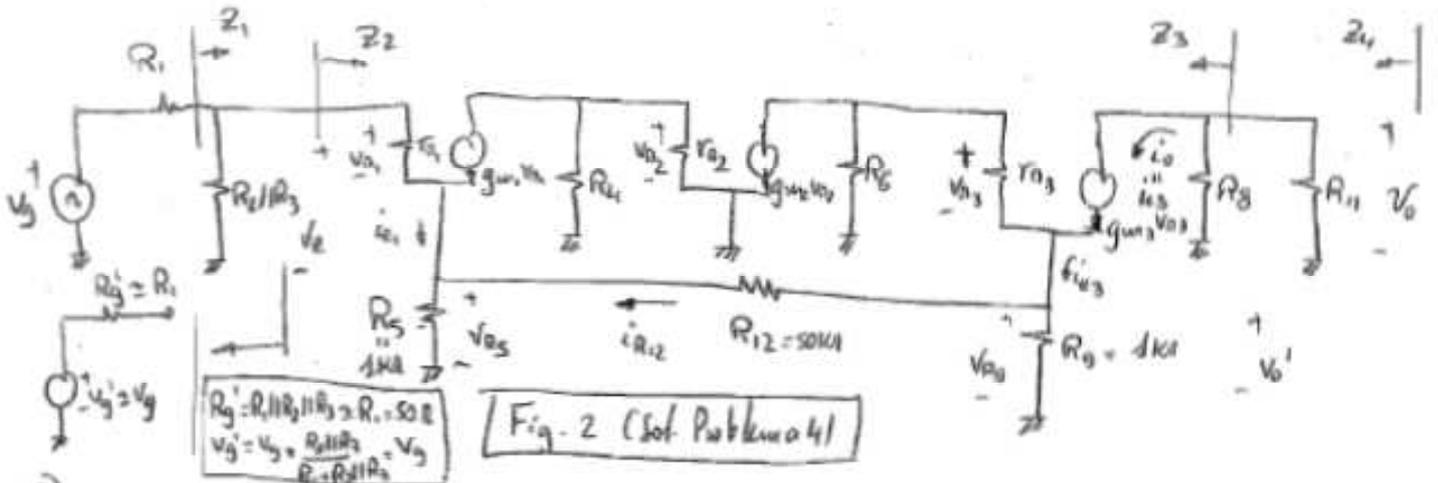
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Cartagena99

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.



1) Si $i_{o3} \uparrow \rightarrow g_{m3} v_{o3} \uparrow \rightarrow i_{e3} \approx i_{c3} = g_{m3} v_{o3} \uparrow \rightarrow v_{R5} = R_5 \times i_{e3} \uparrow$
 $R_5 \ll R_{12} \rightarrow v_{R5} \uparrow \rightarrow i_{R12} \uparrow$
 $i_{R12} \times R_5 = v_{R5} \uparrow \rightarrow v_{e1} = v_{b1} + v_{R5} \rightarrow v_{b1} \uparrow \rightarrow g_{m1} v_{b1} \uparrow \rightarrow v_{e2} \uparrow \rightarrow g_{m2} v_{e2} \uparrow \rightarrow$
 Suponiendo $i_{e1} \approx g_{m1} v_{b1} = \text{Constante}$
 $\rightarrow v_{e2} \uparrow \rightarrow g_{m3} v_{o3} = i_{o3} \downarrow \rightarrow$ Existe realimentación negativa.

2) - Muestreamos corriente a la salida $\left\{ \frac{i_o}{v_e} = \frac{A_v}{1 + A_v \beta_2} = G_v \right.$
 - Comparamos tensión a la entrada

Es decir, tenemos una topología Serie-serie



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

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

① Red β .

Según el circuito de la Figura 2 (Sol. Probl. 4), la red β para la que nos permite mostrar la corriente de salida y compararla a la entrada tensión es la red formada por las resistencias R_5 , R_{12} y R_9 es decir:

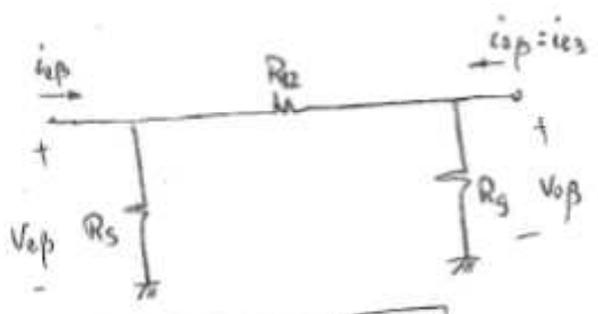


Fig. 3 (Sol. Problema 4)

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

$$v_{ep} = Z_{11} \beta i_{ep} + Z_{12} \beta i_{op}$$

$$v_{op} = Z_{21} i_{ep} + Z_{22} \beta i_{op}$$

↓ Elemento común a la entrada
 ↓ Elemento común a la salida

Por tanto, $Z_{11} \beta = \left. \frac{v_{ep}}{i_{ep}} \right|_{i_{op} = 0} = R_5 // (R_{12} + R_9) = 1k // (500\Omega + 1k) = 0,98k \approx 1k$



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

3

② Cálculo del vector de β_2

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, $\beta_2 = \frac{V_{e\beta}}{i_o} = \frac{V_{e\beta}}{i_{o\beta}} \cdot \frac{i_{o\beta}}{i_o}$ } Siendo $i_{o\beta} = i_{e3}$ y $i_o = i_{c3}$ } Ver Fig. 2 (Sol. Problema 4)

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

Un esquema circuital que puede resumir el efecto del factor $\frac{1}{\alpha_F}$ en la red β_{cr} .

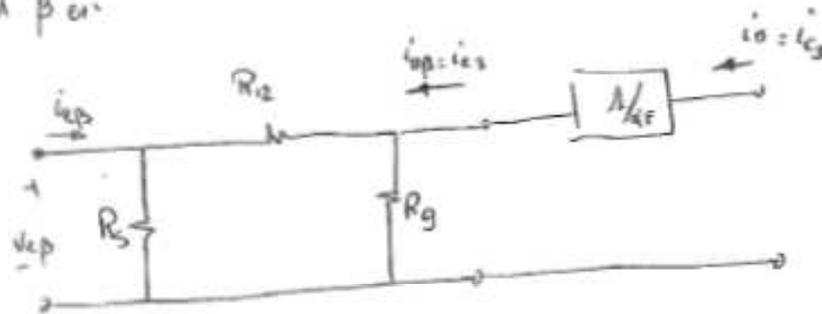
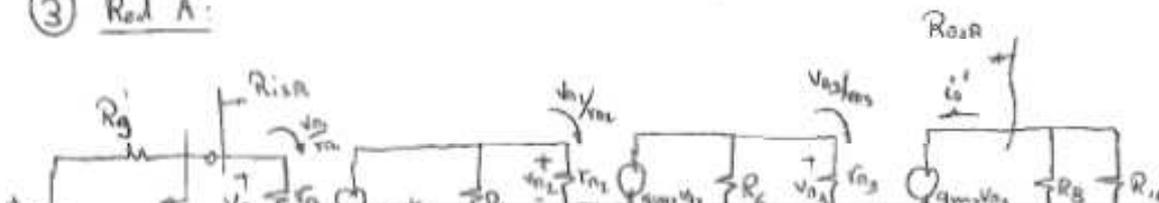


Fig. 4. (Sol. Problema 4)

En consecuencia, $\beta_2 = \frac{V_{e\beta}}{i_o} = \frac{V_{e\beta}}{i_{o\beta}} \cdot \frac{i_{o\beta}}{i_o} = Z_{12\beta} \cdot \frac{1}{\alpha_F} = 19\Omega \cdot \frac{1}{0,99} \approx 19,2\Omega$

$\beta_2 = 19,2\Omega \approx 19\Omega = Z_{12\beta}$

③ Red A'



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Cartagena99

4) cálculo del valor de $A' = A_v$

$$A' = A_v = \left. \frac{i_o'}{v_o'} \right|_{\text{corto}} \quad \boxed{\text{Fig 5 (ed. Robt 4)}} \quad \underbrace{\frac{i_o'}{v_{o3}}}_{(1)} \times \underbrace{\frac{v_{o3}}{v_{o2}}}_{(2)} \times \underbrace{\frac{v_{o2}}{v_{o1}}}_{(3)} \times \underbrace{\frac{v_{o1}}{v_o'} }_{(4)}$$

1) $i_o' = g_{m3} v_{o3} \rightarrow \boxed{\frac{i_o'}{v_{o3}} = g_{m3}}$

2) $\frac{v_{o3}}{v_{o2}} = \frac{-g_{m2} v_{o2} R_C}{R_C + r_{o2} + [R_3 \parallel R_{o1} \parallel R_5] (1 + \beta_{o2})} \rightarrow$ Ecuación de un divisor de corriente

$$\boxed{\frac{v_{o3}}{v_{o2}} = \frac{-g_{m2} v_{o2} R_C}{R_C + r_{o2} + [R_3 \parallel R_{o1} \parallel R_5] (1 + \beta_{o2})}}$$

3) $\frac{v_{o2}}{v_{o1}} = -g_{m1} v_{o1} \frac{R_4}{R_4 + r_{o2}} \rightarrow$ Ecuación de un divisor de corriente

$$\boxed{\frac{v_{o2}}{v_{o1}} = -\frac{g_{m1} r_{o2} R_4}{R_4 + r_{o2}} = -g_{m1} \parallel r_{o2} \parallel R_4}$$

4) $\frac{v_{o1}}{v_i'} = \frac{r_{o1}}{R_3' + r_{o1} + [R_5 \parallel R_{o2} \parallel R_5] (1 + \beta_{o1})} \rightarrow$ Ecuación de un divisor de tensión

$$\boxed{\frac{v_{o1}}{v_i'} = \frac{r_{o1}}{R_3' + r_{o1} + [R_5 \parallel R_{o2} \parallel R_5] (1 + \beta_{o1})}}$$

Por tanto, tenemos:

$$A_v = \underbrace{g_{m3}}_{\beta_{o3}} \times \underbrace{\left(\frac{-g_{m2} r_{o2} R_C}{R_C + r_{o2} + [R_3 \parallel R_{o1} \parallel R_5] (1 + \beta_{o2})} \right)}_{\beta_{o2}} \times \underbrace{\left(\frac{-g_{m1} r_{o2} R_4}{R_4 + r_{o2}} \right)}_{\beta_{o1}} \times \underbrace{\left(\frac{r_{o1}}{R_3' + r_{o1} + [R_5 \parallel R_{o2} \parallel R_5] (1 + \beta_{o1})} \right)}_{\beta_{o1}}$$

$$A_v = \beta_{o1} \cdot \beta_{o2} \cdot \beta_{o3} = \frac{R_C}{R_C + r_{o2} + [R_3 \parallel R_{o1} \parallel R_5] (1 + \beta_{o2})} \cdot \frac{R_4}{R_4 + r_{o2}} + \frac{1}{R_3' + r_{o1} + [R_5 \parallel R_{o2} \parallel R_5] (1 + \beta_{o1})}$$

Por tanto,

$$A_v = 100 \cdot \frac{10k\Omega}{10k\Omega + 1,25k\Omega + [1k\Omega(50\Omega + 1k\Omega)](1+100)} \cdot \frac{14k\Omega}{14k\Omega + 1,25k\Omega} \cdot \frac{1}{50\Omega + 2,5k\Omega + [1k\Omega(50\Omega + 1k\Omega)]}$$

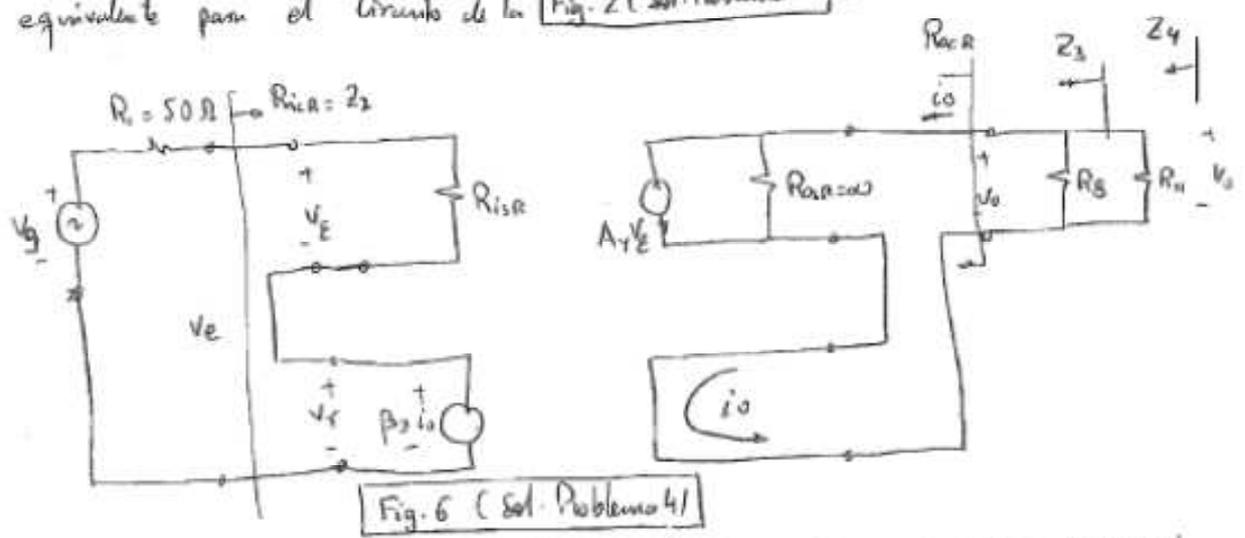
$\underbrace{\hspace{10em}}_{\sim 1k\Omega}$
 $\underbrace{\hspace{10em}}_{0,92}$
 $\underbrace{\hspace{10em}}_{\sim 101k\Omega}$

$\sim 10^{-2} \frac{1}{k\Omega}$
 $\sim 10^{-5} \frac{1}{\Omega}$

$$A_v = 10^6 \cdot 0,089 \cdot 0,92 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\Omega} \approx 0,8 \cdot \frac{1}{\Omega}$$

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

Según el esquema de la **Figura 5 (Sol. Problema 4)** tenemos como esquema equivalente para el circuito de la **Fig. 2 (Sol. Problema 4)**:



Siendo R_{isR} (ver Fig 5 (Sol. Problema 4)) = $r_{o1} + [R_3 || (R_{12} + R_4)](1 + \beta_{o1}) = 2,5k\Omega + 1k\Omega(101)$

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

$R_{1sR} = \infty$

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
 ...
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70



Asimismo tenemos:

$$R_{iCB} = R_{iCB} (1 + A_2 \beta_1) = 103,5k\Omega (1 + 15,36) = 1693,26k\Omega \approx 1,7M\Omega$$

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

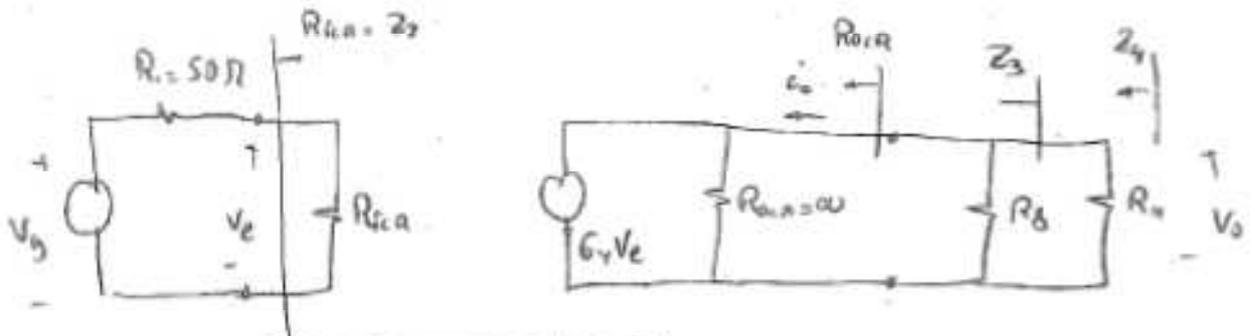


Fig. 7 (Sol. Problema 4)

En consecuencia, $\frac{v_o}{v_g} = \frac{v_o}{i_o} \times \frac{i_o}{v_e} \times \frac{v_e}{v_g} = - (R_B || R_o) \cdot G_v \times \frac{R_{iCB}}{R + R_{iCB}}$

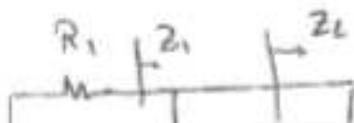
$$\frac{v_o}{v_g} = - (R_B || R_o) \cdot 0,05 \frac{1}{\Omega} = - \frac{(3k\Omega || 2k\Omega) \cdot 0,05 \frac{1}{\Omega}}{1,2k\Omega} = - 60$$

$$z_2 = R_{iCB} = 1,7M\Omega$$

$$z_3 = R_B || R_{oCB} = 3k\Omega || \infty = 3k\Omega$$

$$z_4 = R_o || z_3 = 2k\Omega || 3k\Omega = 1,2k\Omega$$

Para el cálculo de z_1 tomamos el siguiente circuito:



Por tanto $z_1 = R_1 || z_2 || z_3$

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70



4.- ① Si la tensión de salida la tomamos en el punto (4) es v_o' , (Ver Fig 2 (sol Probl 4))

implica que: - mediremos tensión a la salida
- comparemos tensión a la entrada

$$\left. \begin{array}{l} - \text{mediremos tensión a la salida} \\ - \text{comparemos tensión a la entrada} \end{array} \right\} \frac{v_o'}{v_e} = \frac{A_v}{1 + A_v \beta_v} = G_v$$

② - Es decir, tenemos una topología serie-parallel

③ - Establezcamos una función de transferencia: G_v

④ - los parámetros privilegiados son los parámetros: "h"

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

EJERCICIO 11

Dado el amplificador realimentado de la figura 3,

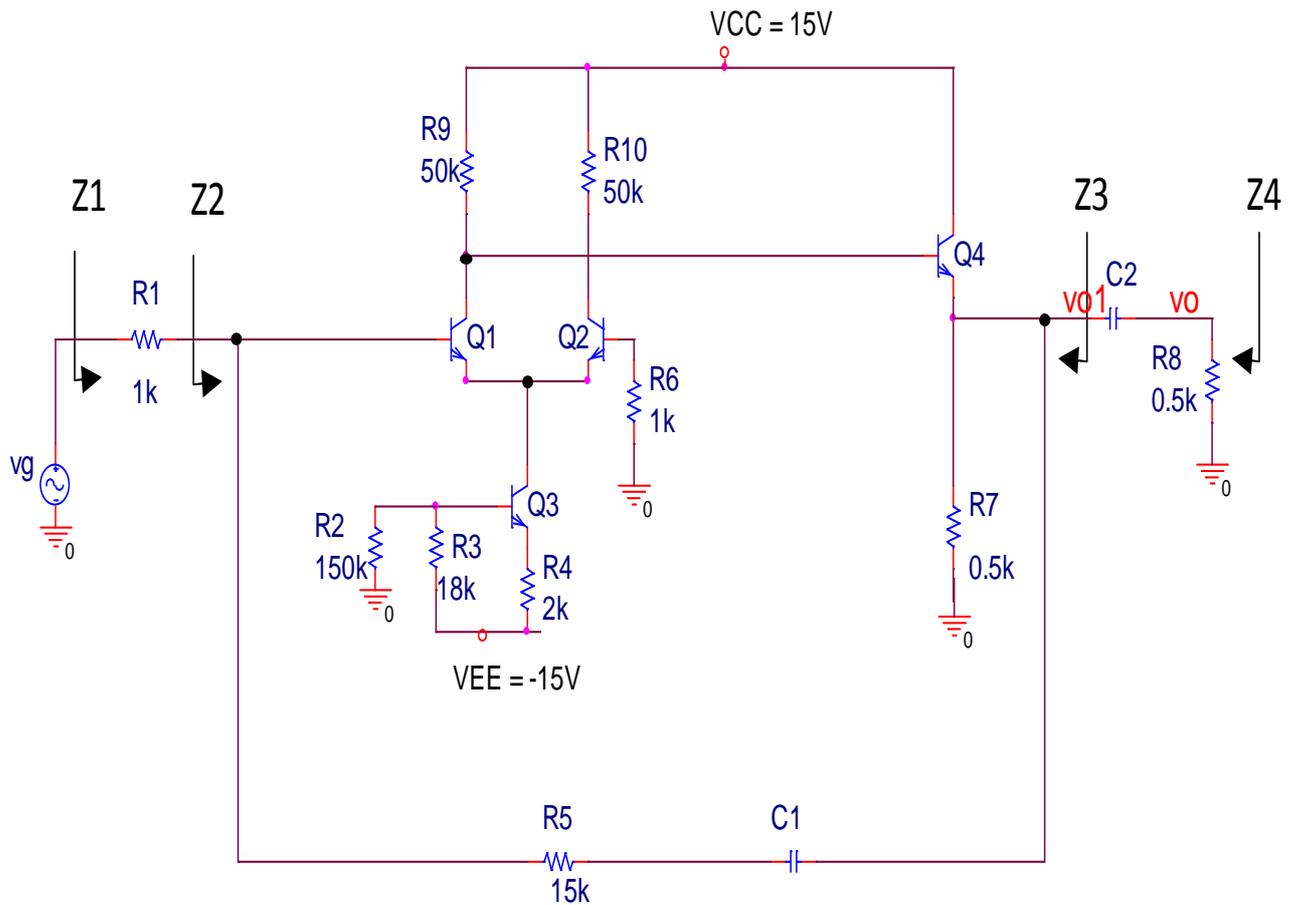


Figura 3

DATOS:

$C1, C2 \rightarrow \infty$

Q1 a Q4: $\beta = 250$

$r_o \rightarrow \infty$

Corrientes en DC: $I_{CQ1} = I_{CQ2} = 0.25\text{mA}$

$I_{CQ4} = 3.8\text{mA}$

Se pide:

- 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
- Obtenga las redes A' y β , sus expresiones y calcule su valor correspondiente al amplificador realimentado de la Figura 3
- Calcule v_o/v_g , Z1, Z2, Z3 y Z4

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

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:

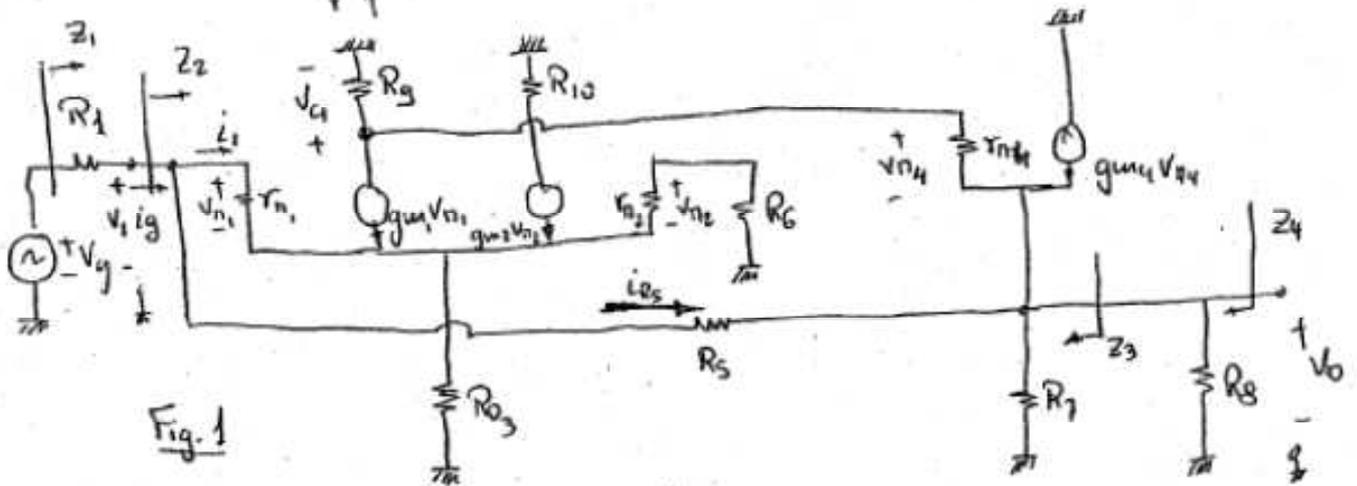
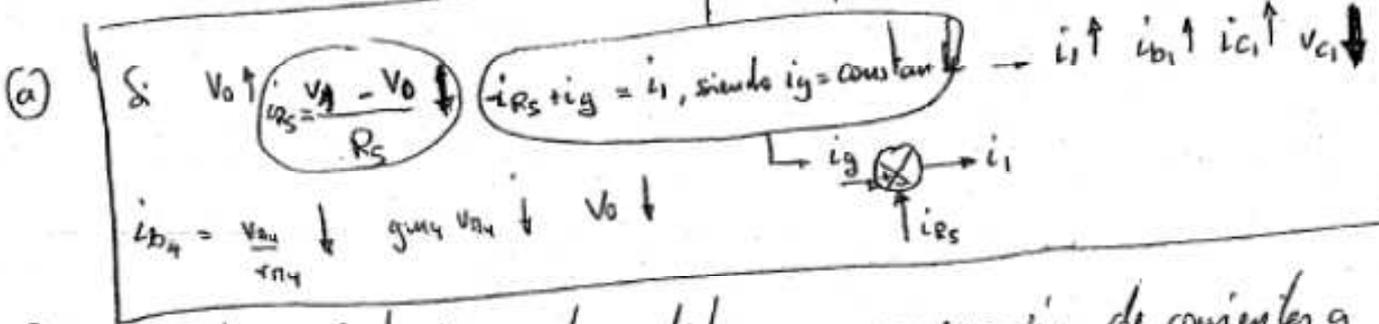


Fig. 1

$$\text{Siendo } R_{03} = r_{03} \left(1 + \frac{R_{02} R_{04}}{R_2/R_3 + r_{03} + R_4} \right)$$

Esquema compensador de corrientes a la entrada



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

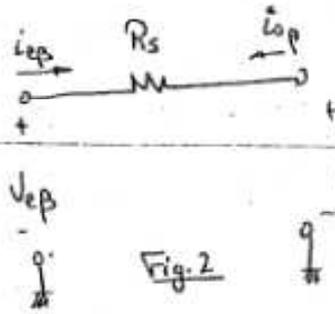


CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

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

(a) La red β es la que permite pasar de la señal de salida (en este caso v_o) a la señal de realimentación (en este caso i_{R_s}). Es decir, la resistencia R_s :



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

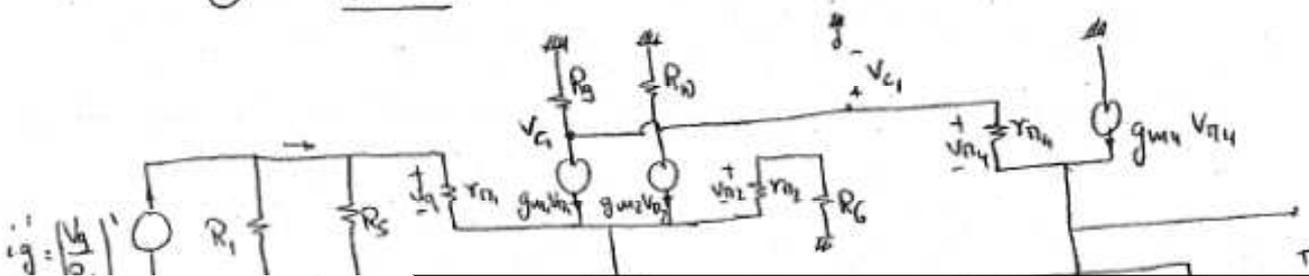
$$i_{o\beta} = y_{21\beta} v_{e\beta} + y_{22\beta} v_{o\beta}$$

Dando $y_{11\beta} = \frac{i_{e\beta}}{v_{e\beta}} \Big|_{v_{o\beta}=0} = \frac{1}{R_s} = \frac{1}{15k\Omega} = 0,067 \text{ (k}\Omega\text{)}^{-1}$

$$y_{22\beta} = \frac{i_{o\beta}}{v_{o\beta}} \Big|_{v_{e\beta}=0} = \frac{1}{R_s} = \frac{1}{15k\Omega} = 0,067 \text{ (k}\Omega\text{)}^{-1}$$

$$y_{12\beta} = \frac{i_{e\beta}}{v_{o\beta}} \Big|_{v_{e\beta}=0} = -\frac{1}{R_s} = -\frac{1}{15k\Omega} = -0,067 \text{ (k}\Omega\text{)}^{-1} = \beta$$

(b) Red A' .



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70



Para obtener las expresiones (1) $\frac{v_o'}{v_i}$ y (2) $\frac{v_{c1}}{i_g'}$ de circuitos de la Fig. 3 lo dividimos en 2 subcircuitos

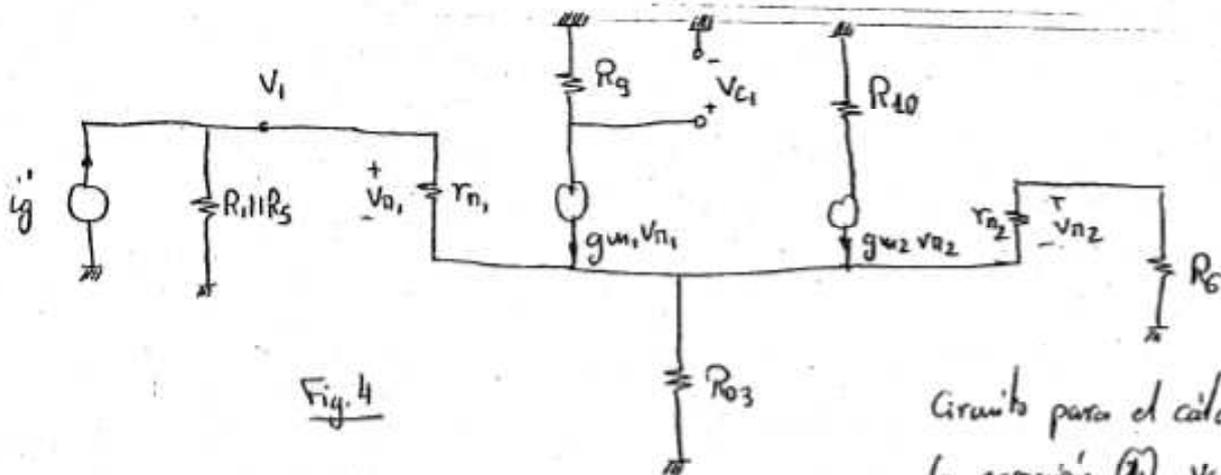


Fig. 4

Circuito para el cálculo de la expresión (2) $\frac{v_{c1}}{i_g'}$

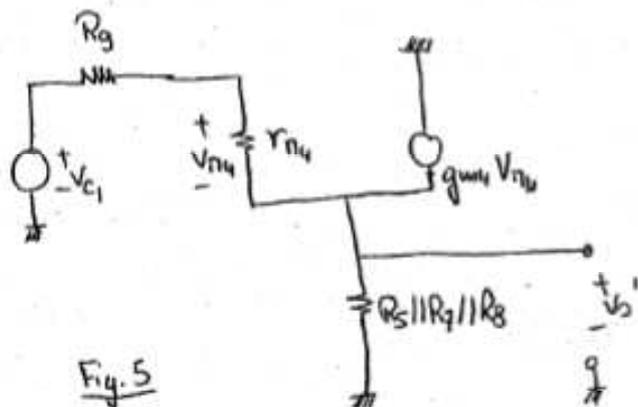


Fig. 5

Circuito para el cálculo de la expresión (1) $\frac{v_o'}{v_{c1}}$

$$(1) \frac{v_o'}{v_{c1}} = \frac{(R_3 \parallel R_7 \parallel R_8) (1 + \beta_{04})}{R_g + r_{n4} + (R_3 \parallel R_7 \parallel R_8) (1 + \beta_{04})} = \frac{(15k\Omega \parallel 10,5k\Omega \parallel 0,5k\Omega) (1 + 250)}{50k\Omega + 1,6k\Omega + (15k\Omega \parallel 10,5k\Omega \parallel 0,5k\Omega) (2)}$$

$$\text{Siendo } r_{n4} = \beta_{04} \times \frac{V_T}{I_{CQ4}} = 250 \times \frac{25mV}{38\mu A} = 1,6k\Omega$$

$$\frac{v_o'}{v_{c1}} = \frac{0,25k\Omega (1 + 250)}{62,75k\Omega} = 0,55$$

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Cartagena99

(2b) Como dices de conectar la entrada tenemos (Ver Circuito Fig. 4)

(2b)

$$1 - V_i = v_{n1} + R_{03} \left(\frac{v_{n1}}{r_{n1}} + g_{m1} v_{n1} + g_{m2} v_{n2} + \frac{v_{n2}}{r_{n2}} \right)$$

$$2 - V_i = v_{n1} - v_{n2} - \frac{v_{n2}}{r_{n2}} + R_G$$

$$3 - i_g' = \frac{V_i}{R_1 || R_5} + \frac{v_{n1}}{r_{n1}}$$

2. → $V_i = v_{n1} - v_{n2} \left(\frac{r_{n2} + 1}{r_{n2}} \right)$

3. → $i_g' = \frac{v_{n1} - v_{n2} \left(\frac{r_{n2} + 1}{r_{n2}} \right)}{R_1 || R_5}$

Sustituyendo 2 en 1 tenemos

~~$$v_{n1} - v_{n2} \left(\frac{r_{n2} + R_G}{r_{n2}} \right) = v_{n1} + R_{03} (1 + \beta_{01}) \frac{v_{n1}}{r_{n1}} + R_{03} (1 + \beta_{02}) \frac{v_{n2}}{r_{n2}}$$~~

$$R_{03} (1 + \beta_{01}) \frac{v_{n1}}{r_{n1}} = - \frac{v_{n2}}{r_{n2}} \left(\frac{r_{n2} + R_G}{r_{n2}} + R_{03} (1 + \beta_{02}) \right)$$

~~$$R_{03} (1 + \beta_{01}) \frac{v_{n1}}{r_{n1}} = - \frac{v_{n2}}{r_{n2}} R_{03} (1 + \beta_{02})$$~~

$$\frac{v_{n1}}{r_{n1}} = - \frac{v_{n2}}{r_{n2}} \quad \text{como } r_{n1} = r_{n2} \rightarrow \boxed{v_{n1} = -v_{n2}}$$

Tenemos, por tanto en la expresión 3: $i_g' = \frac{v_{n1} + v_{n1} \left(\frac{r_{n2} + R_G}{r_{n2}} \right)}{R_1 || R_5} + \frac{v_{n1}}{r_{n1}}$

Como $r_{n1} = r_{n2} \rightarrow i_g' = v_{n1} \left(\frac{2r_{n1} + R_G + R_1 || R_5}{(R_1 || R_5) + r_{n1}} \right)$

Por tanto:
$$\boxed{\frac{v_{n1}}{i_g'} = \frac{(R_1 || R_5) + r_{n1}}{2r_{n1} + R_G + R_1 || R_5}}$$

Cartagena99

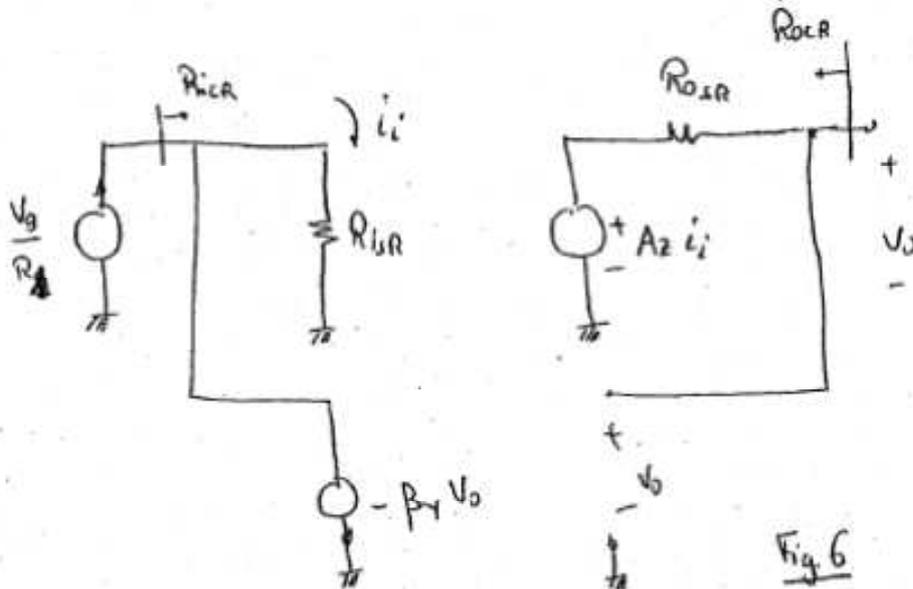
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Por tanto: $A_z = \frac{v_o}{i_o} = \frac{v_o}{v_{c1}} \cdot \frac{v_{c1}}{i_o} \approx 0,55 \cdot (-225,62 \text{ k}\Omega) = -124 \text{ k}\Omega$

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

El Amplificador realimentado que hemos obtenido es:



Seendo: $R_{f1R} = R_1 \parallel R_5 \parallel (r_{m1} + r_{m2} + R_6) = 1 \text{ k}\Omega \parallel 15 \text{ k}\Omega \parallel \frac{25 \text{ k}\Omega + 25 \text{ k}\Omega + 1 \text{ k}\Omega}{51 \text{ k}\Omega} \approx 0,92 \text{ k}\Omega$

$R_{o1R} = R_3 \parallel R_7 \parallel R_8 \parallel \left(\frac{r_{m1} + R_9}{1 + \beta_{04}} \right) = 15 \text{ k}\Omega \parallel 0,5 \text{ k}\Omega \parallel 0,5 \text{ k}\Omega \parallel \left(\frac{1,6 \text{ k}\Omega + 50 \text{ k}\Omega}{1 + 250} \right) \approx 0,5 \text{ k}\Omega$

$A_z = -124 \text{ k}\Omega$

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

$A_z \beta_v = (-124 \text{ k}\Omega) \cdot \left(-0,067 \frac{1}{\text{k}\Omega} \right) = 8,308$

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

En donde tenemos:

$$R_{iCR} = \frac{R_{iR}}{1 + A_z \beta_v} = \frac{0,92 \text{ k}\Omega}{1 + 8,3} = 98 \Omega$$

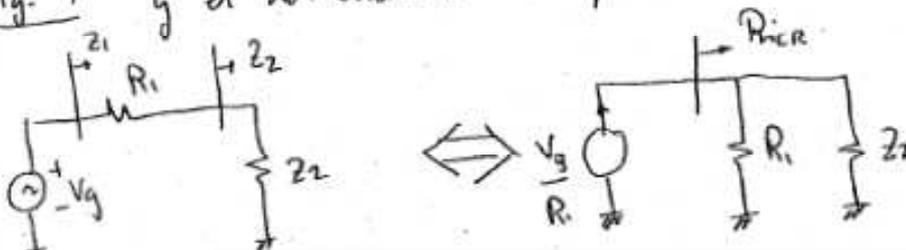
$$R_{oCR} = \frac{R_{oR}}{1 + A_z \beta_v} = \frac{0,11 \text{ k}\Omega}{1 + 8,3} = 11,8 \Omega$$

$$G_z = \frac{A_z}{1 + A_z \beta_v} = \frac{-124 \text{ k}\Omega}{1 + 8,3} = -13,3 \text{ k}\Omega$$

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

$$\frac{v_o}{v_g} = \frac{v_o}{i_g} \times \frac{i_g}{v_g} = G_z \times \frac{1}{R_i} = \frac{-13,3 \text{ k}\Omega}{1 \text{ k}\Omega} = -13,3$$

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

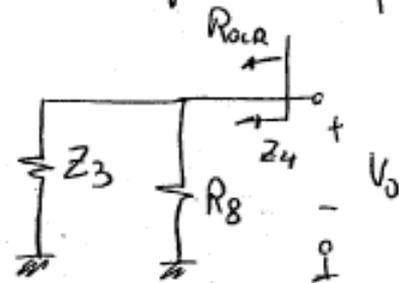
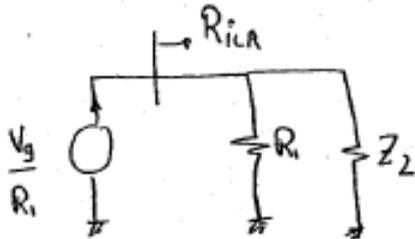


CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

$$c) \boxed{Z_4 = R_{ocR} \text{ (ver Fig. 7)} = 11,8 \Omega}$$

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



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

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

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

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

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70