



UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA
Escuela Técnica Superior de Ingenieros
de Telecomunicación

CIRCUITOS ANALÓGICOS (SEGUNDO CURSO)

Tema 4

Amplificadores Realimentados

Sebastián López y José Fco. López
Instituto Universitario de Microelectrónica Aplicada (IUMA)
Universidad de Las Palmas de Gran Canaria
35017 - Las Palmas de Gran Canaria
Tfno. 928.451247
Fax 928.451243
e-mail: seblopez@iuma.ulpgc.es

© LOPEZ

OBJETIVOS

La mayoría de los sistemas físicos incorporan algún tipo de realimentación. La teoría de la realimentación negativa fue desarrollada por ingenieros, siendo Harold Black, ingeniero electrónico de la Western Electric Company, quien inventó el primer amplificador realimentado en 1928. Desde entonces, esta técnica ha sido ampliamente utilizada hasta el punto que es imposible pensar en un circuito electrónico sin alguna forma de realimentación, ya sea explícita o implícita.

El diseño de amplificadores con realimentación negativa ofrece múltiples beneficios (reducción de la sensibilidad a variaciones de parámetros, incremento del ancho de banda, reducción de la distorsión no lineal, mejora de las resistencias de entrada y salida...). En este capítulo se presentan las características básicas de la realimentación negativa junto con una clasificación de los distintos tipos de configuraciones de realimentación que nos podemos encontrar. Se desarrolla una metodología de análisis de amplificadores realimentados en la que la teoría de cuadripolos juega un papel muy importante.

Duración: 9 horas

ÍNDICE

1. Introducción
2. Estructura general de la realimentación
3. Propiedades de la realimentación negativa
 - 3.1. Insensibilización de la ganancia
 - 3.2. Aumento del ancho de banda
 - 3.3. Disminución del ruido
 - 3.4. Reducción de la distorsión no lineal
4. Topologías básicas de realimentación
 - 4.1. Realimentación serie-paralelo: amplificador de tensión
 - 4.2. Realimentación paralelo-paralelo: amplificador de transresistencia
 - 4.3. Realimentación paralelo-serie: amplificador de corriente
 - 4.4. Realimentación serie-serie: amplificador de transconductancia
 - 4.5. Tabla resumen de topologías de realimentación
5. Configuraciones prácticas y efecto de la carga
 - 5.1. Realimentación paralelo-paralelo
 - 5.2. Realimentación serie-serie
 - 5.3. Realimentación serie-paralelo
 - 5.4. Realimentación paralelo-serie
6. Metodología de análisis de circuitos realimentados
 - 6.1. Caso de estudio: Amplificador no inversor con operacional

FICHA TÉCNICA

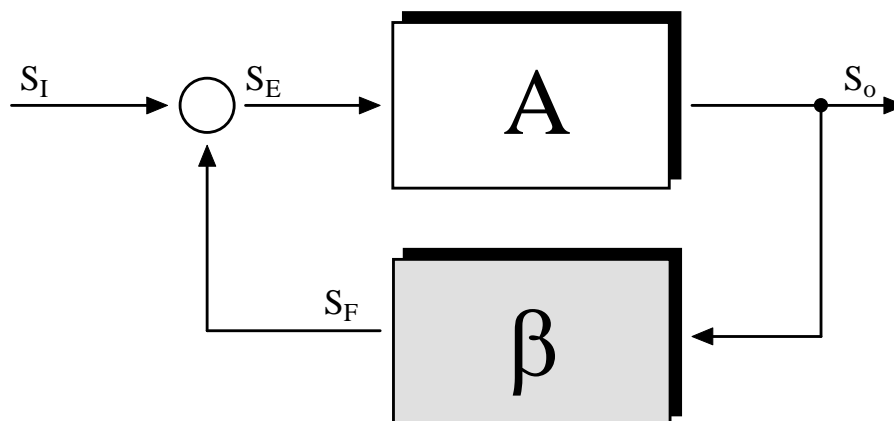
1. Introducción

Beneficios: Estabiliza la ganancia del amplificador contra cambios en los parámetros de los dispositivos; permite modificar las impedancias de entrada y salida del circuito; reduce la distorsión de la forma de onda de la señal que produce; produce un incremento en el ancho de banda de los circuitos.

Desventajas: Reduce la ganancia del circuito; resulta necesario añadir etapas de amplificación adicionales; aumento en el coste del circuito; se producen oscilaciones si no se realiza un diseño correcto.

2. Estructura general de la realimentación

Un sistema realimentado es aquel en el que parte de la salida se reintroduce en la entrada



$S_I \equiv$ señal de entrada

$S_o \equiv$ señal de salida

$S_F \equiv$ señal realimentada

$S_E \equiv$ señal de error

$$A_F = \frac{A}{1 + A\beta}$$

En el circuito realimentado se distinguen:

- Red $A \equiv$ Normalmente es un amplificador
- Red $\beta \equiv$ Normalmente es una red pasiva
- Mezclador \equiv Mezcla la señal de β con la señal de entrada

Se define la *ganancia de lazo* como el producto de la ganancia de la etapa amplificadora, A , por la ganancia de la red de realimentación, β .

Los sistemas realimentados se dividen en:

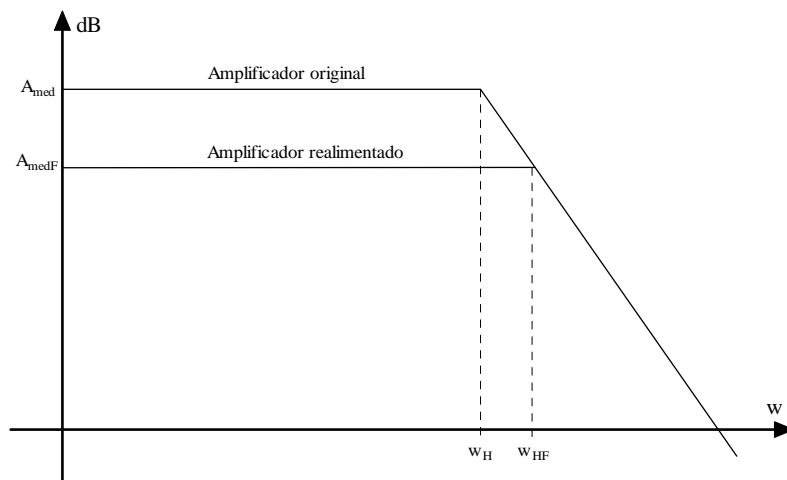
- Circuitos con realimentación negativa: $S_E = S_I - S_F$
 $A\beta > 0$
- Circuitos con realimentación positiva: $S_E = S_I + S_F$
 $A\beta < 0$

3. Propiedades de la realimentación negativa

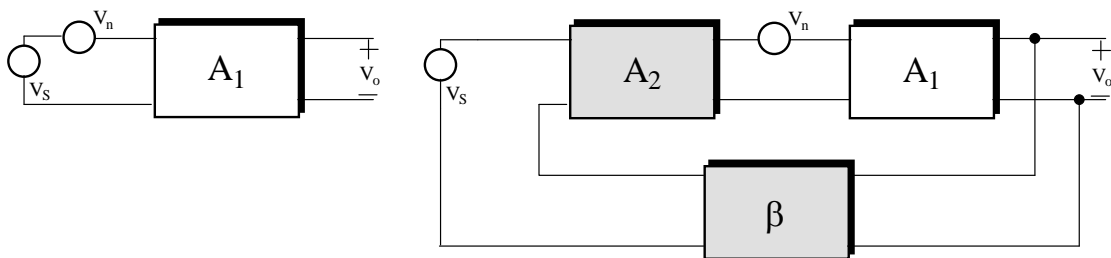
3.1. Insensibilización de la ganancia: Si el circuito tiene realimentación, la amplificación total tiene pocas variaciones con la temperatura, las condiciones de operación de los dispositivos activos...

$$\frac{dA_f}{A_f} = \frac{1}{1 + A\beta} \frac{dA}{A}$$

3.2. Aumento del ancho de banda: La función de transferencia del circuito realimentado es igual que la del circuito sin realimentar salvo que ahora la frecuencia de corte es mayor y la ganancia es menor.



3.3. Disminución del ruido: La realimentación negativa se emplea para aumentar el cociente señal-a-ruido (S/N).



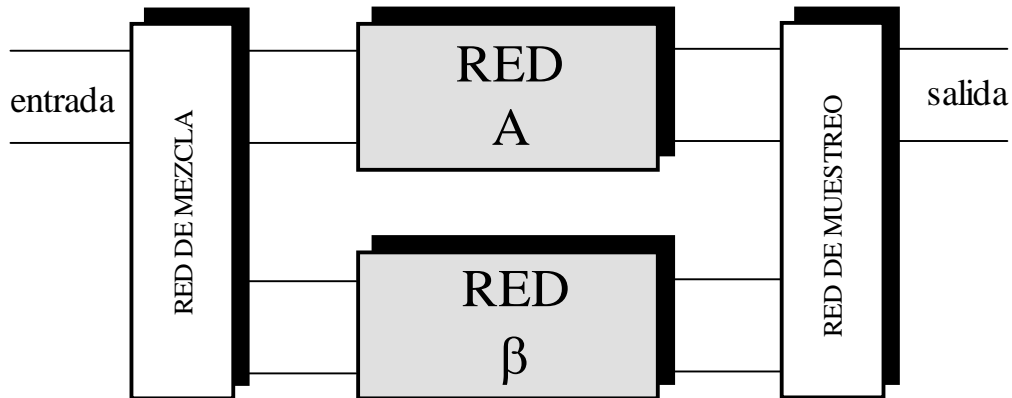
$$\frac{S}{N} = \frac{V_S}{V_n}$$

$$\frac{S}{N} = \frac{V_S}{V_n} A_2$$

3.4. Reducción en la distorsión no lineal: La distorsión está causada por los cambios en la pendiente de la característica de transferencia del amplificador básico. La realimentación reduce el efecto de estos cambios en la pendiente, dado que A_F es relativamente independiente de A .

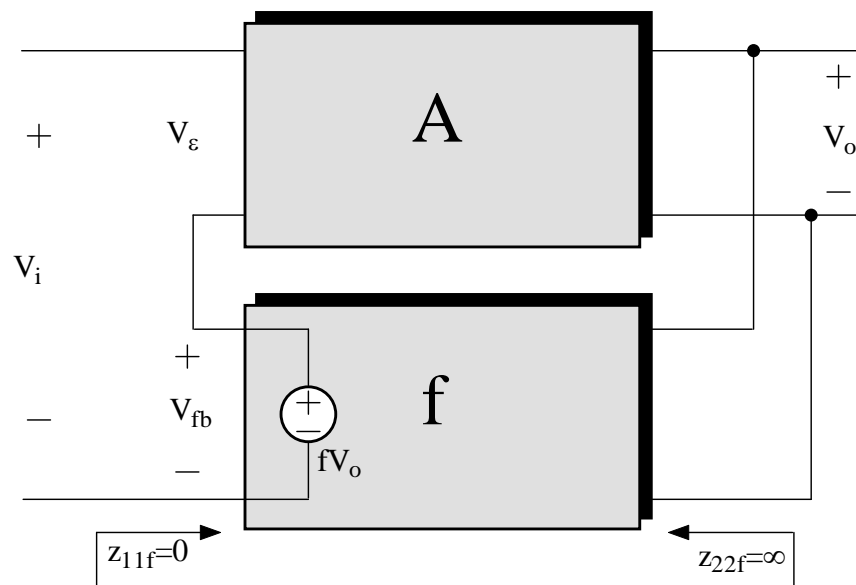
4. Topologías básicas de realimentación

El sistema básico de realimentación se puede representar de la siguiente forma haciendo uso del modelo de cuadripolo:

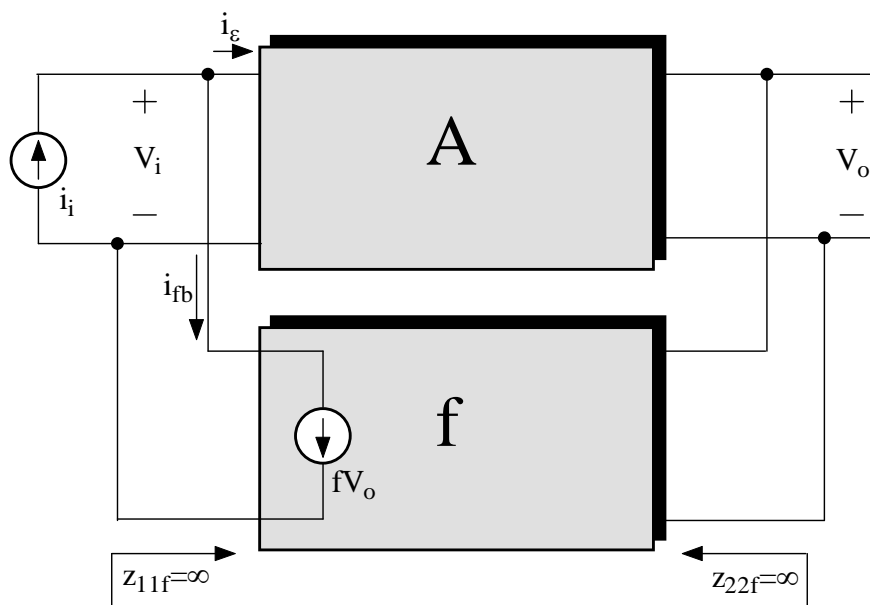


La red de mezcla representa una conexión, serie o paralelo, entre la salida de la red β y la entrada, mientras que la red de muestreo representa el tipo de conexión, serie o paralelo, entre la salida de la red A y la entrada de la red β .

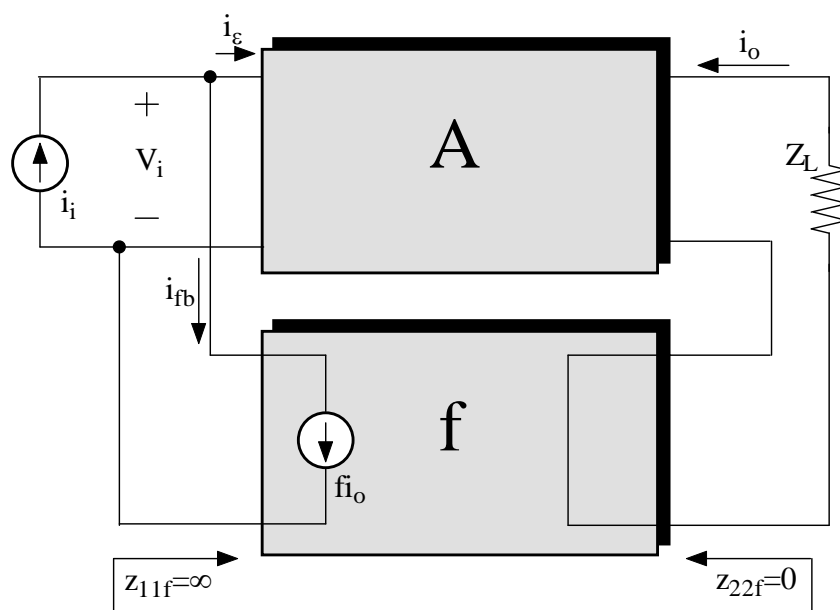
4.1. Realimentación serie-paralelo: amplificador de tensión



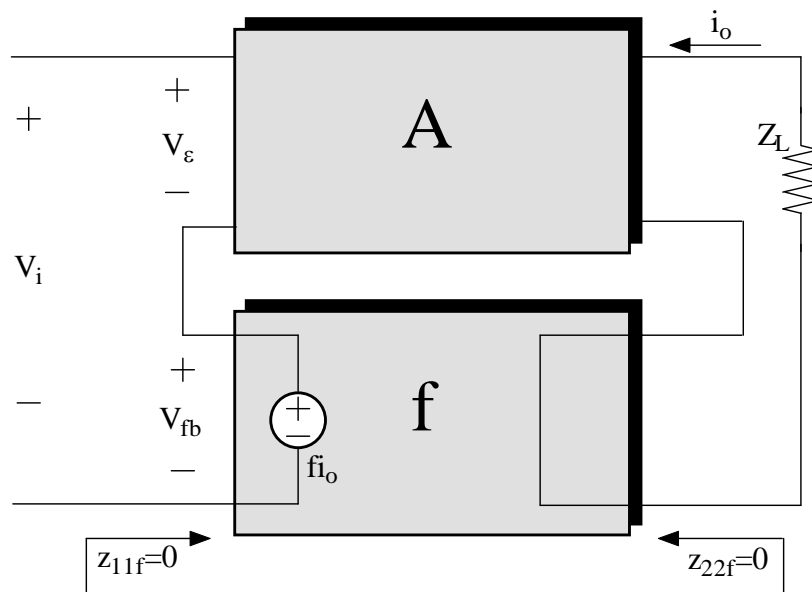
4.2. Realimentación paralelo-paralelo: amplificador de transresistencia



4.3. Realimentación paralelo-serie: amplificador de corriente



4.4. Realimentación serie-serie: amplificador de transconductancia



4.5. Tabla resumen de topologías de realimentación

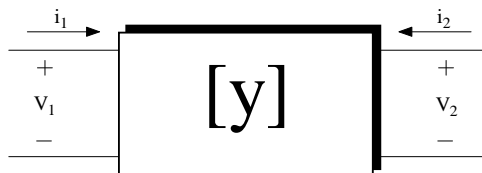
	Entrada serie ⇒ tensión	Entrada paralelo ⇒ intensidad
Salida serie ⇒ intensidad	<p>⇒ Amplificador de transconductancia:</p> <ul style="list-style-type: none"> • $A = i_o / V_i$ • $Z_{IF} = Z_i (1 + A\beta)$ • $Z_{OF} = Z_o (1 + A\beta)$ 	<p>⇒ Amplificador de corriente:</p> <ul style="list-style-type: none"> • $A = i_o / i_i$ • $Z_{IF} = Z_i / (1 + A\beta)$ • $Z_{OF} = Z_o (1 + A\beta)$
Salida paralelo ⇒ tensión	<p>⇒ Amplificador de tensión:</p> <ul style="list-style-type: none"> • $A = V_o / V_i$ • $Z_{IF} = Z_i (1 + A\beta)$ • $Z_{OF} = Z_o / (1 + A\beta)$ 	<p>⇒ Amplificador de corriente:</p> <ul style="list-style-type: none"> • $A = V_o / i_i$ • $Z_{IF} = Z_i / (1 + A\beta)$ • $Z_{OF} = Z_o / (1 + A\beta)$

5. Configuraciones prácticas y efecto de la carga

En amplificadores realimentados prácticos, la red de realimentación genera una carga en la entrada y en la salida del amplificador básico, y la división entre el amplificador básico y la red de realimentación no es tan obvia. La forma más sencilla de analizar estos circuitos es identificando el amplificador base y la red de realimentación y a continuación aplicar las ecuaciones de realimentación ideales deducidas en el apartado anterior. En general, será necesario incluir el efecto de la carga de la red de realimentación en el amplificador básico. En esta sección se ven métodos para incluir esa carga en los cálculos.

5.1. Realimentación paralelo-paralelo

La representación de dos puertos más conveniente es la de los parámetros $[y]$ porque mediante ellos se simplifican los cálculos.



$$y_{11} = \left. \frac{i_1}{V_1} \right|_{V_2=0}$$

$$y_{12} = \left. \frac{i_1}{V_2} \right|_{V_1=0}$$

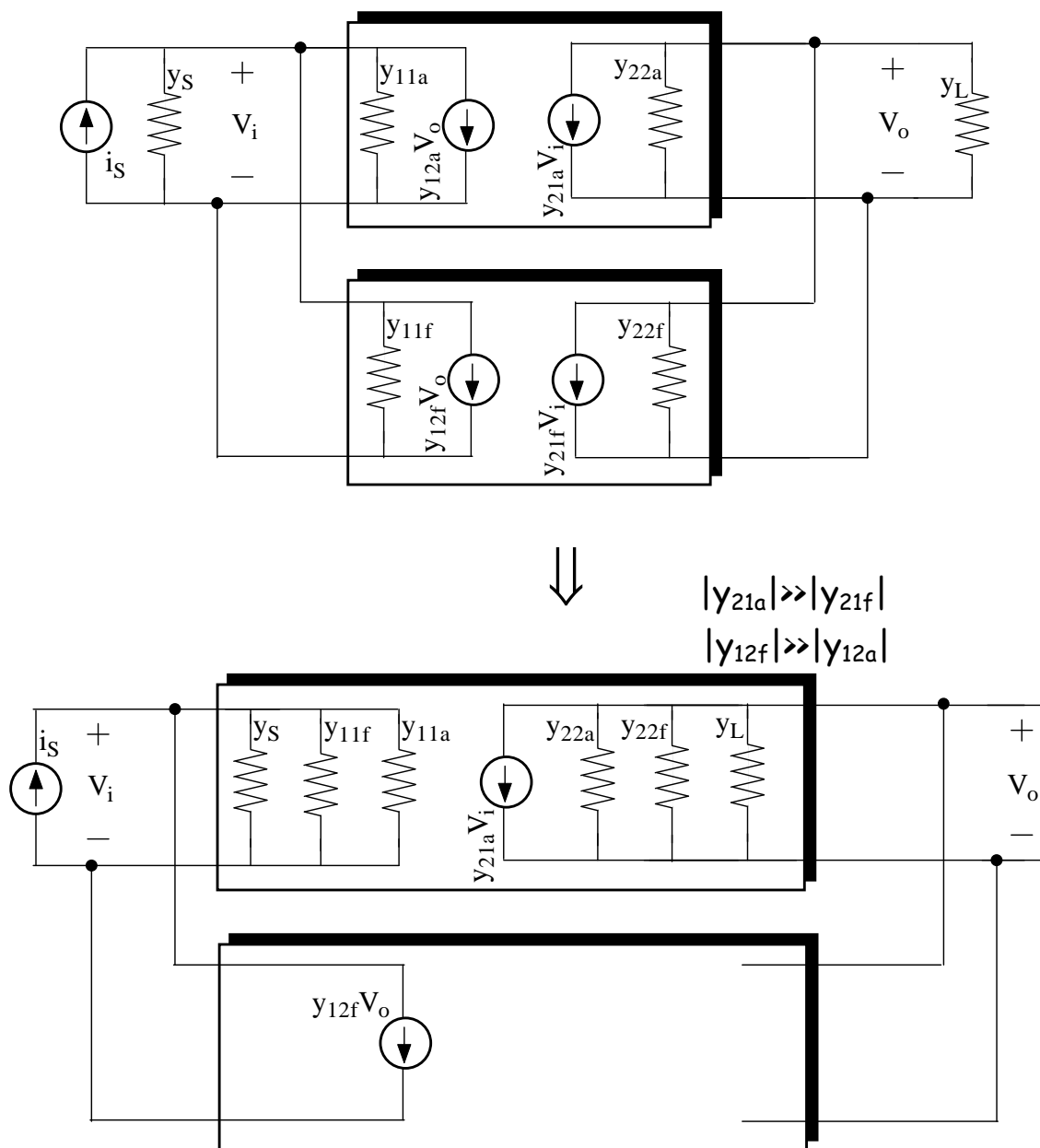
$$y_{21} = \left. \frac{i_2}{V_1} \right|_{V_2=0}$$

$$y_{22} = \left. \frac{i_2}{V_2} \right|_{V_1=0}$$

$$i_1 = y_{11}V_1 + y_{12}V_2$$

$$i_2 = y_{21}V_1 + y_{22}V_2$$

Si incluimos el efecto de las redes no ideales:



$$a = -\frac{y_{21a}}{y_i y_o}$$

$$f = y_{12f}$$

$$\frac{V_o}{i_s} \approx \frac{a}{1 + af}$$

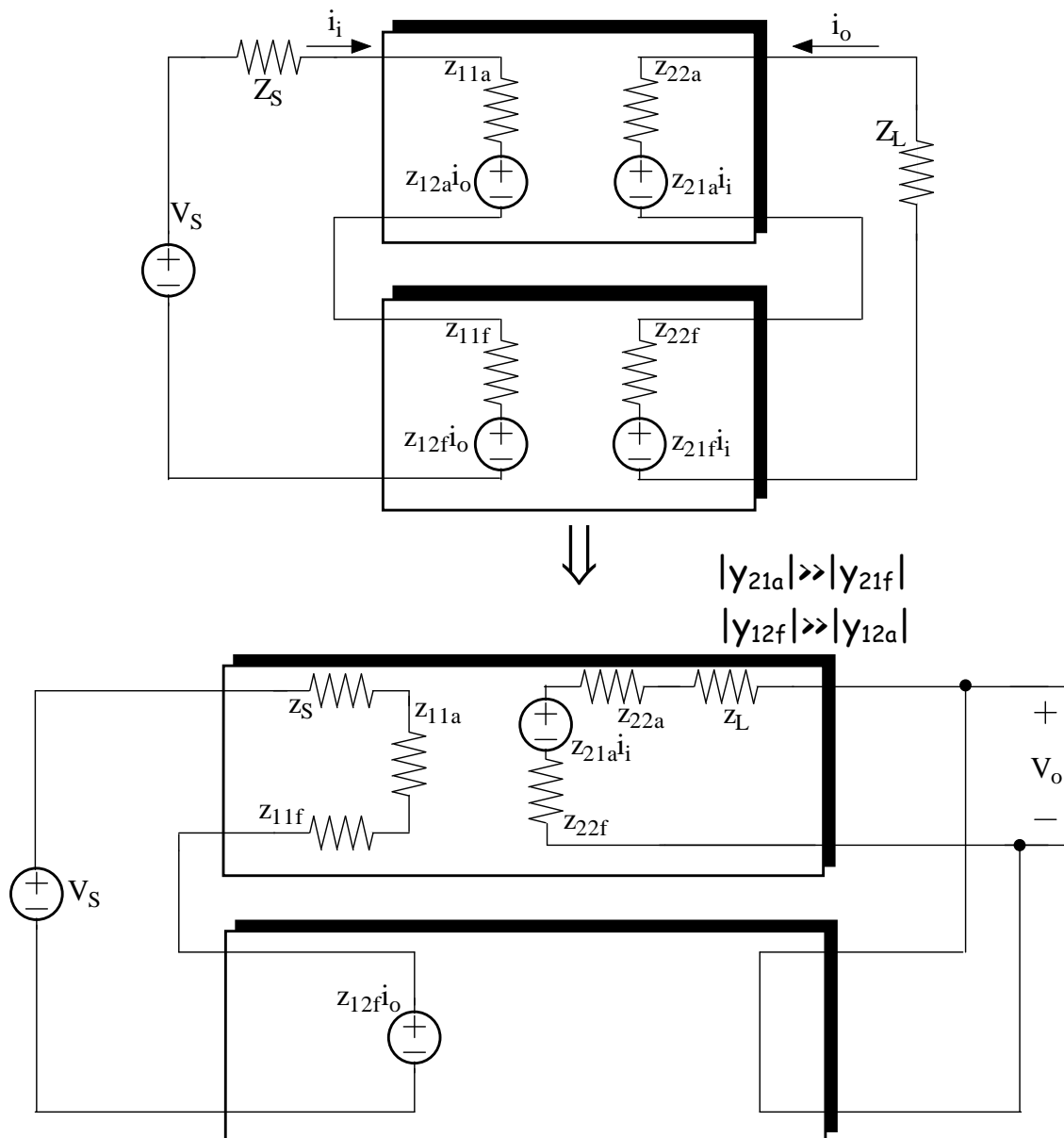
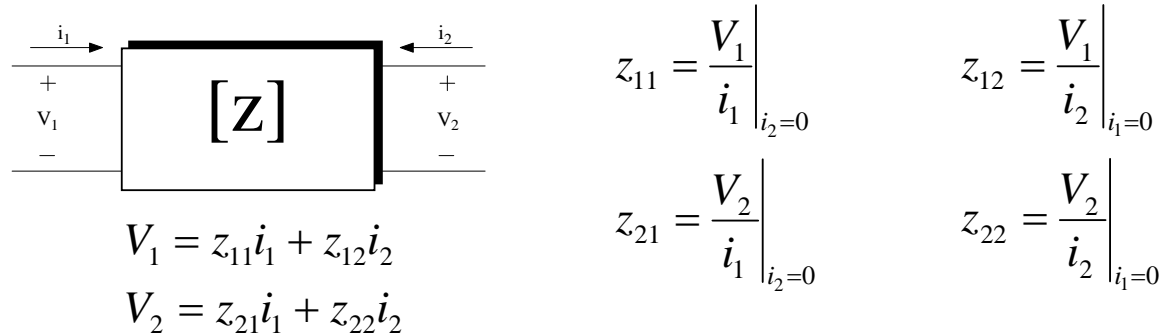
donde

$$y_i = y_s + y_{11a} + y_{11f}$$

$$y_o = y_L + y_{22a} + y_{22f}$$

5.2. Realimentación serie-serie

La representación de dos puertos más conveniente es la de los parámetros $[z]$ porque mediante ellos se simplifican los cálculos.



$$a = -\frac{z_{21a}}{z_i z_o}$$

$$f = z_{12f}$$

$$\frac{i_o}{V_s} \approx \frac{a}{1 + af}$$

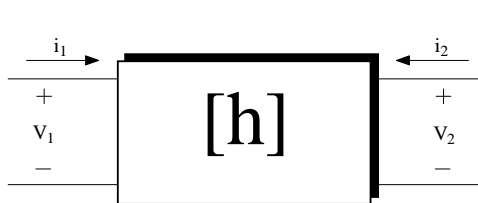
donde

$$z_i = z_s + z_{11a} + z_{11f}$$

$$z_o = z_L + z_{22a} + z_{22f}$$

5.3. Realimentación serie-paralelo

La representación de dos puertos más conveniente es la de los parámetros $[h]$ porque mediante ellos se simplifican los cálculos.



$$V_1 = z_{11}i_1 + z_{12}V_2$$

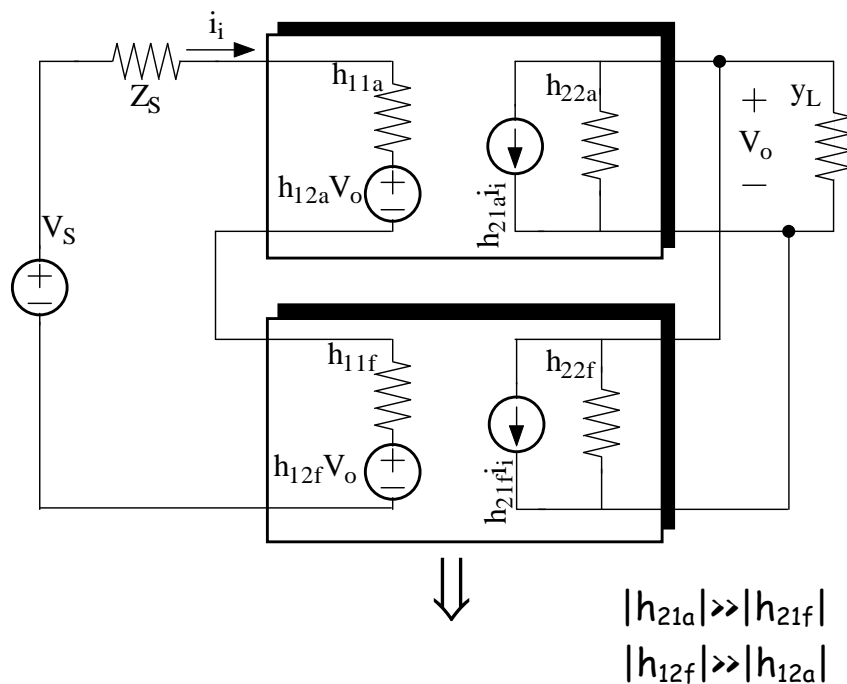
$$i_2 = z_{21}i_1 + z_{22}V_2$$

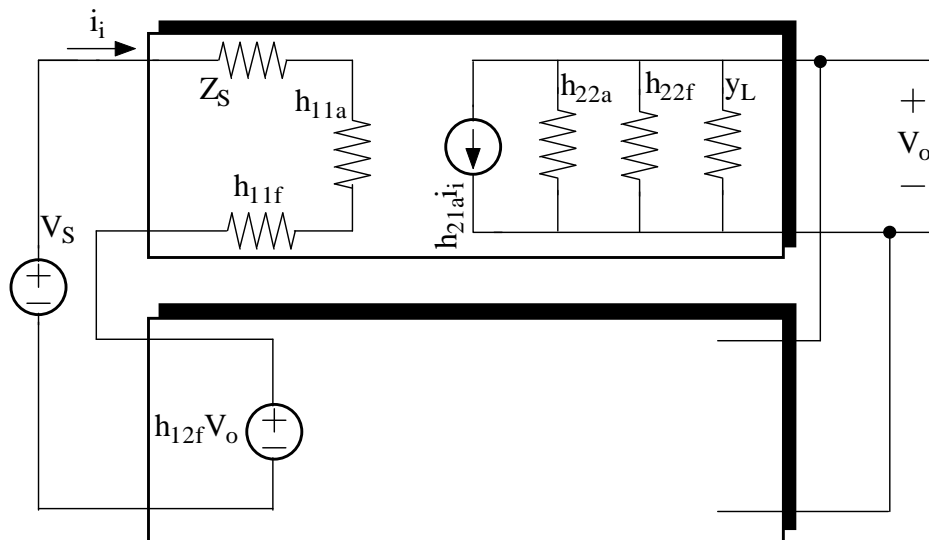
$$z_{11} = \left. \frac{V_1}{i_1} \right|_{i_2=0}$$

$$z_{12} = \left. \frac{V_1}{i_2} \right|_{i_1=0}$$

$$z_{21} = \left. \frac{V_2}{i_1} \right|_{i_2=0}$$

$$z_{22} = \left. \frac{V_2}{i_2} \right|_{i_1=0}$$





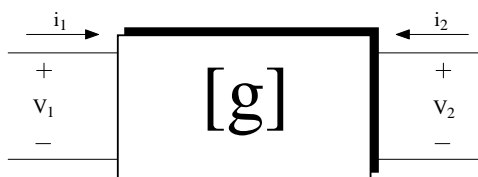
$$a = -\frac{h_{21a}}{z_i y_o} \quad \text{donde} \quad \begin{aligned} z_i &= z_S + h_{11a} + h_{11f} \\ y_o &= y_L + h_{22a} + h_{22f} \end{aligned}$$

$$f = h_{12f}$$

$$\frac{V_o}{V_S} \approx \frac{a}{1 + af}$$

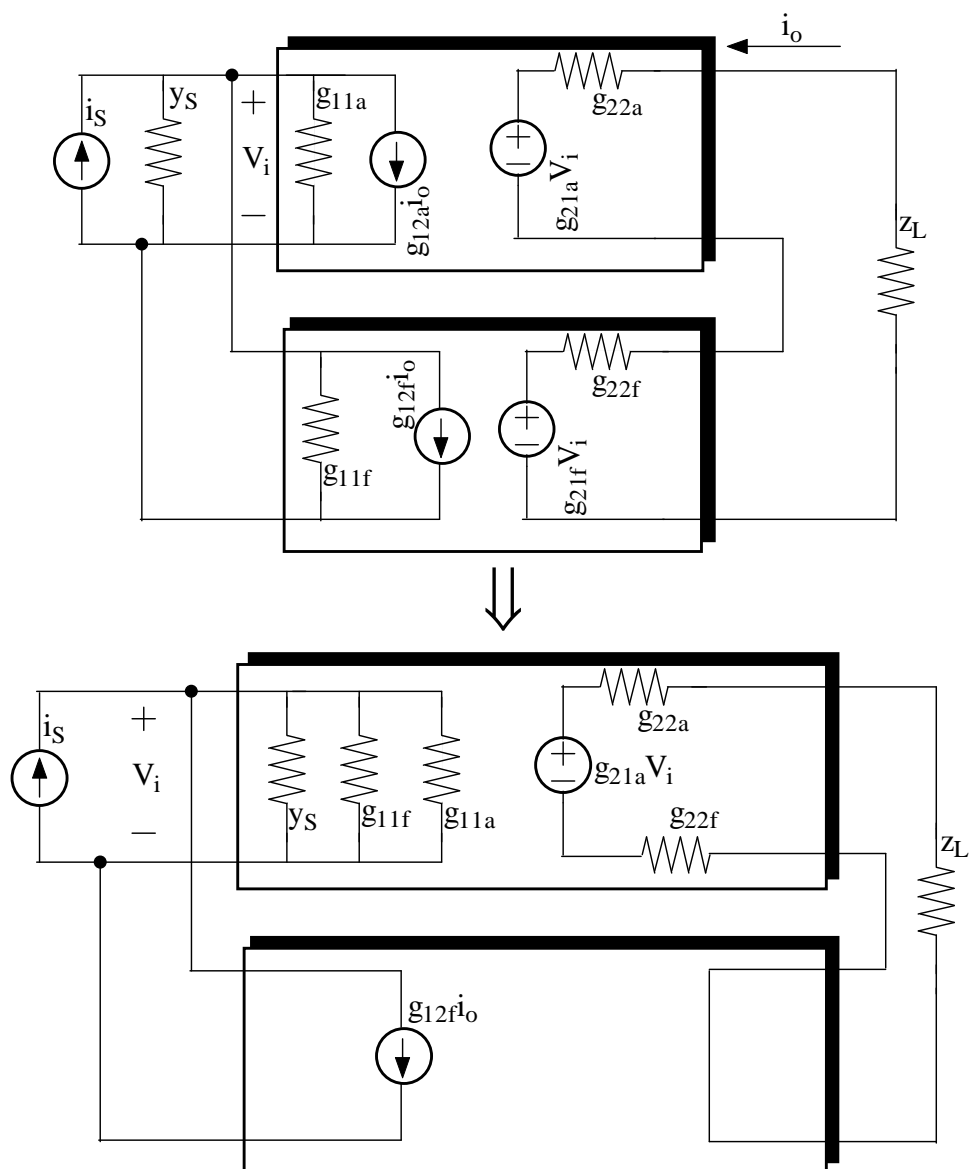
5.4. Realimentación paralelo-serie

La representación de dos puertos más conveniente es la de los parámetros $[g]$ porque mediante ellos se simplifican los cálculos.



$$\begin{aligned} i_1 &= g_{11}V_1 + g_{12}i_2 \\ V_2 &= g_{21}V_1 + g_{22}i_2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} g_{11} &= \left. \frac{i_1}{V_1} \right|_{i_2=0} & g_{12} &= \left. \frac{i_1}{i_2} \right|_{V_1=0} \\ g_{21} &= \left. \frac{V_2}{V_1} \right|_{i_2=0} & g_{22} &= \left. \frac{V_2}{i_2} \right|_{V_1=0} \end{aligned}$$



$$a = -\frac{g_{21a}}{y_i z_o}$$

donde

$$y_i = y_S + g_{11a} + g_{11f}$$

$$z_o = z_L + g_{22a} + g_{22f}$$

$$f = g_{12f}$$

$$\frac{i_o}{i_s} \approx \frac{a}{1 + af}$$

6. Análisis de circuitos realimentados

6.1. Pasos para análisis por cuadripolos

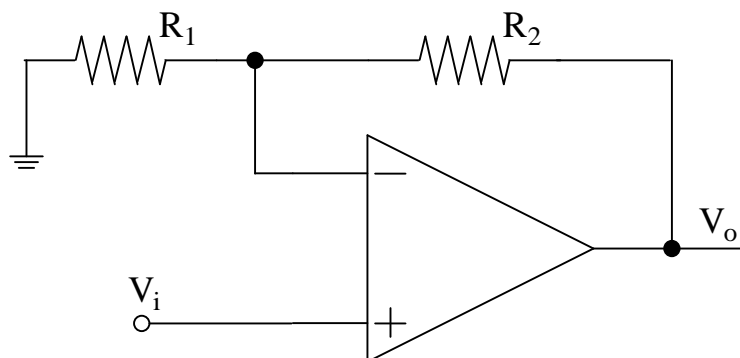
- Paso 1: Identificar A y β así como determinar si la realimentación es positiva o negativa
- Paso 2: Representar equivalente AC marcando aproximadamente A y β
- Paso 3: Identificar tipo de *muestreo* y de *mezcla*. Así como tipo de cuadripolo asociado (si entre el nodo de entrada/salida y la realimentación hay un elemento activo, transistor o amplificador operacional, será mezcla/muestreo tipo serie. Si no lo hay, será paralelo)
- Representar equivalente en AC en cuadripolos
- Calcular los parámetros de β
- Calcular los parámetros de A
- Separar A y β
- Calcular A , Z_i y Z_o
- Calcular A_F , Z_{iF} y Z_{oF}

6.2. Caso de estudio: amplificador no inversor con amplificador operacional.

[Será un caso a estudiar en las clases de problemas]

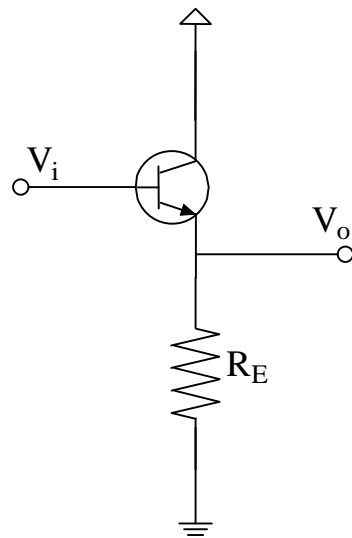
PROBLEMAS

1. El siguiente circuito representa un amplificador no inversor con amplificador operacional.
 - a) Deducir qué topología de realimentación se trata, si es realimentación positiva o negativa y diferenciar la red A de la red β
 - b) Representar el equivalente en AC en cuadripolos
 - c) Calcular los parámetros de la red β
 - d) Calcular los parámetros de la red A
 - e) Separar A y β
 - f) Calcular la impedancia de entrada, Z_i , impedancia de salida, Z_o , y ganancia sin realimentar, A
 - g) Calcular la ganancia, A_F , impedancia de entrada, Z_{iF} , e impedancia de salida, Z_{oF} , del circuito realimentado

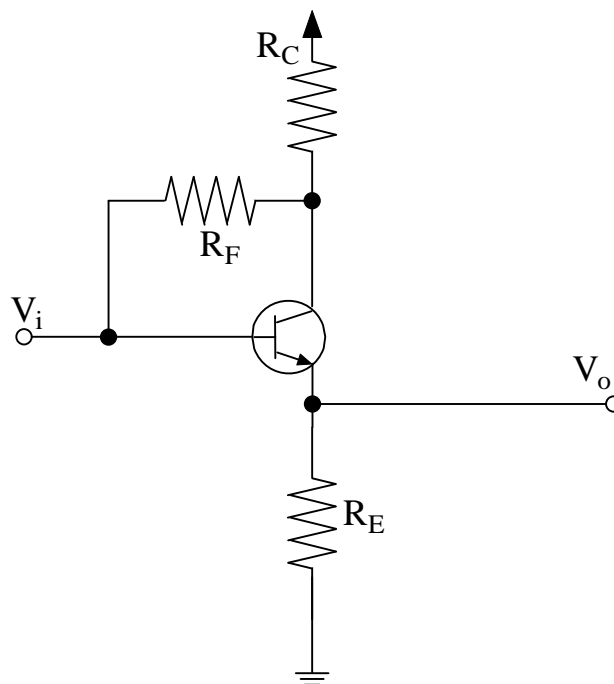


2. Para el siguiente seguidor de emisor:

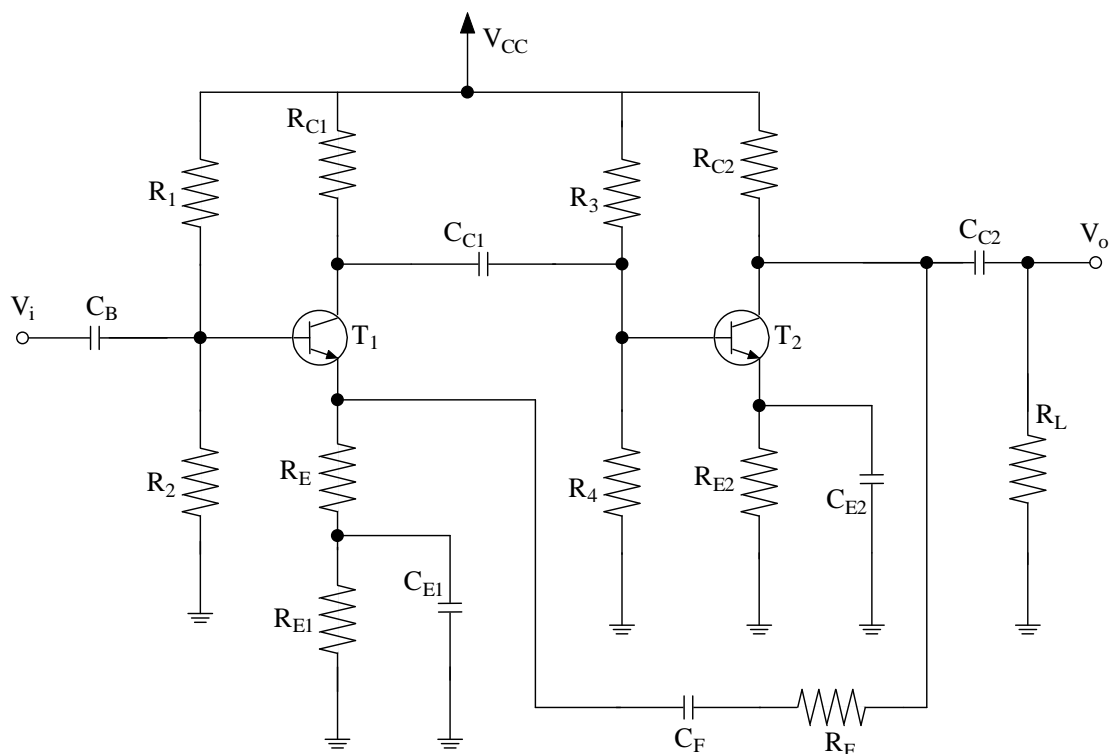
- a) Deducir qué topología de realimentación se trata, si es realimentación positiva o negativa y diferenciar la red A de la red β
- b) Representar el equivalente en AC en cuadripolos
- c) Calcular los parámetros de la red β
- d) Calcular los parámetros de la red A
- e) Separar A y β
- f) Calcular la impedancia de entrada, Z_i , impedancia de salida, Z_o , y ganancia sin realimentar, A
- g) Calcular la ganancia, A_F , impedancia de entrada, Z_{iF} , e impedancia de salida, Z_{oF} , del circuito realimentado



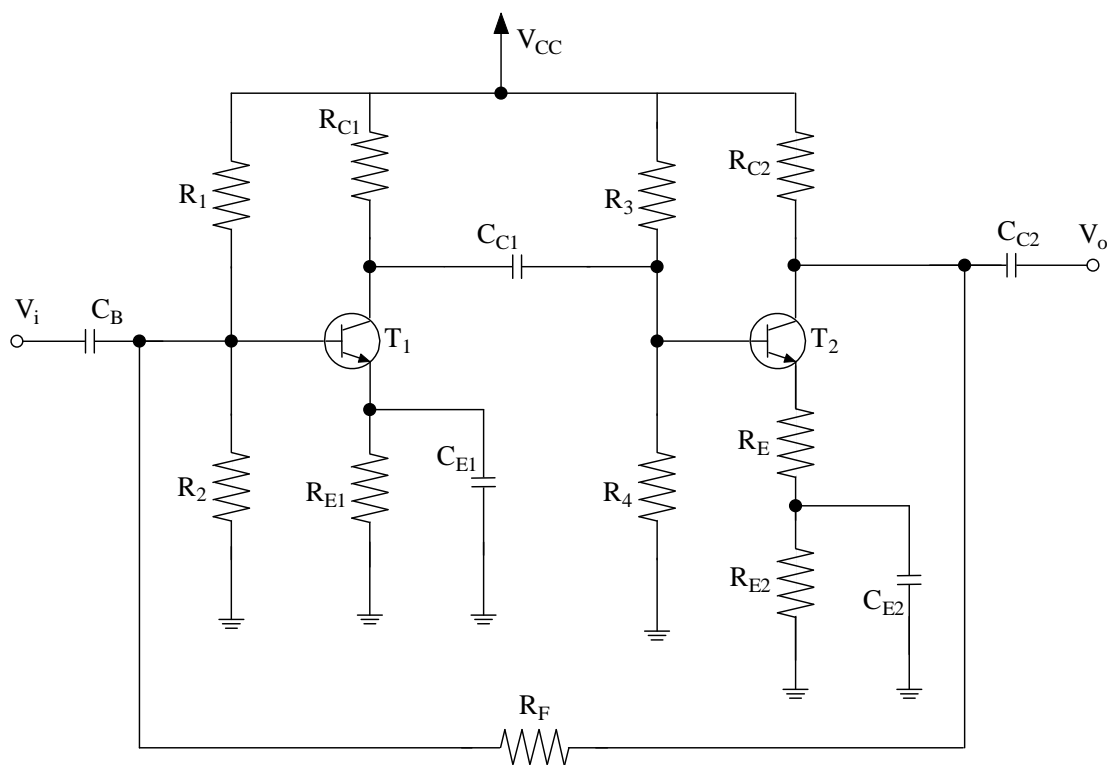
3. Para el siguiente emisor común con resistencia emisor-base,
- a) Deducir qué topología de realimentación se trata, si es realimentación positiva o negativa y diferenciar la red A de la red β
 - b) Representar el equivalente en AC en cuadripolos
 - c) Calcular los parámetros de la red β
 - d) Calcular los parámetros de la red A
 - e) Separar A y β
 - f) Calcular la impedancia de entrada, Z_i , impedancia de salida, Z_o , y ganancia sin realimentar, A
 - g) Calcular la ganancia, A_F , impedancia de entrada, Z_{iF} , e impedancia de salida, Z_{oF} , del circuito realimentado



4. Para el siguiente amplificador de dos etapas,
- Deducir qué topología de realimentación se trata, si es realimentación positiva o negativa y diferenciar la red A de la red β
 - Representar el equivalente en AC en cuadripolos
 - Calcular los parámetros de la red β
 - Calcular los parámetros de la red A
 - Separar A y β
 - Calcular la impedancia de entrada, Z_i , impedancia de salida, Z_o , y ganancia sin realimentar, A
 - Calcular la ganancia, A_F , impedancia de entrada, Z_{iF} , e impedancia de salida, Z_{oF} , del circuito realimentado

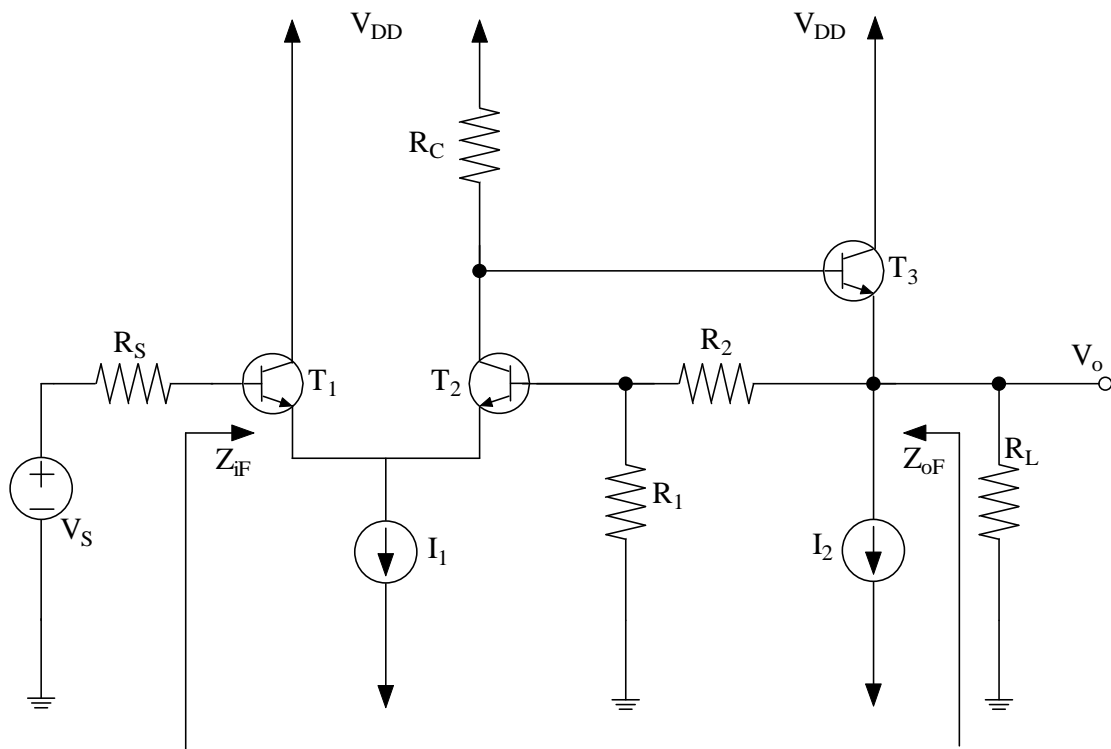


5. Para el siguiente amplificador de dos etapas,
- Deducir qué topología de realimentación se trata, si es realimentación positiva o negativa y diferenciar la red A de la red β
 - Representar el equivalente en AC en cuadripolos
 - Calcular los parámetros de la red β
 - Calcular los parámetros de la red A
 - Separar A y β
 - Calcular la impedancia de entrada, Z_i , impedancia de salida, Z_o , y ganancia sin realimentar, A
 - Calcular la ganancia, A_F , impedancia de entrada, Z_{iF} , e impedancia de salida, Z_{oF} , del circuito realimentado



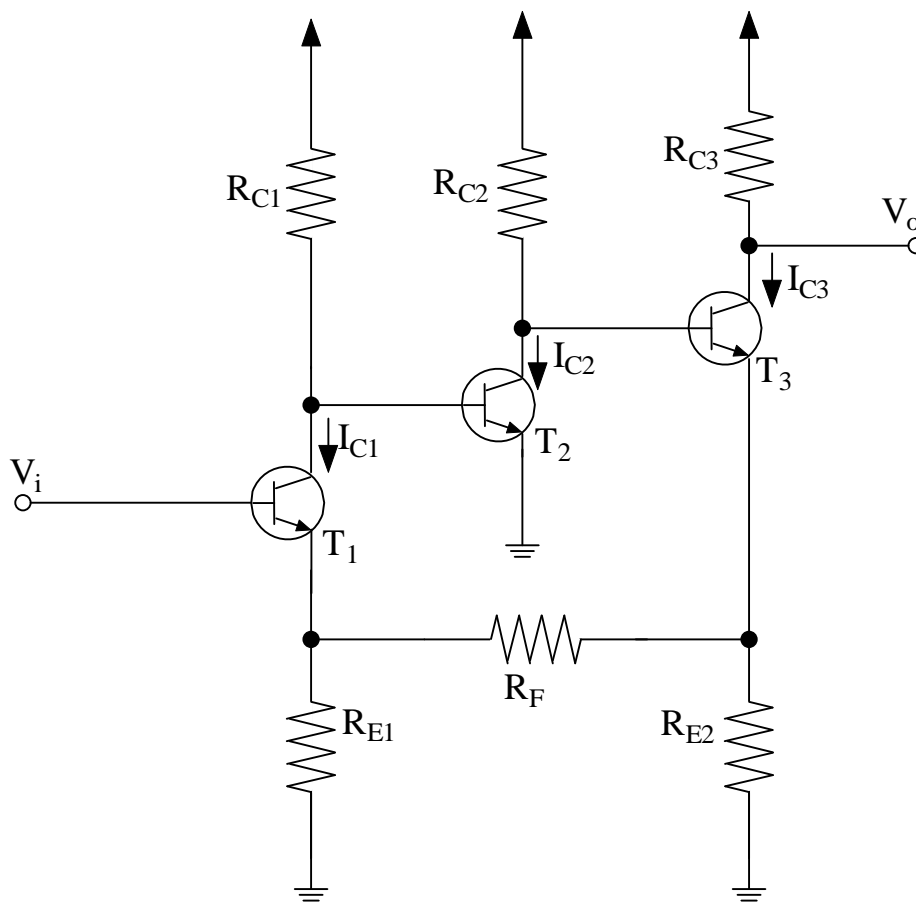
6. El siguiente circuito es una etapa diferencial seguida de un amplificador en colector común. Suponiendo que la componente DC de V_s es cero, encontrar:
- Corrientes de operación de cada uno de los 3 transistores
 - Mostrar que la tensión DC en V_o es prácticamente 0
 - Tipo de realimentación
 - Calcular A_F , Z_{iF} y Z_{oF}

DATOS: $V_{DD}=10.7V$, $R_S=10K\Omega$, $I_1=1mA$, $I_2=5mA$, $R_C=20K\Omega$, $R_1=1K\Omega$, $R_2=9K\Omega$, $R_L=2K\Omega$



7. Para el siguiente circuito, determinar qué tipo de realimentación es, determinar la red A y β , determinar la ganancia $A_f = I_o/V_i$ y $A_f = V_o/V_i$, y la impedancia de entrada de la red A, Z_i , y del circuito realimentado, Z_{iF} .

DATOS: $R_{C1}=9K\Omega$, $R_{C2}=5K\Omega$, $R_{C3}=600\Omega$, $R_F=640\Omega$, $R_{E1}=100\Omega$, $R_{E2}=100\Omega$, $I_{C1}=0.6mA$, $I_{C2}=1mA$, $I_{C3}=4mA$, $\beta=100$



8. Para el siguiente circuito:

- Deducir qué topología de realimentación se trata, si es realimentación positiva o negativa y diferenciar la red A de la red β
- Representar el equivalente en AC en cuadripolos
- Calcular los parámetros de la red β
- Calcular la ganancia A_V de la red A cargada con la red β
- Calcular la ganancia A_F del circuito realimentado
- Calcular la impedancias de salida Z_o y Z_{oF}

DATOS: $\beta_1=200$, $\beta_2=40$, $R_1=8K\Omega$, $R_2=4K\Omega$

