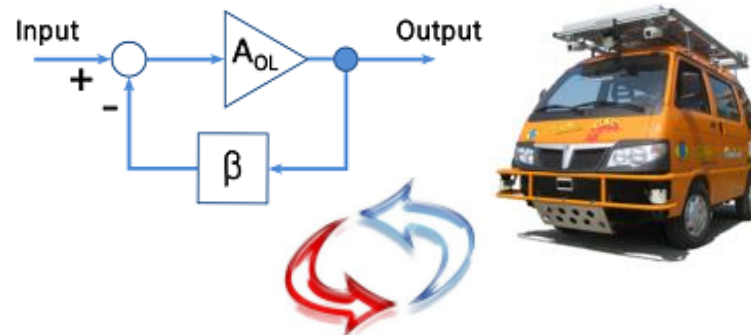




Tecnología Electrónica

Tema 2: Realimentación y estabilidad.

Teoría de realimentación. (1/3)



1. Introducción.
2. Teoría básica de realimentación
 1. Fundamentos y definiciones
 2. Ventajas de la realimentación negativa
 3. Topologías de realimentación
3. Realimentación en circuitos electrónicos
 1. Efectos de carga.
 2. Métodos de resolución de circuitos realimentados
4. Estabilidad en circuitos realimentados
 1. Análisis de la estabilidad.
 2. Métodos de compensación



1. Introducción



- ❑ ¿Qué es la teoría de **realimentación**?
 - Un modelo para el comportamiento de un sistema (electrónico, físico, etc.) en el que **parte** de la información de su **salida** se reenvía de nuevo hacia la **entrada**
 - *Retro-alimentación, o **feed-back**.*
 - Permite corregir desviaciones, errores, tolerancias, etc.
 - *Prácticamente todos los sistemas funcionales están **realimentados** (!)*

- ❑ Un ejemplo, físico:
 - La conducción de un coche.
 - *Sistema: **conductor – coche - carretera***
 - **Objetivo**: *seguir tu carril*
 - Desde el punto de vista del conductor:
 - *¿Cuál es la entrada – salida del sistema?*
 - *¿Sería capaz de conseguir el **objetivo** (ir por el carril) **sin ver la carretera**?*



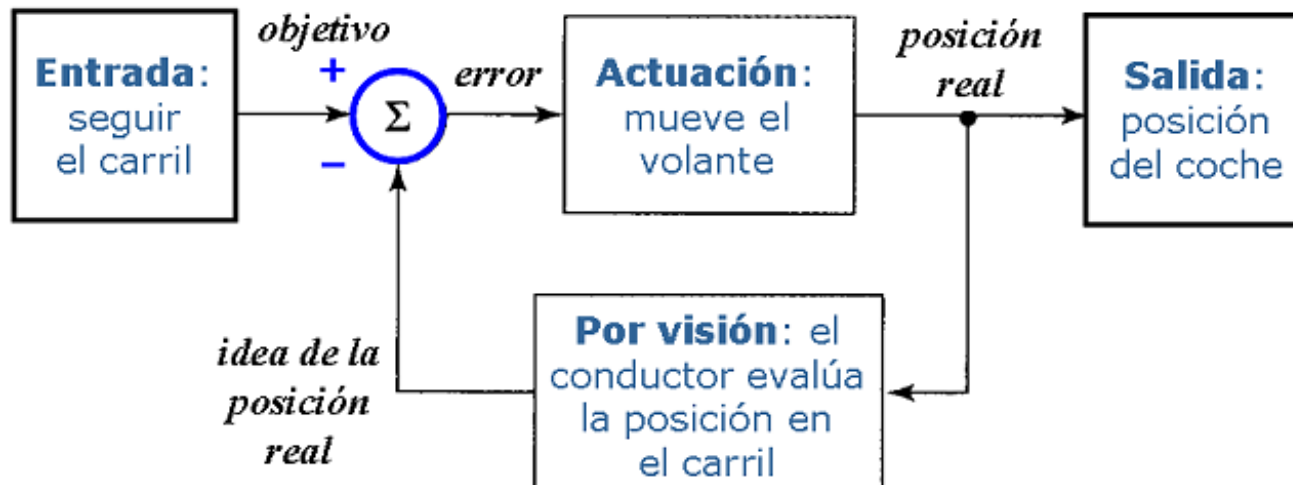


1. Introducción



- ❑ Ejemplo de un sistema realimentado
 - Objetivo (comando): seguir el centro del carril
 - Salida: posición relativa del coche en el carril
 - Entrada: error entre la posición del coche y el objetivo

- ❑ ¿Cómo **funciona** un sistema *conductor-coche-carretera*?
 - El conductor (controlador) mueve a izquierda y derecha el volante para mantener el coche en el centro del carril.



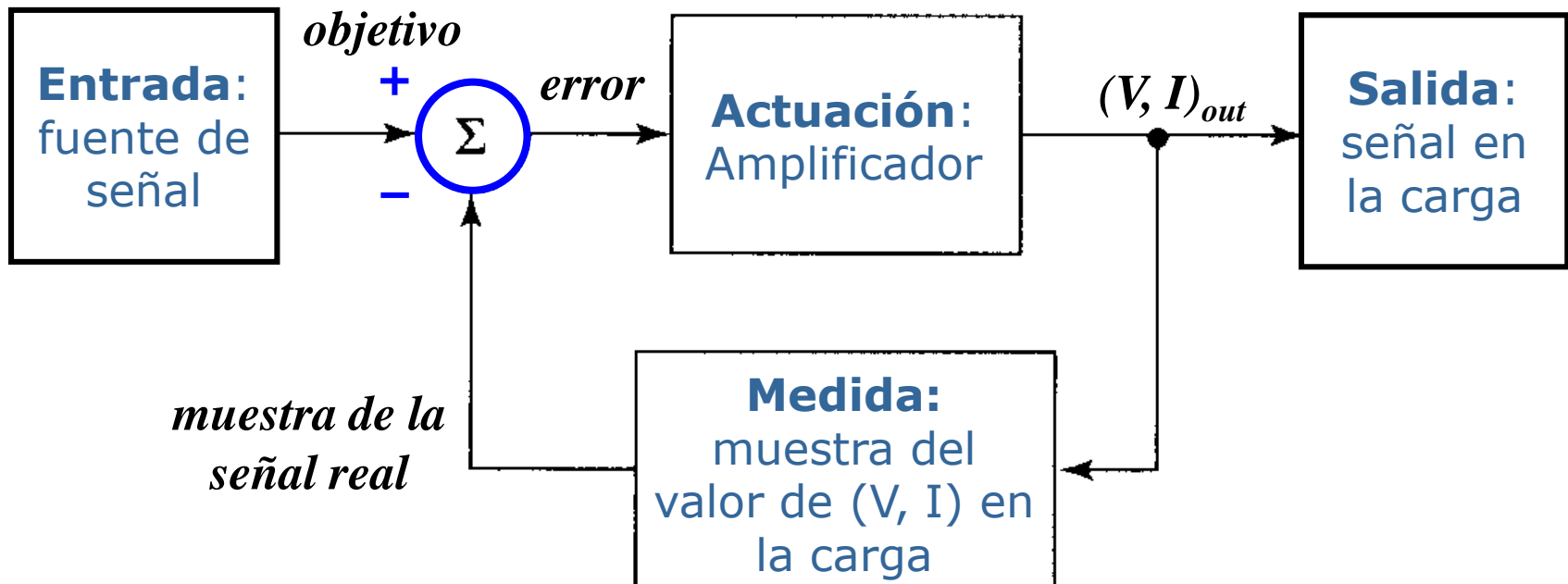


1. Introducción



Realimentación en circuitos electrónicos

- El mismo esquema fundamental
 - Señal de entrada (comando), señal de salida, actuación (amplificador).
- El sistema **mide** la forma de la salida, la compara con la entrada y es el **error** lo que actúa sobre la entrada del amplificador.
 - De esta forma, mejoran muchos parámetros del amplificador

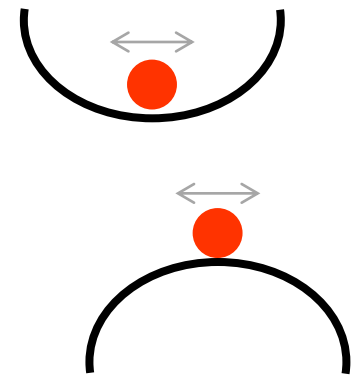




2. Teoría de realimentación

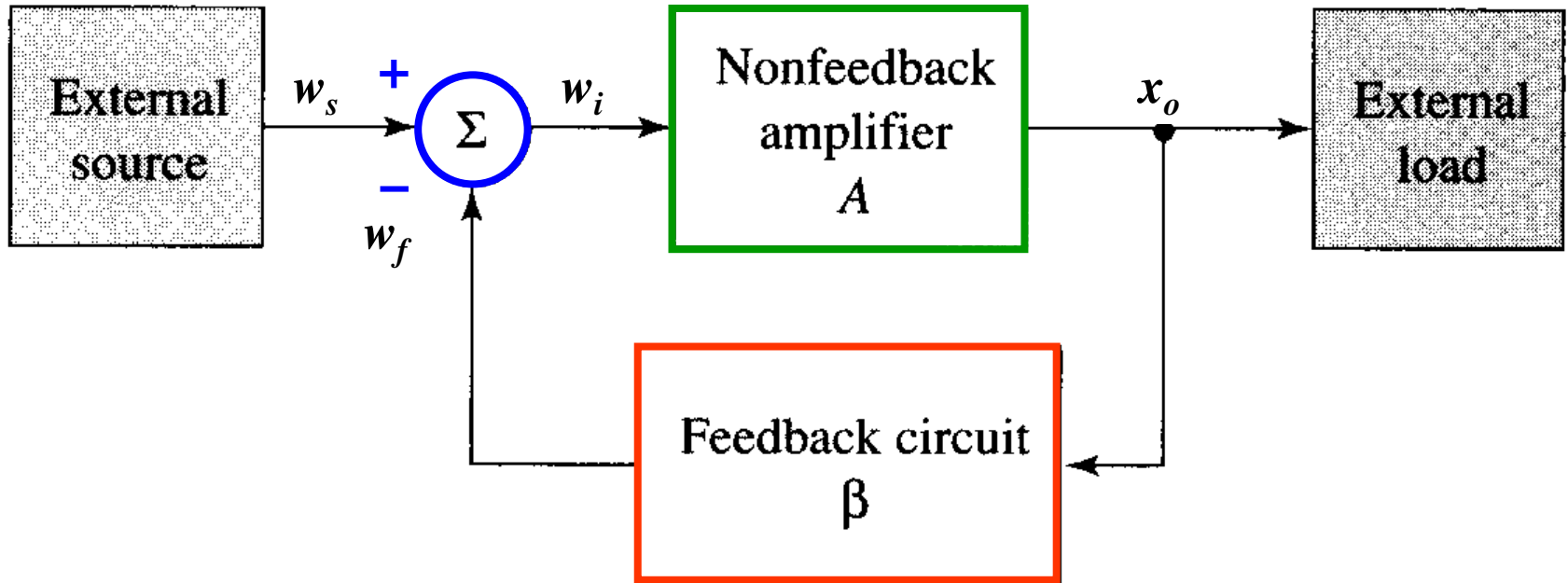


- ❑ Problema original a resolver (la necesidad)
 - Reducir la distorsión de los repetidores de señal telefónica
- ❑ Solución: la idea de realimentación y su formulación matemática
 - Harold S. Black, en 1927
 - Patentada finalmente en 1937
 - *El proceso de patente duró 9 años: la oficina de patentes **desconfió** de que la idea funcionase realmente.*
 - Ahora, en electrónica: todo amplificador práctico está realimentado
- ❑ Formalmente, dos tipos de realimentación
 - **Negativa**: compensa los cambios espontáneos
 - *Sistema estable*
 - *...idea gráfica → una canica en un hoyo...*
 - **Positiva**: realza los cambios espontáneos
 - *Sistema inestable.*
 - *...idea gráfica → una canica sobre un tubo...*





2.1. Teoría de realimentación negativa



- La idea de Real. negativa se formaliza en el signo (-) del sumador
- Factor de realimentación β (ojo, *inada que ver con BJTs!*)
- Esquema válido para cualquier tipo de amplificador
- Ecuación fundamental (ver trp. 9):

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

2.1. Teoría de Realimentación negativa



$$A_f = \frac{A}{F} = \frac{A}{1+L} \quad \leftarrow \quad A_f = \frac{A}{1+A\beta} \quad \rightarrow \quad A_{CL} = \frac{A_{OL}}{1+A_{OL}\beta}$$

Elementos de la **ecuación fundamental**

- Ganancia en **Lazo Abierto**:

$$A = A_{OL} = A_{Open-Loop} = \frac{x_o}{w_i}$$

- Ganancia en **Lazo Cerrado**:

$$A_f = A_{CL} = A_{Closed-Loop} = \frac{x_o}{w_s}$$

- Ganancia o cantidad de realimentación:

$$\beta = \frac{w_f}{x_o}$$

- Ganancia de **Lazo**: $L = A\beta$

- **Factor de mejora** (ó mérito) **F**:

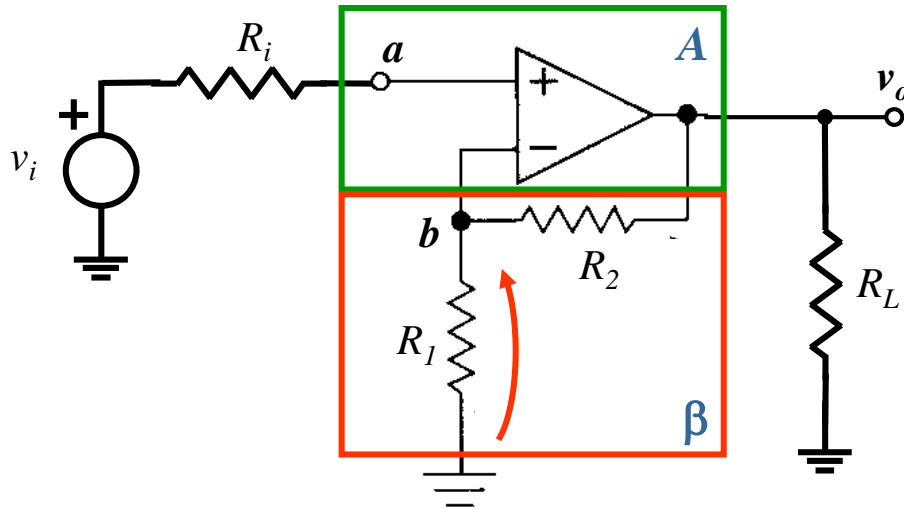
$$F = 1 + A\beta \quad \leftarrow \quad F = 1 + L$$



2.1. Teoría de realimentación negativa

□ Un ejemplo ya conocido...

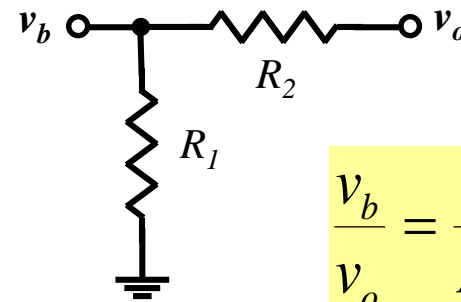
■ Amplificador con AO, configuración no inversora.



• **AO**, con $A_d=A$:

$$v_o = A(v_a - v_b)$$

• **Red β** , resistiva:



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

• **Al realimentar:**

$$\left. \begin{aligned} v_o &= A(v_a - v_b) = A(v_i - \beta v_o) \\ v_o(1 + A\beta) &= Av_i \end{aligned} \right\}$$

$$\Rightarrow A_f = \frac{v_o}{v_i} = \frac{A}{1 + A\beta}$$



2.2. Efectos de la realimentación negativa



□ Ventajas de la Re-

- Reducción de la sensibilidad a la variación de sus parámetros
 - *Tolerancias en componentes, variaciones por Temperatura, ...*
- Reducción de la distorsión no lineal
- Incremento del Ancho de Banda (BW)
- Ajuste de las impedancias terminales (Z_e y Z_s)
- Ajuste de la respuesta temporal, ...

□ Desventajas

- Disminución de la ganancia
 - *Es un inconveniente muy relativo (el beneficio es mucho mayor)*
 - *Puede solventarse aumentando el número de etapas.*
- **Peligro de inestabilidad**
 - *¡Esta cuestión sí es **muy importante!***
 - *Es necesario **saber estimar este riesgo**, para prevenirlo y/o compensarlo.*

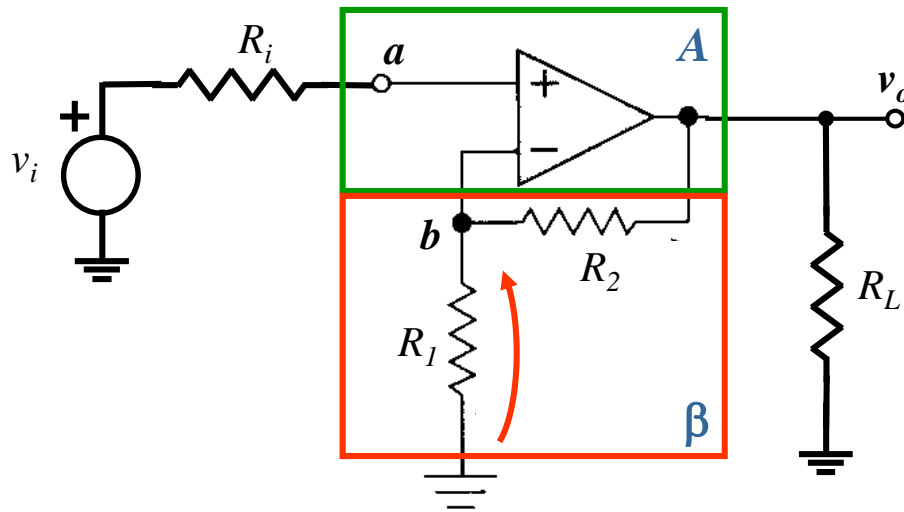


2.2. Beneficios de la realimentación negativa



- Ejemplo: Amplificador no-inversor con AO.

- Como A es de valor muy elevado, es fácil lograr que $A\beta \gg 1$:



$$A_f = \frac{A}{1 + A\beta} \Big|_{A\beta \gg 1} \approx \frac{1}{\beta} = \frac{R_1 + R_2}{R_1}$$

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



- Mientras se cumpla que $A\beta \gg 1$ se logra:

- Tener una A_f que no depende de los parámetros de A
 - **Insensible** a variaciones de A con Temperatura, tiempo, tolerancia...
- A_f es **lineal** y **ajustable** mediante los **elementos pasivos de β**
 - Mayor libertad del diseñador y mejor repetitibilidad del diseño



2.2.1. Reducción de la sensibilidad



- Sensibilidad de A al parámetro p
 - Cuantifica la variación relativa de A respecto a las variaciones relativas de p :

$$S_p^A = \frac{p}{A} \frac{dA}{dp}$$

- Consecuencia de realimentar A :
 - la sensibilidad del amplificador realimentado A_f mejora (se **reduce**) en un factor F :

$$S_p^{A_f} = \frac{1}{1 + A\beta} S_p^A$$

- Amplificador multietapa: mejora por realimentar cada etapa
 - La ganancia crece *exponencialmente* con el n° de etapas (n)
 - Mientras la sensibilidad crece más despacio (*linealmente* con n)

$$G = [A_f]^n$$

$$S_p^G = n S_p^{A_f}$$

n	G	S_p^G
1	8	0,001
2	64	0,002
3	512	0,003
4	4096	0,004

- Ejemplo con n etapas iguales:

2.2.2. Reducción de la distorsión no-lineal



□ Curva (a):

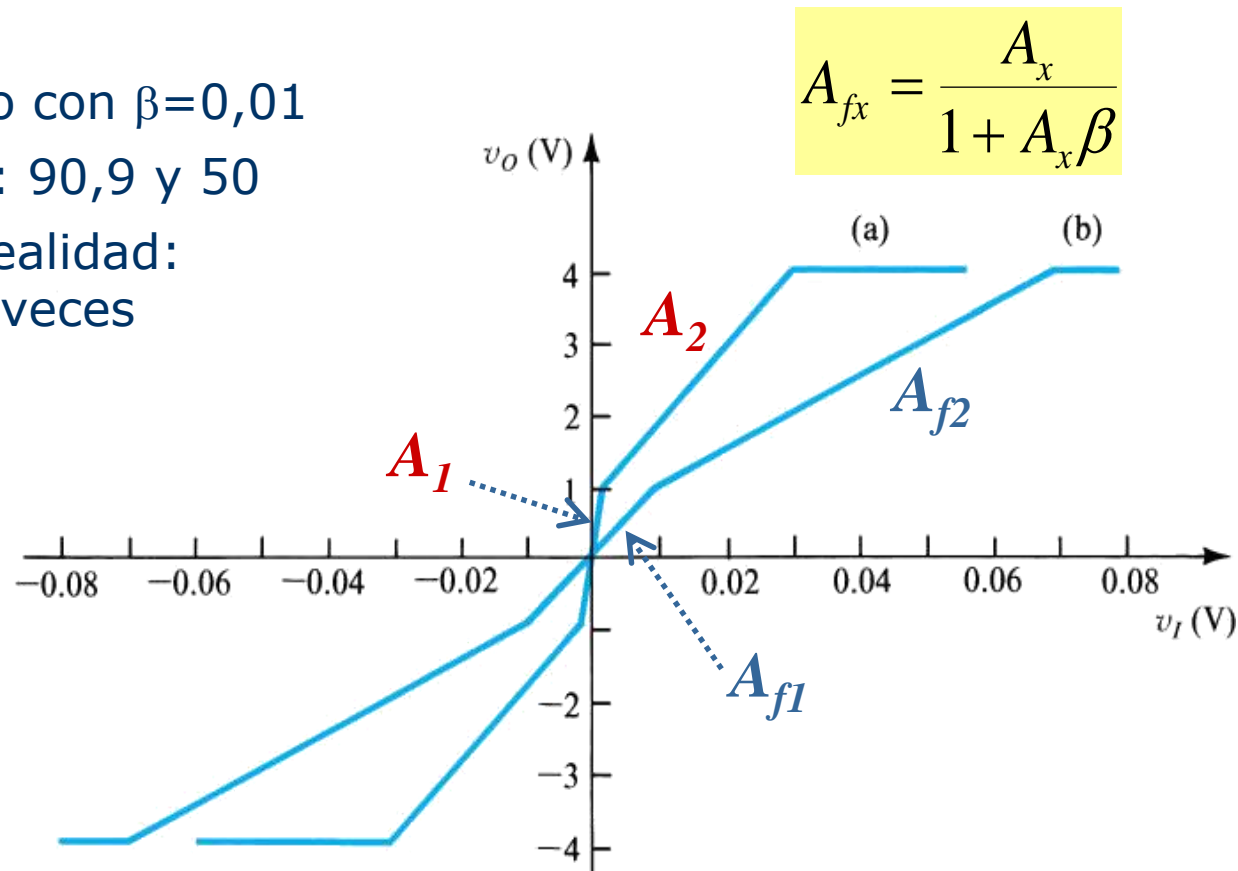
- Ganancia 1000, 100, en cada tramo (ganancia 0, en saturación)
- Relación de no-linealidad: de 1000 a 100 → **10** veces

□ Curva (b):

- Amp. realimentado con $\beta=0,01$
- Nuevas ganancias: 90,9 y 50
- Relación de no-linealidad: de 91 a 50 → **1,8** veces

$$A_{f1} = \frac{1000}{1 + 1000 \cdot 0,01} = 90,9$$

$$A_{f2} = \frac{100}{1 + 100 \cdot 0,01} = 50$$



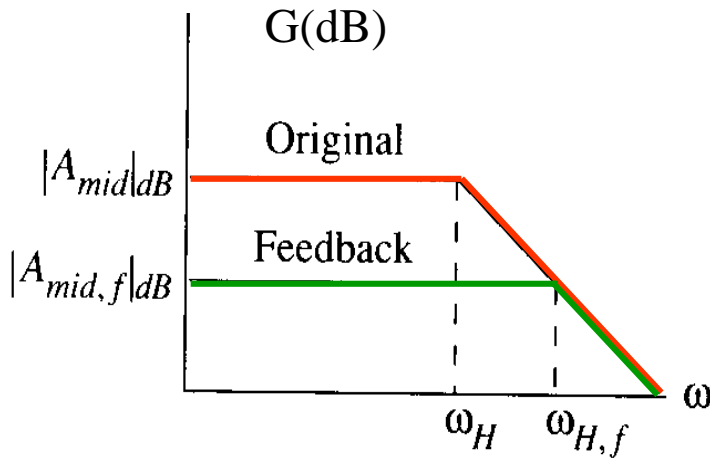


2.2.3. Efecto sobre el Ancho de Banda



- Sencillo de modelar en el caso de **polos dominantes**

- En Alta Frecuencia:



$$\text{Original} \rightarrow A = A_{mid} \frac{1}{1 + \frac{j\omega}{\omega_H}}$$

$$\text{Realimentado} \rightarrow A_f(\omega) = \frac{A(\omega)}{1 + A(\omega)\beta}$$

Operando se tiene:

$$A_f = A_{mid,f} \frac{1}{1 + \frac{j\omega}{\omega_{Hf}}}$$

$$A_{mid,f} = \frac{A_{mid}}{1 + A_{mid}\beta}$$

$$\omega_{Hf} = \omega_H (1 + A_{mid}\beta)$$

Importante: nótese que el producto **Ganancia por Ancho de Banda (GBW)** es una **constante**.

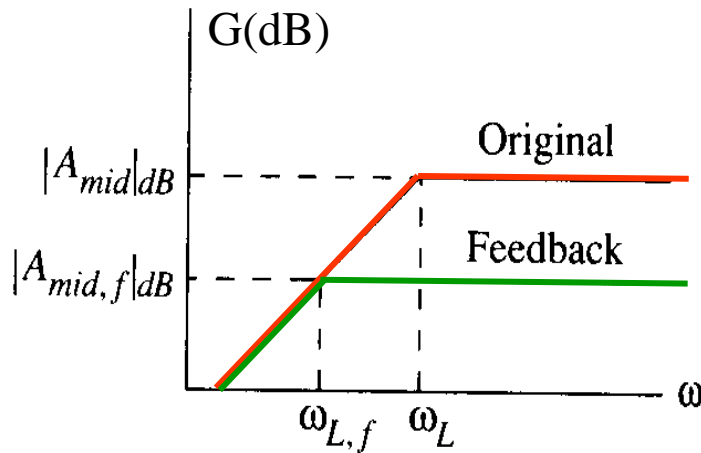
$$GBW = A_{mid,f} \cdot \omega_{Hf} = A_{mid} \cdot \omega_H = \text{cte.}$$



2.2.3. Efecto sobre el Ancho de Banda



- Con el **polo dominante** en Baja Frecuencia (cero en 0 + polo):



Original $\rightarrow A = A_{mid} \frac{j\omega}{j\omega + \omega_L}$

Realimentado $\rightarrow A_f(\omega) = \frac{A(\omega)}{1 + A(\omega)\beta}$

$$A_f = A_{mid,f} \frac{j\omega}{j\omega + \omega_{L,f}}$$

$$A_{mid,f} = \frac{A_{mid}}{1 + A_{mid}\beta}$$

$$\omega_{L,f} = \frac{\omega_L}{(1 + A_{mid}\beta)}$$

- También se traslada la frecuencia de corte inferior, pero no se puede relacionar con GBW.

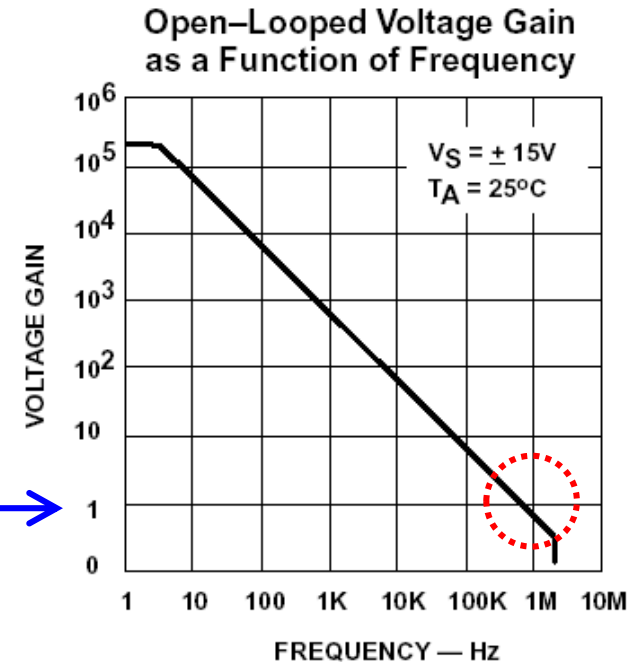
2.2.3. Ejemplo: GBW en el AO real



- El AO 741 tiene un **polo dominante**
 - Efecto reflejado en los *data-sheet* por la **frec. de ganancia unidad: f_t**

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

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



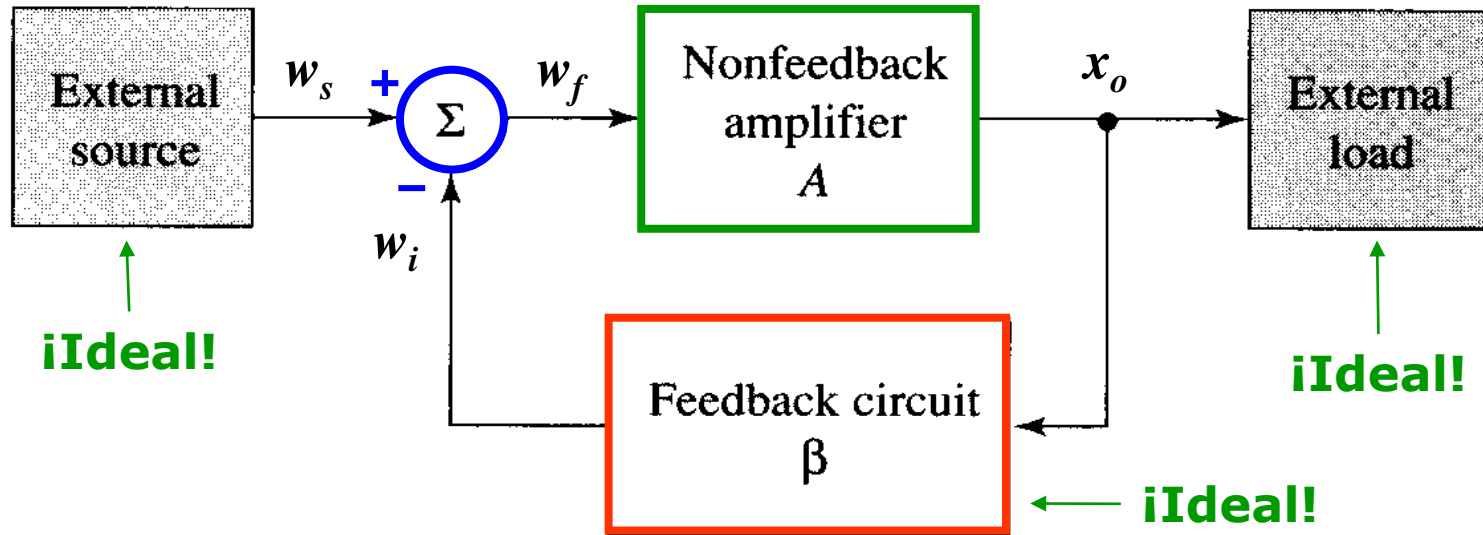
AC ELECTRICAL CHARACTERISTICS

$T_A=25^\circ C$, $V_S = \pm 15V$, unless otherwise specified.

SYMBOL	PARAMETER	TEST CONDITIONS	$\mu A741, \mu A741C$			UNIT
			Min	Typ	Max	
R_{IN}	Parallel input resistance	Open-loop, $f=20Hz$	0.3			$M\Omega$
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	$V_{IN}=20mV, R_L=2k\Omega, C_L \leq 100pF$				
	Rise time			0.3		μs
SR	Overshoot	$C \leq 100pF, R_L \geq 2k\Omega, V_{IN} = \pm 10V$		5.0		%
	Slew rate			0.5		$V/\mu s$



2.3. Tipos de realimentación



- ❑ Formulación teórica única: implica una idealización del problema
- ❑ Condiciones del estudio idealizado
 - Sin efectos de carga: las variables (V o I) no dependen de ellas.
 - Se mide la variable de salida (V o I)
 - La red β transfiere esta señal hacia la entrada

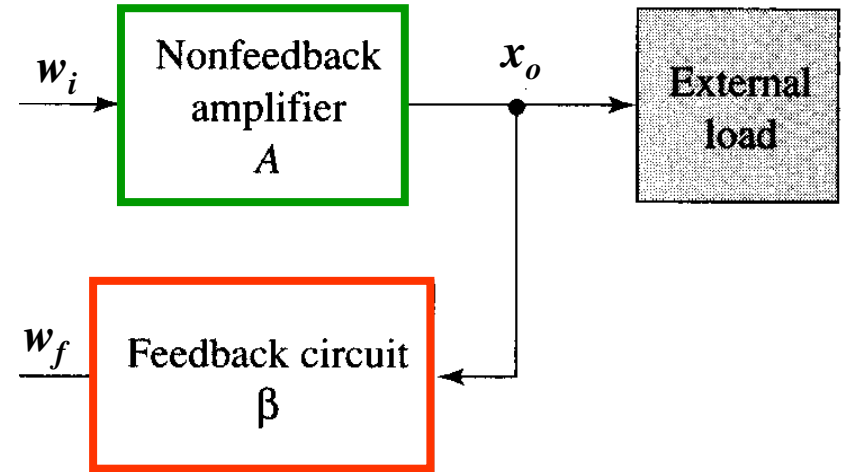


2.3. Tipos de Realimentación.



- ❑ **Medida** (muestra) de la variable de salida x_o

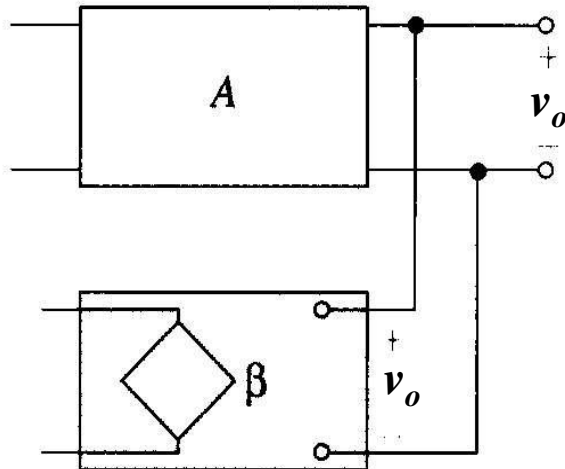
Condición: no hay efectos de carga (β y *Load* ideales)



Nomenclaturas diversas:

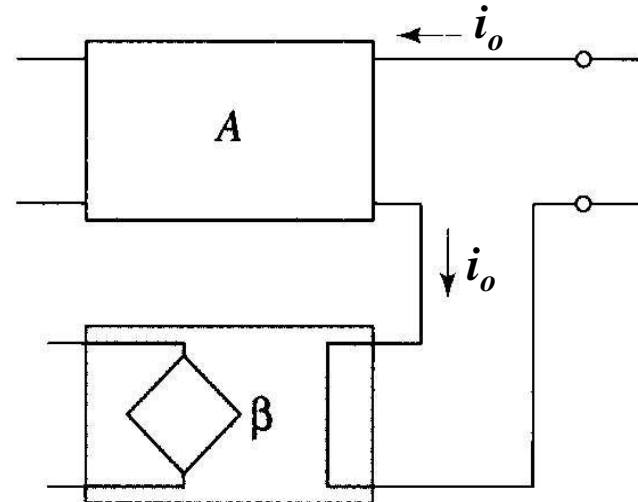
Variable **Malik...** **Topología**

Muestreo en tensión



Tensión...

Paralelo a la salida



Muestreo en corriente

Corriente...

Serie a la salida



2.3. Tipos de Realimentación

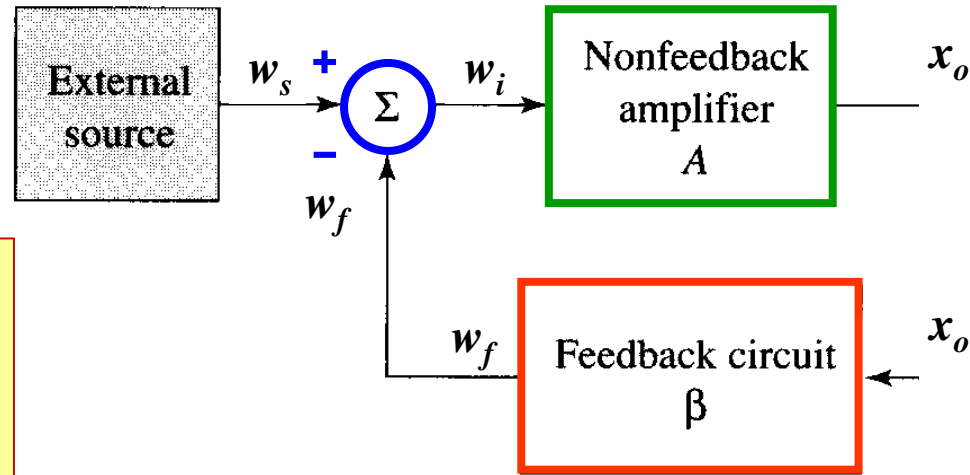


□ **Suma** en la entrada $w_{s,i,f}$

Condición: no hay efectos de carga (β y *Generador* ideales)

Ojo a nomenclaturas

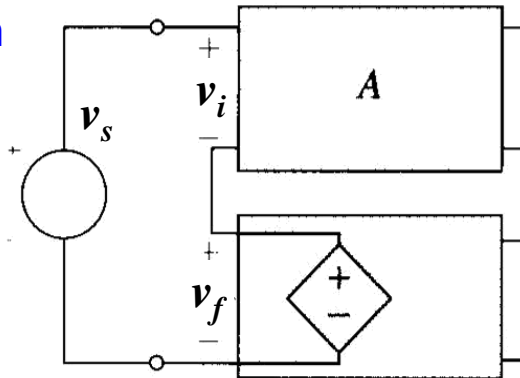
Variable **Malik...** **Topología**



Realimentación en tensión

...Serie

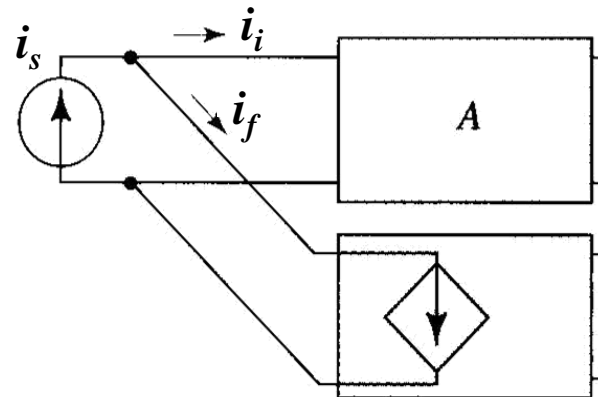
Serie a la entrada



Realimentación en corriente

...Paralelo

Paralelo a la entrada

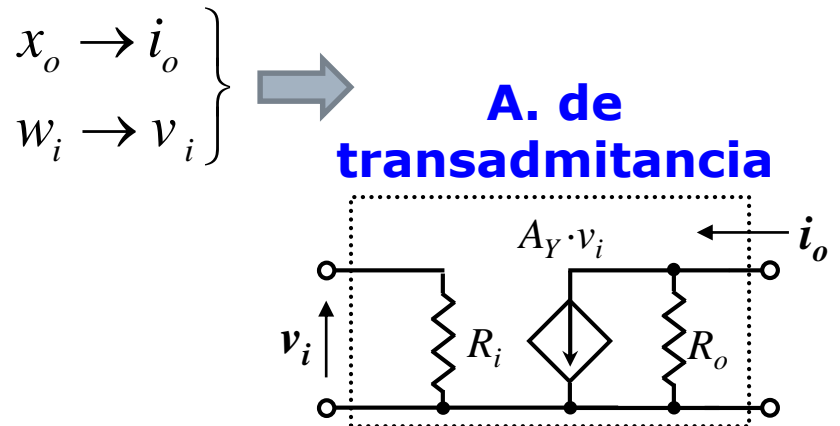
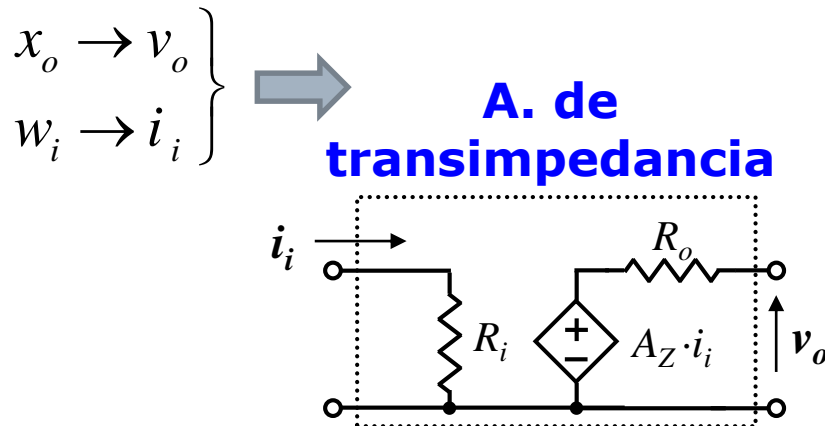
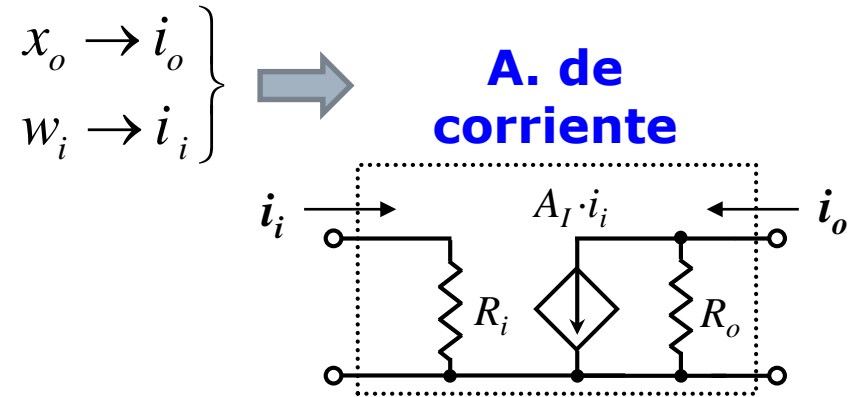
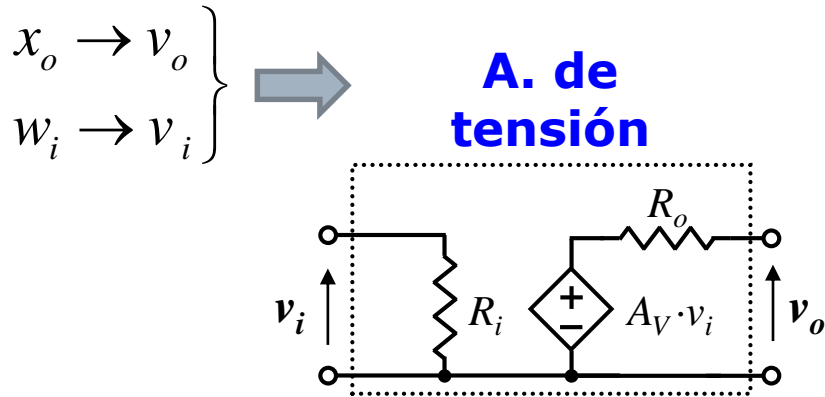




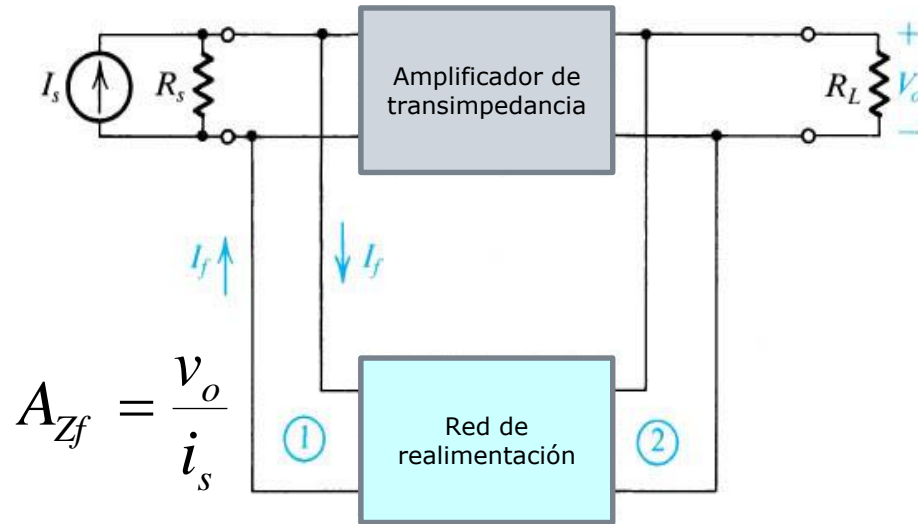
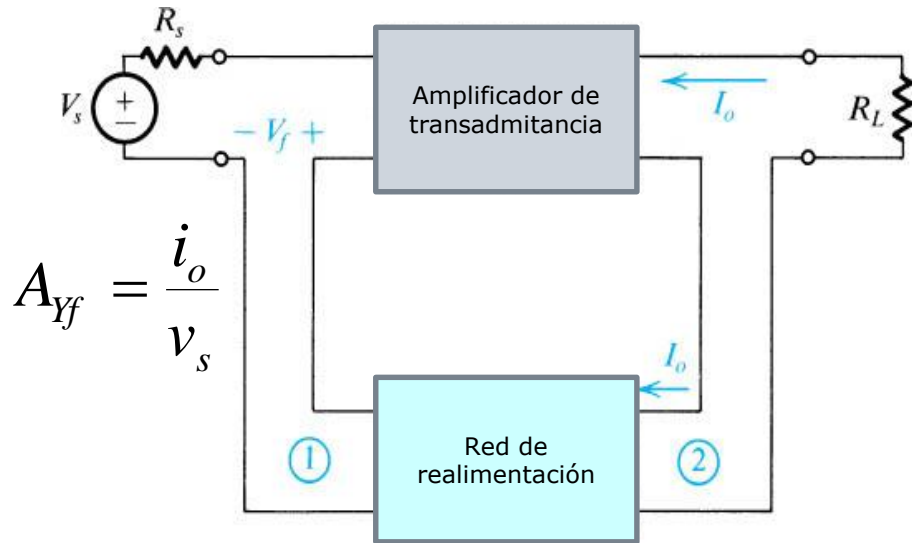
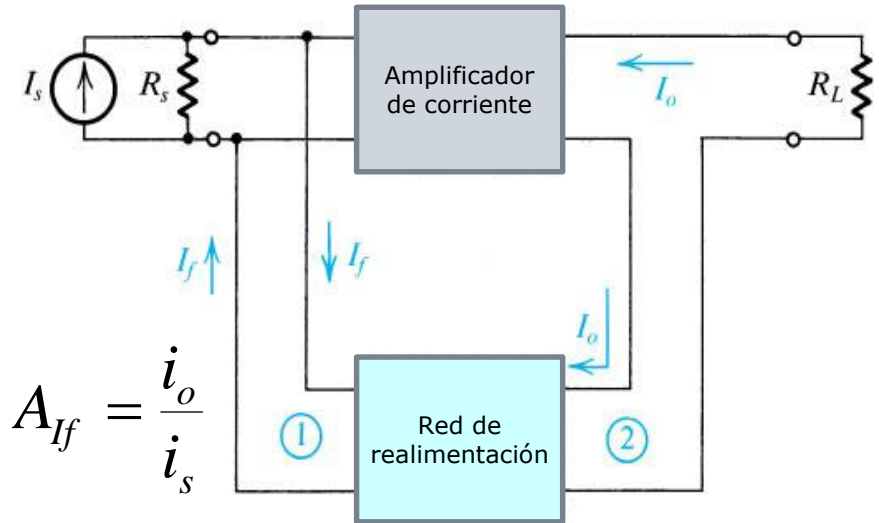
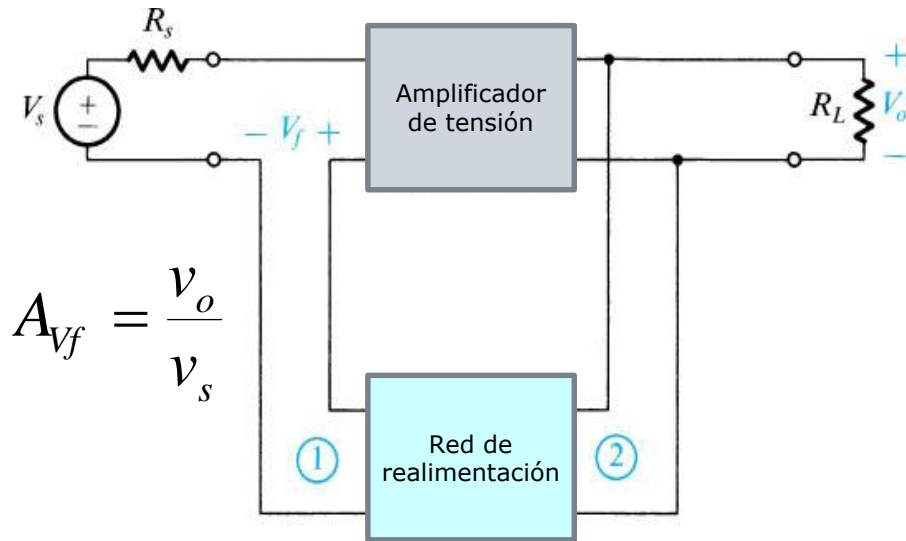
2.4. Topologías de realimentación



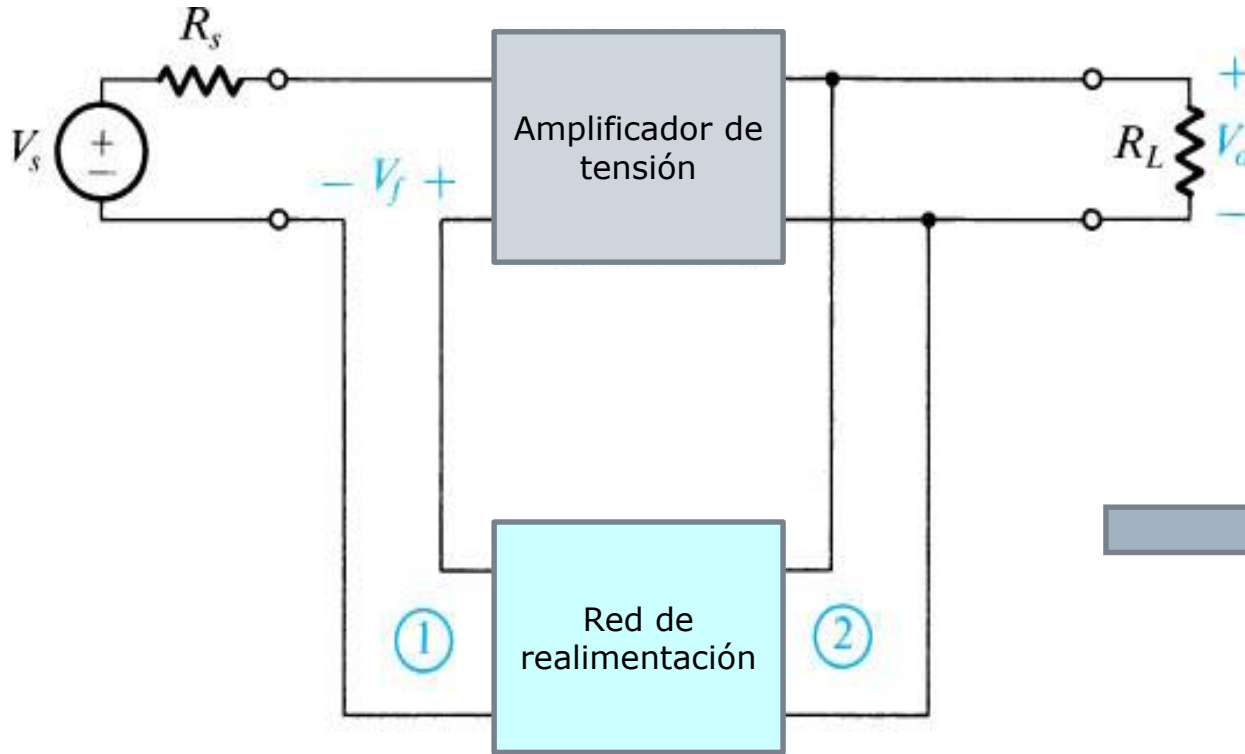
- Al determinarse las variables eléctricas en salida y entrada:
 - Se fija y concreta el tipo de realimentación, las ganancias (unidades), la forma de conexión y los tipos apropiados de amplificador A y β



2.4. Topologías de realimentación



2.4.1. Serie-Paralelo (tensión-tensión) A_{vf}



Caso a caso.

- La topología fija todo:
- *tipos de ganancias, unidades de A y β , y la nomenclatura.*



$$A_{vf}$$

$$A_v \quad \beta_v$$

Muestreo en tensión...

Realimentación en tensión...

Tensión...

... paralelo

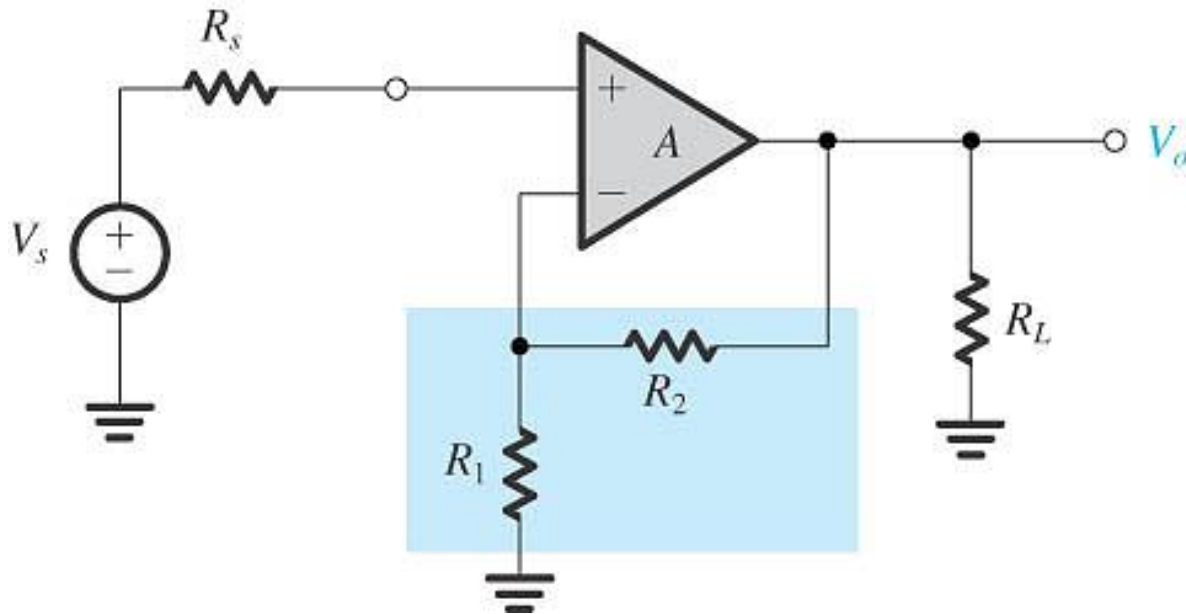
Serie a la entrada

Paralelo a la salida

2.4.1. Serie-Paralelo (tensión-tensión) A_{vf}



- Ejemplo: amplificador no-inversor con AO



Muestreo en tensión...

Tensión...

Serie a la entrada

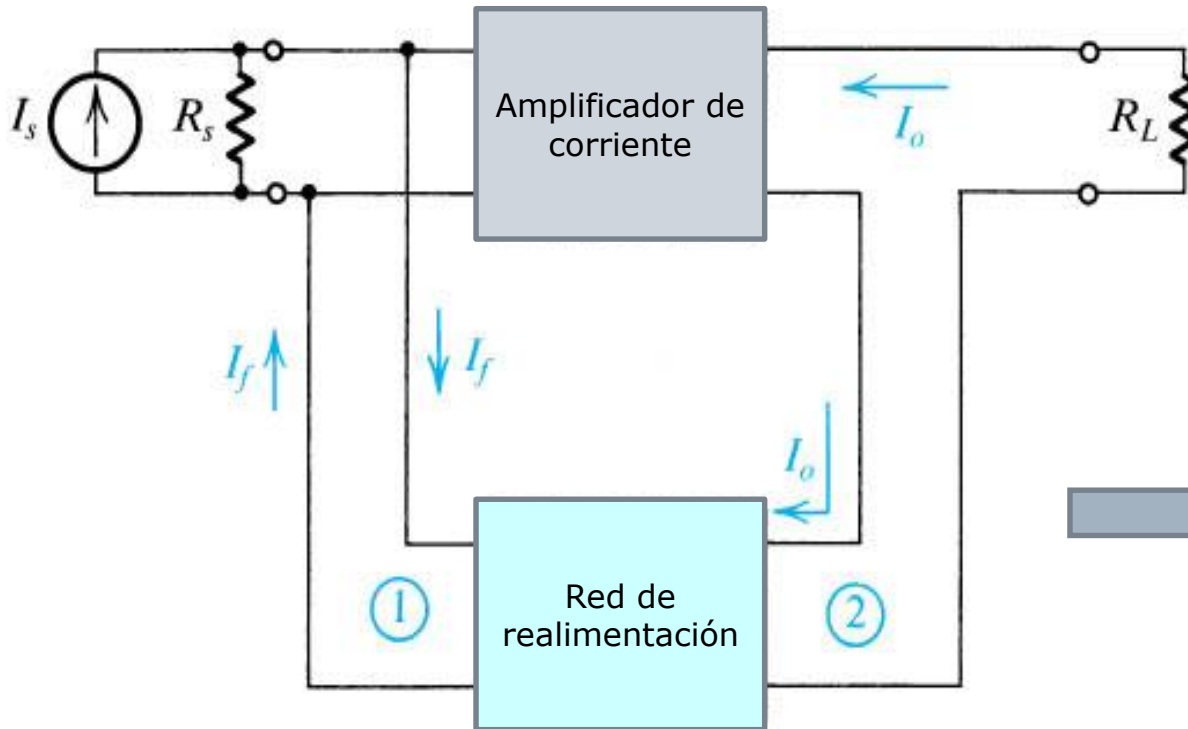
Realimentación en tensión...

... serie

Paralelo a la salida



2.4.2. Paralelo-Serie (corriente-corriente) A_{If}



A_{If}

$A_I \quad \beta_I$

Muestreo en corriente...

Realimentación en corriente...

Corriente... ... paralelo

Paralelo a la entrada

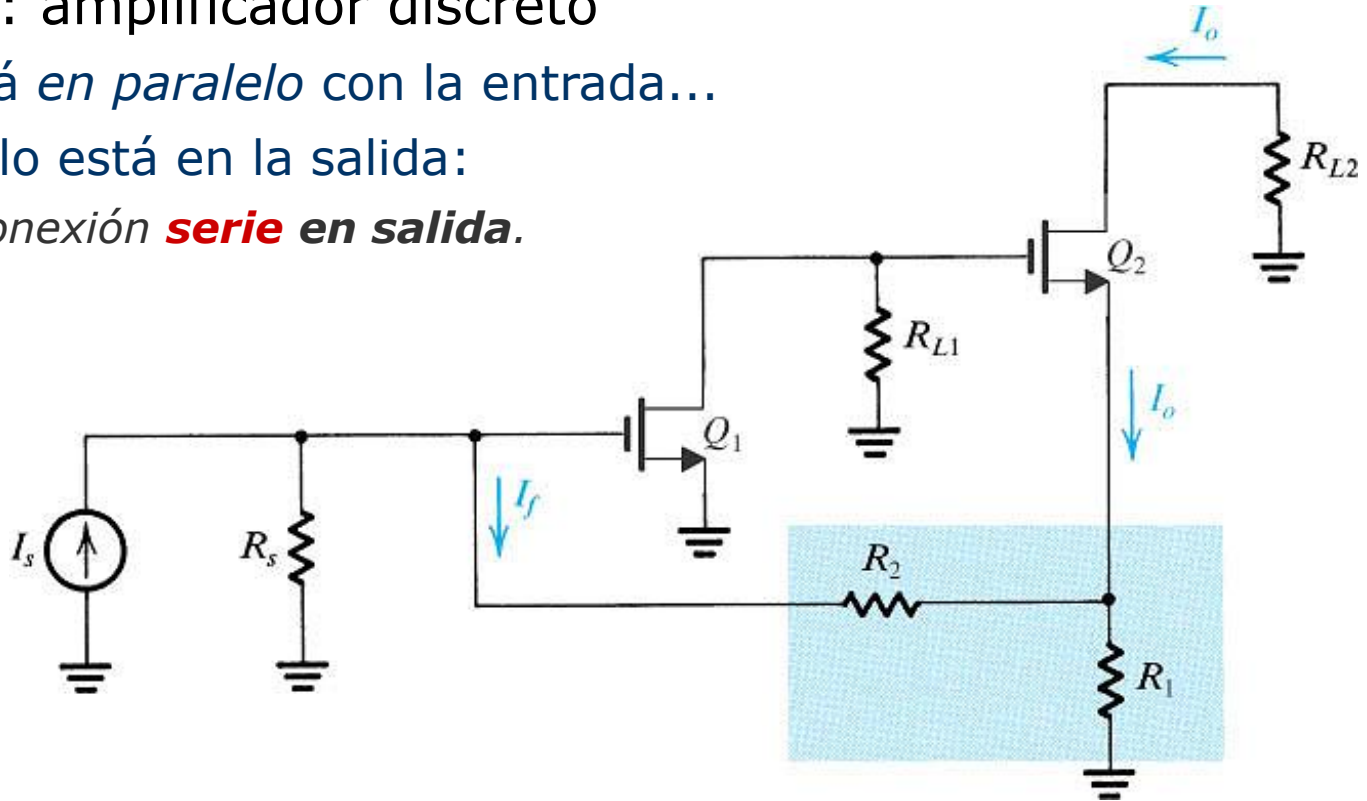
Serie a la salida



2.4.2. Paralelo-Serie (corriente-corriente) A_{If}



- Ejemplo: amplificador discreto
 - β está *en paralelo* con la entrada...
 - Y no lo está en la salida:
 - Conexión **serie** en salida.



Muestreo en corriente...

Realimentación en corriente...

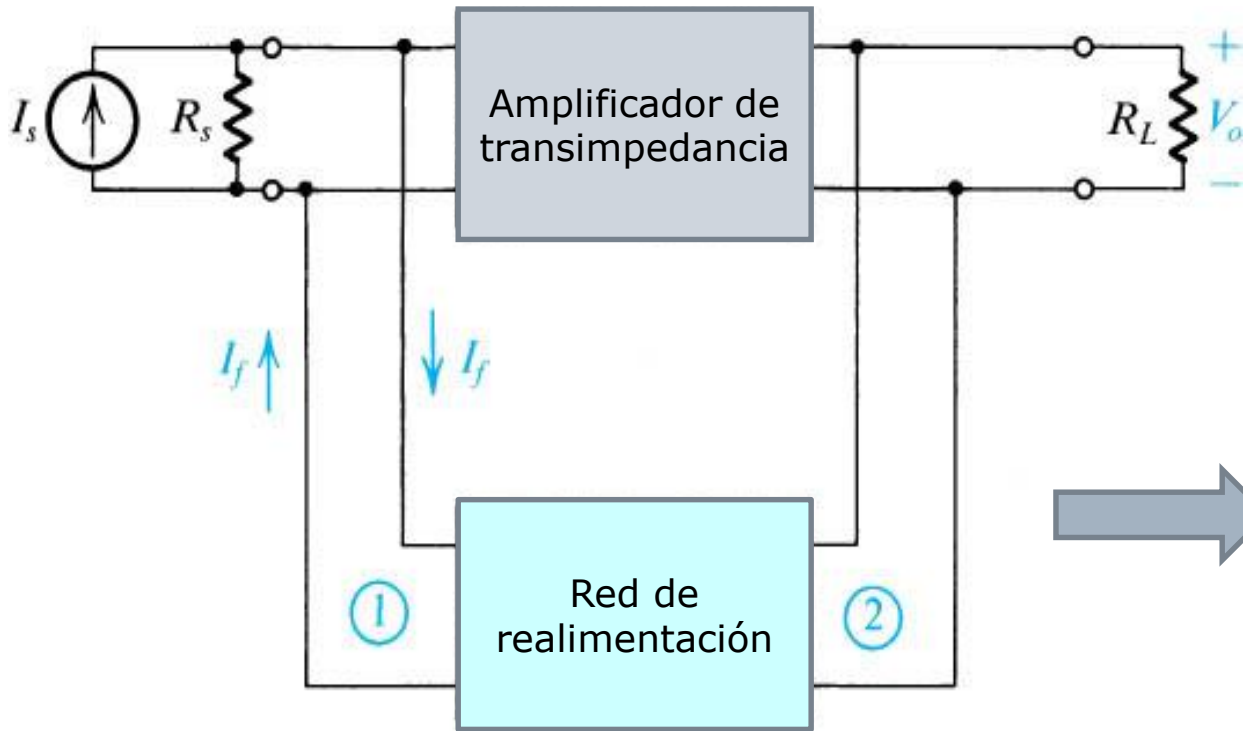
Corriente... ... paralelo

Paralelo a la entrada

Serie a la salida



2.4.3. Paralelo-Paralelo (corriente-tensión) A_{zf}



$$A_{zf}$$

$$A_z \quad \beta_Y$$

Muestreo en tensión... Realimentación en corriente...

Tensión... ... paralelo

Paralelo a la entrada Paralelo a la salida

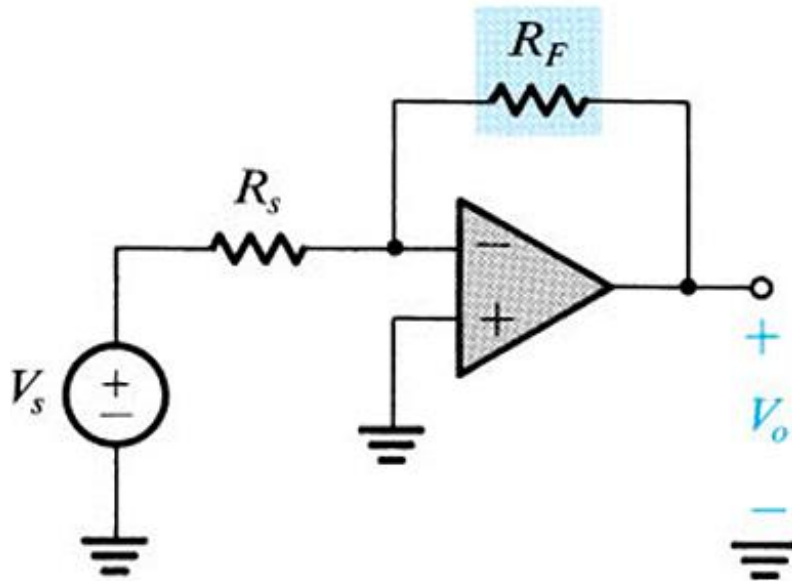


2.4.3. Paralelo-Paralelo (corriente-tensión) A_{zf}



□ Un ejemplo interesante:

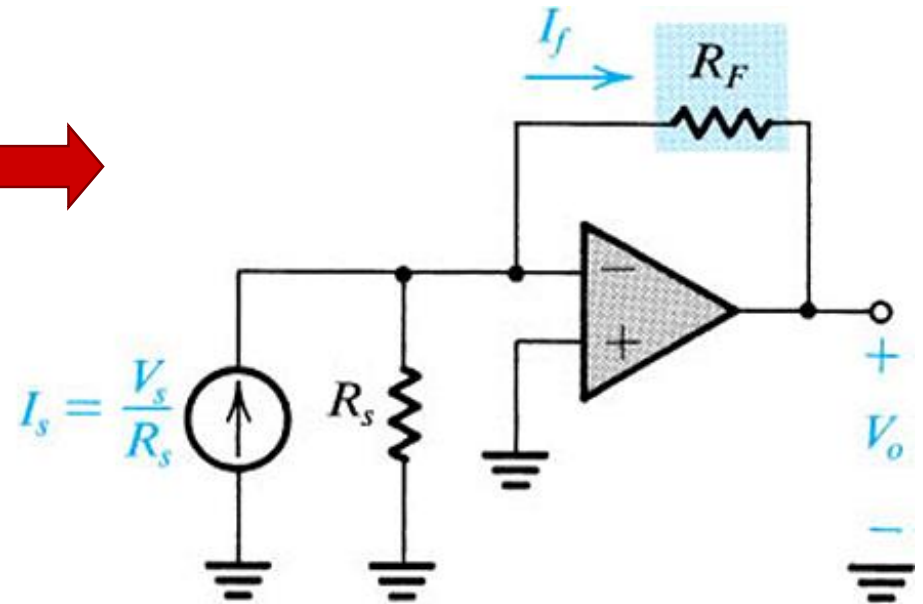
- el amplificador inversor con AO, desde el punto de vista de teoría de Realimentación, en realidad **debe** considerarse como un **A_I**



Muestreo en corriente...

Corriente...

Paralelo a la entrada

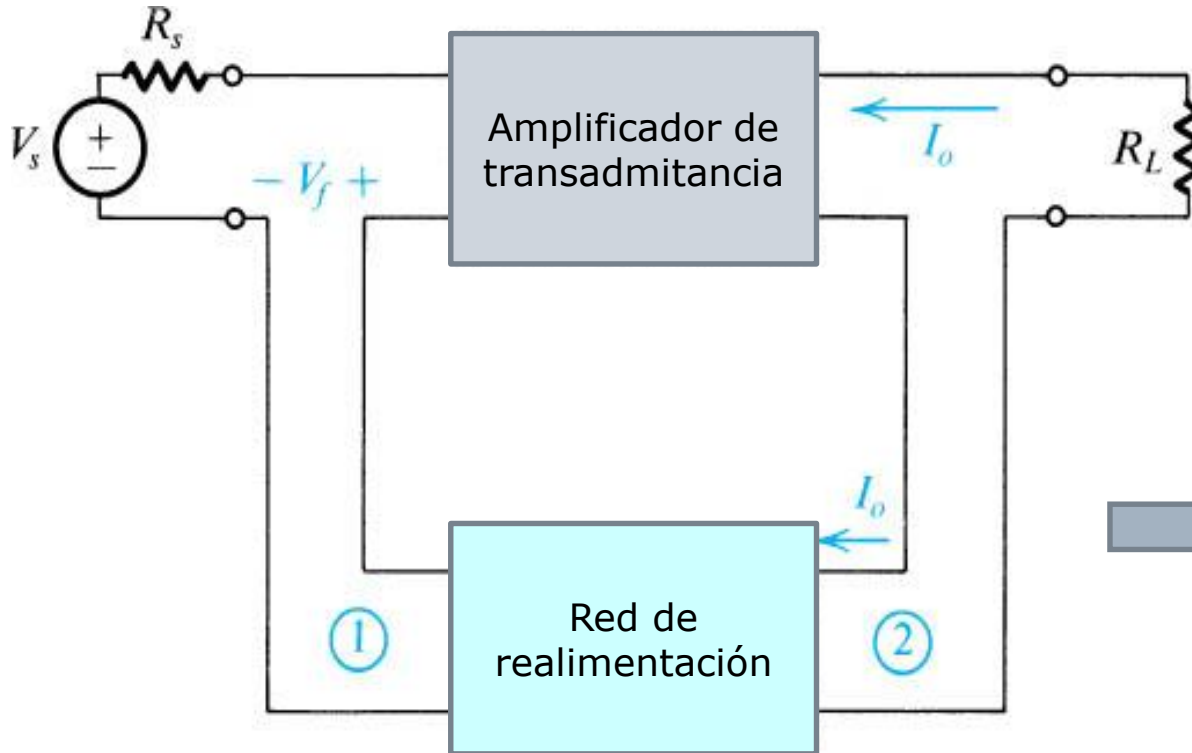


Realimentación en corriente...

... paralelo

Serie a la salida

2.4.4. Serie-Serie (tensión-corriente) A_{Yf}



$$A_{Yf}$$

$$A_Y \quad \beta_Z$$

Muestreo en corriente...

Realimentación en tensión...

Corriente...

... Serie

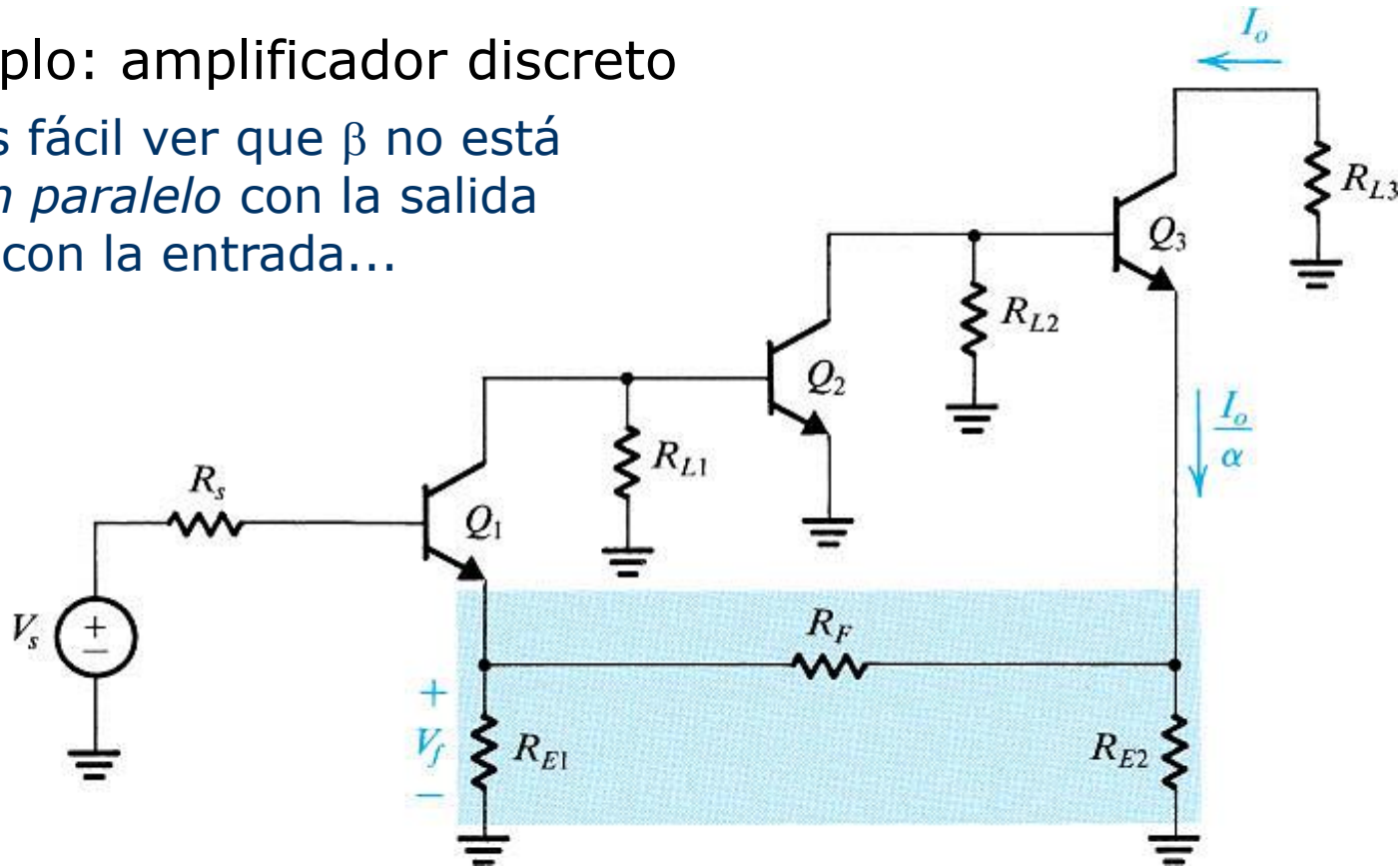
Serie a la entrada

Serie a la salida

2.4.4. Serie-Serie (tensión-corriente) A_{Yf}

□ Ejemplo: amplificador discreto

- Es fácil ver que β no está *en paralelo* con la salida o con la entrada...



Muestreo en corriente...

Realimentación en tensión...

Corriente...

... serie

Serie a la entrada

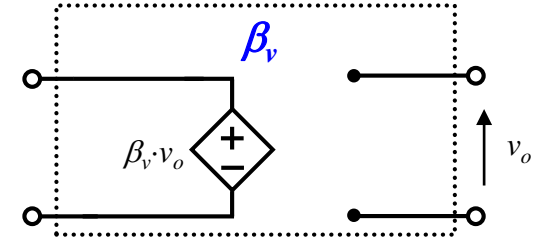
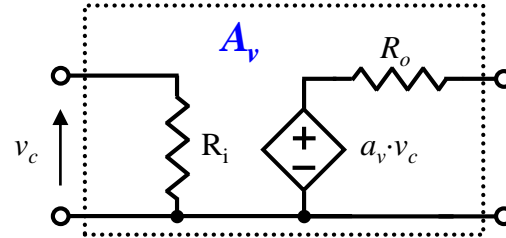
Serie a la salida

2.4.5. Resumen: detalle de las redes A y β

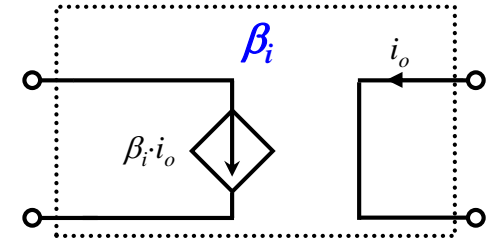
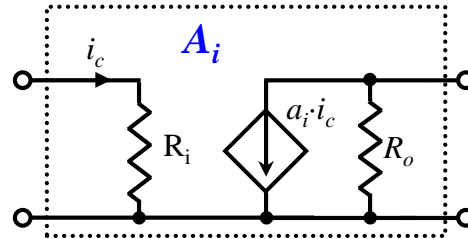


Observación importante: $\mathbf{L} = \mathbf{A} \cdot \boldsymbol{\beta}$ es siempre adimensional:

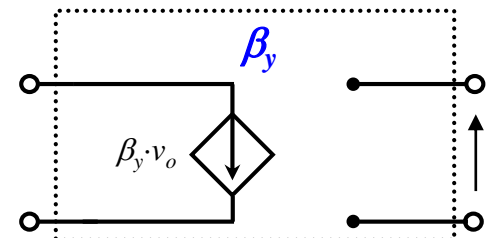
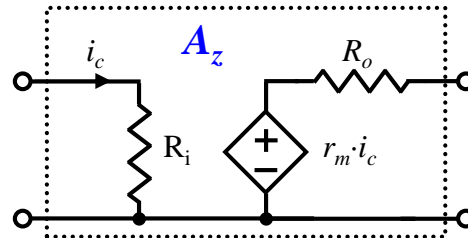
A. de tensión



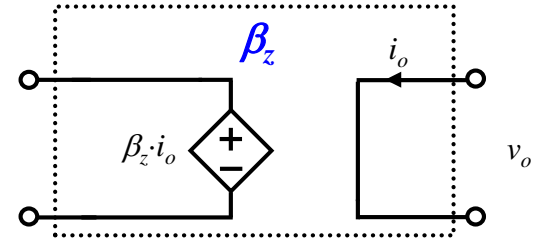
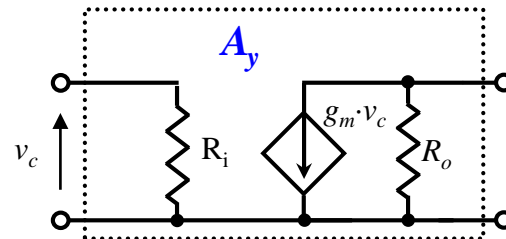
A. de corriente



A. de transimpedancia



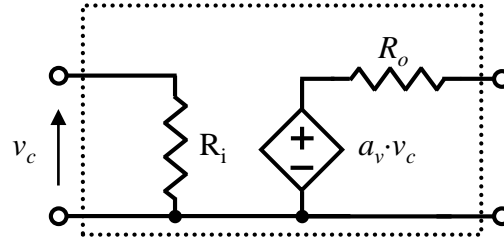
A. de transadmitancia



2.5. Realimentación con A real ($R_i - R_o$)

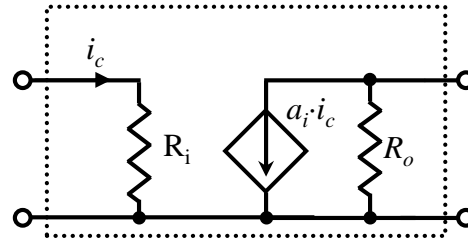
- Hacia el problema real: efecto de las R terminales de A .

A. real de tensión



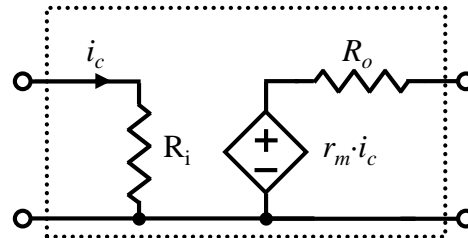
Realimentación más favorable:
Serie-Paralelo

A. real de corriente



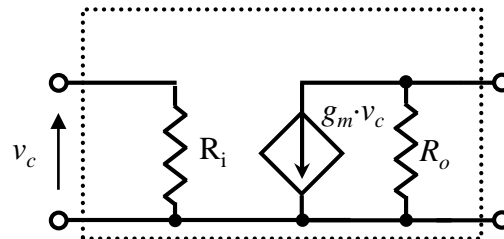
Realimentación más favorable:
Paralelo-Serie

A. real de transimpedancia



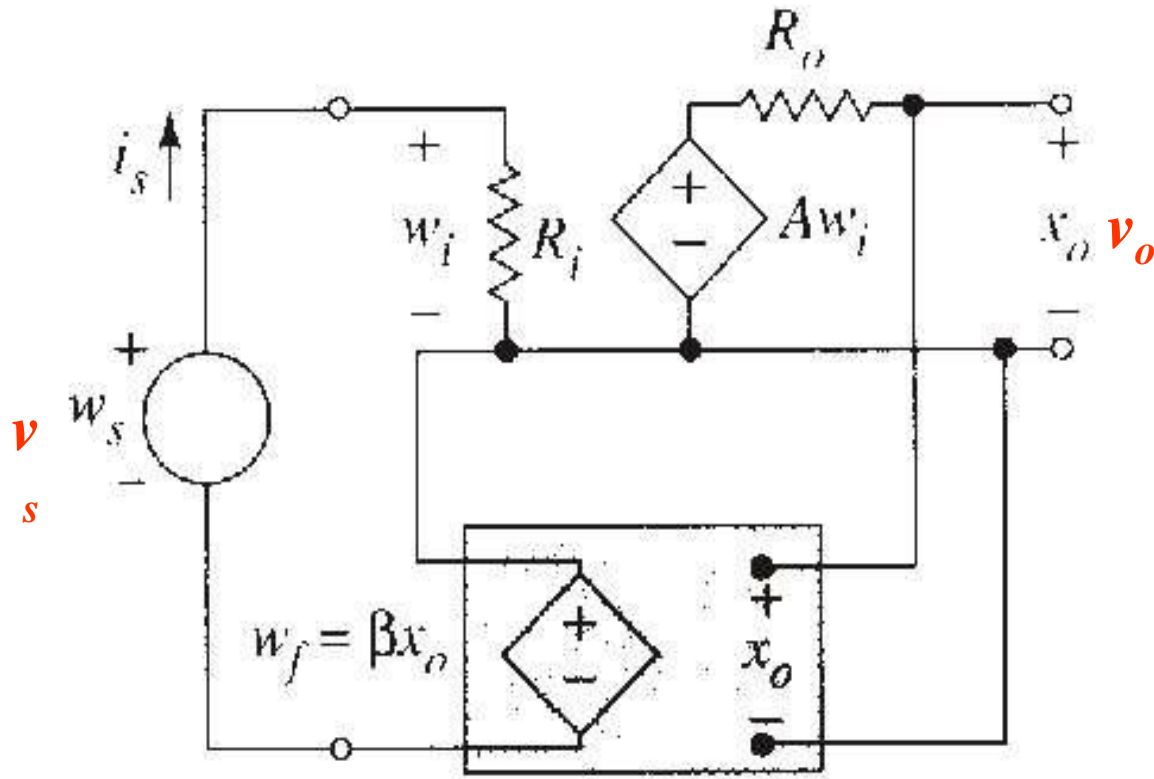
Realimentación más favorable:
Paralelo-Paralelo

A. real de transadmitancia



Realimentación más favorable:
Serie-Serie

2.5.1. Efectos en R de entrada: en serie



Atacamos en tensión: nos interesa $R_{if} \uparrow \uparrow$

$$R_{if} = (1 + A\beta) \cdot R_i$$

Muestreo en tensión...

Realimentación en tensión...

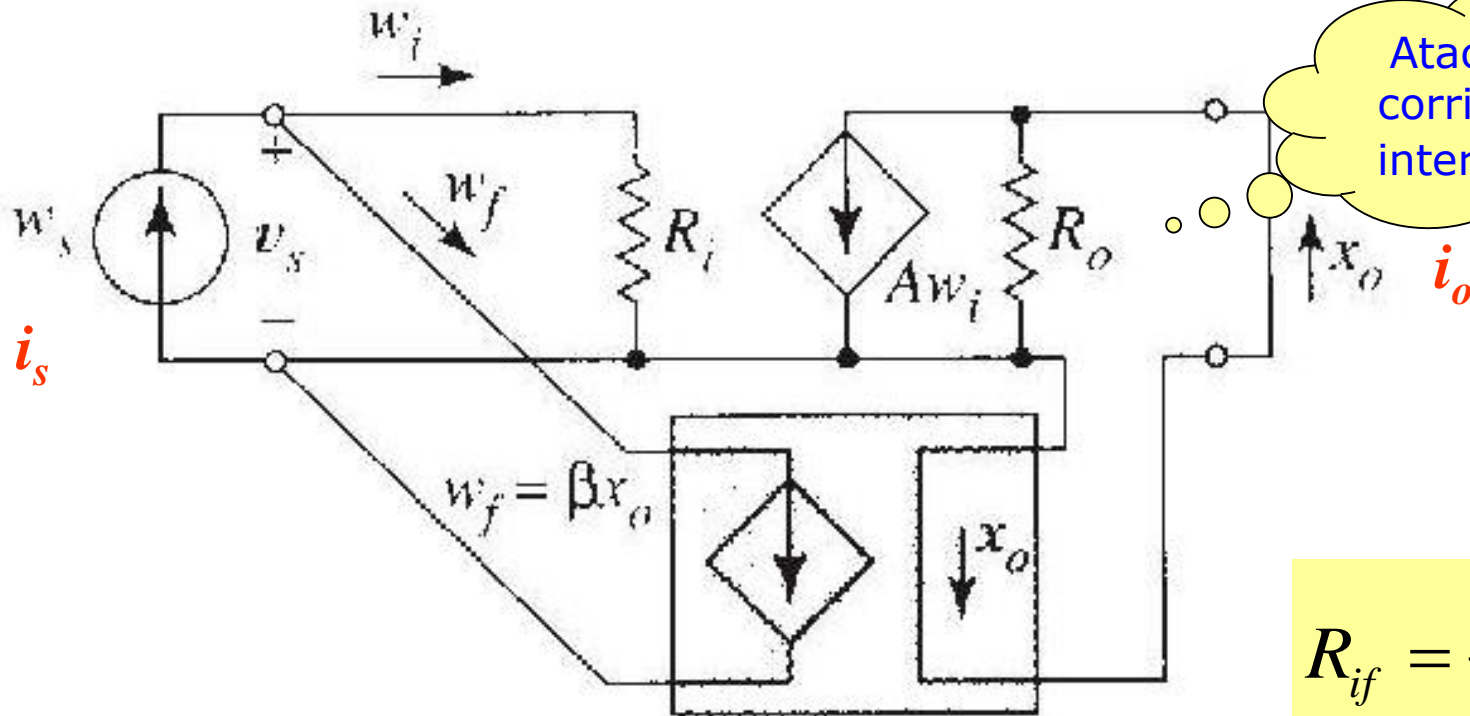
Tensión...

... paralelo

Serie a la entrada

Paralelo a la salida

2.5.1. Efectos en R de entrada: en paralelo



Atacamos en corriente: nos interesa $R_{if} \downarrow \downarrow$

$$R_{if} = \frac{R_i}{(1 + A\beta)}$$

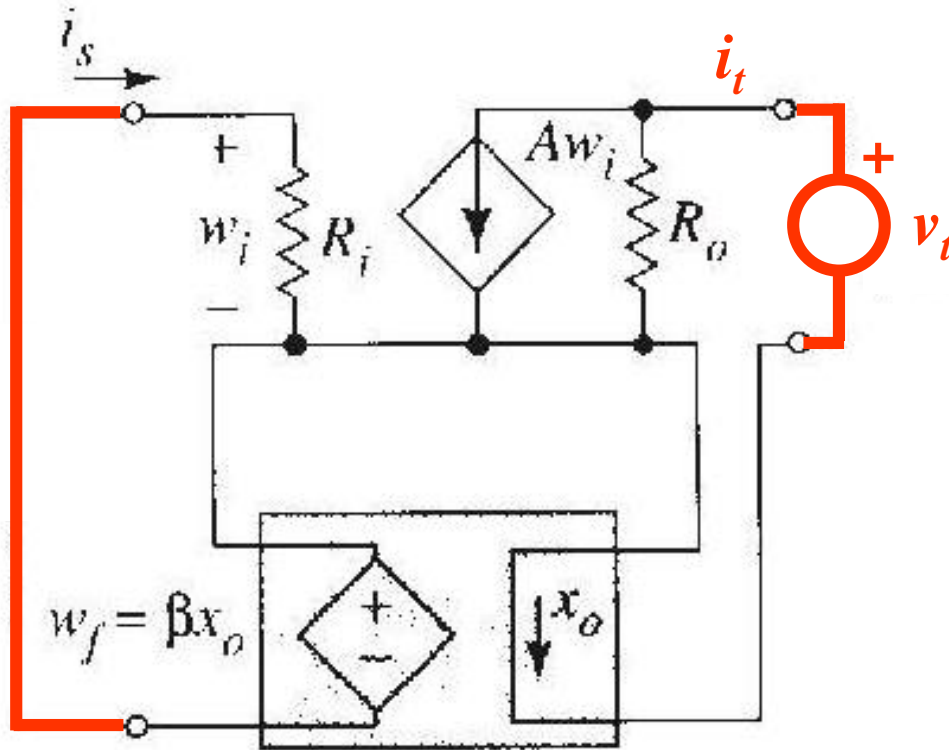
Muestreo en corriente... Realimentación en corriente...

Corriente... ... paralelo

Paralelo a la entrada Serie a la salida



2.5.2. Efectos en R de salida: en serie



Salimos en corriente: nos interesa R_{of} ↑↑

$$R_{of} = (1 + A\beta) R_o$$

Muestreo en corriente...

Realimentación en tensión...

Corriente...

... Serie

Serie a la entrada

Serie a la salida



2.5.3. Conclusión: efecto en R terminales



- ❑ Asociación en **serie a la entrada**
(realimentación en tensión)

$$R_{if} = (1 + A\beta) \cdot R_i$$

- ❑ Asociación en **paralelo a la entrada**
(realimentación en corriente)

$$R_{if} = \frac{R_i}{(1 + A\beta)}$$

- ❑ Asociación en **serie a la salida**
(muestreo en corriente)

$$R_{of} = (1 + A\beta) \cdot R_o$$

- ❑ Asociación en **paralelo a la salida**
(muestreo en tensión)

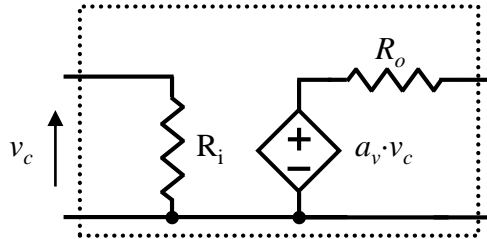
$$R_{of} = \frac{R_o}{(1 + A\beta)}$$

2.5.3. Conclusión

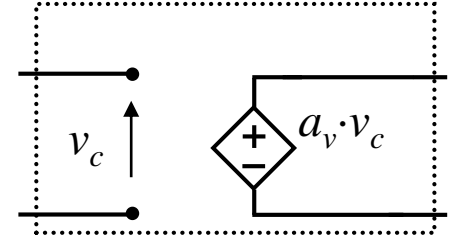


La topología adecuada permite **idealizar** un **amplificador real**

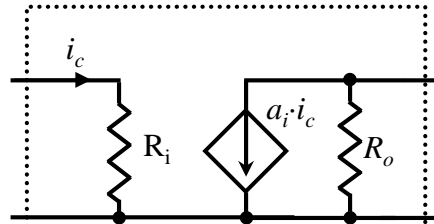
A. de tensión



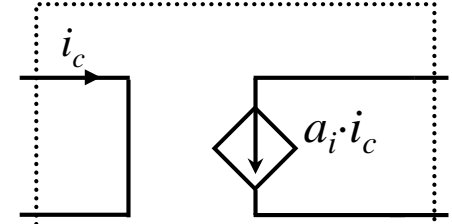
Serie-Paralelo:
 $Z_i \uparrow$ y $Z_o \downarrow$



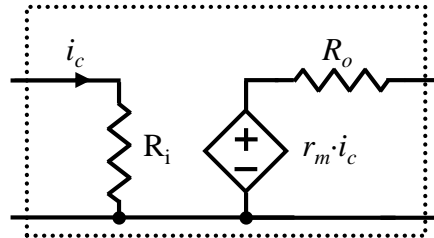
A. de corriente



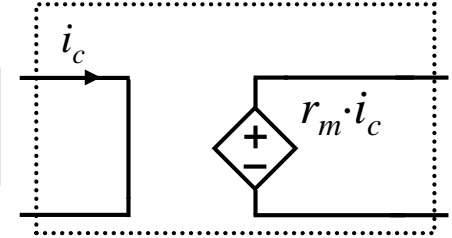
Paralelo-Serie:
 $Z_i \downarrow$ y $Z_o \uparrow$



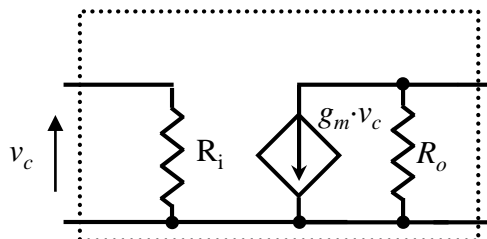
A. de transimpedancia



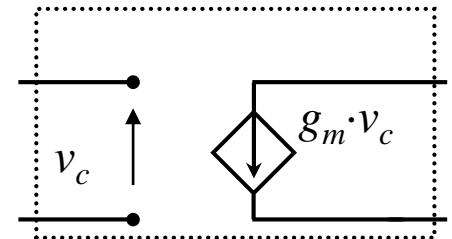
Paralelo-Paralelo:
 $Z_i \downarrow$ y $Z_o \downarrow$



A. de transadmitancia



Serie-Serie:
 $Z_i \uparrow$ y $Z_o \uparrow$



- ❑ En este tema, las transparencias deben ser complementadas con las demostraciones, ejemplos y ejercicios incluidos en el texto básico.
- ❑ Bibliografía básica. Para la parte 1 del tema:
[b1].- Malik, capítulo 9: secciones 9.1 a 9.3
- ❑ Bibliografía complementaria o alternativa. Todo el tema en:
[b2].- Sedra_Smith, capítulo 8 completo.
[b3].- Sedra_Smith, capítulo 9: hasta la sección 9.10.
- ❑ Gráficas y ejemplos. Fuentes:
 - Elaborados por los profesores del Dpto. de Electrónica.
 - Extraídas de los textos y referencias detallados.



Control de revisiones



- 2015-02-20: versión inicial.