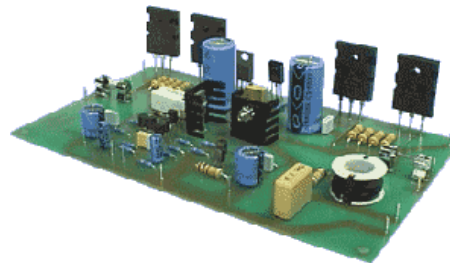




Tecnología Electrónica

Capítulo 6: **Amplificadores con TRTs.**

Respuesta en frecuencia y Realimentación.



1. Introducción

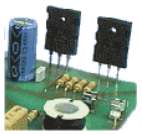
Objetivos y requisitos previos

2. Respuesta en frecuencia de amplificadores con transistores

1. Análisis por bandas
2. Amplificación en Baja Frecuencia
3. Amplificación en Alta Frecuencia. Efecto Miller.
4. Capacidad Miller en los AO compensados

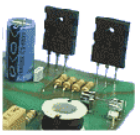
3. Aplicación de las técnicas de Realimentación

1. Revisión conceptual
2. Topologías en amplificadores con TRTs



1. Introducción

- ❑ Objetivos generales de estudio
 - Dependencias con la frecuencia de los amplis. con transistores
 - *Aplicación de los modelos de transistores; técnicas de análisis a diferentes bandas; estimación de ganancias y frecuencias de corte.*
 - Estimación de los parámetros y configuraciones realimentadas
 - *Identificación de topologías; estimación de los efectos de carga; estimación de los parámetros apropiados sin y con Realimentación*
- ❑ Conocimientos previos necesarios
 - Respuesta en frecuencia
 - *Funciones de ganancia en (s) y (). Polos y ceros. Frecuencias de corte. Polos dominantes. Diagramas de Bode, en módulo y fase.*
 - Realimentación
 - *Propiedades generales ideales. Topologías de Realimentación en Amplifs. Efectos de carga. Idealización. Interpretación de resultados.*
 - A modo de apoyo, se incluye en el Aula Virtual la documentación relacionada con estos temas en la asignatura precedente (EA)



3. Respuesta en frecuencia de A. discretos

- ❑ En todo amplificador (como los multietapa) existen numerosos parámetros dependientes de ω
 - Redes de polarización
 - Elementos de **acoplo** y **desacoplo** capacitivos, inductivos, etc.
 - Dispositivos activos semiconductores
 - Uniones, distribución de cargas, **capacidades internas** ...
 - Filtros activos, con amplificadores
 - Con redes R , L y C dispuestas para obtener una **$A(\omega)$** determinada
- ❑ Efecto de los elementos de **acoplo-desacoplo**:
 - Dependen de su ubicación y su impedancia equivalente a (ω)
 - Ejemplo típico: las **C** en **acoplo capacitivo**, rondan los **10-100 μF** .

Para
 $C_{acoplo} = 10 \mu F$

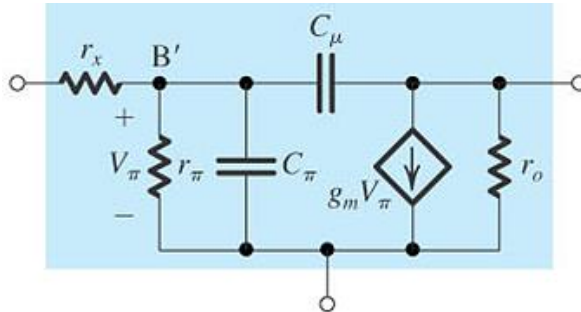
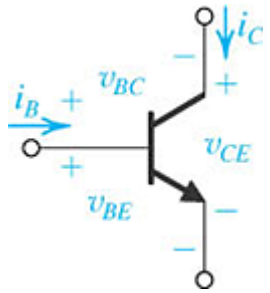


frec.	10 Hz	100 Hz	1 kHz	10 kHz
$ Z_c $	1.6 k Ω	160 Ω	16 Ω	1.6 Ω



3. Respuesta en frecuencia de A. con TRTs

- Por su lado, los dispositivos activos (diodos y TRTs) presentan **capacidades** debidas a las distribuciones de **carga** en las **uniones**



- Dependen del punto Q y otros factores,

- Son de pequeño valor, del orden de pF
- Por tanto, solo ejercen un efecto significativo en **altas frecuencias**

- Una comparativa interesante:

La tabla siguiente relaciona los valores de Z de las **C's** internas (pF), con las de acoplo (μ F)

$$C_{\text{interna}} = 10 \text{ pF}$$



$$C_{\text{acoplo}} = 10 \mu\text{F}$$



frec.	10 Hz	100 Hz	1 kHz	10 kHz
$ Z_c $	1.6 T Ω	160 M Ω	16 M Ω	1.6 M Ω
$ Z_c $	1.6 k Ω	160 Ω	16 Ω	1.6 Ω

3.1. Análisis por Bandas: *bajas, medias, altas*

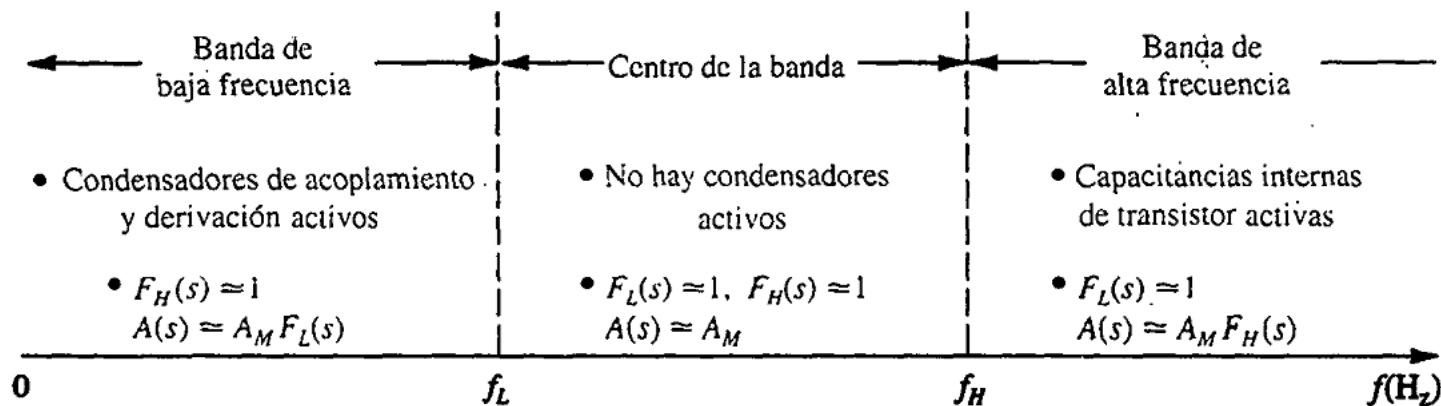
□ Separación de efectos:

- La gran diferencia de **valores típicos** entre las **C** internas y de acoplo hace que sus efectos sean notables en **bandas diferentes**.

□ Un análisis por bandas, simplifica su estudio y diseño

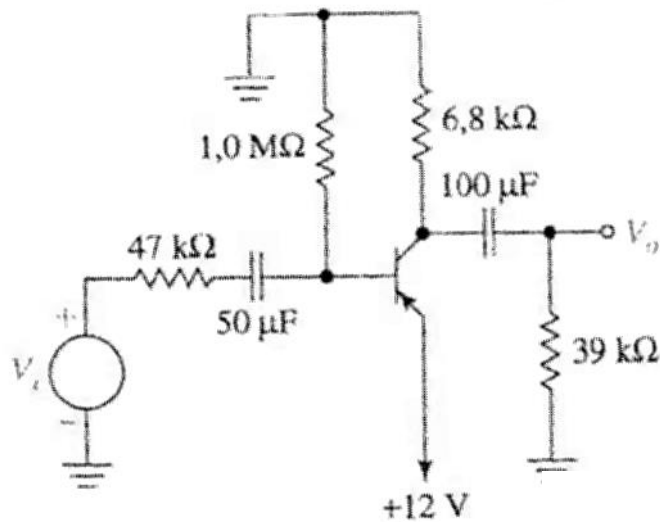
- Las capacidades de acoplo: significativas en **baja frecuencia**
- Las capacidades internas: significativas en **alta frecuencia**
- A **frecuencias medias**: cortos (**C_{acoplo}**) o abiertos (**C_{internas}**).

$$A(s) = F_L(s) \cdot A_m \cdot F_H(s) \rightarrow A_{Total} = \text{bajas}_L \cdot \text{medias}_m \cdot \text{altas}_H$$



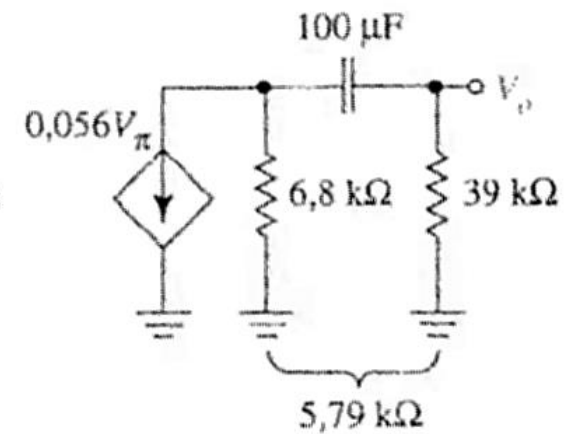
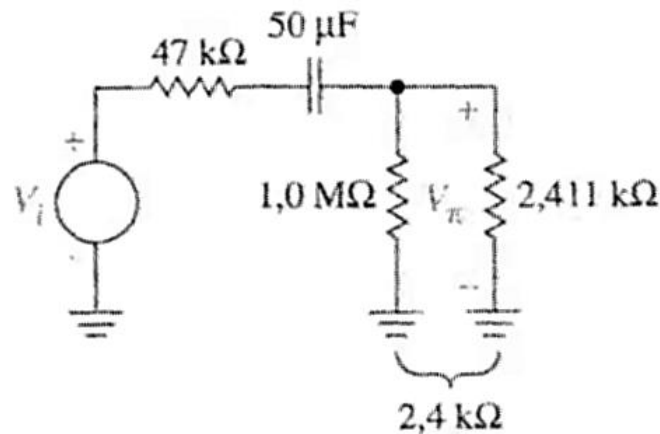
3.2. Amplificación en baja frecuencia

- Su estudio se facilita si se reconocen estructuras simples
 - Ejemplo: amplificador en Emisor Común, sin R_E, C_E .



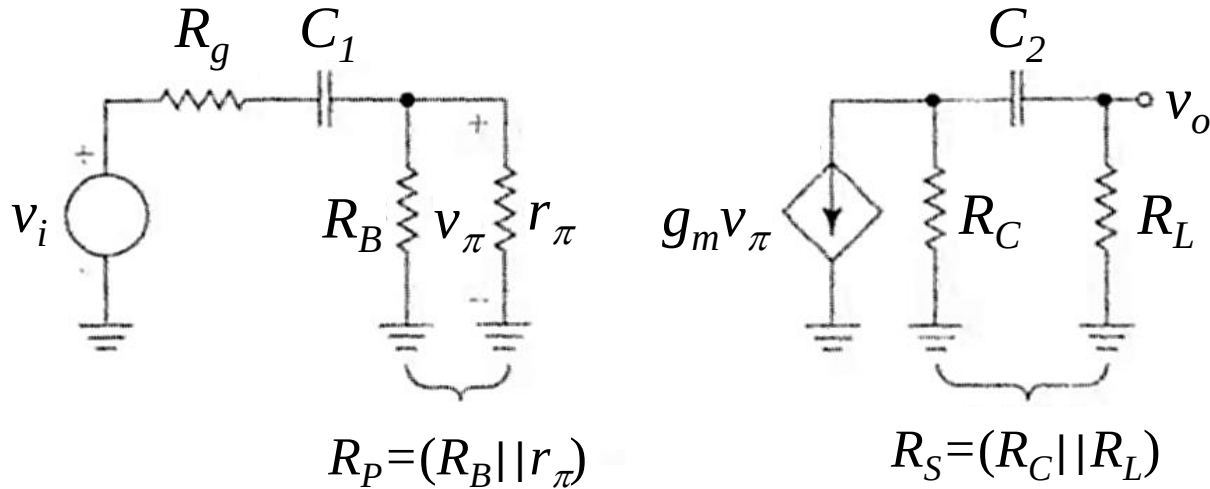
✓ Efectos de los Condensadores fácilmente analizables por separado:

→ ¡Se pueden identificar las τ de cada parte del cto.!



3.2. Amplificación en baja frecuencia

- Las estructuras de C_1 y C_2 son *paso-alto* (*)



Paso-Alto → cada capacidad introduce:
Un cero en origen y un polo en $\omega = (1/\tau)$ rad/s

$$A_V(s) = \frac{V_O}{V_I}(s) = \frac{-R_P}{R_g + R_P} g_m R_S \cdot \frac{s}{s + \omega_1} \cdot \frac{s}{s + \omega_2}$$

$$A_{V_m} = \frac{-R_P}{R_g + R_P} g_m R_S$$

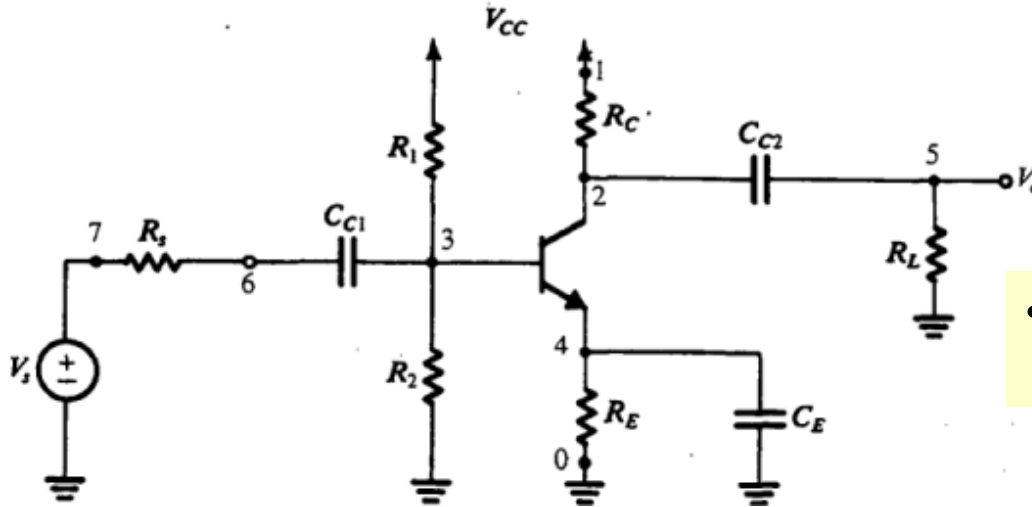
$$(1/\omega_1) = \tau_1 = C_1 \cdot (R_g + R_P)$$

$$(1/\omega_2) = \tau_2 = C_2 \cdot (R_C + R_L)$$

(*) ver tema Respuesta en Frecuencia

3.2. Amplificación en baja frecuencia

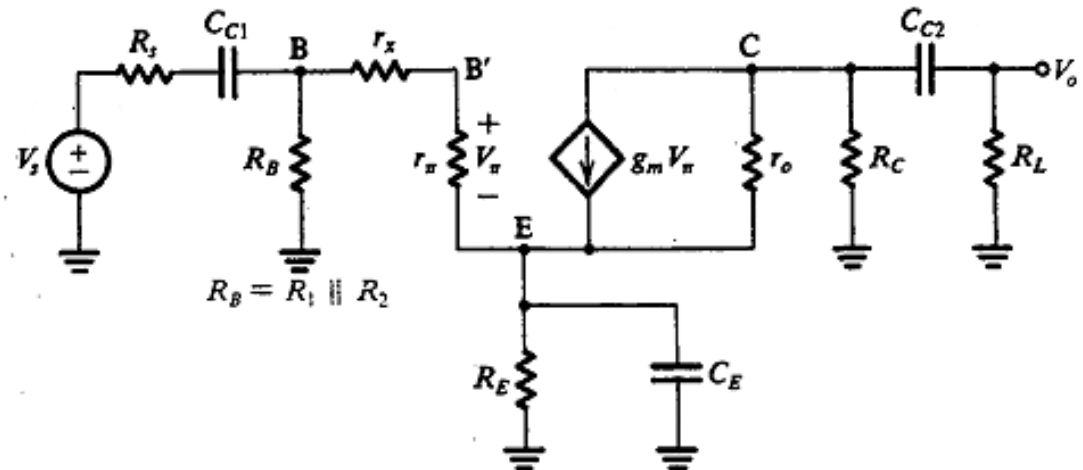
- ❑ Pero un amplificador en Emisor Común, **suele tener R_E y C_E** .



- Efectos de los Condensadores **NO son fáciles** de separar.

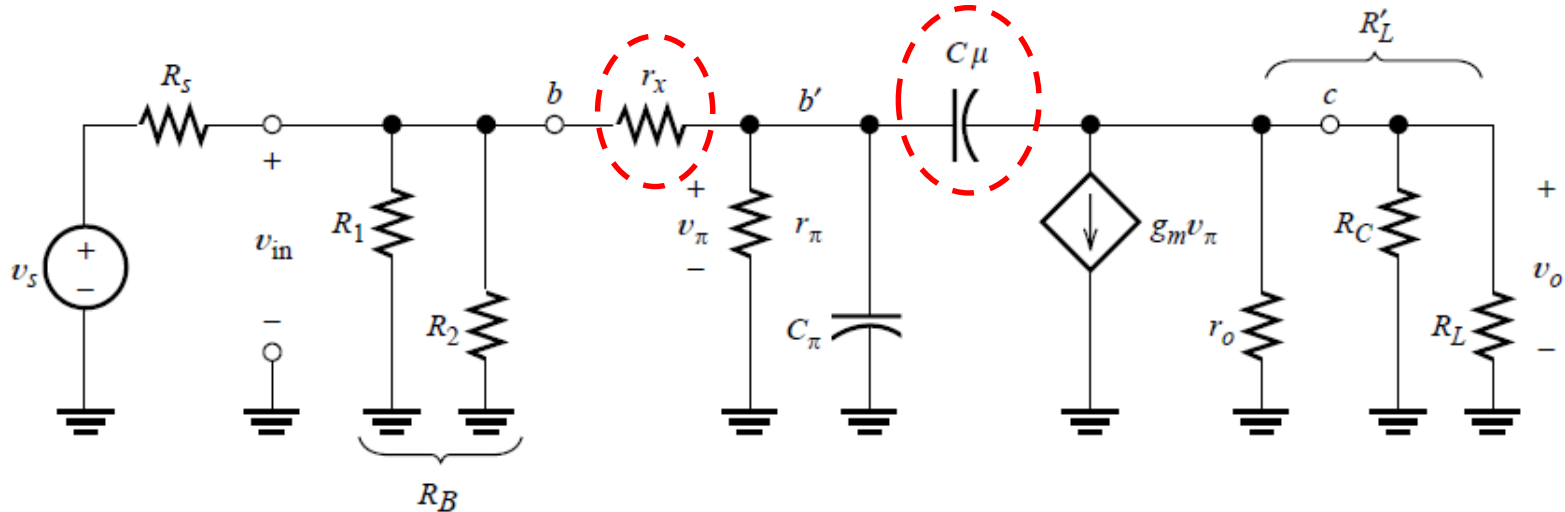


- En los textos recomendados se tratan con profundidad técnicas de **aproximación** necesarias para abordar estos casos **manualmente**.



3.3. Amplificación en alta frecuencia (AF)

- ❑ Ejemplo de análisis: el amplificador en EC de la transp. anterior. Para obtener su circuito equivalente para señal variable en A.F.
 - En los elementos de acoplo las ω son ya muy altas $\rightarrow |Z_{C_{ext}}| \approx 0$
 - En los dispositivos activos $\rightarrow$ incluimos elementos reactivos internos

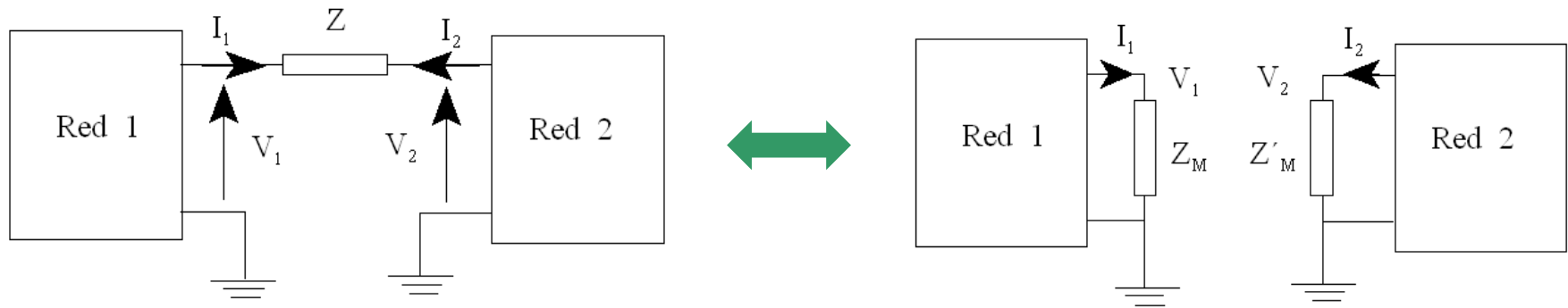


- ¡Nótese que el modelo del transistor incluye además la r_x !
- **Observación importante:** la ubicación de C_μ (uniendo la red de entrada con la red de salida) complica mucho los cálculos.

3.3. AF: Miller, un teorema interesante

Teorema de Miller

- Permite sustituir una impedancia entre dos redes, bajo ciertas condiciones → *útil para trabajar con la C_μ del transistor!*



Sea conocida $k = (V_2/V_1)$; entonces:

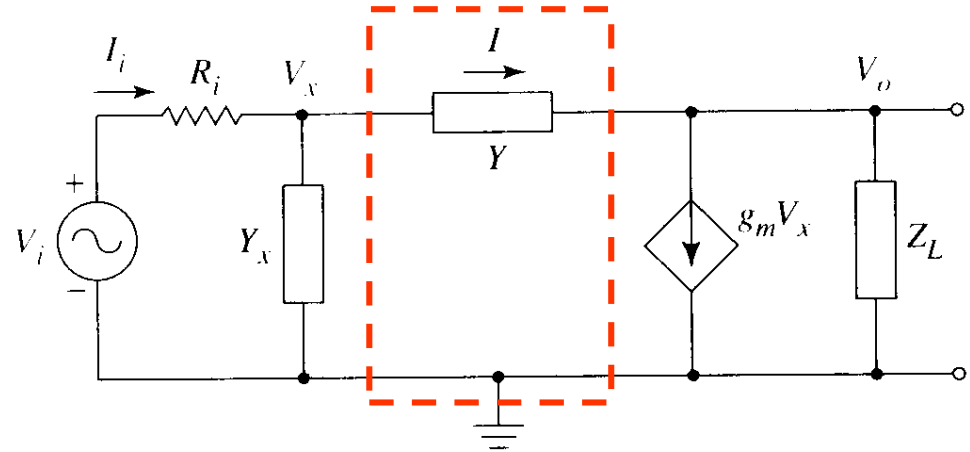
$$Z = \frac{V_1 - V_2}{I_1} = \frac{1 - (V_2/V_1)}{I_1/V_1} = \frac{1 - k}{1/Z_M} = Z_M \cdot (1 - k) \quad \Rightarrow \quad \text{Si } Z = \frac{1}{j\omega C} \Rightarrow C_M = C \cdot (1 - k)$$

$$Z = \frac{V_2 - V_1}{I_2} = \frac{1 - (V_1/V_2)}{I_2/V_2} = \frac{1 - k^{-1}}{1/Z'_M} = Z'_M \cdot \left(1 - \frac{1}{k}\right) \quad \Rightarrow \quad \text{Si } Z = \frac{1}{j\omega C} \Rightarrow C'_M = C \cdot \left(1 - \frac{1}{k}\right)$$

3.3. AF: aplicación práctica del efecto Miller

□ Aplicación del Teorema de Miller a un amp. discreto:

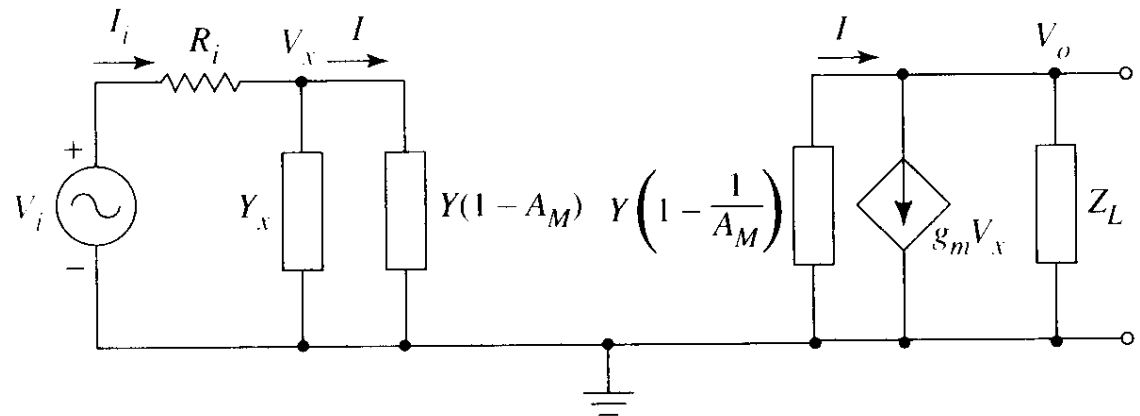
- Aproximación: $k \rightarrow A_M$
- Ojo:
 $A_M = \text{Ganancia Miller.}$
- Importante:
 $A_M \neq A_{medias}$



$$A_M = \left. \frac{V_o}{V_x} \right|_{\text{Sin la } Y} = -g_m Z_L$$

□ En los casos de interés:

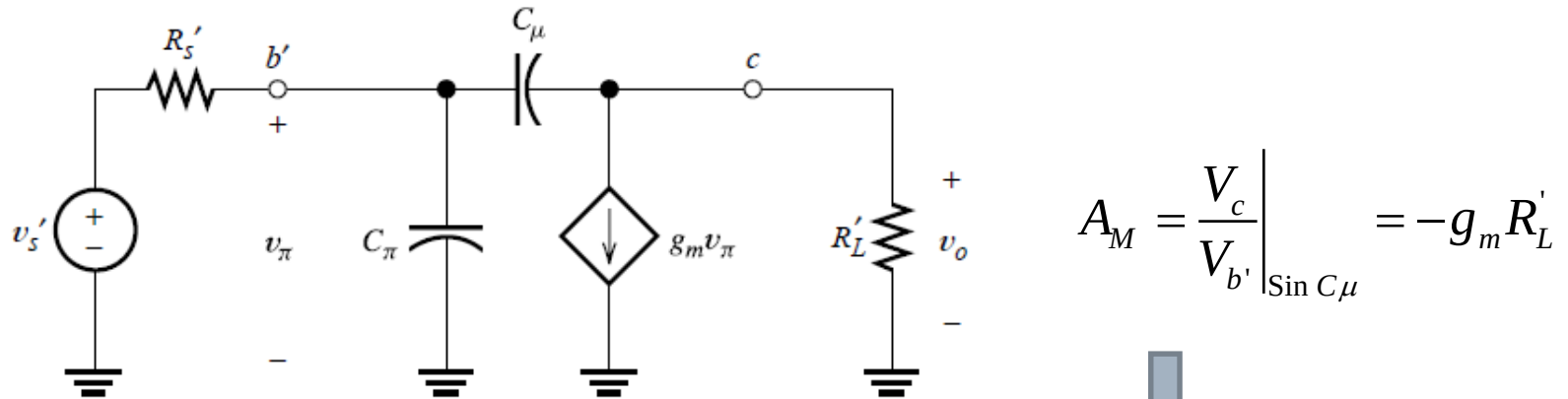
- $A_M \in \mathbb{R}$
- A_M grande y negativa



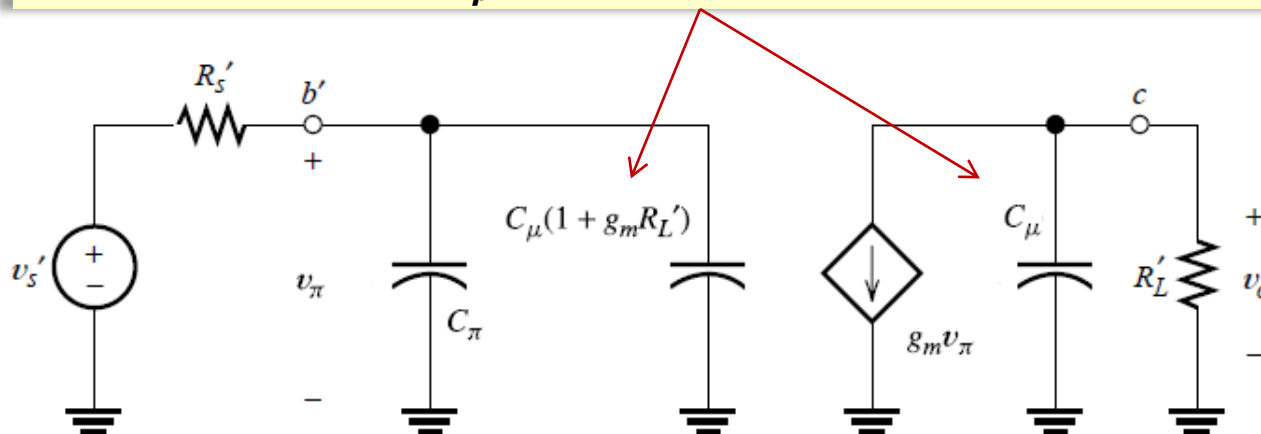
3.3. AF: análisis del EC (1)

❑ Proseguimos el análisis del cto. EC de la trp. 19:

■ Simplificamos → Eq. Thévenin a izquierda de **b'** y derecha de **c**

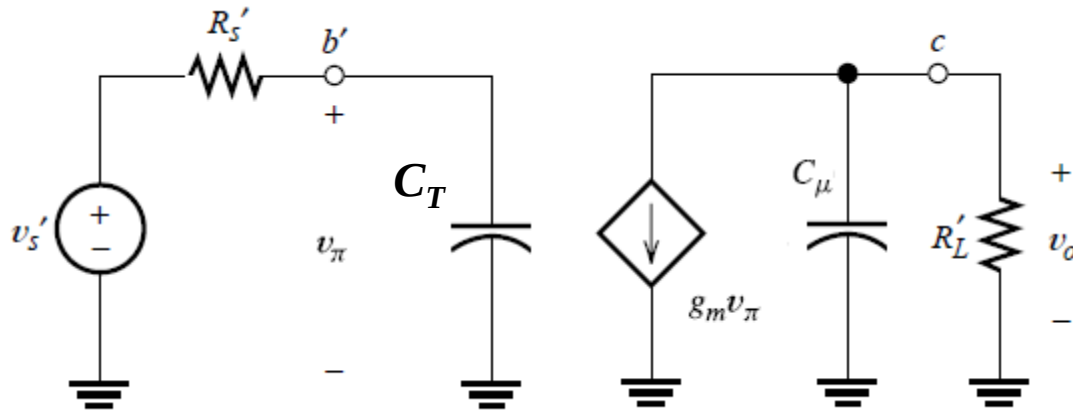


Aplicando **Miller** a **C_μ** obtenemos estas **dos capacidades ...**



3.3. AF: análisis del EC (2)

- Asociando las dos capacidades de base identificamos claramente dos estructuras paso-bajo $\rightarrow$ sendos polos a $\omega_i = 1/\tau_i = 1/(R_i \cdot C_i)$.



$$C_T = C_\pi + C_M = C_\pi + C_\mu (1 + g_m \cdot R_L')$$

$$\downarrow$$

$$C_\mu \ll C_T$$

$$A_V(s) = \frac{V_O}{V_I}(s) = A_{V_m} \cdot \frac{1}{1 + \frac{s}{\omega_1}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{s}{\omega_2}}$$



$$\omega_1 = \frac{1}{\tau_1} = \frac{1}{R_s' \cdot C_T}$$

$$\omega_2 = \frac{1}{\tau_2} = \frac{1}{R_L' \cdot C_\mu}$$

- El polo de C_T suele ser dominante (esto es $\omega_1 \ll \omega_2$) con lo que la frecuencia de corte superior la fija C_T en la que C_M es importante.

El efecto Miller es usado a veces para **ajustar** el **Ancho de Banda** de una etapa **colocando una capacidad** aposta entre entrada y salida.

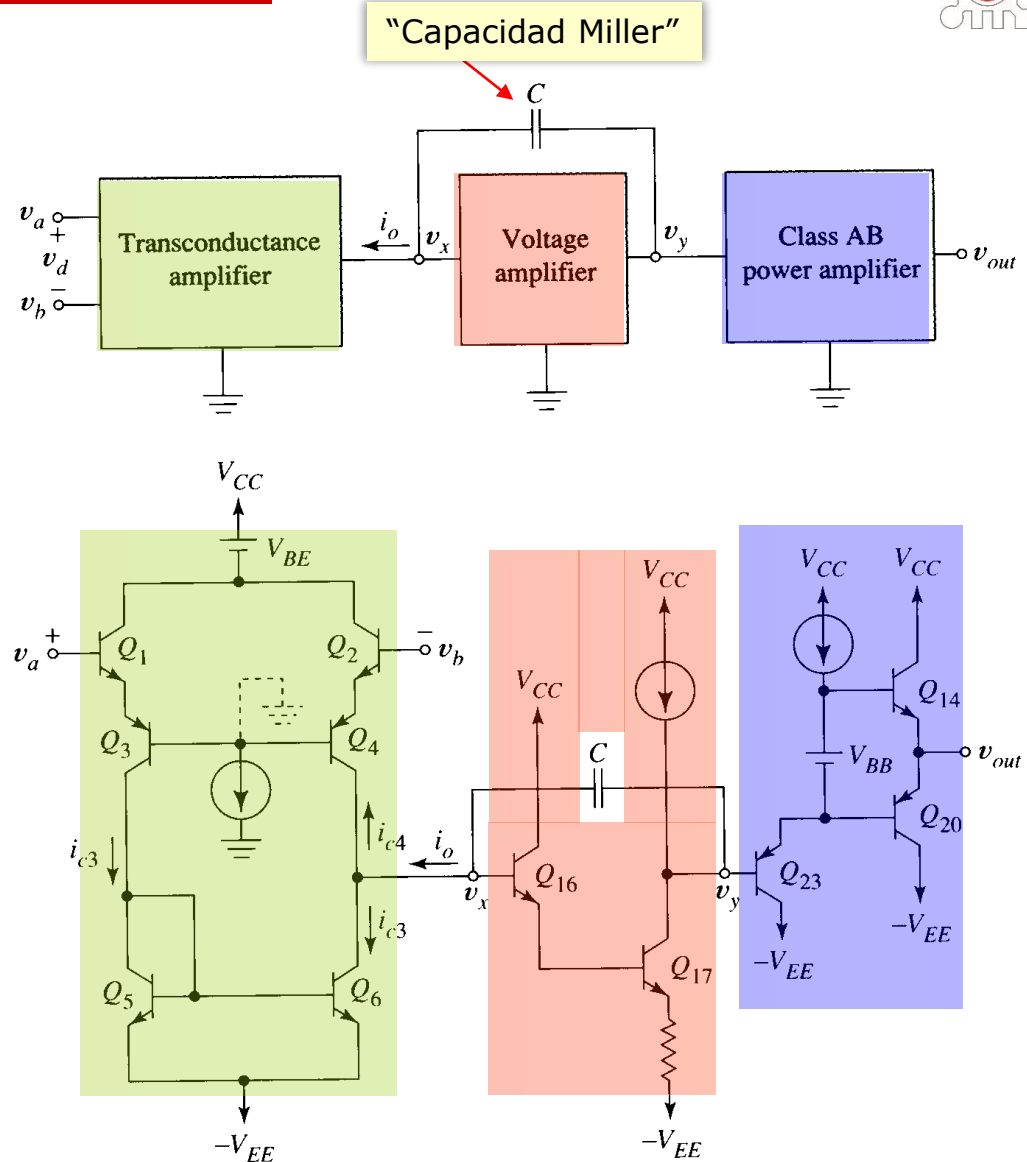
3.4. Capacidad Miller en un A.O. compensado

□ AO compensado: el **741**

- Ver **C** en estructura interna
- Se aprovecha el efecto Miller en la etapa 2:
 - $A_{M2} \approx -400$ (V/V)*
 - *Esto multiplica el efecto de un C integrado pequeño, para no ocupar mucha superficie de chip*

□ ¿Por qué insertar un **C**?

- **Estabilidad** del AO
- Impone **Polo dominante**
 - *El AO realimentado será incondicionalmente estable para cualquier ganancia.*



(*) Ver Malik, sección 11.2.3



3.4. Capacidad Miller en el 741 → GBW

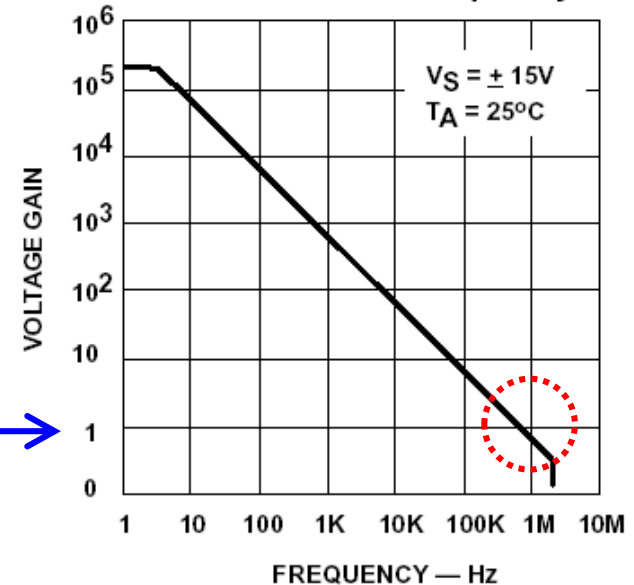
❑ Recordemos el **polo dominante** del AO 741

- Aparece en los *data-sheet* a través de la **frec. de ganancia unidad**: f_t

$$A_V(s) = A_m \frac{1}{1 + (s / \omega_H)}$$

$$f_t = A_m f_H = G \cdot BW$$

Open-Loop Voltage Gain as a Function of Frequency



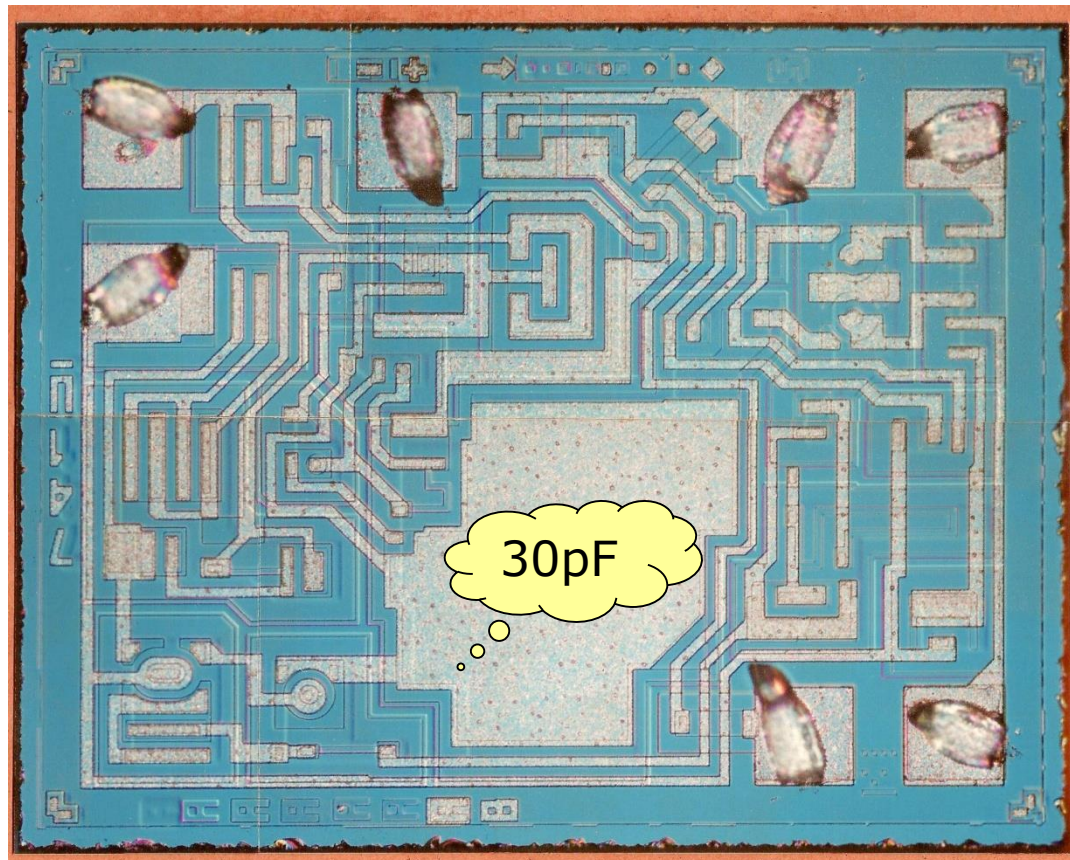
AC ELECTRICAL CHARACTERISTICS

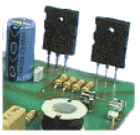
T_A=25°C, V_S = ±15V, unless otherwise specified.

SYMBOL	PARAMETER	TEST CONDITIONS	μA741, μA741C			UNIT
			Min	Typ	Max	
R _{IN}	Parallel input resistance	Open-loop, f=20Hz	0.3			MΩ
C _{IN}	Parallel input capacitance	Open-loop, f=20Hz		1.4		pF
	Unity gain crossover frequency	Open-loop		1.0		MHz
t _R	Transient response unity gain	V _{IN} =20mV, R _L =2kΩ, C _L ≤100pF				
	Rise time			0.3		μs
	Overshoot			5.0		%
SR	Slew rate	C≤100pF, R _L ≥2kΩ, V _{IN} =±10V		0.5		V/μs

3.4. *Capacidad Miller en el AO 741.*

- ❑ Vista interna del circuito integrado del Operacional 741:
 - Observe el gran tamaño ocupado por el C de compensación, a pesar de su pequeño valor...

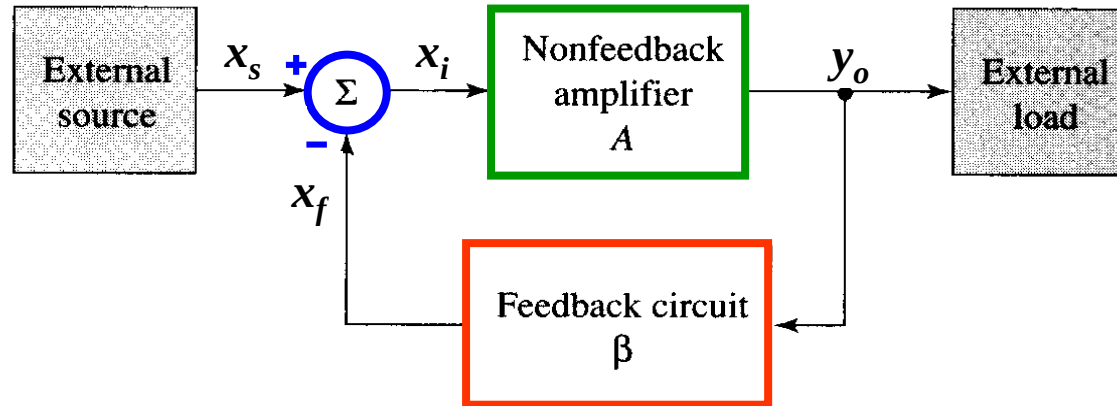




4. Realimentación en amplificación con TRTs

- ❑ La realimentación es esencial en amplificación
 - **Mejora y linealiza** los parámetros de ganancia, margen dinámico, impedancias terminales, respuesta en frecuencia, etc.
 - **Disminuye la sensibilidad** de los parámetros del amplificador respecto a las variaciones de los parámetros de los TRTs
- ❑ Estudio de la Realimentación en ctos. con TRTs
 - Recordemos que en amplificadores con TRTs, es frecuente separar su análisis o diseño en dos fases:
 1. **Polarización** (DC), *para ubicar los TRTs en la zona de trabajo deseada*
 2. **Señal variable** (AC), *usando el modelo del TRT correspondiente al punto de trabajo ajustado en el paso 1*
 - Es frecuente independizar ambos comportamientos (DC y AC) usando redes apropiadas de *acoplo/desacoplo*
 - Las **características en DC** (polarización) y en **AC** (señal) se ajustan de forma **independiente** (realimentaciones diferentes)

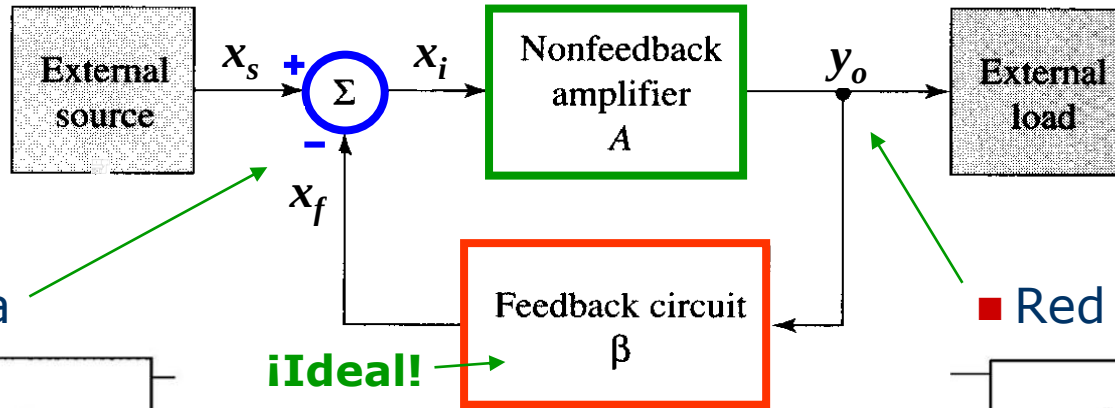
4.1. Revisión: enfoque del problema



- ❑ Es fundamental determinar la topología existente:
 - Hay que reconocer generador, carga y redes **A** y **β** poder aplicar las ecuaciones fundamentales → **Topología de Realimentación**
- ❑ Para reconocer la topología hay que **buscar**:
 - Un *restador* de señales a la entrada (variables que se suman...)
 - Un *muestreador* de señales a la salida (variable común)
- ❑ La topología **fuerza** las condiciones concretas del análisis:
 - Tipo de parámetros, tipo de ganancias, etc.

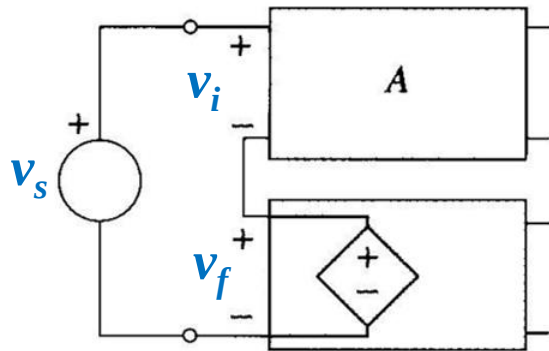
4.1. Revisión: topologías y variables

iIdeal!

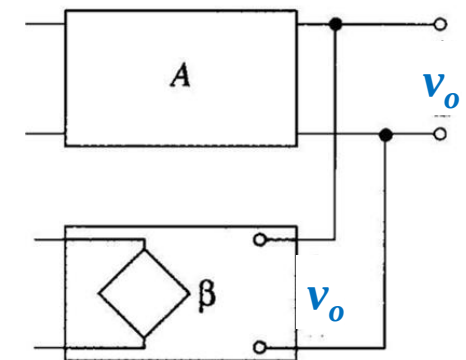


iIdeal!

■ Red sumadora

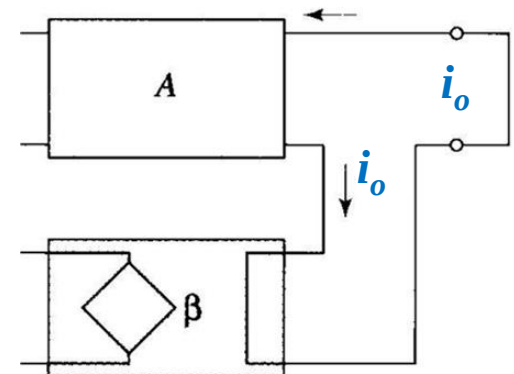
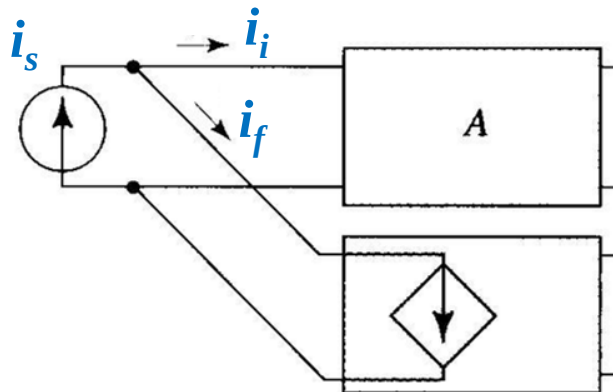


■ Red muestreadora

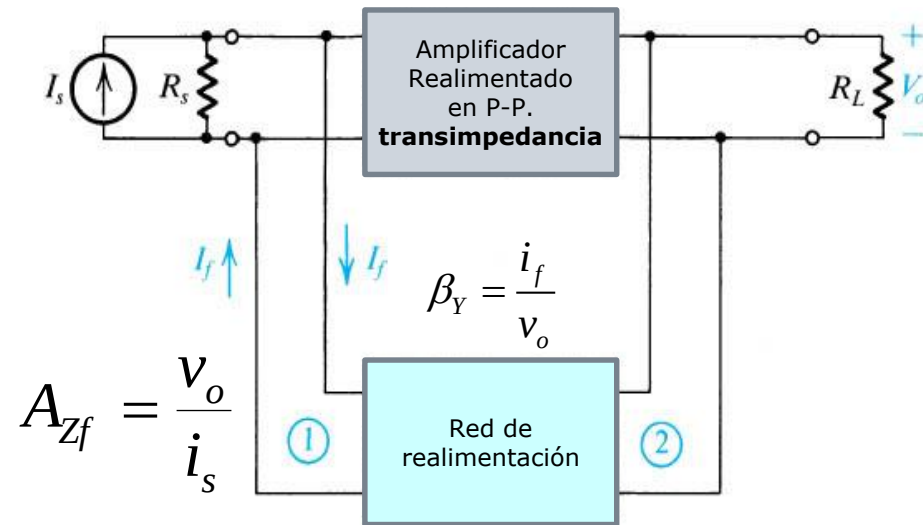
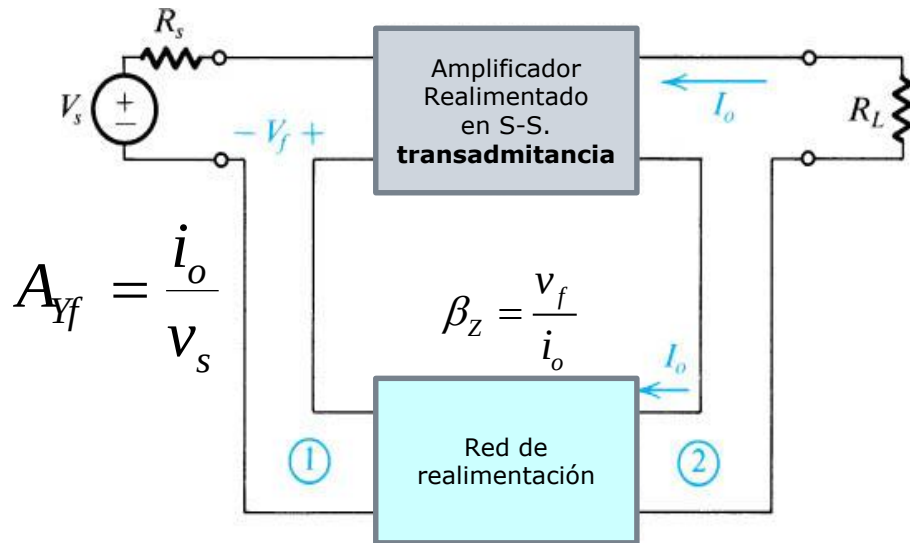
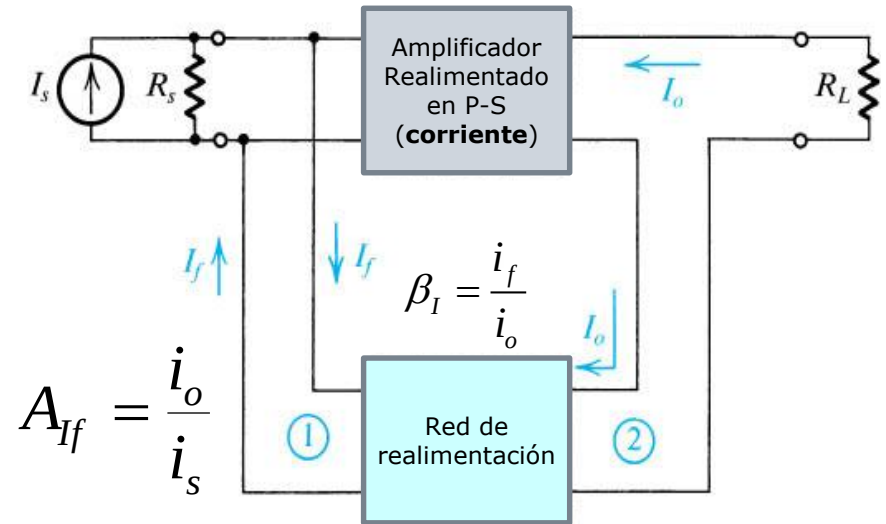
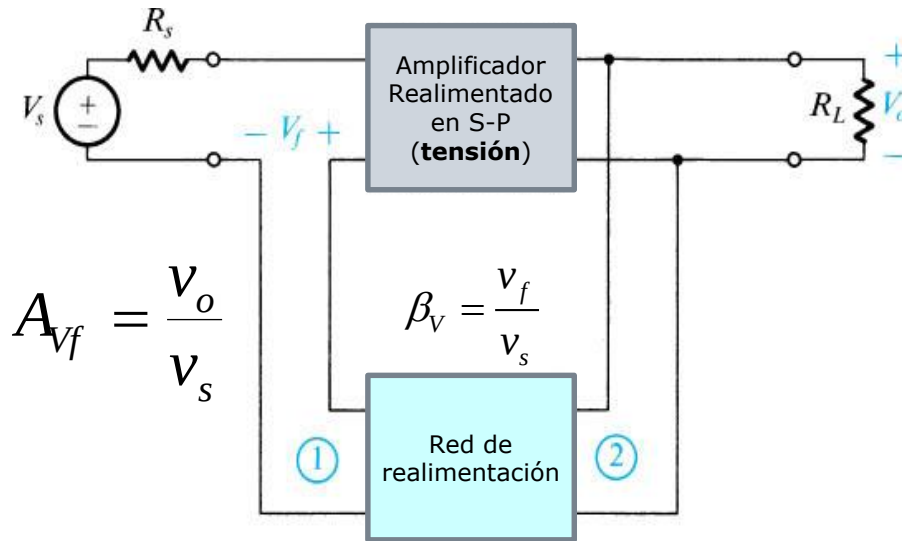


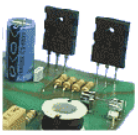
Entrada	Salida
Serie Tensión	Paralelo Tensión
Paralelo Corriente	Serie Corriente

Tipo de
realimentación



4.1. Tipo y dimensiones de las ganancias





4.1. Revisión: análisis en ctos. prácticos

- ❑ **Identificar** la topología:
 - Ella impone los tipos de ganancias A y β correspondientes, y
 - la asignación en serie o paralelo de los efectos de carga sobre A
- ❑ **Idealizar** la estructura:
 - Convertir todo, salvo A , en **ideal**. Para ello...
 - Asignar las impedancias de fuente y carga a A .
 - Obtener el efecto de carga β sobre A en la entrada (R_{11})
 - *Anular la variable común a la salida en la red β*
 - Efecto de carga en la salida (R_{22}) y valor de β
 - *Anular la variable común a la entrada en la red β*
 - El nuevo amplificador resultante será: **A'**
- ❑ **Aplicar** la teoría general de realimentación sobre A' y β ideal
 - Comprobar que $A \cdot \beta$ es **adimensional** y **positivo**
- ❑ **Interpretar** los resultados sobre el circuito original

4.2. Topologías en circuitos con TRTs

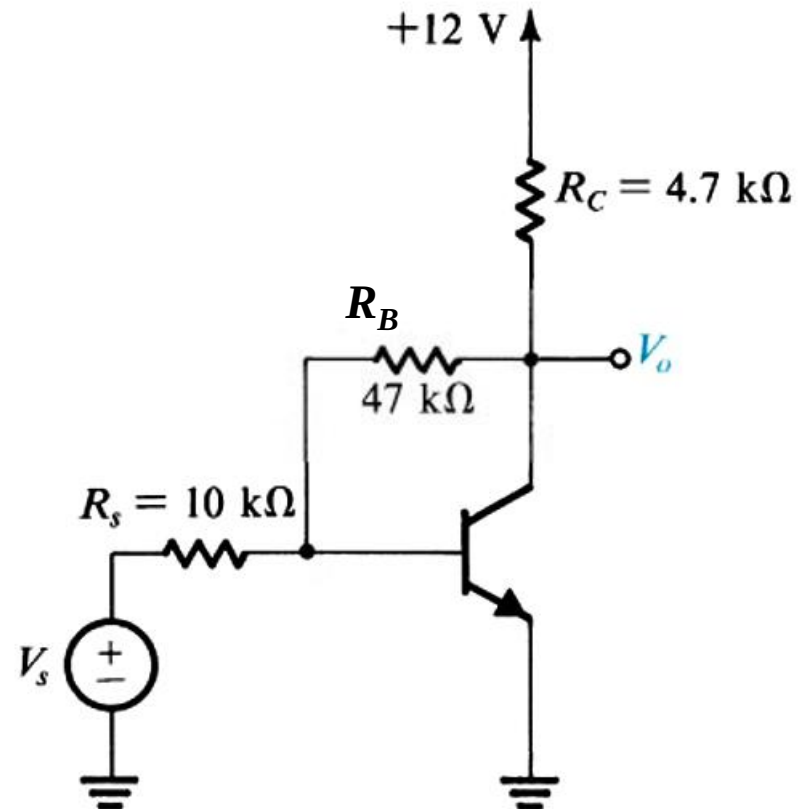
- ❑ Identificación correcta de las variables en entrada y salida
 - La conexión *paralelo* se identifica fácilmente → ***inudo*** de corrientes!
 - Por exclusión, si no existe o no se identifica un *nudo*, busquemos una conexión en *serie*

- ❑ Ejemplos:

- Veamos diversas alternativas de interconexión en los amplificadores con TRTs

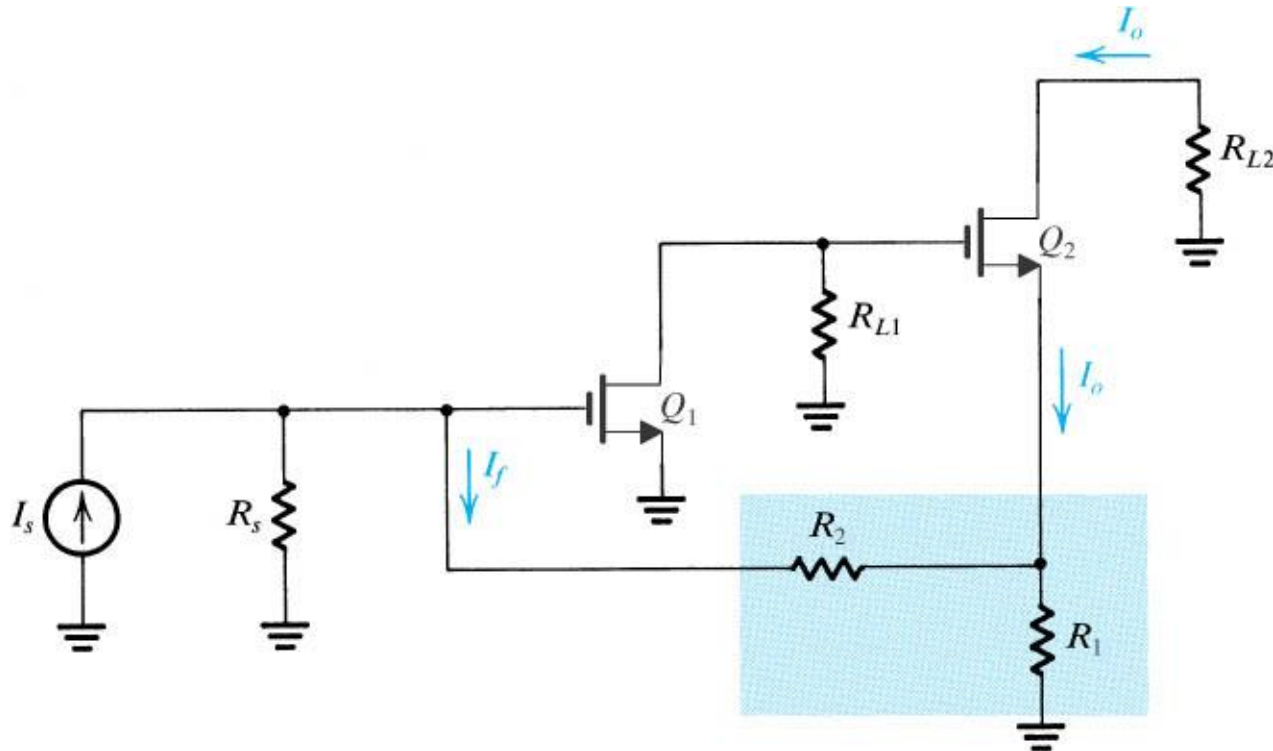
➔ Ejemplo 1:

- *Identifique la topología y todos los bloques que forman el amplificador realimentado adjunto.*



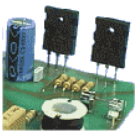
4.2. Ejemplo 2: topología Paralelo-Serie

- En los siguientes amplificadores se ha destacado ya la red de realimentación. Identifique el resto de bloques (*A*, carga, gen.):



■ Importante:

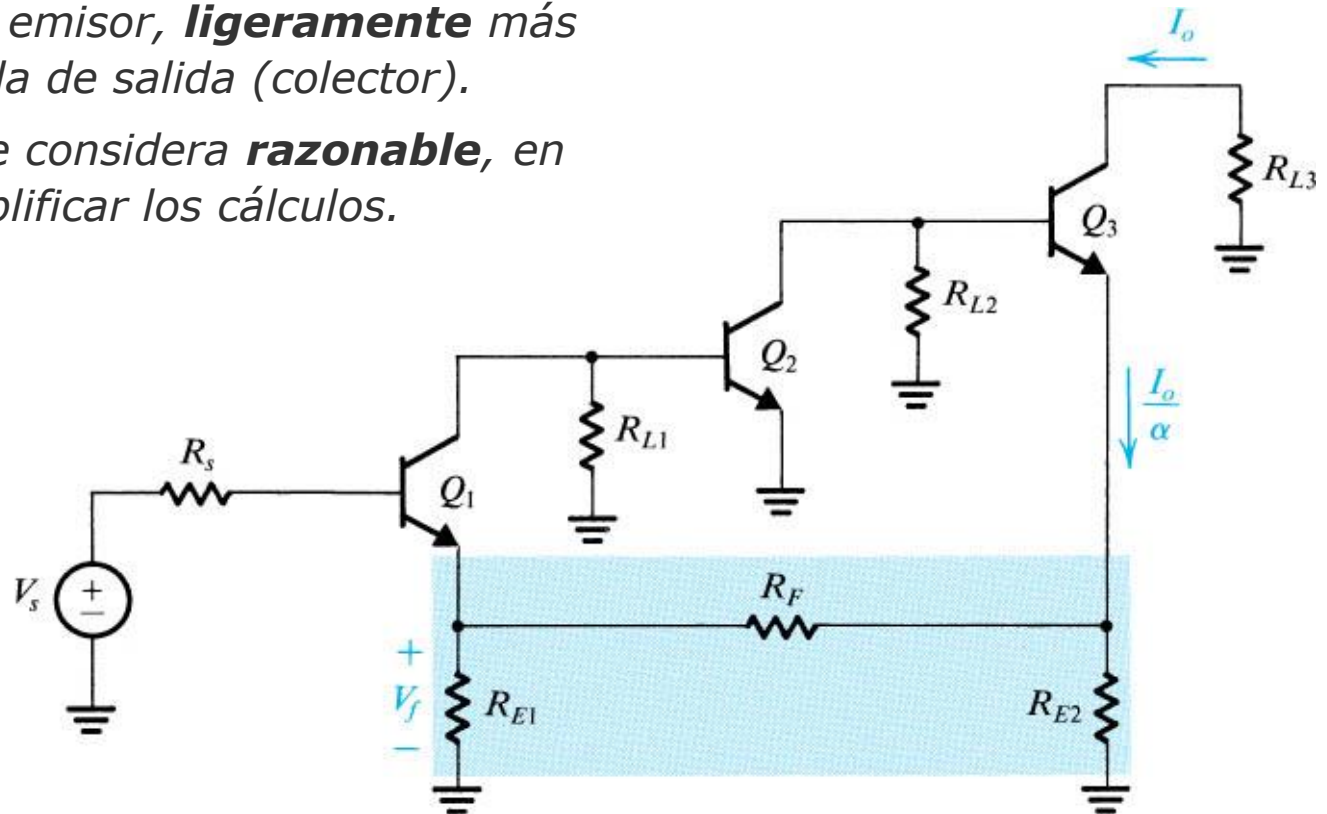
- *Nótese que la red de polarización se ha suprimido en este esquema.*



4.2. Ejemplo 3: topología Serie-Serie

- En este caso la salida del amplificador es a través de Q_3 , un BJT

- Por tanto, la corriente en la red β es la corriente de emisor, **ligeramente** más grande que la de salida (colector).
- Este error se considera **razonable**, en aras de simplificar los cálculos.

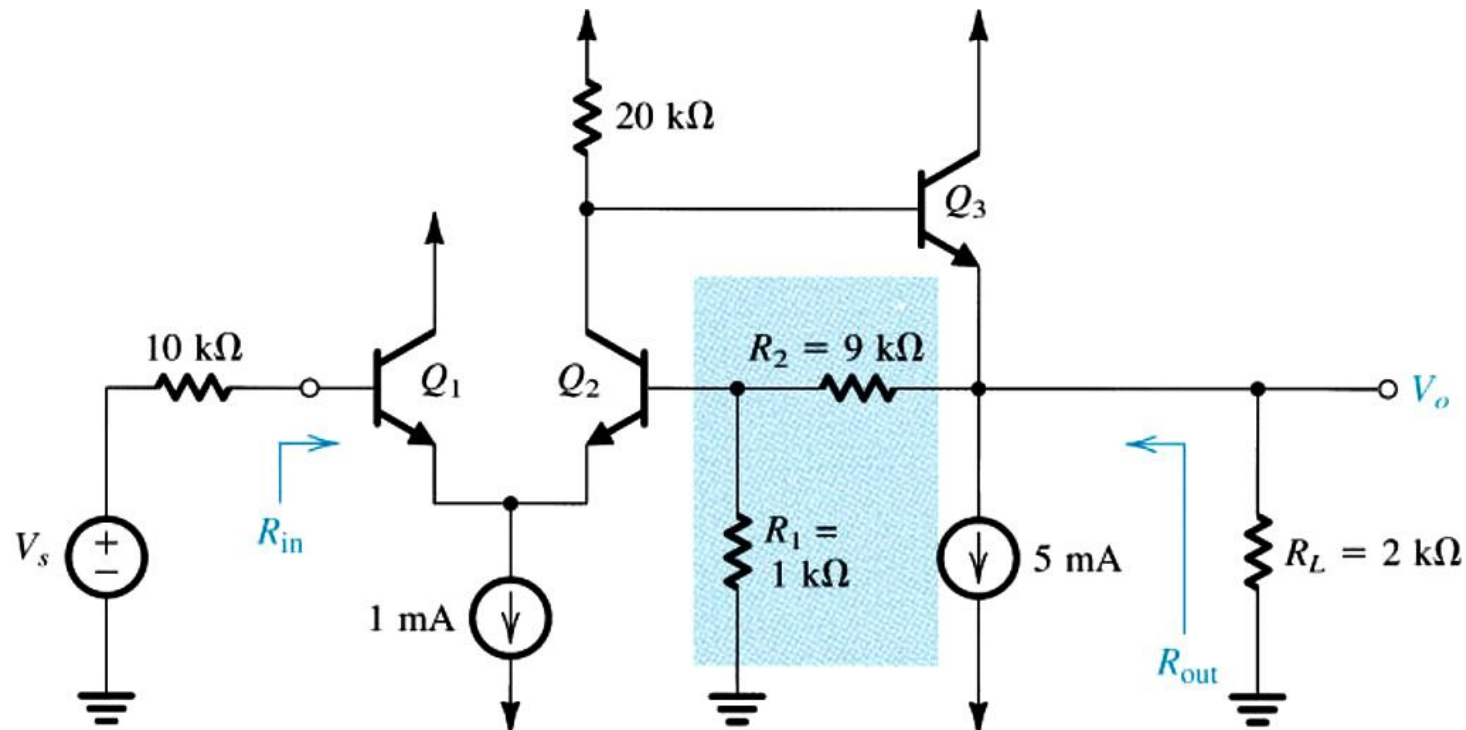


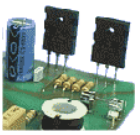
■ Importante:

- Nótese que la red de polarización se ha suprimido en este esquema.

4.2. Ejemplo 4: topología Serie-Paralelo

- El amplificador mostrado es un diferencial (*similar al del Laboratorio*)
 - Al tener dos entradas (no-inversora e inversora) la conexión serie de la red beta se simplifica notablemente.
 - En este caso, se muestra la red polarización pues el diferencial es un **amplificador de continua**, igual que el A. Operacional.

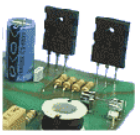




Referencias

- ❑ Material de estudio:
 - Hambley, capítulo 7.
 - Malik, secciones: 6.7, 7.8.3, 7.8.5 y 7.9.(2-4)
 - Sedra-Smith, capítulo 6, secciones 6.1-5.

- ❑ Gráficas extraídas de los textos y secciones detallados.



Control de revisiones

- 2017-03-13: versión preliminar
 - *Sólo secciones 'Introducción' y 'Respuesta en Frecuencia'*
- 2017-03-15: versión final
 - *Se incluye la sección 3.4-Capacidad Miller en los Amplificadores Operacionales. Se incluye la sección 4-Realimentación.*