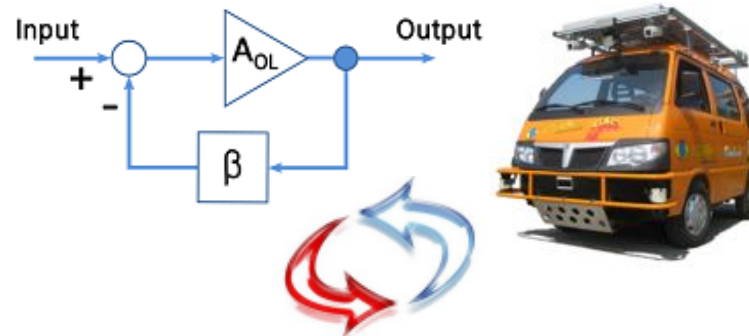




Electrónica Analógica

Capítulo 7: **Realimentación.** (1/2)

Teoría básica de realimentación.



1. Introducción.
 1. Concepto. Realimentación en Amplificadores.
2. Teoría básica de realimentación
 1. Fundamentos y definiciones
 2. Ventajas de la realimentación negativa
 3. Topologías de realimentación
3. Realimentación con efectos de carga
 1. Influencia de los Efectos de carga.
 2. Análisis de circuitos realimentados prácticos



1. Introducción



- ❑ ¿Qué establece la teoría de **realimentación**?
 - Un **modelo** para el comportamiento de un sistema real (electrónico, físico, etc.) en el que **parte** de la información de su **salida** se reenvía de nuevo hacia la **entrada**
 - *Concepto básico* → 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**?

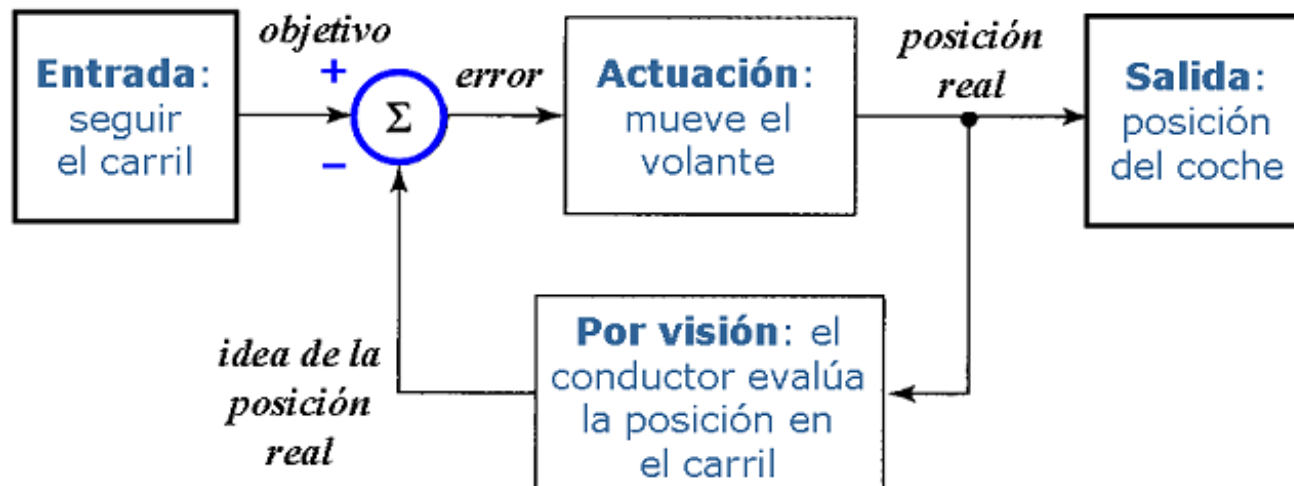




1. Introducción



- ❑ 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



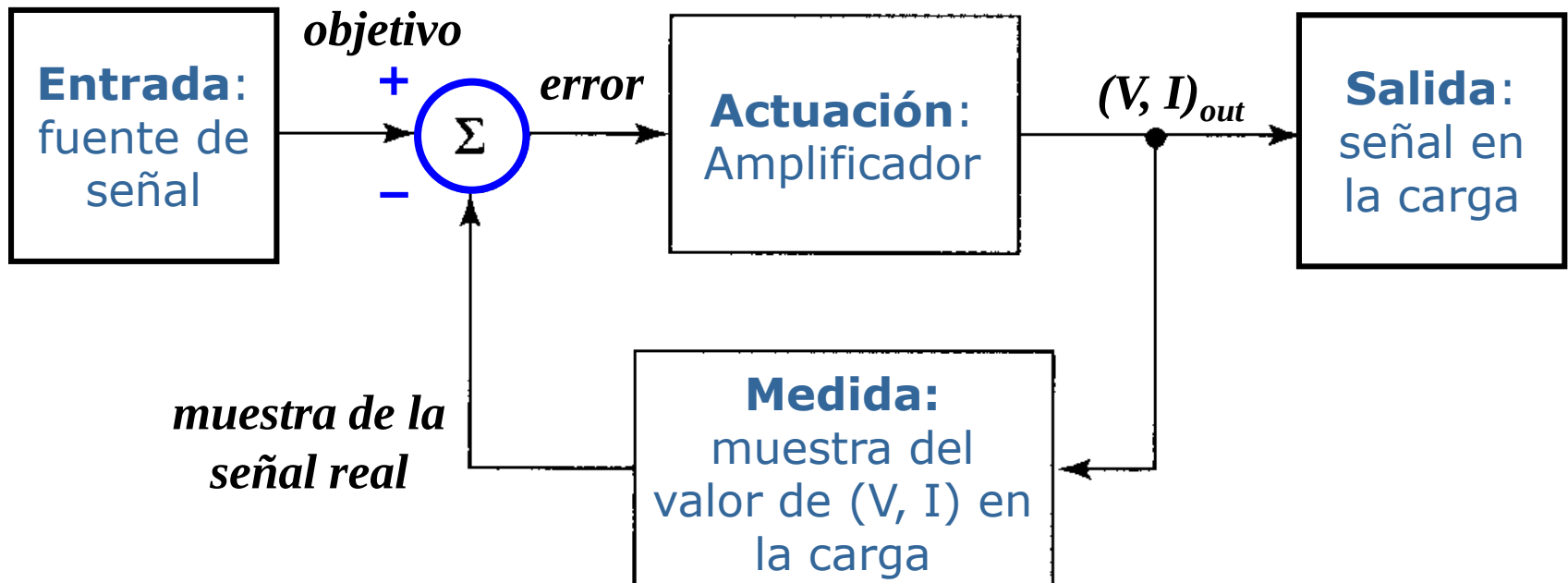
❑ Realimentación en circuitos electrónicos

■ 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*

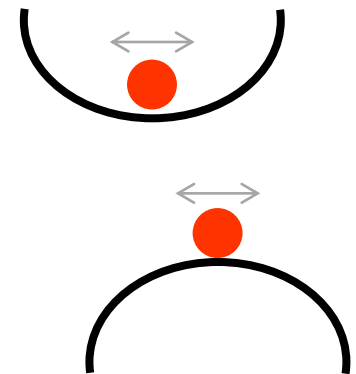




2. Teoría de realimentación

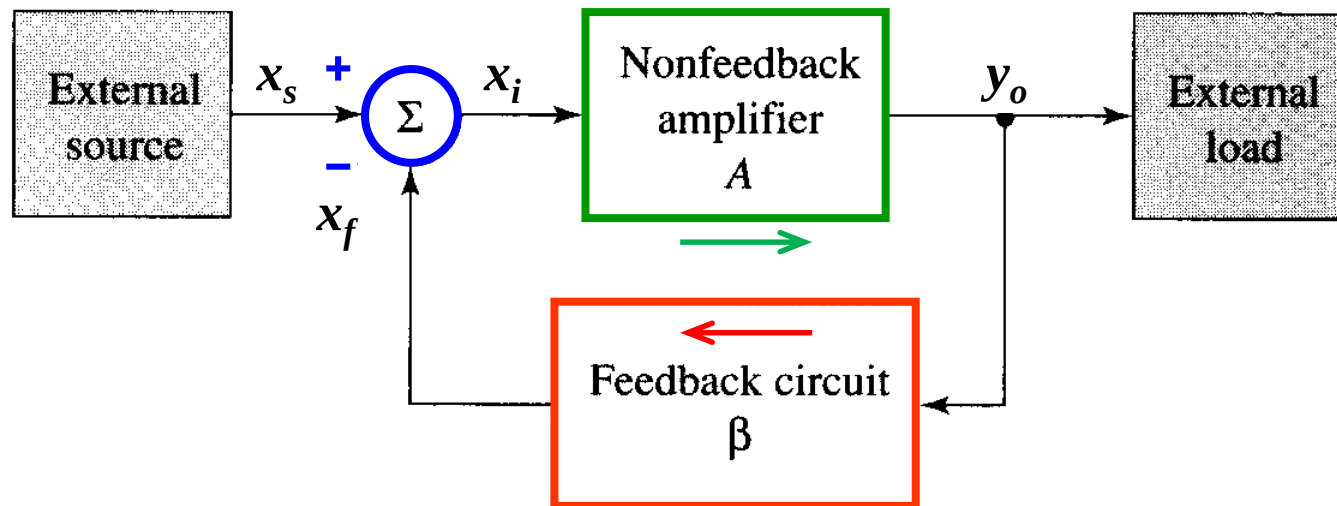


- ❑ Problema original a resolver (la necesidad)
 - Reducir la distorsión de los repetidores de señal telefónica
- ❑ Solución: la idea de realimentación y su formulación matemática
 - Harold S. Black, en 1927
 - Patentada finalmente en 1937
 - *El proceso de patente duró 9 años: la oficina de patentes **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...*





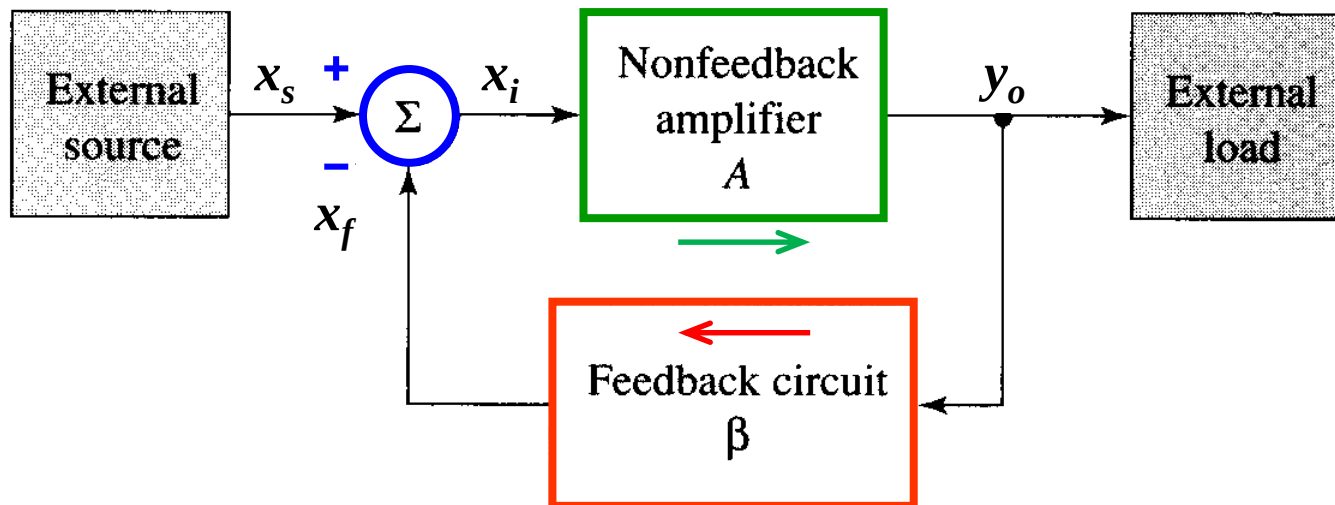
2.1. Teoría de realimentación negativa



- ❑ Componentes de un amplificador realimentado
 - El **amplificador sin realimentar (A)** → transfiere señal de x_i hacia y_o
 - La **red de realimentación, β** , (ojo, *idiferente de otras β que se usan en la Electrónica!*) lleva parte de la información de la salida y_o hacia la entrada
 - Una **red sumadora**, para restar la señal realimentada a la de entrada: la **realimentación negativa** necesita del **signo (-)**
- ❑ Esquema válido para cualquier tipo de amplificador:
 - Basta concretar las **unidades correctas** de las señales en cada bloque



2.1. Teoría de realimentación negativa



Definiciones de partida:

- Ganancia en **Lazo Abierto** →
(*Open Loop* = *OL*)

$$A = A_{OL} = A_{Open-Loop} = \frac{y_o}{x_i}$$

- Ganancia en **Lazo Cerrado** →
(*Closed Loop* = *CL*)

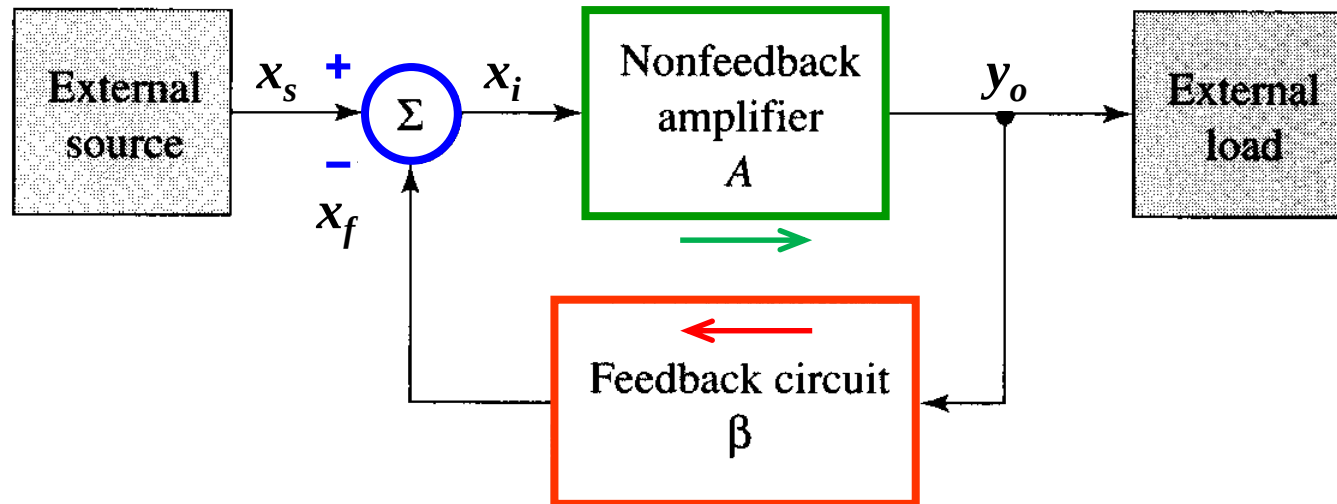
$$A_f = A_{CL} = A_{Closed-Loop} = \frac{y_o}{x_s}$$

- Ganancia o **factor de realimentación** →

$$\beta = \frac{x_f}{y_o}$$



2.1. Teoría de realimentación negativa



□ Deducción de la ***Ecuación fundamental*** de la realimentación:

$$\left. \begin{array}{l} y_o = A \cdot x_i \\ x_i = x_s - x_f \\ x_f = \beta \cdot y_o \end{array} \right\} \rightarrow y_o = A \cdot (x_s - x_f) = A \cdot (x_s - \beta \cdot y_o) = A \cdot x_s - A\beta \cdot y_o$$

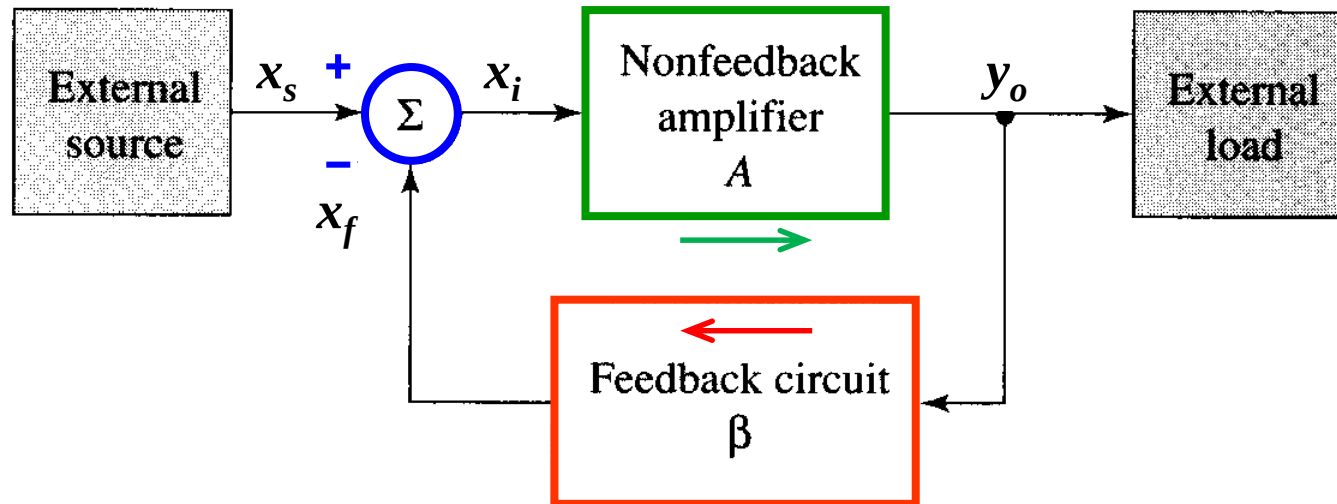


$$y_o + A\beta \cdot y_o = A \cdot x_s \quad \Leftrightarrow \quad A_f = \frac{y_o}{x_s} \Rightarrow$$

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



2.1. Teoría de realimentación negativa



❑ De interés para **evaluar** los **efectos de la realimentación**

- Ganancia de **Lazo**: $L = A\beta$ → ¡OJO: L es siempre **adimensional**!
- **Factor de mejora** (ó mérito) F : $F = 1 + A\beta$ → $F = 1 + L$

$$A_f = \frac{A}{F} = \frac{A}{1 + L}$$



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

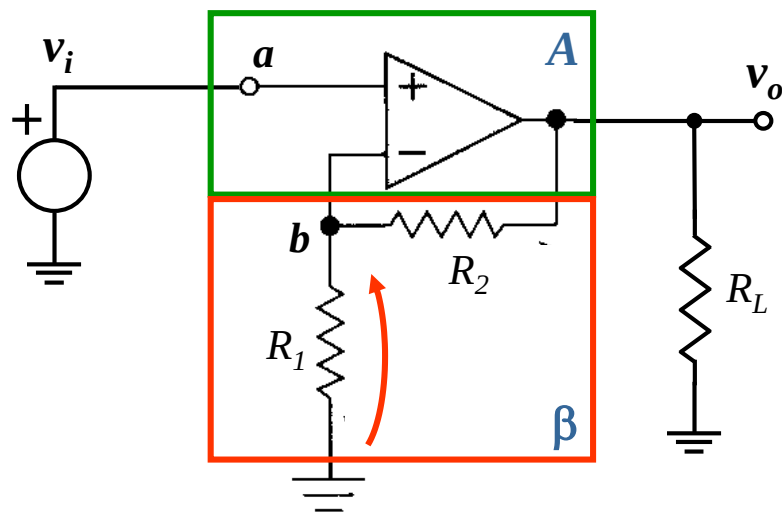


$$A_{CL} = \frac{A_{OL}}{1 + A_{OL}\beta}$$



2.1. Teoría de realimentación: ejemplo.

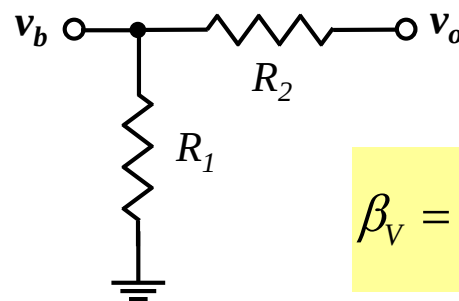
- ❑ Ejemplo: usaremos un circuito cuyo resultado es conocido...
 - Amplificador con AO, configuración no inversora.



- **AO**, con $A_d = A_V$:

$$v_o = A_V (v^+ - v^-) = A_V (v_a - v_b)$$

- **Red β** , resistiva:



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

- **Al realimentar:**

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

$$\Rightarrow A_{Vf} = \frac{v_o}{v_i} = \frac{A_V}{1 + A_V \beta_V}$$



... ¿se parece al valor de G_V con un **AO ideal**?

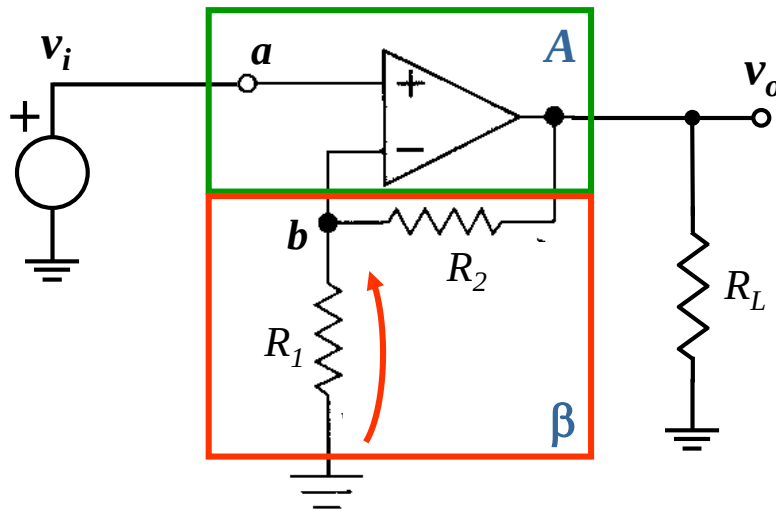
$$G_V = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \quad ??$$

2.1. Teoría de realimentación: ejemplo.



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

■ Actividad: verifique en las hojas del 741 los valores de su A_v



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

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



❑ Si se cumple que **$A\beta = L \gg 1$** se logra que **$A_f \approx \beta^{-1}$** y por tanto:

■ Se tiene 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 repetitividad del diseño



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, problemas y/o efectos secundarios

- 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.*



2.2.1. Reducción de la sensibilidad



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

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



- 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 nº de etapas (n)
 - Mientras la sensibilidad crece más despacio (*linealmente* con n)



$$G = [A_f]^n$$

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

- Ejemplo con n etapas iguales:

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



2.2.2. Reducción de la distorsión no-lineal



□ Curva (a):

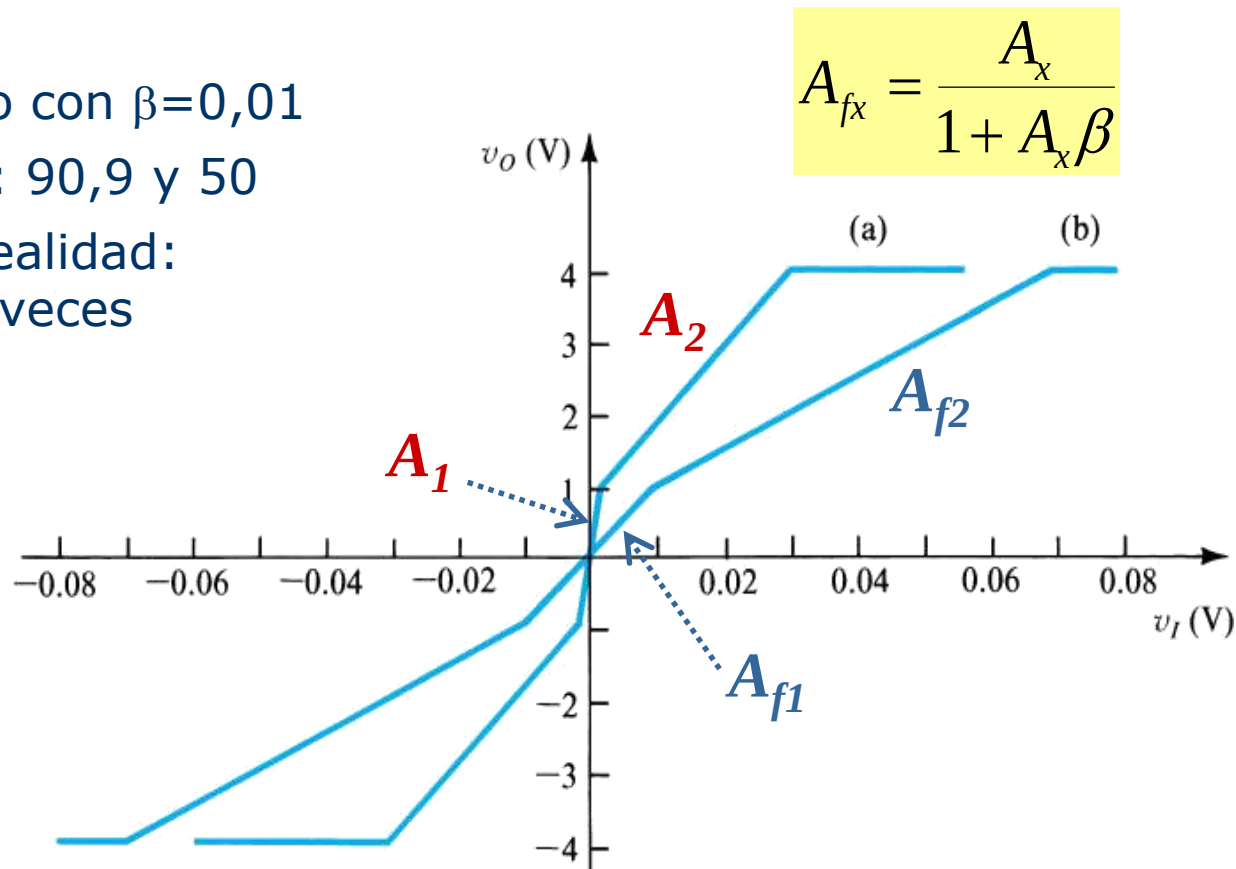
- Ganancia 1000, 100, en cada tramo (ganancia 0, en saturación)
- Relación de no-linealidad: de 1000 a 100 → **10** veces

□ 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

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

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

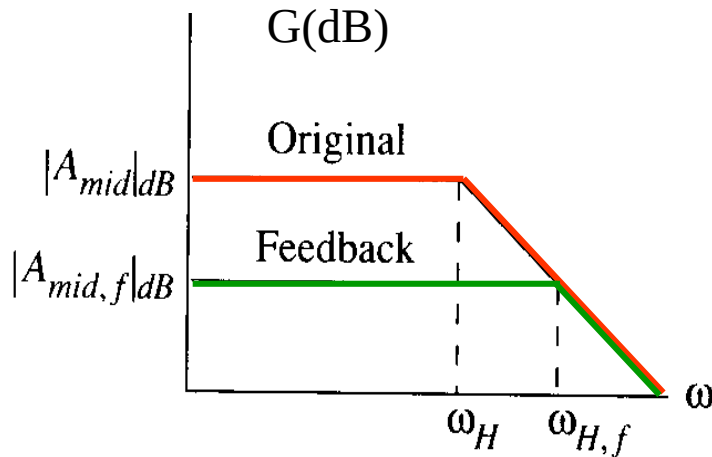




2.2.3. Efecto sobre el Ancho de Banda

- ❑ 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:

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

$$(*) \quad A_{mid,f} = \frac{A_{mid}}{1 + A_{mid}\beta}$$

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

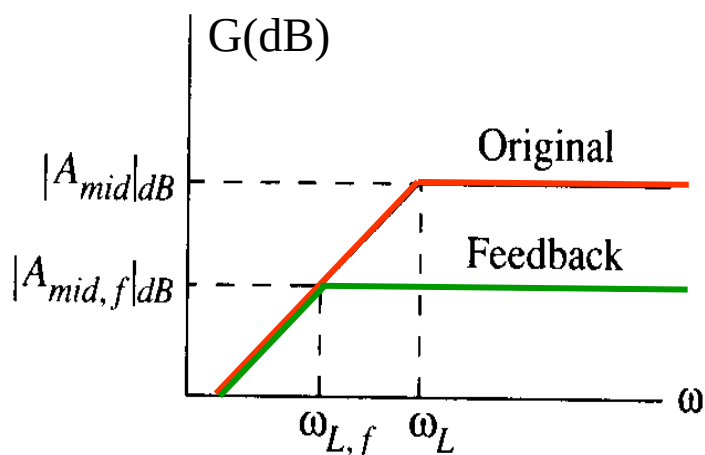
Importante: nótese que el producto **Ganancia** por **Ancho de Banda (GBW)** es una **constante**.

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



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

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

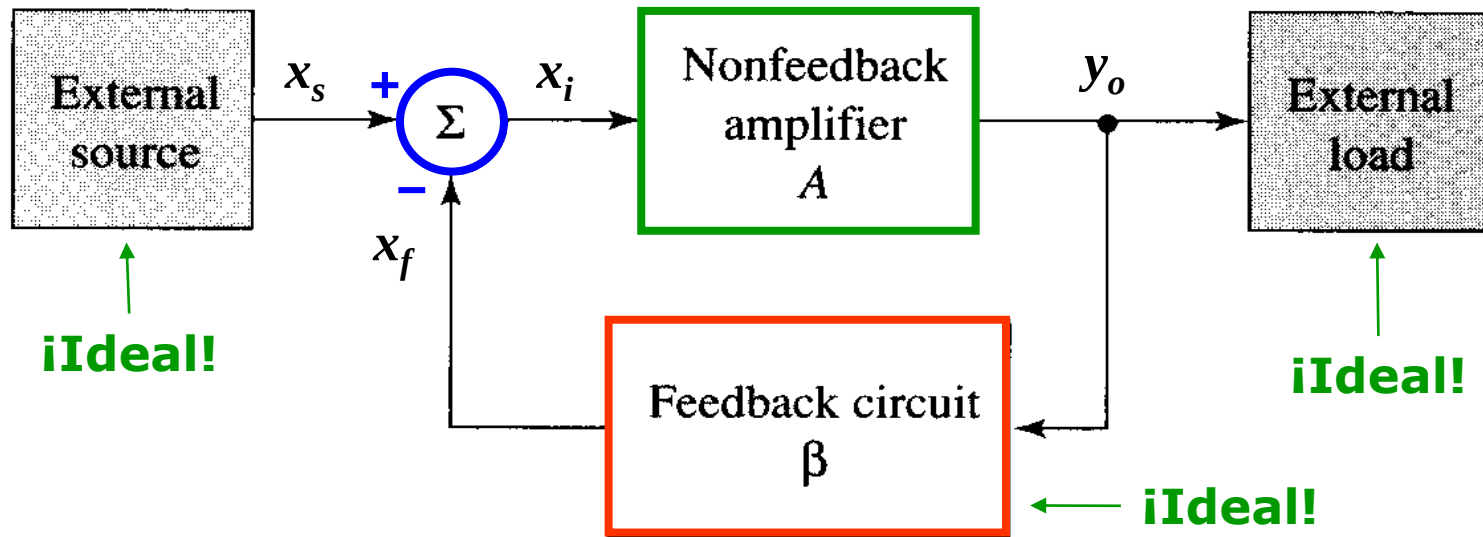
$$\begin{aligned} (*) \quad A_{mid,f} &= \frac{A_{mid}}{1 + A_{mid}\beta} \\ (*) \quad \omega_{Lf} &= \frac{\omega_L}{(1 + A_{mid}\beta)} \end{aligned}$$

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

Actividad: demuestre la que las relaciones en los cuadros (*) son correctas.



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 y_o

Condición: no hay efectos de carga $\rightarrow \beta$ y $Carga$ ideales

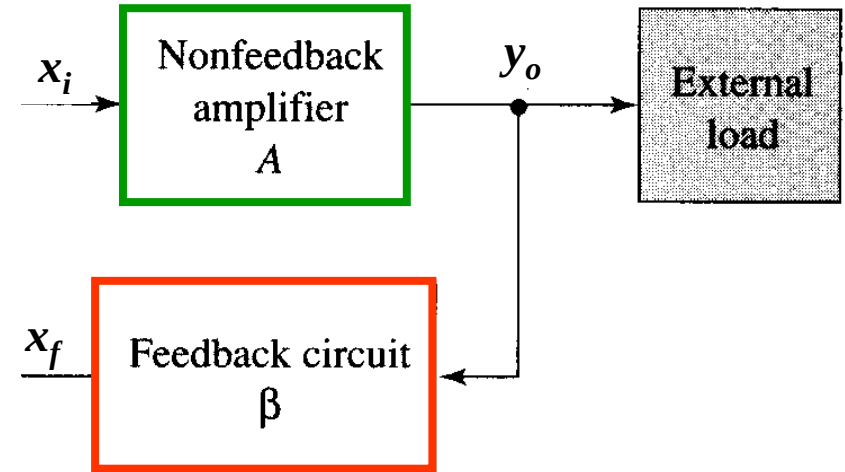
Nomenclaturas: ¡Muy *diversas*!

Descripción detallada

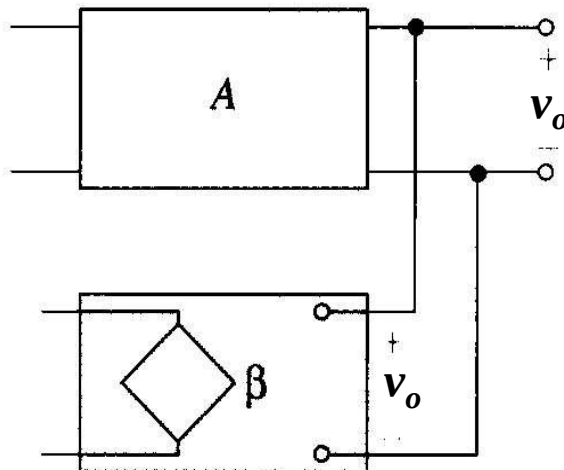
Descripción breve (Malik)

Solo Topología de redes

¿Cómo es en la **salida**?

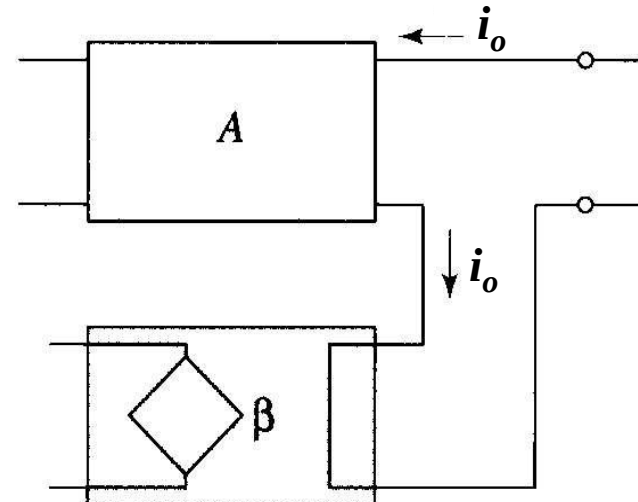


Muestreo en tensión



Tensión...

Paralelo a la salida



Muestreo en corriente

Corriente...

Serie a la salida



2.3. Tipos de Realimentación



❑ **Suma** en la entrada $x_{s, i, f}$

Condición: no hay efectos de carga $\rightarrow \beta$ y *Generador* ideales

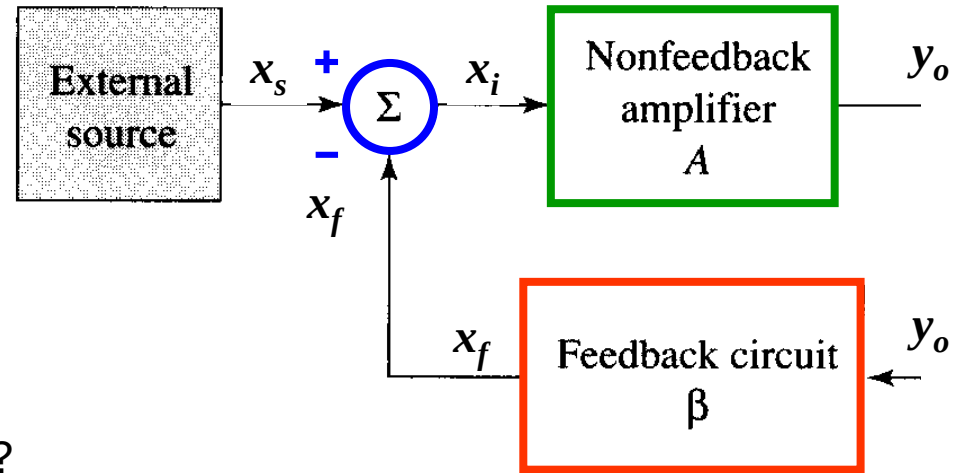
Nombre completo: entrada + salida

Descripción detallada

Descripción breve (Malik)

Solo Topología de redes

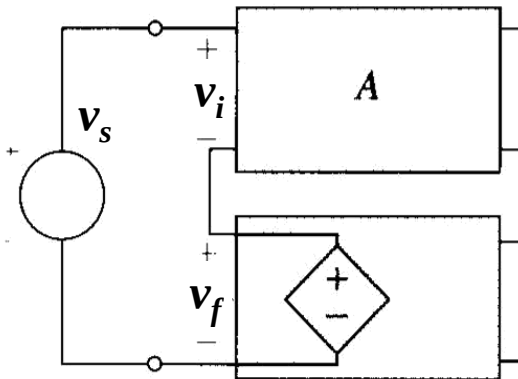
¿Cómo es en la **entrada**?



Realimentación en tensión

... en Serie

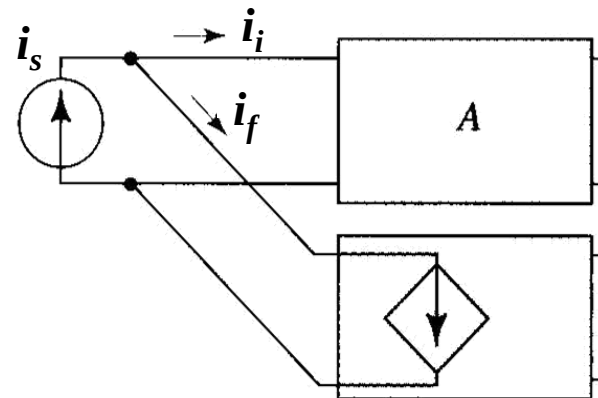
Serie a la entrada



Realimentación en corriente

...en Paralelo

Paralelo a la entrada

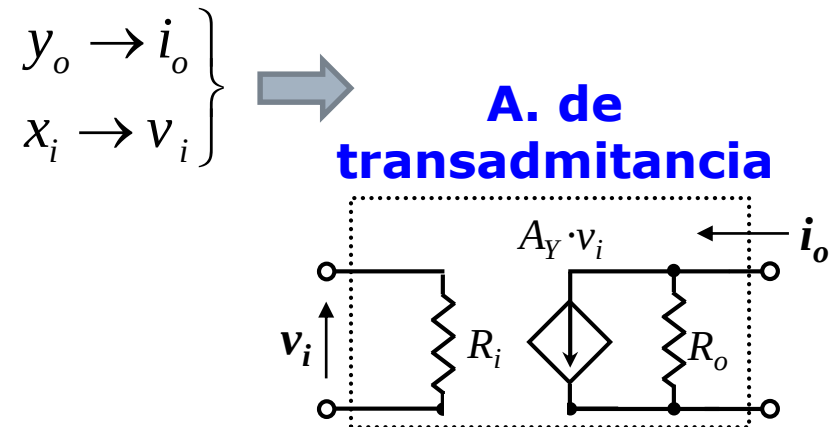
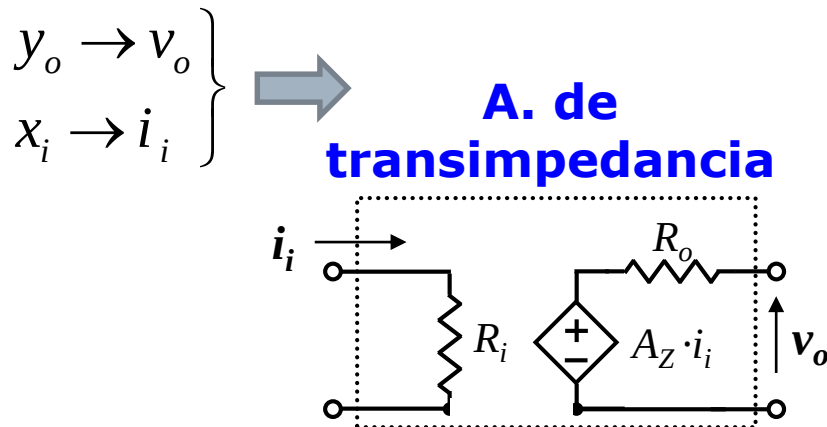
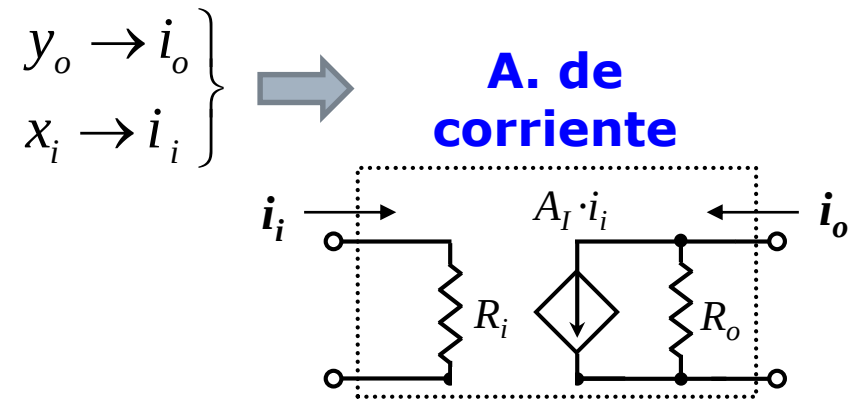
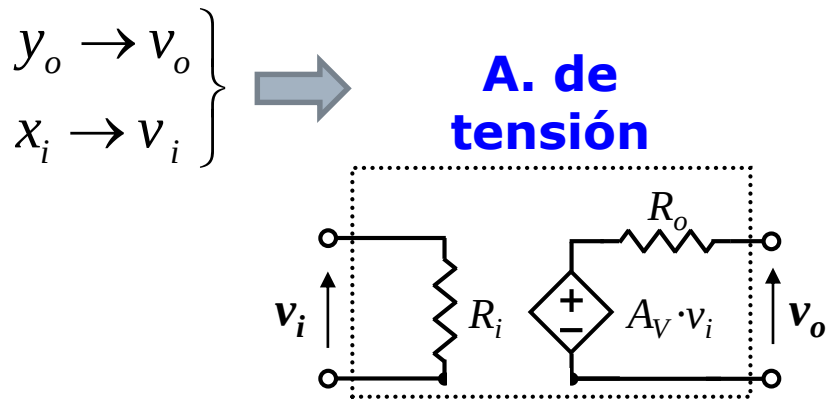




2.4. Topologías de realimentación

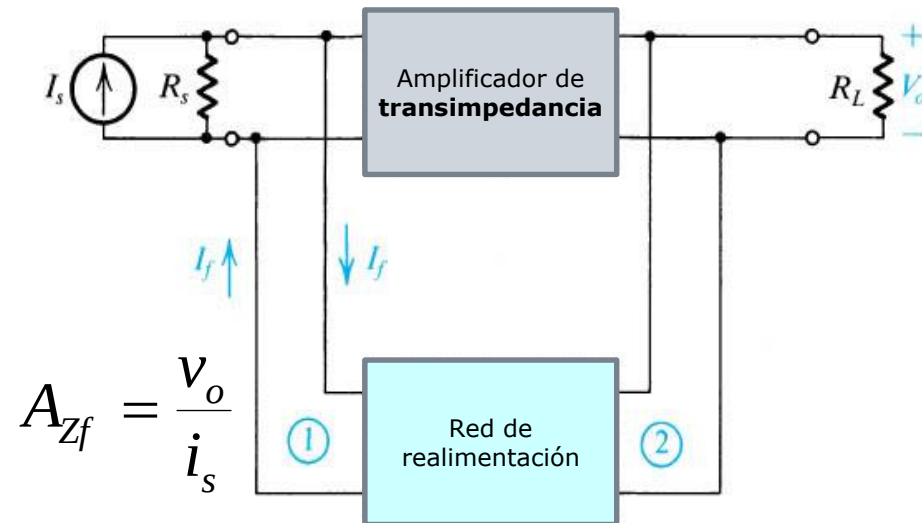
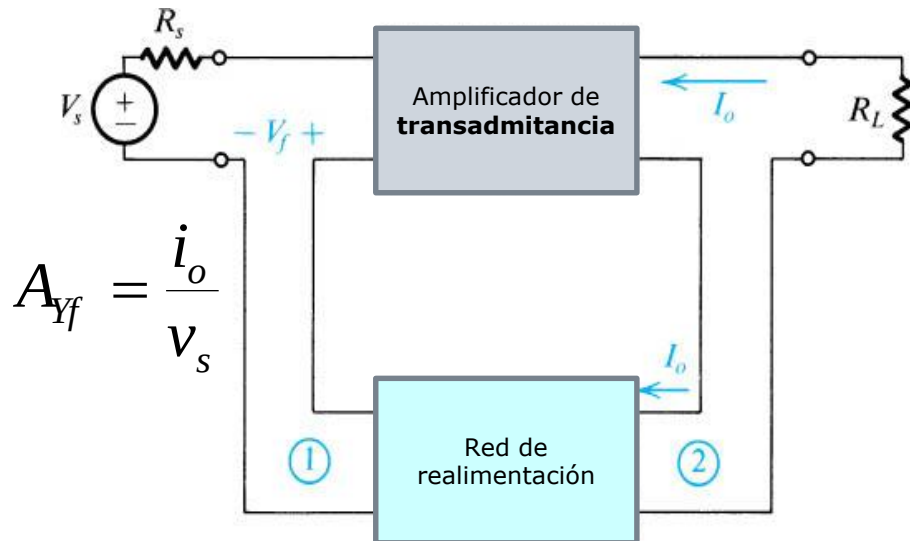
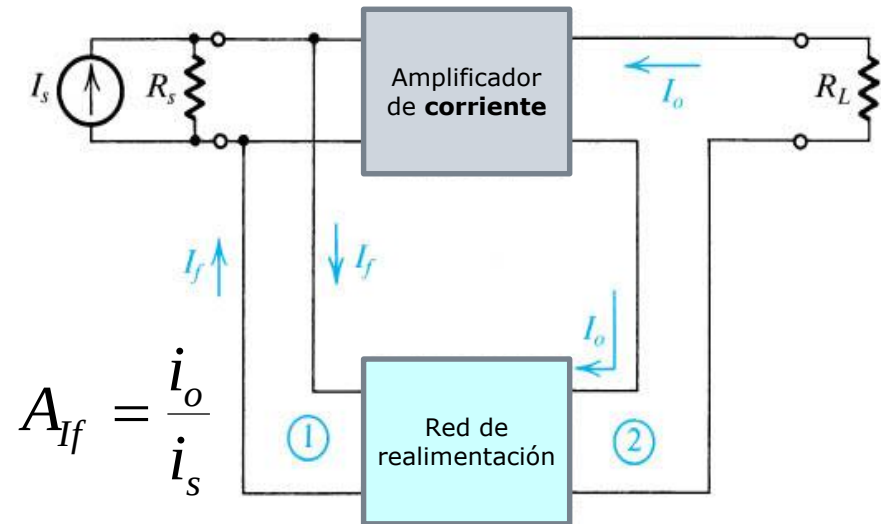
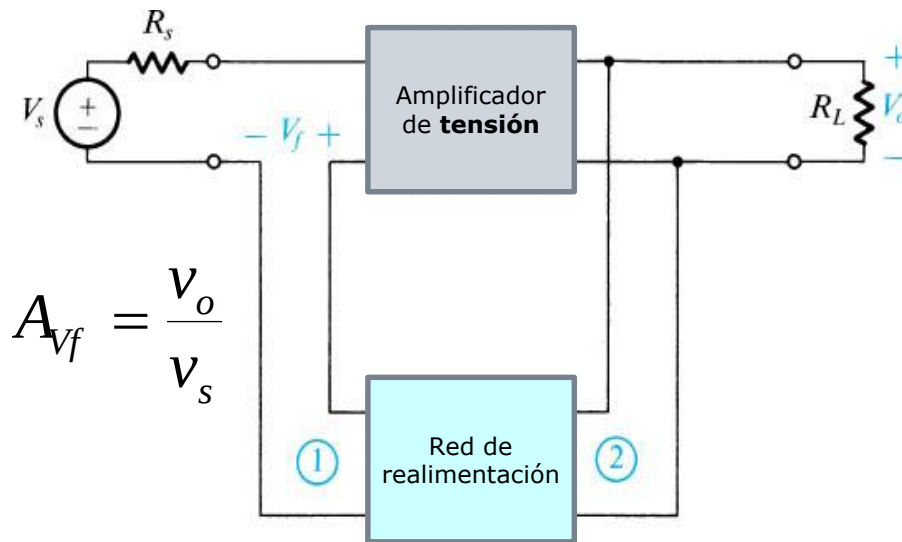


- ❑ Al determinarse las variables eléctricas en salida y entrada:
 - Se fija y concreta el tipo de realimentación, las ganancias (unidades), la forma de conexión y los tipos apropiados de amplificador A y β





2.4. Topologías de realimentación: conexión



2.4. Topologías de realimentación: red β

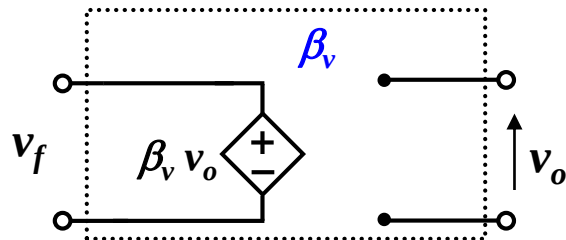


Redes de realimentación ideales:

- Para cada tipo de Re , la red β ideal es un gen. dependiente ideal
- Recuerde que $L = A \cdot \beta$ debe ser siempre adimensional

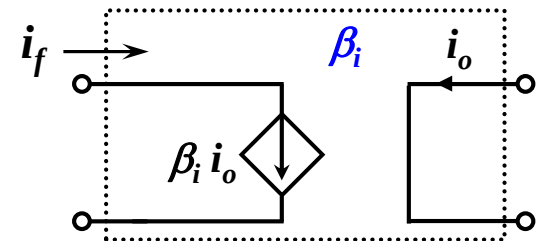
$y_o \rightarrow v_o$
 $x_f \rightarrow v_f$

Re de tensión
muestreo de tensión



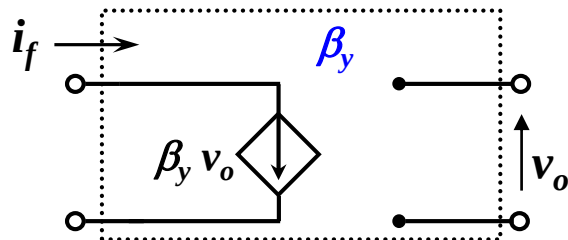
$y_o \rightarrow i_o$
 $x_f \rightarrow i_f$

Re de corriente
muestreo de corriente



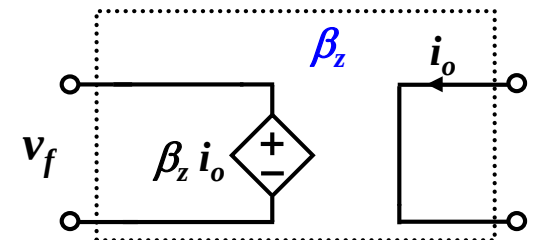
$y_o \rightarrow v_o$
 $x_f \rightarrow i_f$

Re de corriente
muestreo de tensión

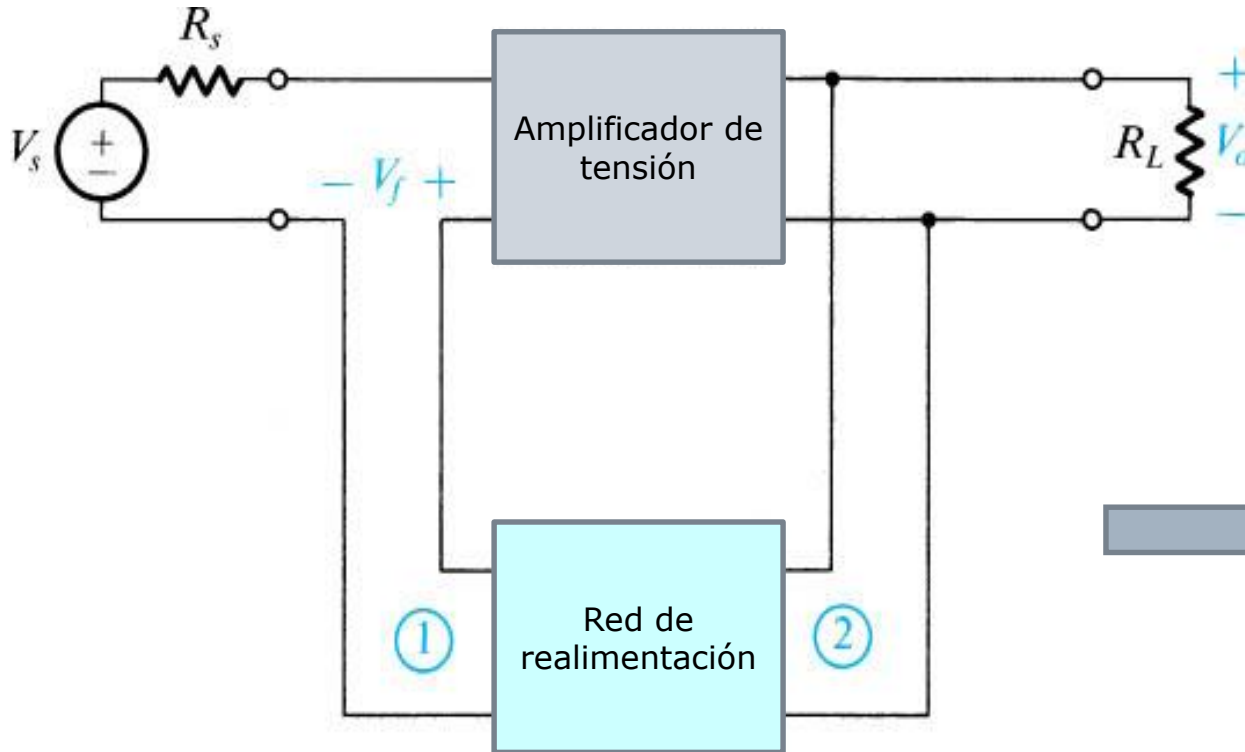


$y_o \rightarrow i_o$
 $x_f \rightarrow v_f$

Re de tensión
muestreo de corriente



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



Caso a caso.

- La topología fija:
- tipos de ganancias, unidades de A y β , y la nomenclatura.
- L es adimensional.

$$A_{vf}$$

$$A_v \quad \beta_v$$

$$L = A_v \cdot \beta_v$$

Muestreo en tensión...

Realimentación en tensión...

Tensión...

... paralelo

Serie a la entrada

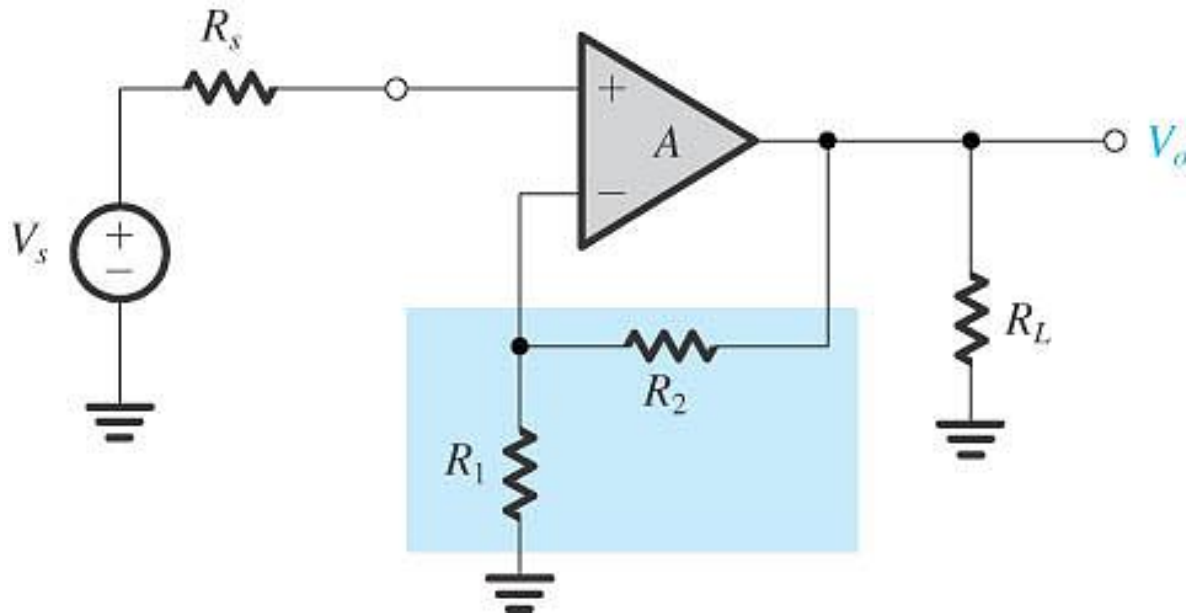
Paralelo a la salida



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



- Ejemplo: amplificador no-inversor con AO



Muestreo en tensión...

Tensión...

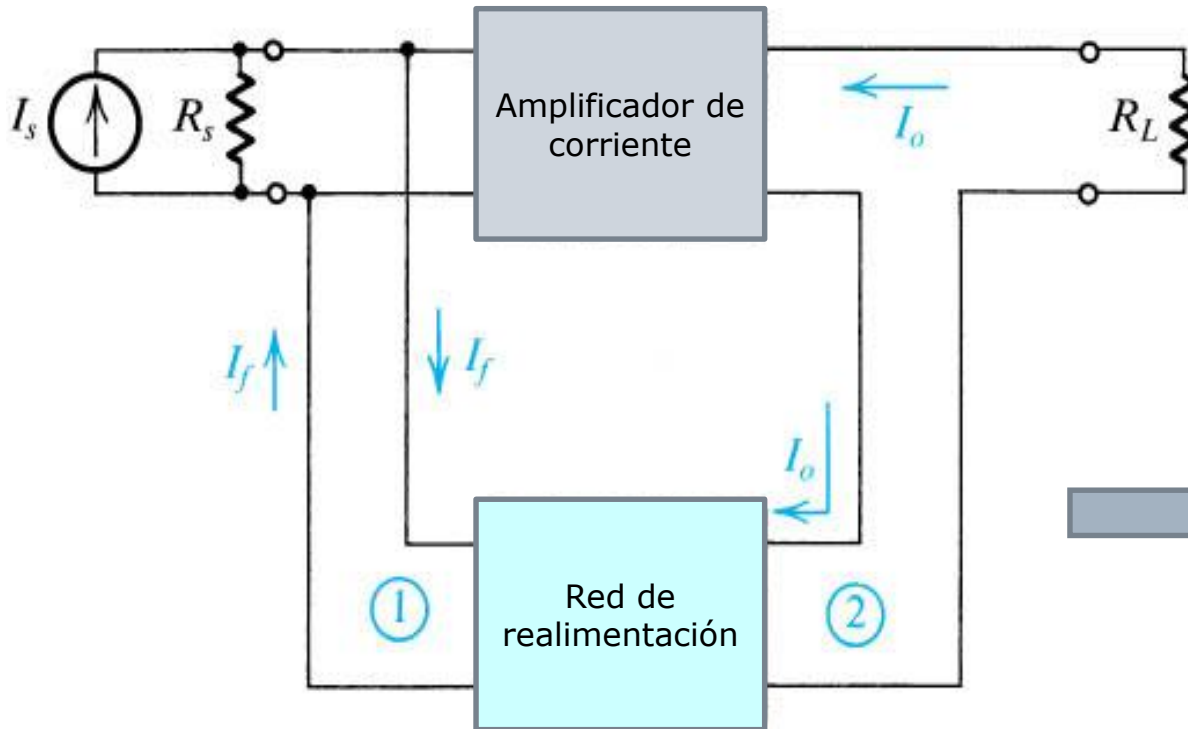
Serie a la entrada

Realimentación en tensión...

... serie

Paralelo a la salida

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



$$A_{If}$$

$$A_I \quad \beta_I$$

$$L = A_I \cdot \beta_I$$

Muestreo en corriente...

Realimentación en corriente...

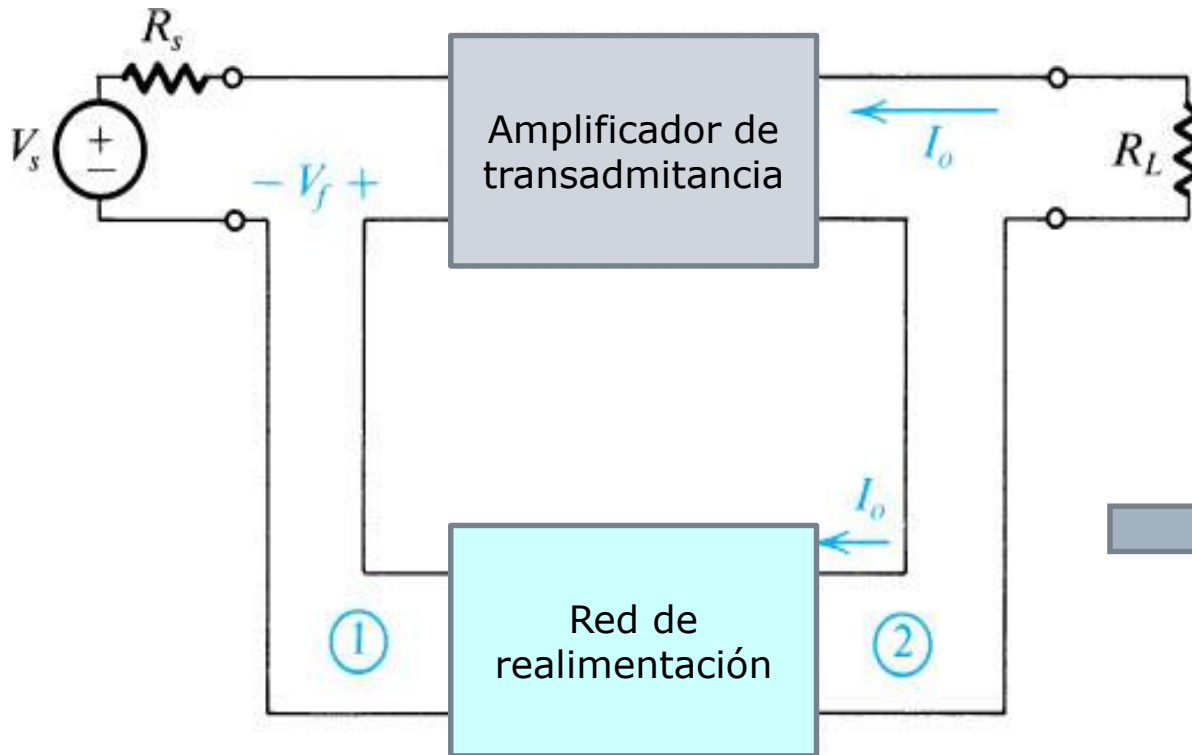
Corriente... ... paralelo

Paralelo a la entrada

Serie a la salida



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



$$A_{Yf}$$

$$A_Y \quad \beta_Z$$

$$L = A_Y \cdot \beta_Z$$

Muestreo en corriente...

Realimentación en tensión...

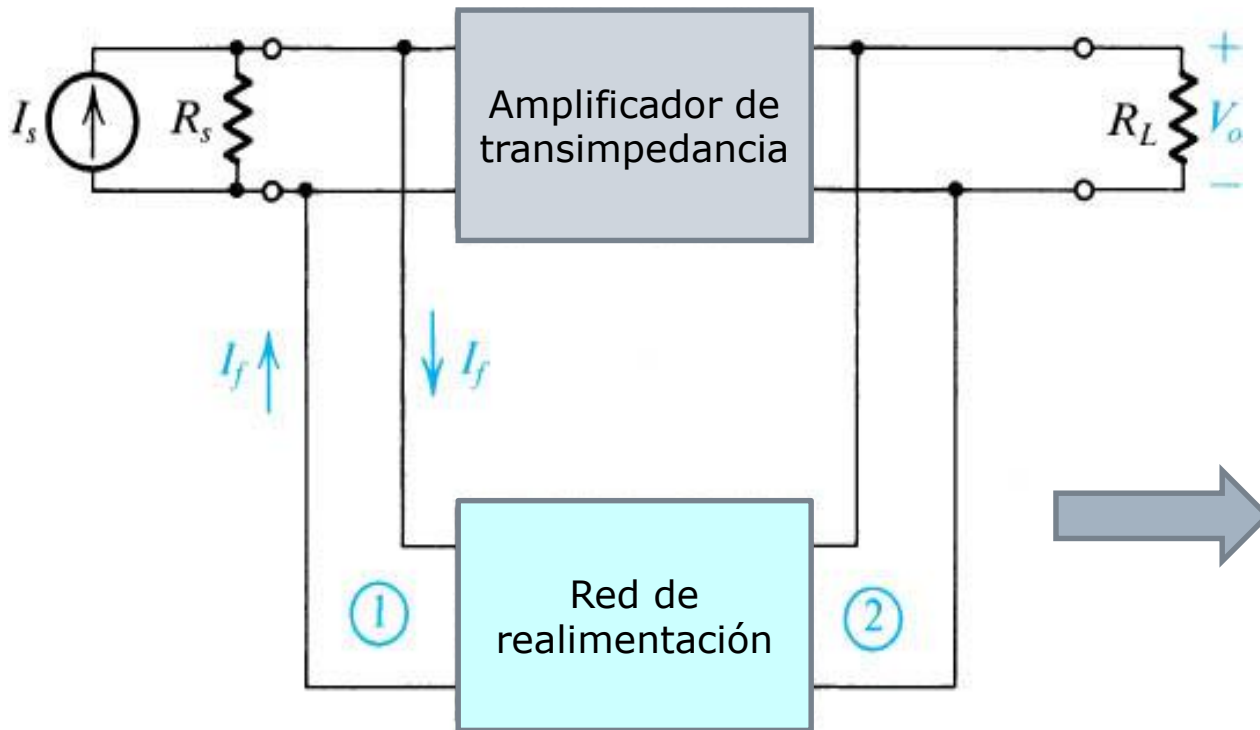
Corriente...

... Serie

Serie a la entrada

Serie a la salida

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



$$A_{zf}$$

$$A_z \quad \beta_Y$$

$$L = A_z \cdot \beta_Y$$

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

Tensión... ... paralelo

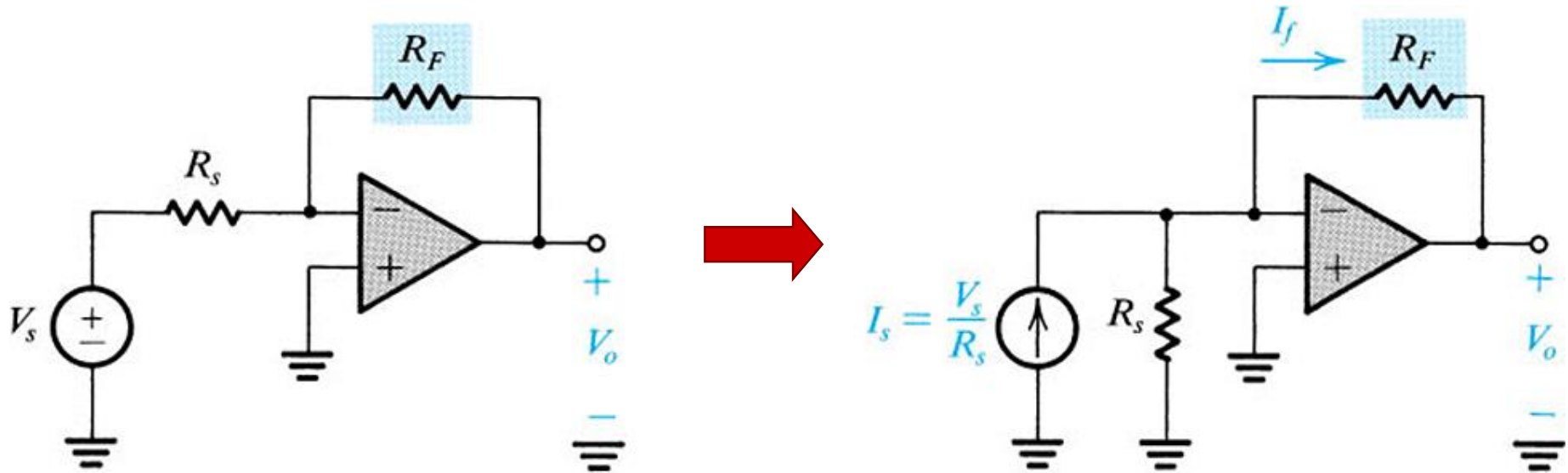
Paralelo a la entrada Paralelo a la salida

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



□ Un caso interesante...

- El amplificador inversor con AO, desde el punto de vista de teoría de Realimentación, en realidad **debe** considerarse como un **A_I**
- *inote que el generador, de **corriente**, ya **no es ideal**!*



Muestreo en corriente...

Realimentación en corriente...

Corriente... ... paralelo

Paralelo a la entrada

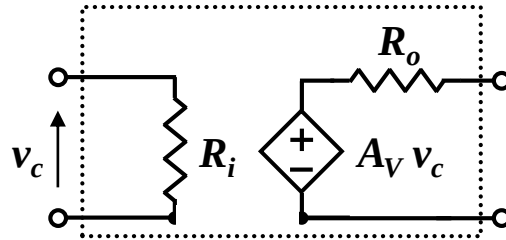
Serie a la salida

2.5. Realimentación en A reales, con R_i y R_o



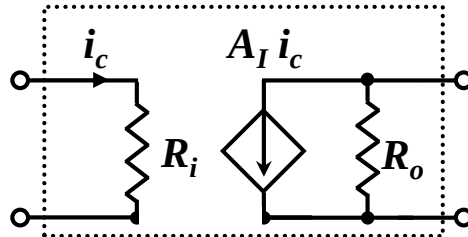
- En los **A prácticos**, la **Re^- modifica** las R terminales:

**A. real de
tensión**



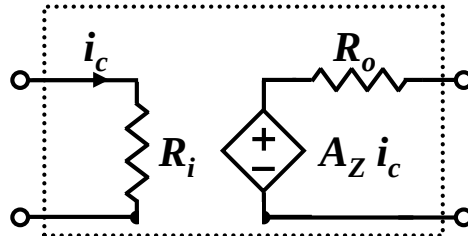
Realimentación
más favorable:
Serie-Paralelo

**A. real de
corriente**



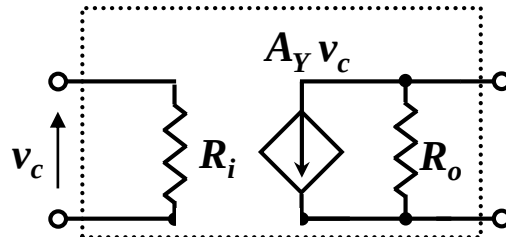
Realimentación
más favorable:
Paralelo-Serie

**A. real de
transimpedancia**



Realimentación
más favorable:
Paralelo-Paralelo

**A. real de
transadmitancia**



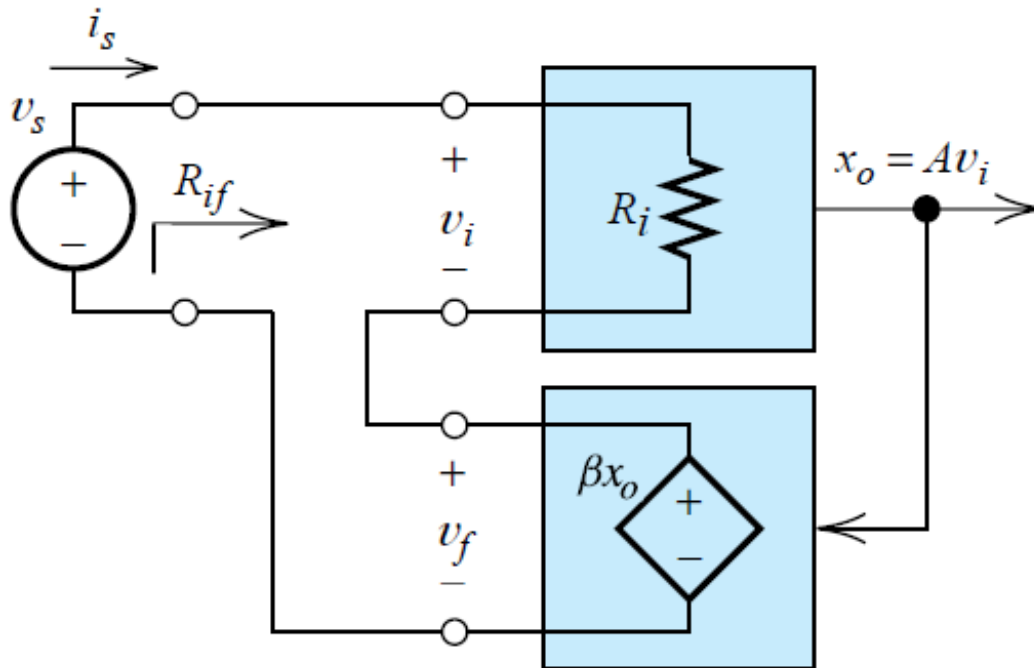
Realimentación
más favorable:
Serie-Serie

2.5.1. Efectos en R de entrada: en **serie**



Serie a la entrada →

→ Realimentación en tensión...



Observe que:

- Si el generador de entrada es de *tensión*:
 - La R_{if} interesa que sea lo más grande posible
 - La asociación necesaria para el generador v_s es en serie.
 - Justo la asociación serie **aumenta** la R de entrada...

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

Demostración:
$$R_{if} = \frac{v_s}{i_s} = \frac{v_i + v_f}{i_s} = \frac{v_i + A\beta v_i}{i_s} = (1 + A\beta) \frac{v_i}{i_s} = (1 + A\beta) R_i$$

Importante: nótese que el tipo de salida (v_o ó i_o) es indiferente

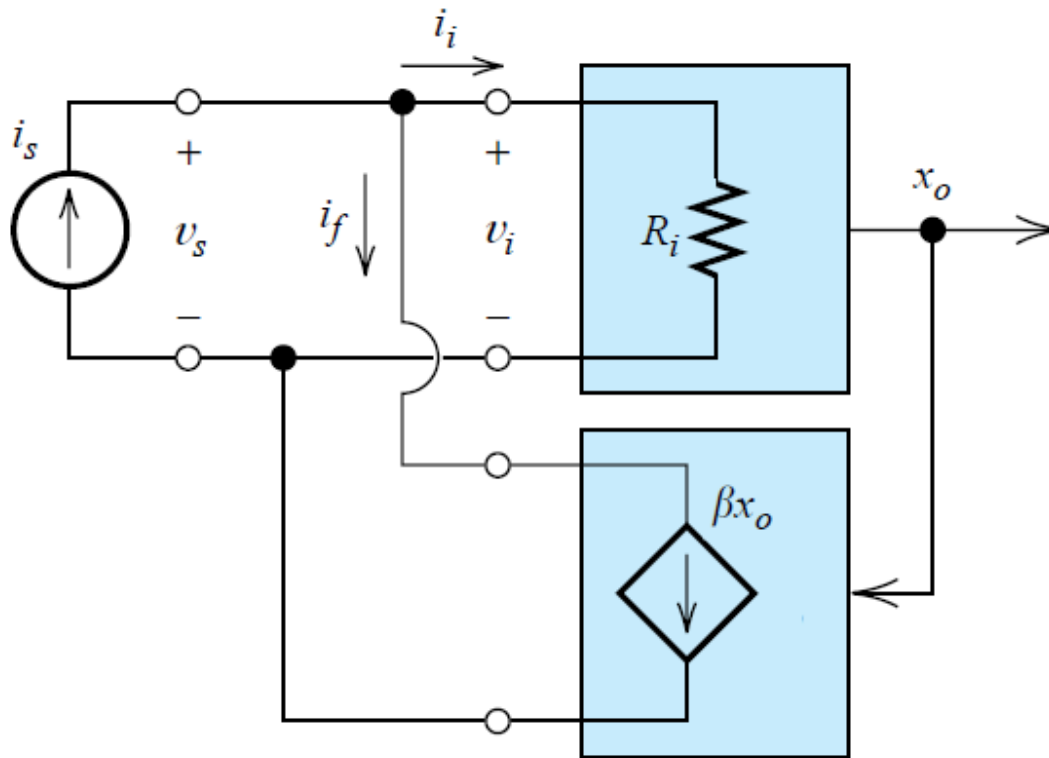


2.5.1. Efectos en R de entrada: en **paralelo**



Paralelo a la entrada →

→ Realimentación en corriente...



Observe que:

- Si el generador de entrada es de *corriente*:
 - La R_{if} interesa que sea lo más pequeña posible
 - La asociación necesaria para el generador i_s es en paralelo.
 - La asociación paralelo **disminuye** la R de entrada...

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

Actividades:

- Demuestre la expresión del valor de R_{if} para entrada en paralelo (*).
- ¿Habría algún cambio en (*) en función de si la salida x_o es tipo v o i ?

2.5.2. Efectos en R de salida: en **paralelo**.

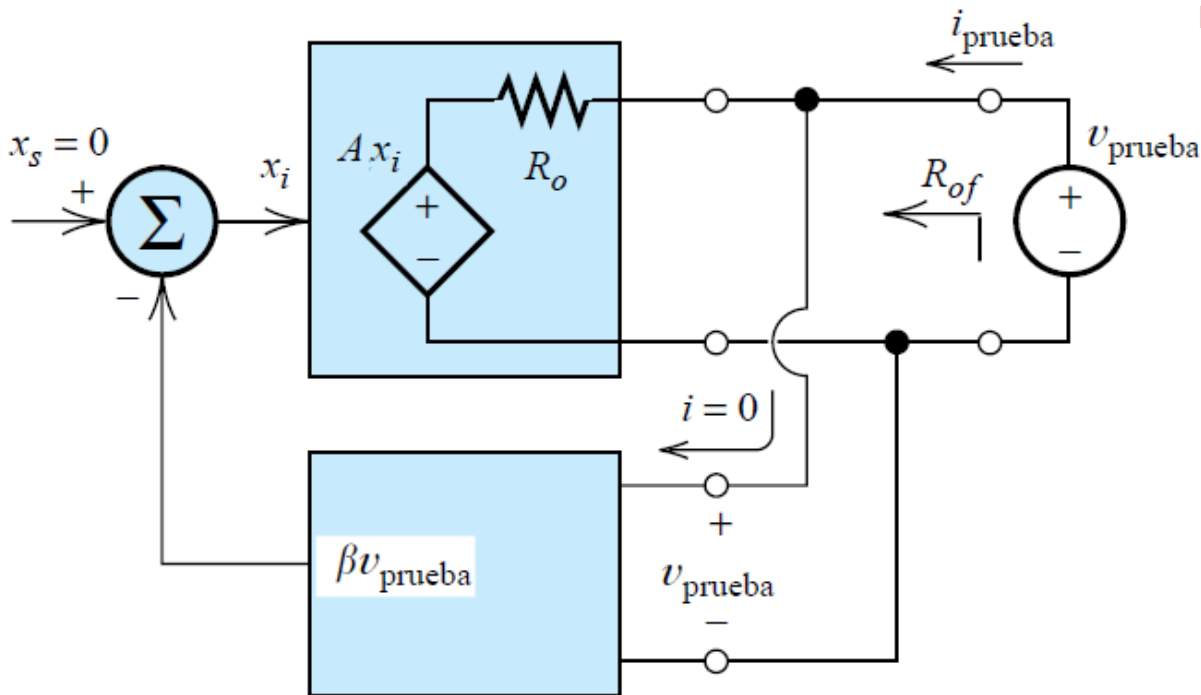


Paralelo a la salida →

→ Muestreo de tensión...

Observe que:

- Si la conexión en salida es en paralelo:
- La salida es en tensión: v_o
- Interesa que la R_{of} sea lo más pequeña posible...
- La asociación paralelo es la que permite **disminuir** la R de salida...



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

Actividad:

- Demuestre la expresión del valor de R_{of} para salida en paralelo (*).
- **Importante.** En el esquema gráfico se muestran las siguientes condiciones de medida: $x_s = 0$, $i = 0$. → ¿Por qué se deben dar tales condiciones?

2.5.3. Conclusión: efectos en R 's terminales



- ❑ En amplificadores reales, una realimentación apropiada permite aumentar o disminuir las impedancias terminales, a voluntad:

- ❑ Efectos sobre la R de entrada:

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

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

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

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

- ❑ Efectos sobre la R de salida:

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

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

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

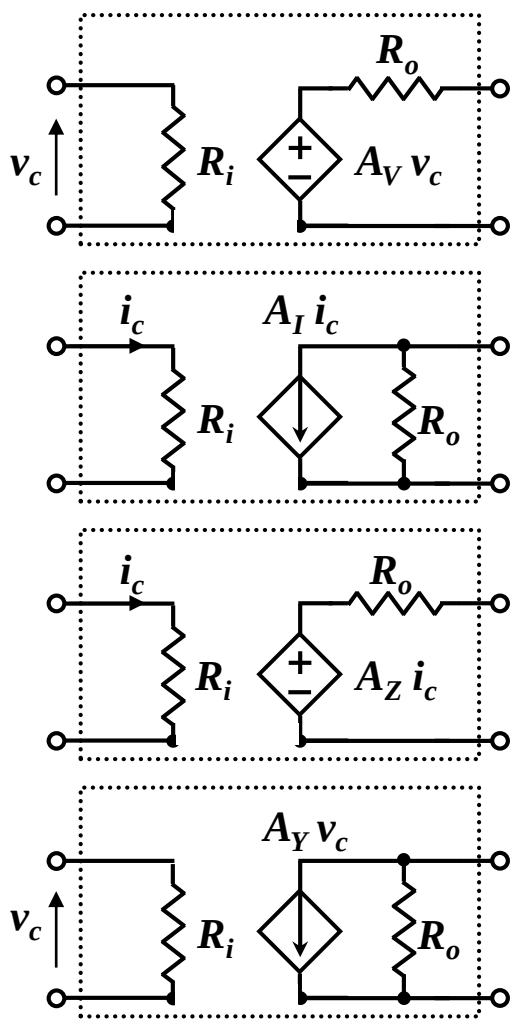
$$\Rightarrow R_{of} = \frac{R_o}{(1 + A\beta)}$$

2.5.3. Conclusión: idealizando cualquier A.



- La topología adecuada "**idealiza**" cualquier **amplificador real**

Un A real cualquiera...



...realimentado en forma...

Serie-Paralelo:

$Z_i \uparrow$ y $Z_o \downarrow$

...tiende a ser un...

Paralelo-Serie:

$Z_i \downarrow$ y $Z_o \uparrow$

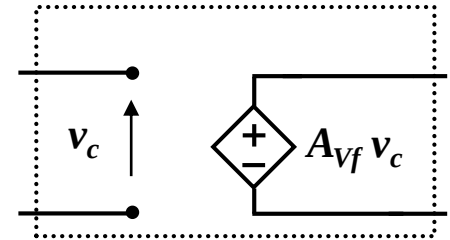
Paralelo-Paralelo:

$Z_i \downarrow$ y $Z_o \downarrow$

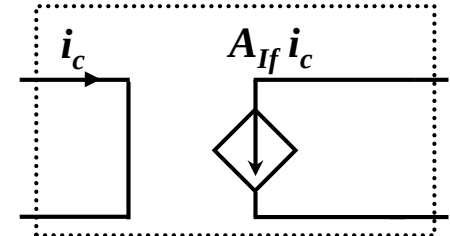
Serie-Serie:

$Z_i \uparrow$ y $Z_o \uparrow$

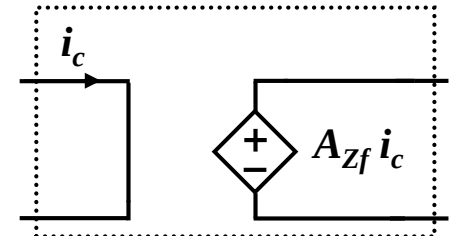
A_f de
tensión
...ideal.



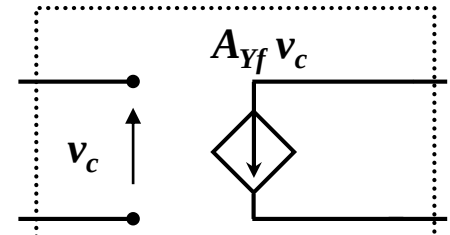
A_f de
corriente



A_f de trans-
impedancia



A_f de trans-
admitancia





Referencias



- ❑ 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



- 2016-10-19: versión inicial.