

# Realimentación

Electrónica Analógica II.  
Bioingeniería



**Concepto:** La realimentación consiste en devolver parte de la salida de un sistema a la entrada. La realimentación es la técnica habitual en los sistemas de control.

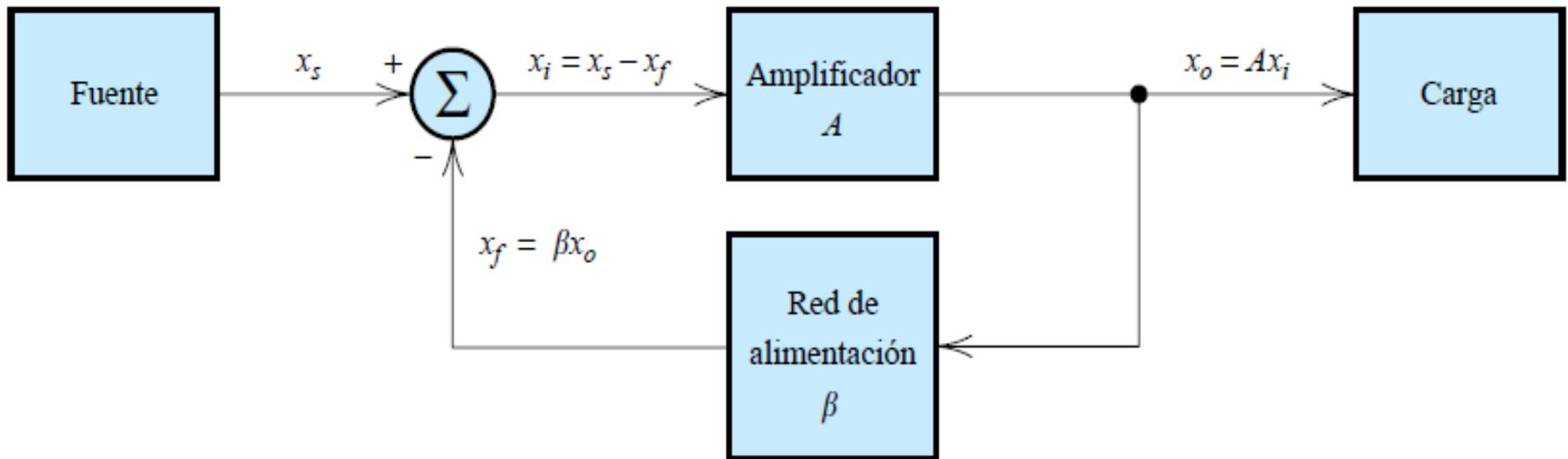
- En la **realimentación negativa**, una parte de la señal de salida es devuelta a la entrada y se opone a la señal de entrada original.
- En la **realimentación positiva**, la señal de realimentación refuerza a la entrada original.
- Normalmente, la **realimentación negativa resulta más útil en los amplificadores** que la realimentación positiva.

La **realimentación negativa** tiene la desventaja de reducir la ganancia de un amplificador, pero tiene potencialmente muchas ventajas:

- Estabilización de ganancia
- Reducción de la distorsión no lineal
- Reducción de ruido
- Control de las impedancias de entrada y de salida
- Aumento del ancho de banda

# EFECTOS DE LA REALIMENTACIÓN SOBRE LA GANANCIA

## Ganancia en lazo cerrado



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

- A: es la ganancia original de la etapa amplificadora.
- $\beta$  : es la ganancia de la red de realimentación.
- A.  $\beta$ : Ganancia de LA
- $(1+A.\beta)$  : Ganancia de retorno
- $A_f$ : Ganancia de LC

Se observa que hay dos maneras de determinar el tipo de realimentación de un circuito:

- Mirando si la señal que sale del bloque de realimentación ( $x_f$ ), se suma o se resta a la señal de entrada ( $x_s$ ).
- Comprobando si el producto de las ganancias,  $A\beta$ , es positivo o negativo.

Valores de las ganancias y tipo de realimentación

Ganancia de lazo	Ganancia de retorno	Ganancia total	Realimentación
$A\beta > 0$	$(1 + A\beta) > 1$	$A_r < A$	Realimentación negativa
$A\beta < 0$	$(1 + A\beta) < 1$	$A_r > A$	Realimentación positiva
$A\beta = -1$	$(1 + A\beta) = 0$	$A_r \rightarrow \infty$	Oscilador

# Estabilización de la ganancia

A menudo, se diseñan amplificadores con realimentación negativa de modo que  $A\beta \gg 1$ . Cumpliendo esta condición,  $A_f \approx 1/\beta$ , lo cual es ventajoso, porque puede hacerse que  $\beta$  dependa únicamente de componentes pasivos estables (R o C). Por el contrario, la ganancia de LA (A), normalmente depende de parámetros de dispositivos activos (como  $g_m$  en un FET o  $\beta$  en un bipolar), que tienden a ser altamente variables con el punto de trabajo y la temperatura.

Ej: si  $A = 10^4$  y  $\beta = 0,01 \rightarrow A_f = A/(1+A\beta) = 99,0$ .

Si A disminuye a 9000 y  $\beta$  no varía,  $\rightarrow A_f = 98,9$ .  $\rightarrow$  una reducción del 10% en A da lugar a sólo una reducción del 0,1% en  $A_f$ .

**Empleando dispositivos activos con parámetros imprecisos se construyen amplificadores de precisión.**

## Revisión de la restricción del punto suma

Considerando las siguientes ecuaciones:

$$X_f = \beta X_o$$

$$X_o = A_f \cdot X_s, \text{ por lo que } X_f = A_f \cdot \beta X_s$$

y reemplazando  $A_f$ , obtenemos  $X_f = \frac{A \cdot \beta}{1 + A \cdot \beta} X_s$

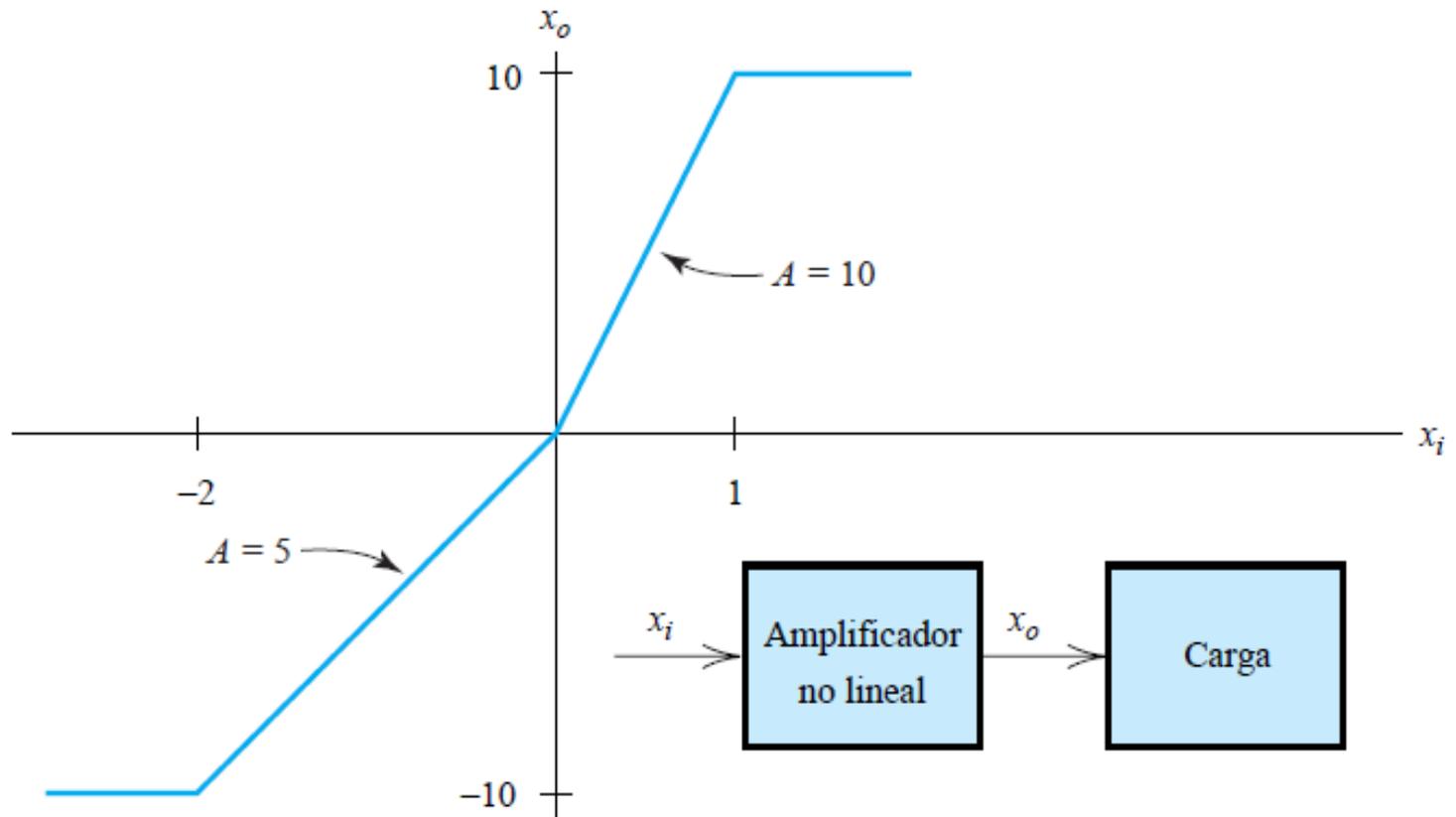
Si  $A \cdot \beta \gg 1$ , entonces  $X_f \approx X_s$  y por tanto

$$X_i = X_s - X_f \rightarrow 0.$$

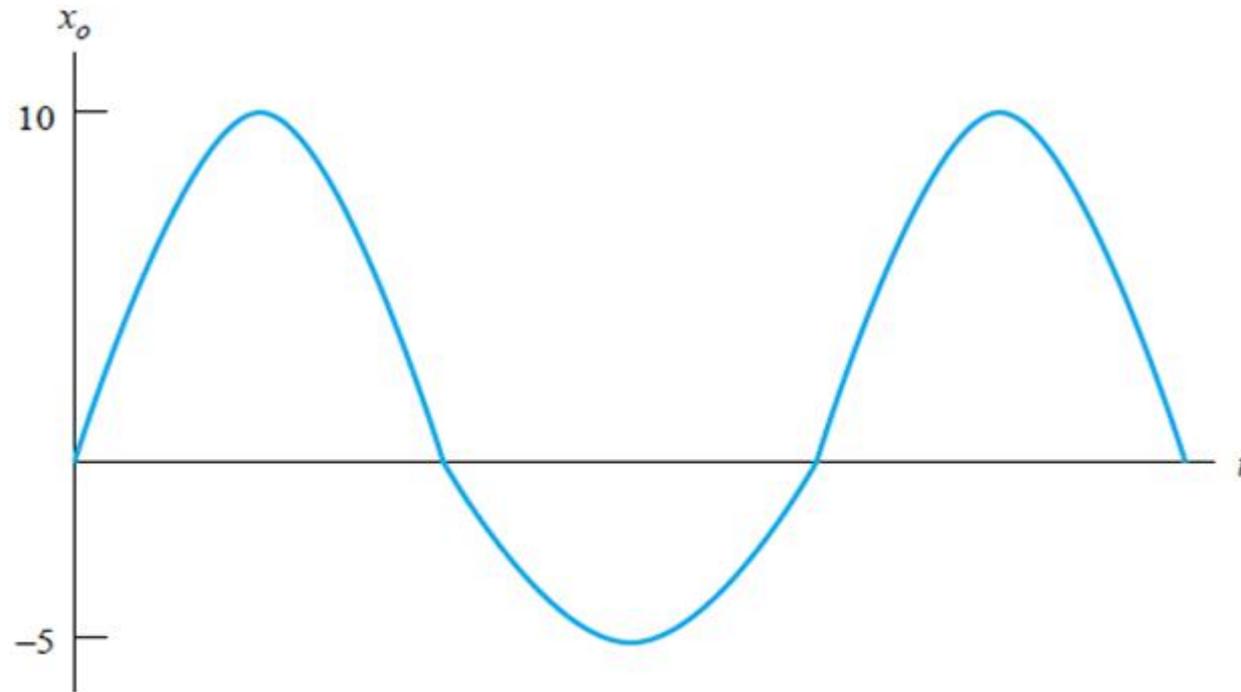
**Conclusión:** en un amplificador con realimentación negativa, el amplificador toma el valor requerido de la salida para producir la señal de error a casi a cero. Esta condición se denomina restricción del punto suma. Este es un concepto extremadamente útil en el análisis de los AO.

# REDUCCIÓN DE LA DISTORSIÓN NO LINEAL Y DEL RUIDO

Consideremos el siguiente ejemplo:



Característica de transferencia de un amplificador no lineal determinado.

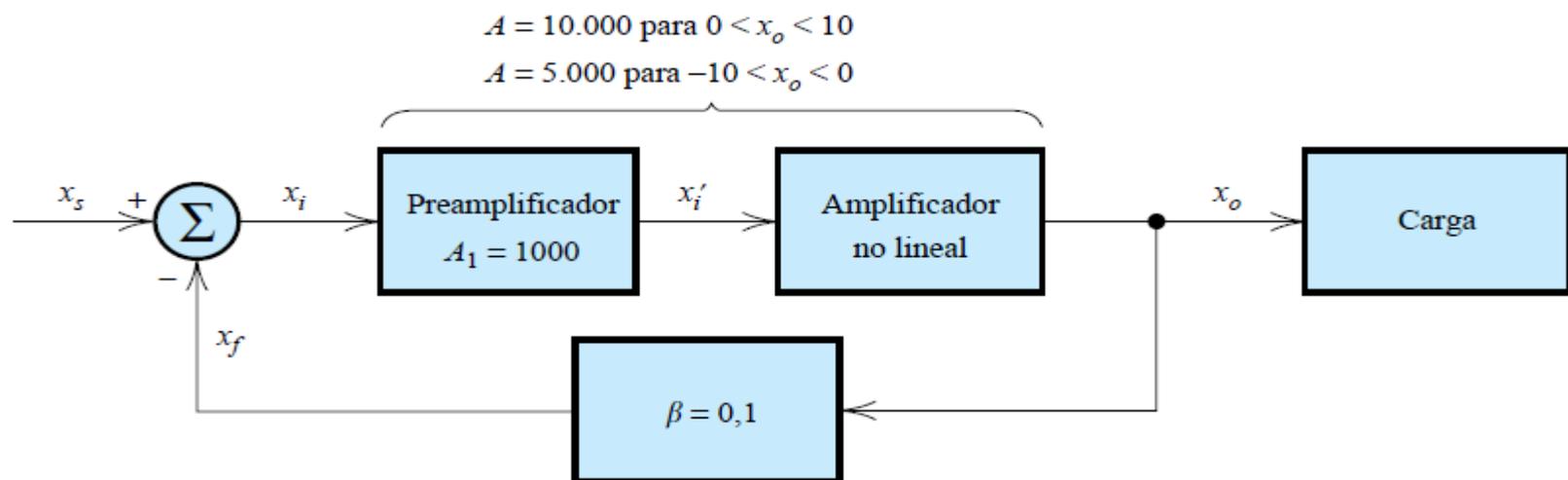


Salida del amplificador para  $x_i = \text{sen}(\omega t)$ .  
Observe la distorsión resultante de la característica de  
transferencia no lineal.

Suponga que queremos que un amplificador tenga  $A_f \cong 10$ . Entonces, puesto que  $A_f \cong 1/\beta$ , elegimos  $\beta = 0,1$ . Para lograr un efecto importante sobre la distorsión, debemos tener  $A\beta \gg 1$ . Sin embargo, la ganancia del amplificador no lineal es de sólo 10 para las señales positivas y 5 para las negativas. Por tanto, no podemos satisfacer el requisito establecido por  $A\beta \gg 1$ , a menos que conectemos en serie un amplificador adicional de alta ganancia con el amplificador no lineal dado. Esto es parte del precio que debemos pagar para aprovechar las ventajas de la realimentación negativa.

En la Fig se ilustra un diagrama del amplificador no lineal, el bloque de ganancia adicional y la red de realimentación.

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



Adición de un preamplificador lineal de alta ganancia y realimentación negativa para reducir la distorsión.

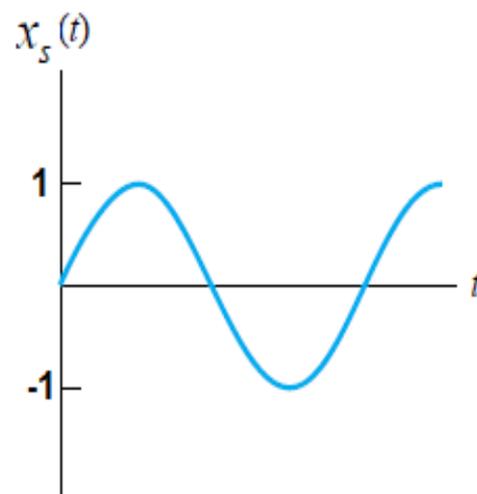
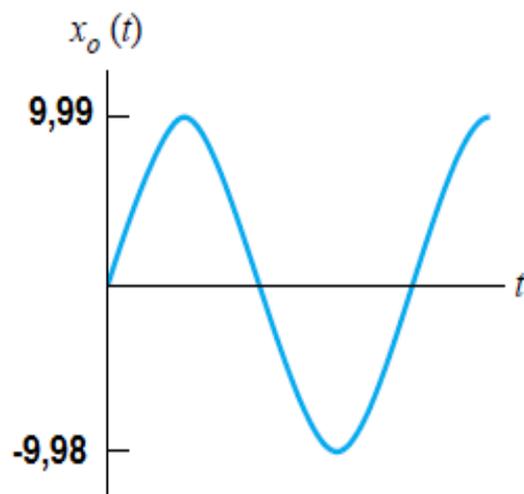
Sustituyendo los valores, obtenemos

$$A_f = 9,99 \quad \text{para} \quad 0 < x_o < 10$$

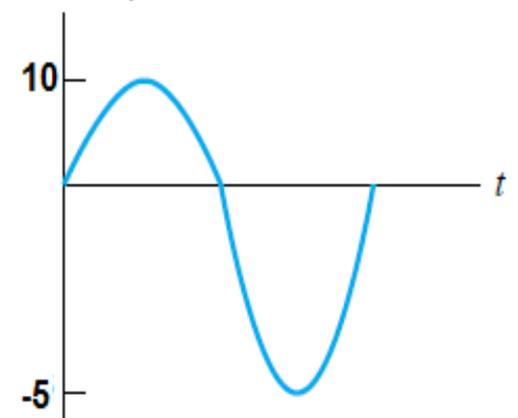
$$A_f = 9,98 \quad \text{para} \quad -10 < x_o < 0$$

Observe que la ganancia en bucle cerrado es casi la misma para los recorridos positivos y negativos de la salida.

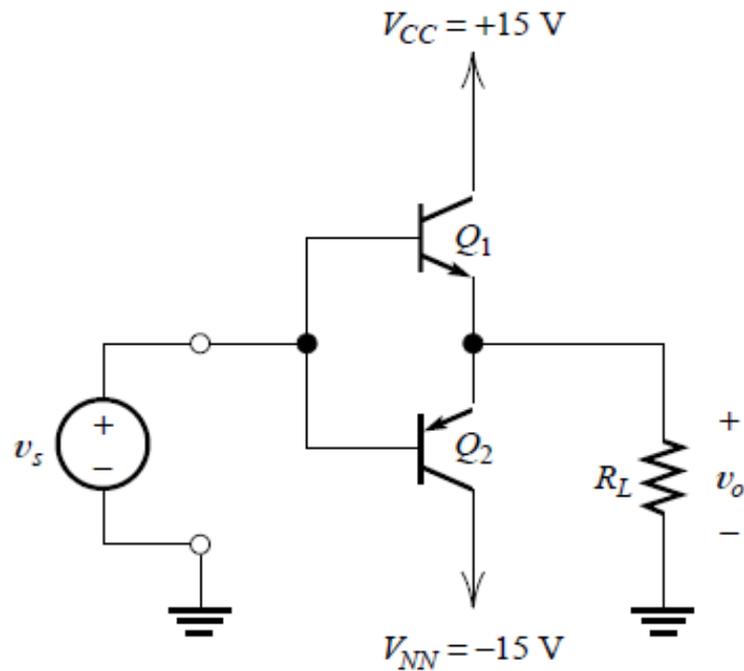
Ahora, si la señal del generador es  $x_s = \text{sen}(2000\pi t)$ , la salida es una senoide casi perfecta, porque el valor máximo positivo es 9,99, y el negativo es  $-9,98$ . Por el contrario, el mismo amplificador sin realimentación producía la forma de onda distorsionada que se mostró anteriormente



*Salida del A, con transferencia no lineal*

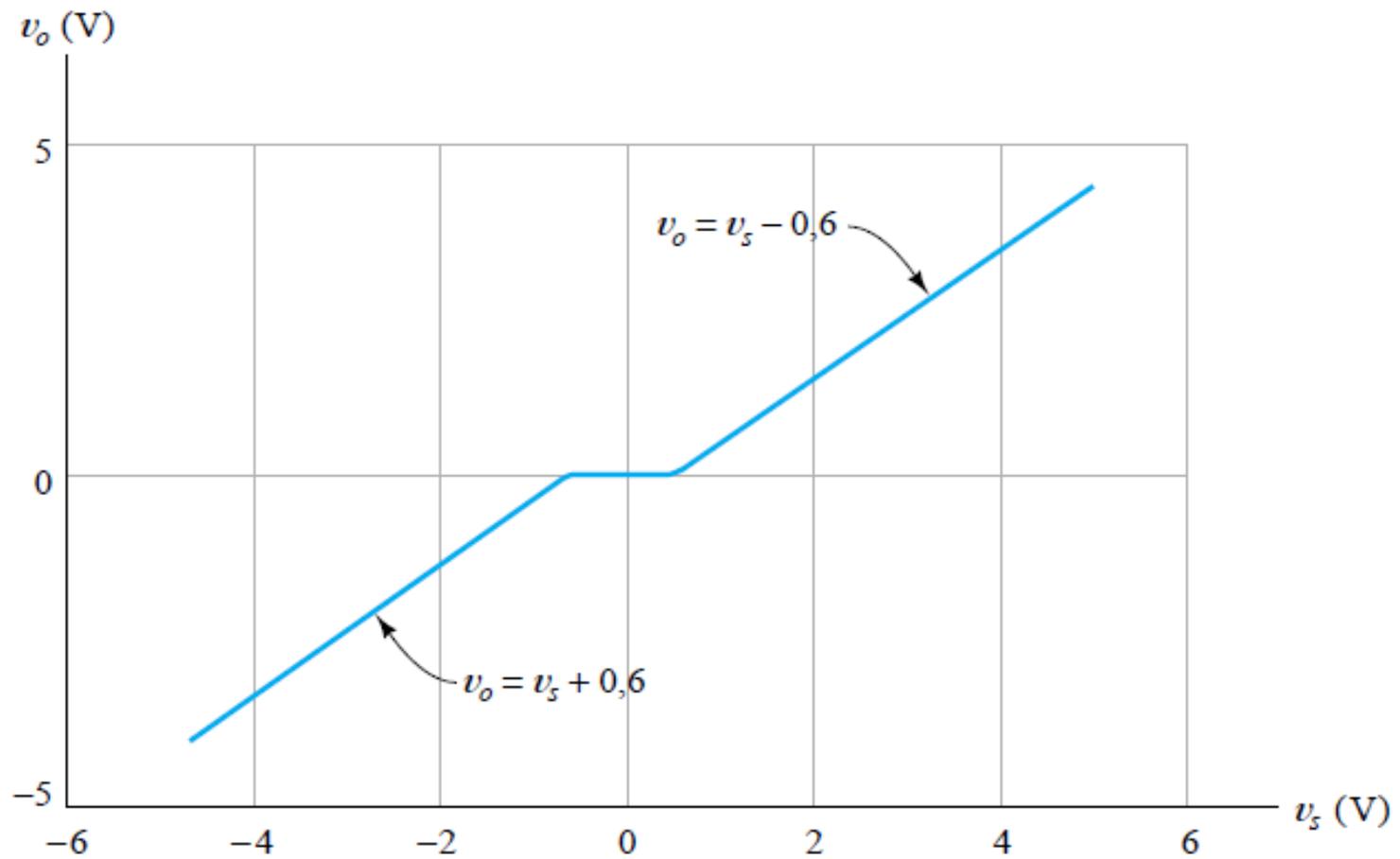


# Un ejemplo con distorsión de cruce



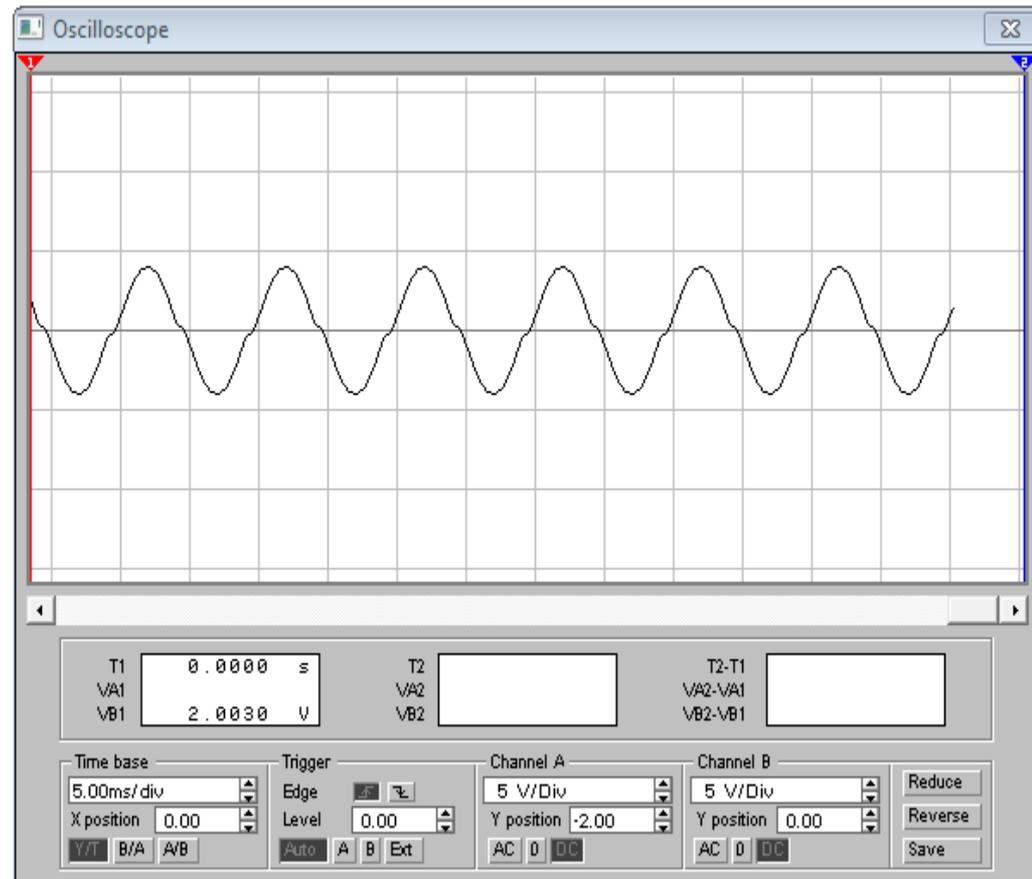
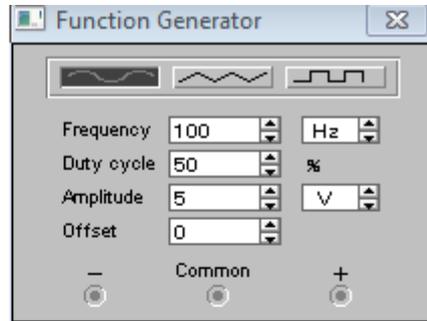
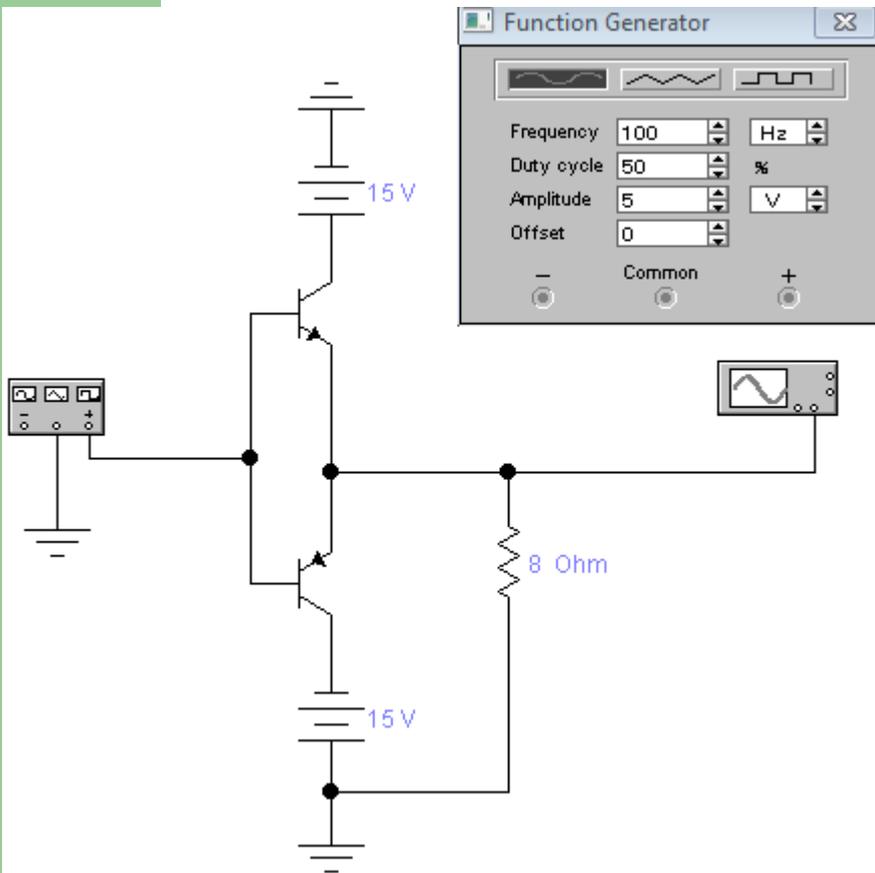
Amplificador de potencia clase B no lineal.

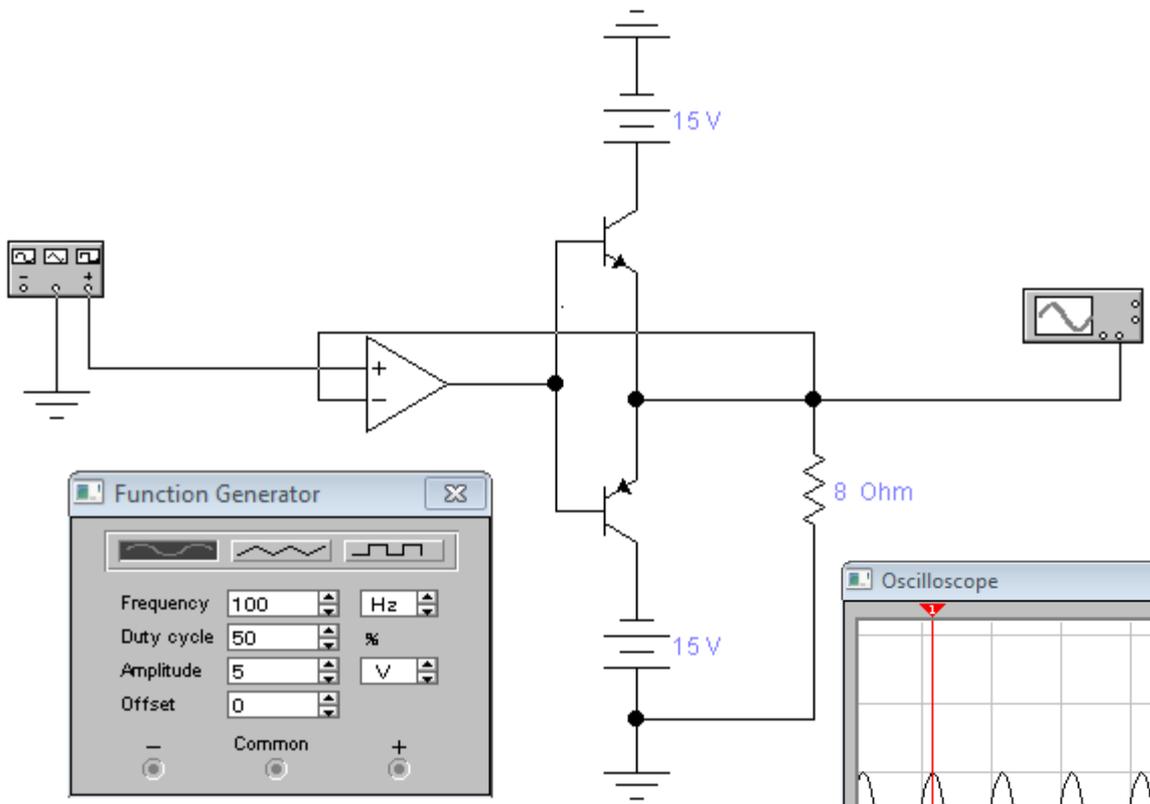
$$v_o \cong v_s + 0,6 \quad \text{para} \quad v_s < -0,6$$



Característica de transferencia del amplificador

# Ejemplo de realimentación negativa utilizando el Amplificador de Potencia Clase B

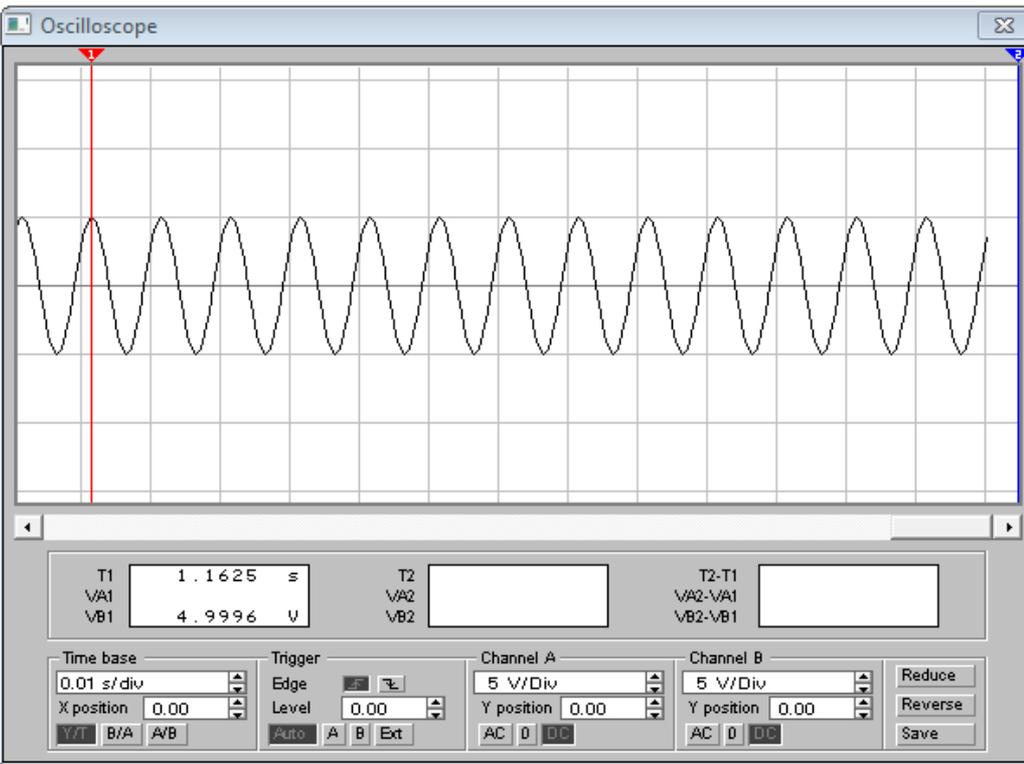


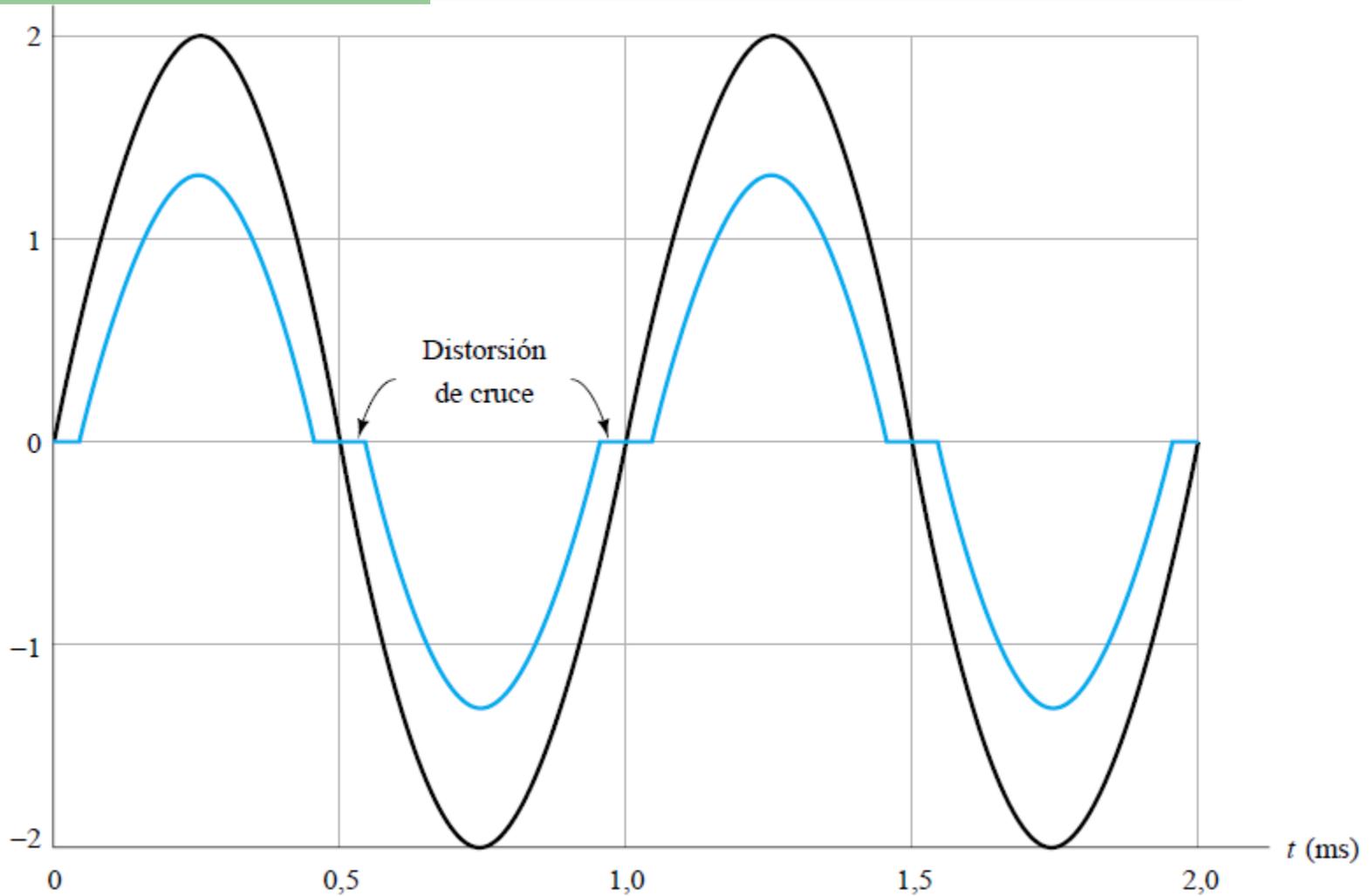


**Function Generator**

Frequency: 100 Hz  
 Duty cycle: 50 %  
 Amplitude: 5 V  
 Offset: 0

Common





Grafica de  $V_o(t)$ , para una señal senoidal de entrada de amplitud de 2V

- Sin realimentar
- Con realimentación

## Reducción de ruido

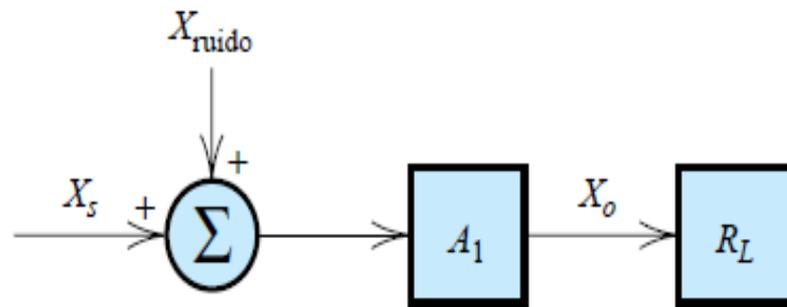
La realimentación negativa se la utiliza también para reducir el ruido en los amplificadores.

Las fuentes de este ruido son: el ruido de la fuente de alimentación, el acoplamiento de señales procedentes de otros circuitos, y el ruido térmico de las resistencias.

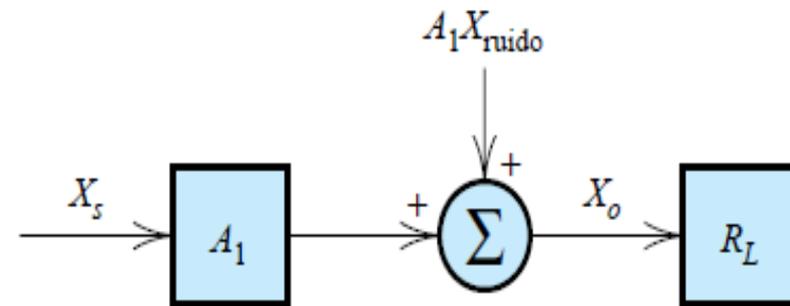
Algunas fuentes de ruido pueden, en principio, eliminarse, sin embargo, algunas de las fuentes de ruido, como el ruido térmico y de descarga, obedecen a procesos básicos naturales que no pueden eliminarse totalmente.

Por tanto, todos los amplificadores añaden ruido, pero algunos son mucho peores que otros.

La adición de ruido puede modelarse como se ilustra en la figura, en la que la ganancia del amplificador se designa mediante  $A_1$ .



(a) Señal de ruido referida a la entrada



(b) Señal de ruido referida a la salida

Modelos que tienen en cuenta la adición de ruido en los amplificadores.

Para cuantificar el comportamiento, se utilizan la relación señal-ruido, que es la potencia de la señal deseada dividida entre la potencia de ruido. Indicamos los valores rms de la señal y del ruido con  $X_s$  y  $X_{\text{ruido}}$ , respectivamente.

La señal rms suministrada a la carga es  $A_1 X_s$ , y el ruido rms es  $A_1 X_{\text{ruido}}$ .

Si las señales son tensiones, las potencias suministradas a la carga son:

$$P_{\text{señal}} = \frac{(A_1 X_s)^2}{R_L}$$

La relación señal-ruido es  $S/N = \frac{P_{\text{señal}}}{P_{\text{ruido}}}$

$$P_{\text{ruido}} = \frac{(A_1 X_{\text{ruido}})^2}{R_L}$$

Sustituyendo las Ecuaciones  $S/N = \frac{(X_s)^2}{(X_{\text{ruido}})^2}$

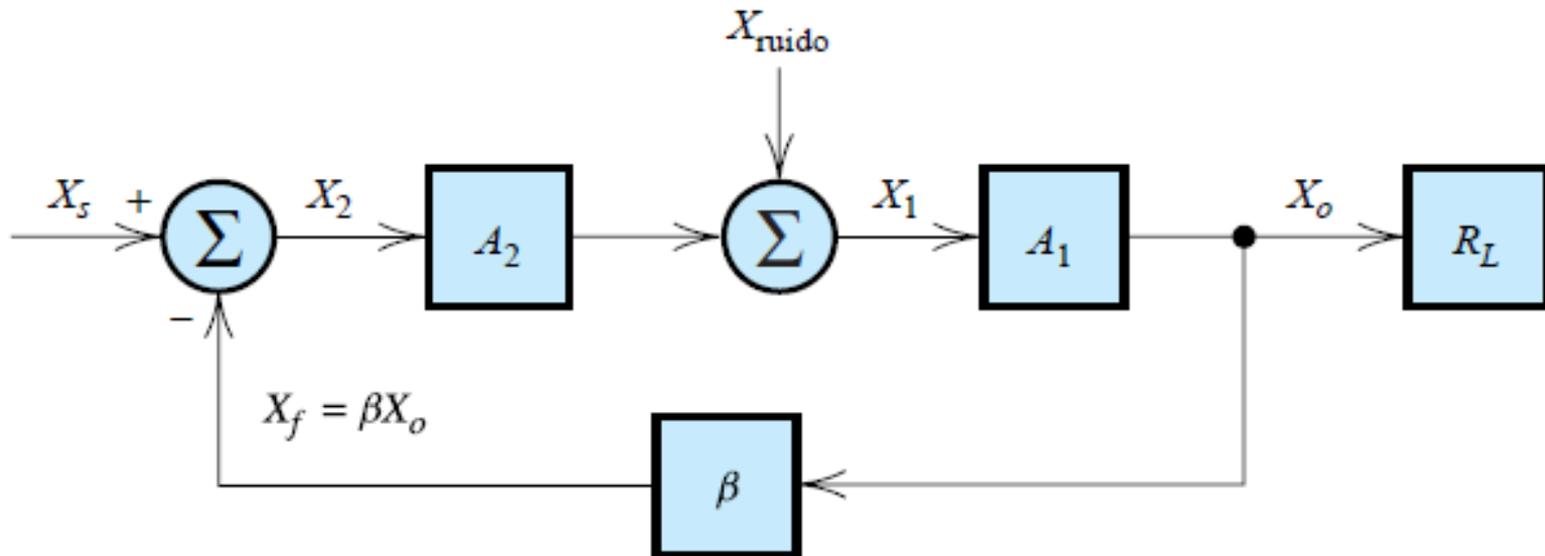
Habitualmente esta Relación se expresa en decibeles

## Considérese el siguiente sistema:

$$x_2(t) = x_s(t) - \beta x_o(t)$$

$$x_1(t) = A_2 x_2(t) + x_{\text{ruido}}(t)$$

$$x_o(t) = A_1 x_1(t)$$



Amplificador realimentado con una fuente de ruido.

$$x_o(t) = x_s(t) \frac{A_1 A_2}{1 + \beta A_1 A_2} + x_{\text{ruido}}(t) \frac{A_1}{1 + \beta A_1 A_2}$$

$$S/N = \frac{[X_s A_1 A_2 / (1 + \beta A_1 A_2)]^2}{[X_{\text{ruido}} A_1 / (1 + \beta A_1 A_2)]^2} = \frac{(X_s)^2}{(X_{\text{ruido}})^2} \times (A_2)^2$$

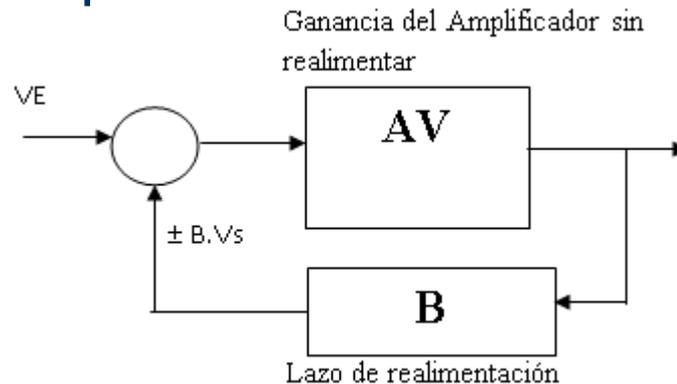
Comparando con la ecuación  $S/N = \frac{(X_s)^2}{(X_{\text{ruido}})^2}$

del sistema sin realimentar, se advierte que la Relación S/N ha aumentado en  $(A_2)^2$

La realimentación es una técnica poderosa para reducir el ruido de los amplificadores.

# IMPEDANCIAS DE ENTRADA Y DE SALIDA

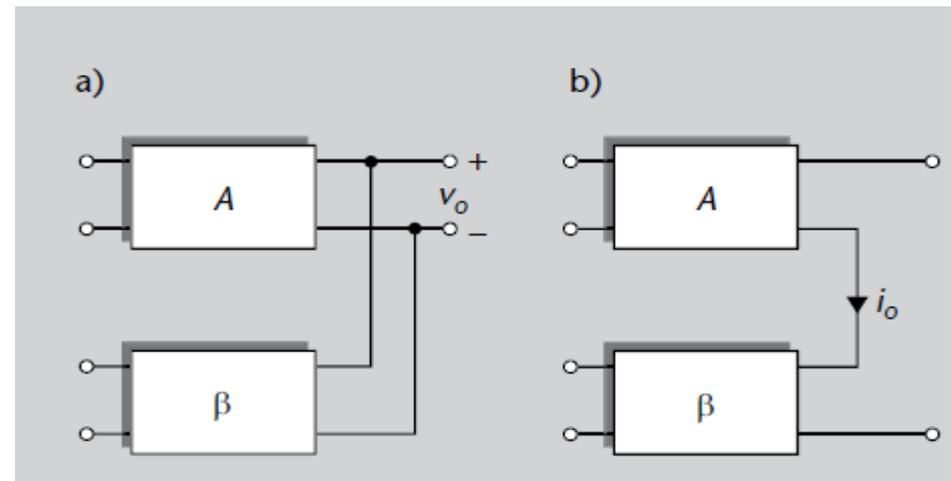
Hay cuatro tipos básicos de realimentación que tienen efectos diferentes sobre las impedancias de entrada y de salida de los amplificadores.



Se puede realimentar

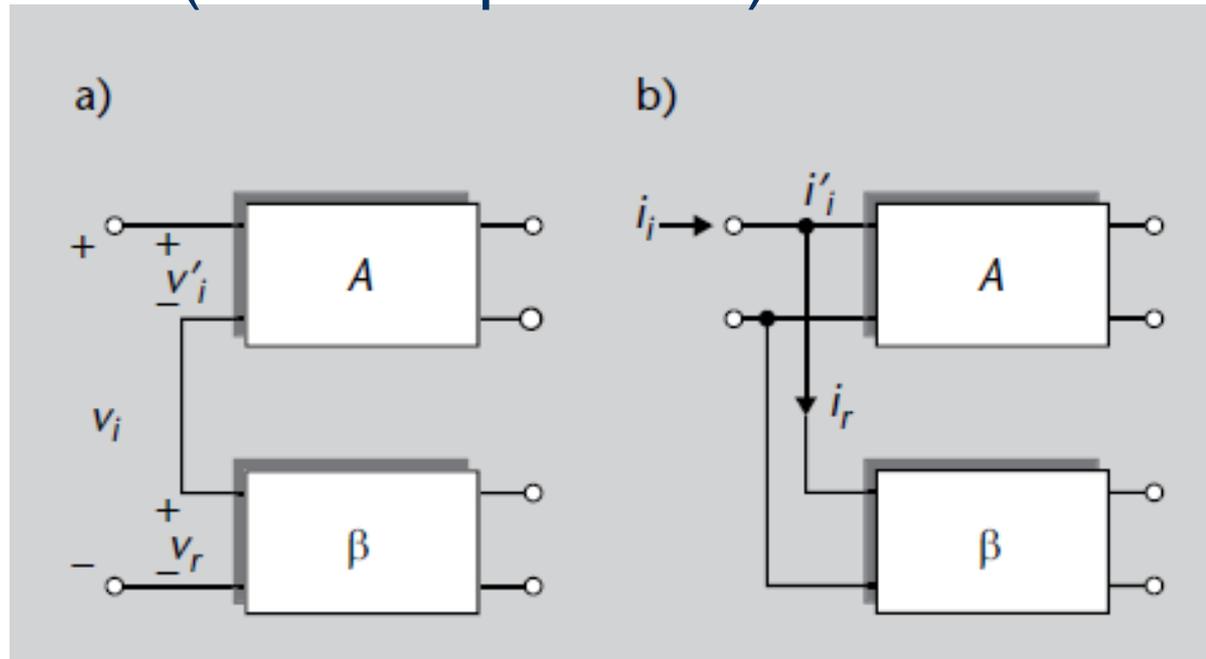
a) Tensión

b) Corriente



La comparación de señales, puede ser de

- a) Tensión (entrada serie)
- b) Corriente (entrada paralelo)



La combinación del tipo de realimentación y la comparación, da lugar a los cuatro tipos de realimentación

## Tipos de Realimentación

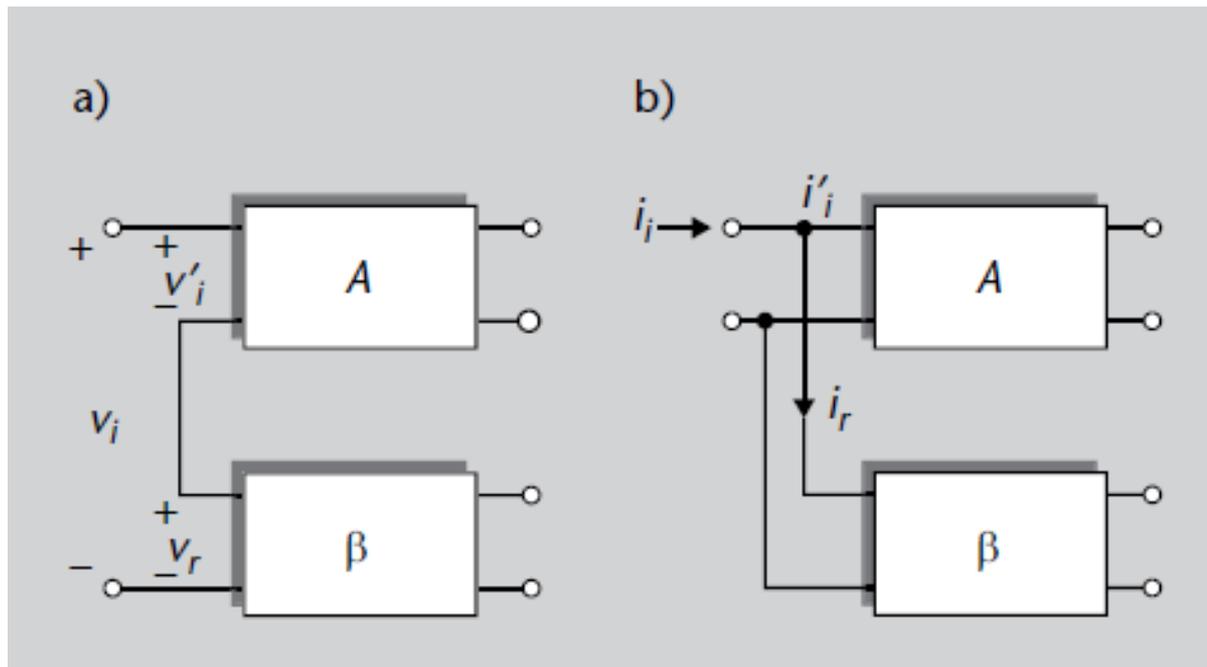
- a) Realimentación de voltaje, entrada en serie.
- b) Realimentación de voltaje, entrada en paralelo.
- c) Realimentación de corriente, entrada en serie.
- d) Realimentación de corriente, entrada en paralelo.

Recuerde que los términos serie y paralelo hacen referencia a la conexión de entrada, mientras que los términos tensión y corriente hacen referencia a la señal de salida que se toma de muestra.

Analizando los esquemas serie y paralelo, se observa:

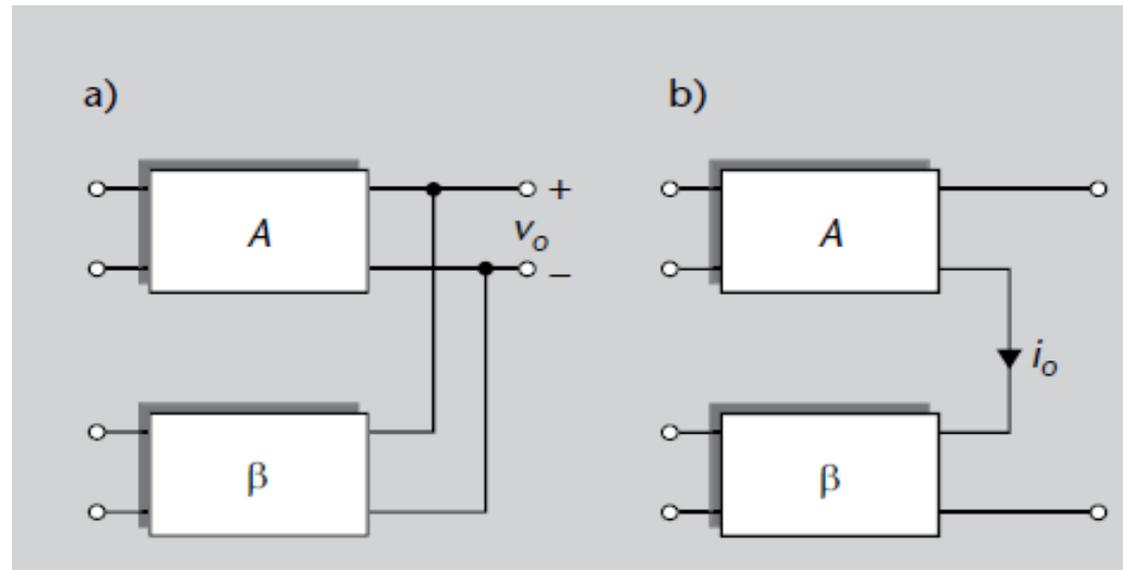
a) En la entrada serie se produce un aumento de la resistencia de entrada al amplificador realimentado.

b) Con la entrada paralelo, se reduce la resistencia de entrada al circuito amplificador.



De manera similar ocurre en la salida.

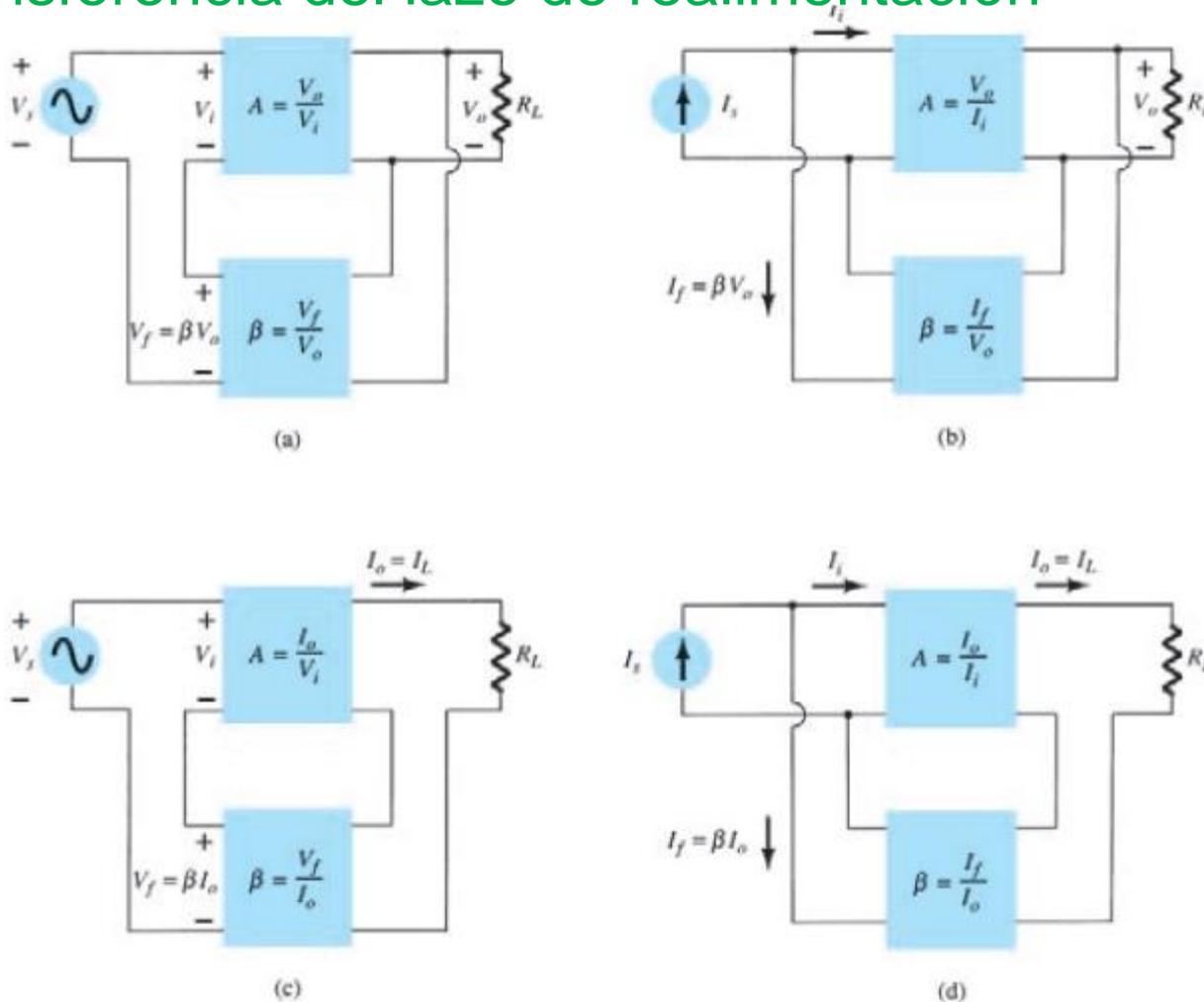
- Con la realimentación de tensión, la resistencia de salida del amplificador realimentado disminuye.
- Con la realimentación de corriente, la resistencia de salida del amplificador realimentado aumenta



La siguiente tabla, resume las conclusiones recién obtenidas, en cuanto a las impedancias de entrada y salida de un amplificador realimentado.

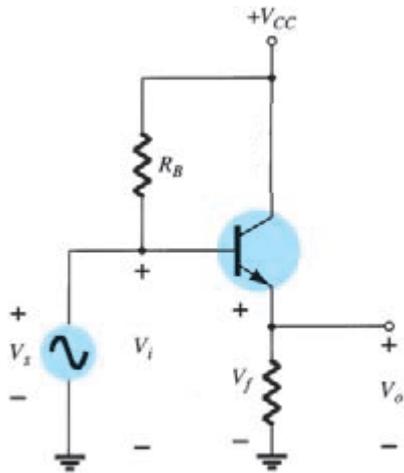
<b>Tipo de Realimentación</b>	<b>Entrada</b>	<b><math>Z_e</math></b>	<b><math>Z_s</math></b>
<b>Voltaje</b>	Serie	Aumenta	Disminuye
	Paralelo	Disminuye	Disminuye
<b>Corriente</b>	Serie	Aumenta	Aumenta
	Paralelo	Disminuye	Aumenta

# De acuerdo al tipo de realimentación, será la Función de transferencia del lazo de realimentación

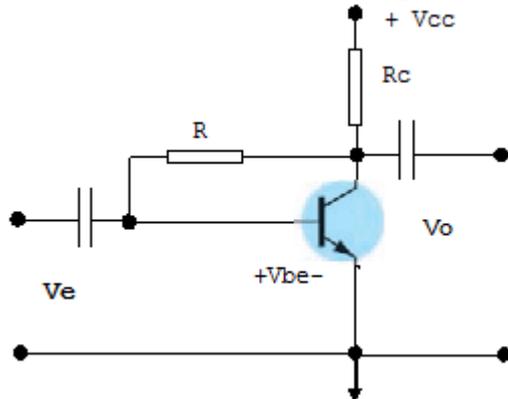


Tipos de amplificador con retroalimentación: (a) retroalimentación de voltaje en serie,  $A_f = V_o/V_s$ ; (b) retroalimentación de voltaje en paralelo,  $A_f = V_o/I_s$ ; (c) retroalimentación de corriente en serie,  $A_f = I_o/V_s$ ; (d) retroalimentación de corriente en paralelo,  $A_f = I_o/I_s$ .

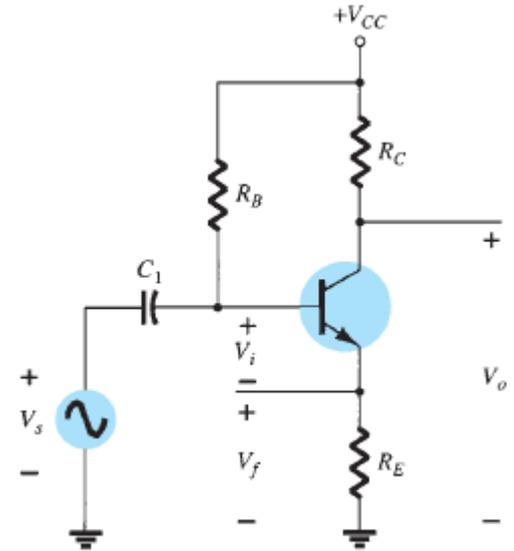
## EJEMPLOS DE REDES DE REALIMENTACIÓN



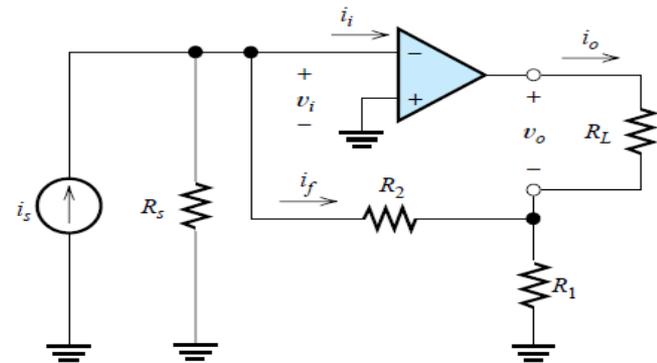
Seguidor emisor  
Retroalimentación de voltaje en serie.



Amplificador E-C a transistor con realimentación por colector.  
Retroalimentación de voltaje en paralelo

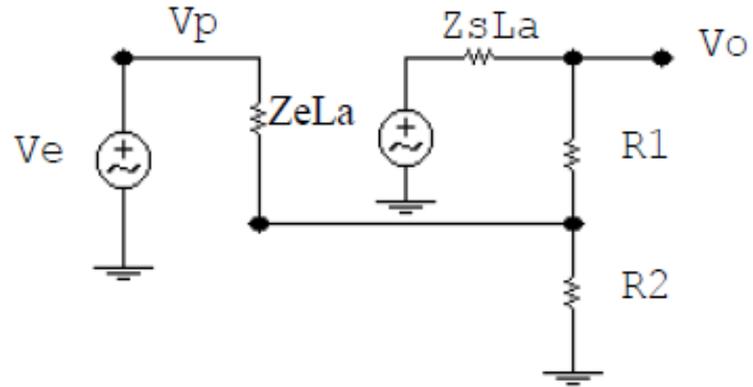
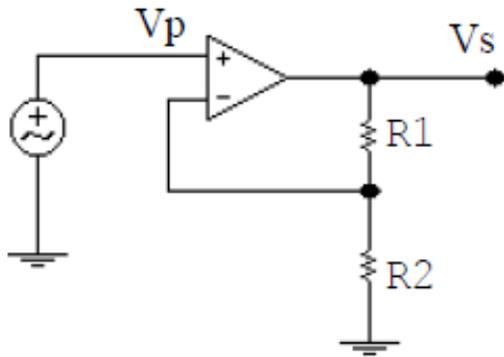


Amplificador E-C a transistor con resistor de emisor. Retroalimentación de corriente en serie

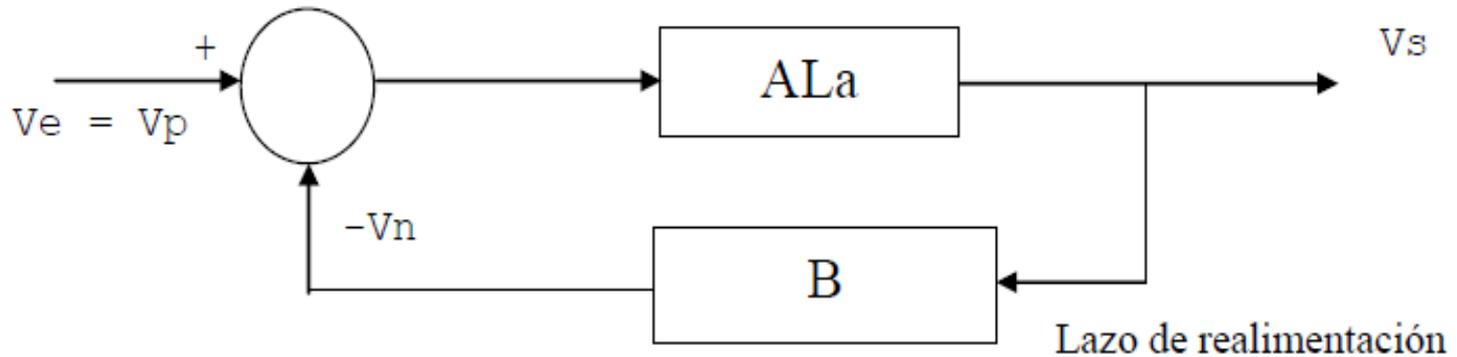


Fuente de corriente  
Retroalimentación de corriente en paralelo

# Amplificador No-Inversor



Ganancia del Amplificador sin realimentar



Realimentación de voltaje con entrada serie

$$(Ec. N^{\circ} 1) V_s = A_{La} \cdot V_d$$

$$(Ec. N^{\circ} 2) V_d = V_p - V_n$$

$$(Ec. N^{\circ} 3) V_n = B \cdot V_s$$

$$\text{y dado que } V_e = V_p \text{ (Ec. N}^{\circ} 4)$$

Reemplazando las ecuaciones (2),(3) y (4), en (1) resulta:

$$V_s(1 + A_{La} \cdot B) = A_{La} \cdot V_e \Rightarrow \\ \mathbf{A_{Lc} = V_s / V_e = A_{La} / (1 + A_{La} \cdot B)} \text{ (Ec. N}^{\circ} 5)$$

Si  $A_{La} \gg 1$ , luego la ecuación N<sup>o</sup> 5, resulta  $V_s / V_e = 1/B$

$$\text{y dado que } B = V_n / V_s = R_2 / (R_1 + R_2) \Rightarrow \mathbf{A_{Lc} = (1 + R_1/R_2)}$$

y este resulta ser el valor de ganancia, calculado para la configuración No- Inversora

En cuanto a la Zentrada de Lazo cerrado, será:

$$V_d = V_p - V_n = V_e - B \cdot V_s = V_e - B \cdot A_{La} \cdot V_d \Rightarrow \\ \mathbf{V_d (1 + B \cdot A_{La}) = V_e} \text{ (Ec. N}^{\circ} 6)$$

Además  $V_d = i_e \cdot Z_{eLa}$ , según se desprende del circuito, que reemplazada en la ec. N<sup>o</sup> 6, resulta:

$$V_e = i_e \cdot Z_{eLa} (1 + B \cdot A_{La}), \text{ y dado que } Z_{eLc} = V_e / i_e \Rightarrow$$

$$\mathbf{Z_{eLc} = Z_{eLa} (1 + B \cdot A_{La})} \text{ (Ec. N}^{\circ} 7)$$

Con igual criterio, se puede calcular la  $Z_{\text{salida}}$  de Lazo cerrado, planteando las siguientes ecuaciones en el circuito equivalente:

$$A_{La} \cdot V_d = i_s \cdot Z_{sLa} + V_s \Rightarrow V_s = A_{La} \cdot V_d - i_s \cdot Z_{sLa}$$

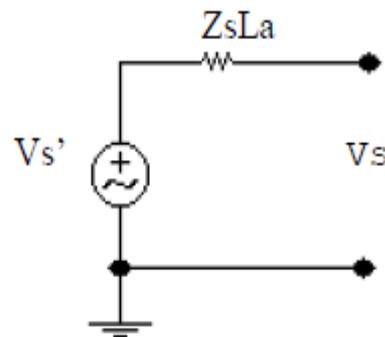
$$V_s = A_{La}(V_p - V_n) - i_s \cdot Z_{sLa}$$

$$V_s = A_{La}(V_p - B \cdot V_s) - i_s \cdot Z_{sLa} \Rightarrow$$

$$V_s (1 + A_{La} \cdot B) = A_{La} \cdot V_p - i_s \cdot Z_{sLa} \Rightarrow$$

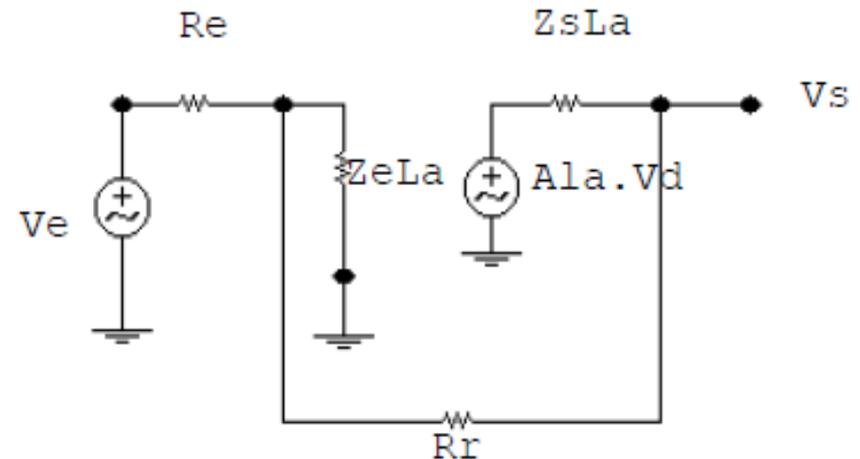
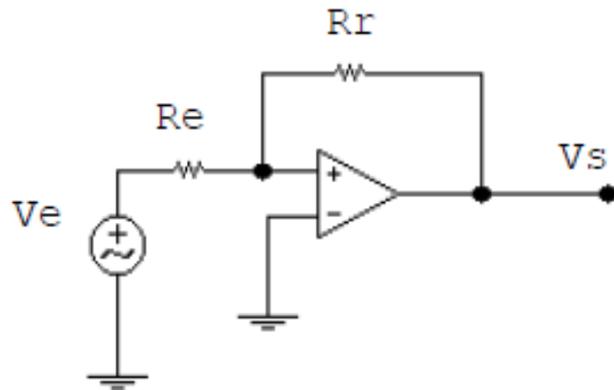
$$V_s = (A_{La} / (1 + A_{La} \cdot B)) \cdot V_p - (Z_{sLa} / (1 + A_{La} \cdot B)) \cdot i_s = V_{s'} - Z_{sLc} \cdot i_s$$

El circuito eléctrico equivalente realimentado, resulta, visto desde la carga:



$$Z_{sLc} = Z_{sLa} / (1 + A_{La} \cdot B) \text{ (Ec. N}^\circ \text{ 8)}$$

# Amplificador Inversor



**Realimentación de voltaje con entrada Paralelo**

$$V_s = A_{la} \cdot V_d = A_{la} (V_p - V_n), \text{ siendo } V_p = 0; V_s = -A_{la} \cdot V_n$$

$$V_n = V_e - i_e \cdot R_e \Rightarrow i_e = (V_e - V_n) / R_e$$

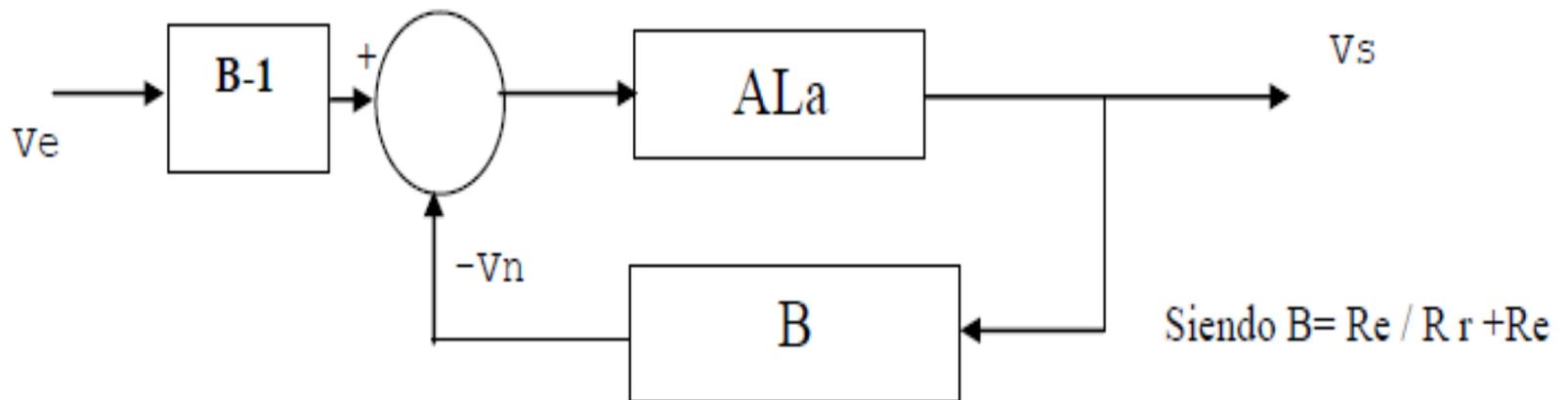
$$V_n = V_s - i_r \cdot R_r \Rightarrow i_r = (V_s - V_n) / R_r$$

Siendo  $i_e = -i_r \Rightarrow (V_e - V_n) / R_e = (V_s - V_n) / R_r$ , obteniéndose:

$$V_n = \frac{(V_e + V_s \cdot \frac{R_e}{R_r})}{1 + \frac{R_e}{R_r}} \text{ Luego}$$

$$V_s = -A_{la} \cdot \frac{(V_e + V_s \cdot \frac{R_e}{R_r})}{1 + \frac{R_e}{R_r}}$$

$$\frac{V_s}{V_e} = -\frac{ALa}{1 + \frac{R_e}{R_r} + ALa \cdot \frac{R_e}{R_r}} = \frac{-ALa \cdot \frac{R_r}{R_r + R_e}}{1 + ALa \cdot \frac{R_e}{R_r + R_e}} = \frac{ALa(B-1)}{1 + ALa \cdot B}$$



$$ALa \cdot \frac{R_e}{R_r + R_e} = ALa \cdot B \gg 1 \Rightarrow \frac{V_s}{V_e} = -\frac{R_r}{R_e}$$

A fin de hallar la  $Z_e$  y la  $Z_s$  de lazo cerrado, considérese las siguientes ecuaciones:

$$I_e - I_r = I_d (Ec.N^{\circ}9)$$

$$I_d \cdot Z_{eLa} = V_d \Rightarrow I_d = \frac{V_d}{Z_{eLa}} (Ec.N^{\circ}10)$$

$$V_d \cdot A_{La} = V_s (Ec.N^{\circ}11)$$

$$I_r = B \cdot V_s = B \cdot V_d \cdot A_{La} (Ec.N^{\circ}12)$$

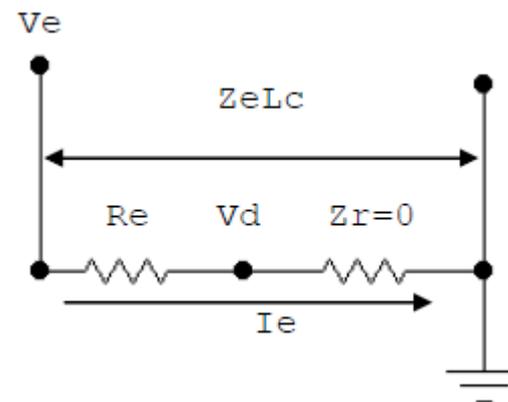
Reemplazando las Ec. N<sup>o</sup>12 y Ec. N<sup>o</sup>10 en la Ec. N<sup>o</sup>9, resulta:

$$I_e - B \cdot A_{La} \cdot V_d = \frac{V_d}{Z_{eLa}} \Rightarrow I_e$$

$$I_e = V_d \left( \frac{1}{Z_{eLa}} + A_{La} \cdot B \right) = V_d \frac{1 + A_{La} \cdot Z_{eLa} \cdot B}{Z_{eLa}}$$

$$Z_r = \frac{V_d}{I_e} = \frac{Z_{eLa}}{1 + A_{La} \cdot Z_{eLa} \cdot \frac{1}{R_r}} \cong \frac{1}{A_{La}} \cdot R_r = 0$$

$$Z_{eLc} = R_e (Ec.N^{\circ}13)$$



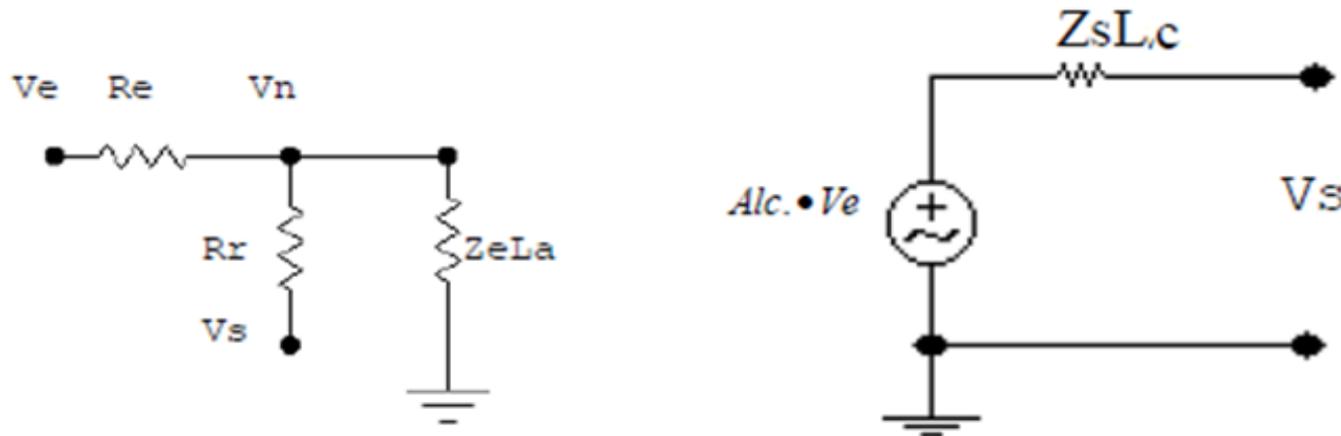
## La $Z_{sLc}$ , resulta del siguiente análisis

$$ALa \cdot Vd = Is \cdot ZsLa + Vs$$

$$Vd = -Vn$$

$$-Vn \cdot ALa = Is \cdot ZsLa + Vs \text{ (Ec. N°14)}$$

El circuito eléctrico equivalente realimentado visto desde la carga, resulta,



Conforme al circuito de la figura N°13, se obtiene  $V_n = f(V_e, V_s)$ . Aplicando el principio de superposición:

$$V_n = V_e \cdot \frac{R_r}{R_e + R_r} + V_s \cdot \frac{R_e}{R_e + R_r} \text{ (Ec. N°15)}$$

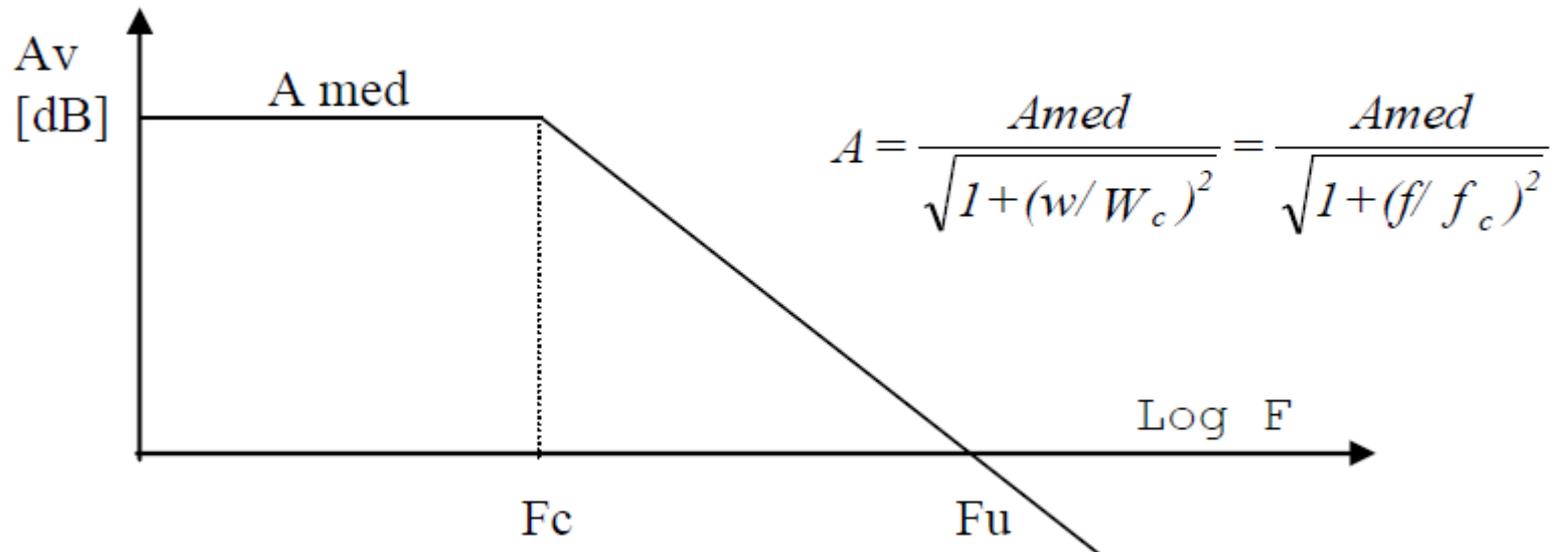
Reemplazando la Ec. N°15 en la Ec. N°14, se obtiene:

$$V_s = -Is \cdot \frac{ZsLa}{1 + B \cdot ALa} + V_e \cdot \frac{(B-1) \cdot ALa}{(1 + B \cdot ALa)} = -Is \cdot ZsLc + Alc \cdot V_e$$

$$ZsLc = \frac{ZsLc}{1 + B \cdot ALa} \text{ Ec. N°16}$$

# RESPUESTA EN FRECUENCIA DE UN AMPLIFICADOR REALIMENTADO

Un amplificador operacional es básicamente, un amplificador de corriente continua, pues no contiene condensadores de acoplo o de desacoplo. La respuesta en frecuencia resulta ser la correspondiente a un filtro pasa bajo de primer orden, tal como la muestra la figura



La ganancia frecuencial  $ALc$ , resulta

$$ALc = \frac{ALa}{1 + B.ALa} = \frac{\frac{Ao}{1 + j(f/fcLa)}}{1 + B \cdot \frac{Ao}{1 + j(f/fcLa)}} = \frac{Ao}{1 + j(f/fcLa) + B.Ao} = \frac{Ao}{[1 + B.Ao] \cdot [1 + \frac{j(f/fc)}{1 + B.Ao}]}$$

$$ALc = \frac{AmedLc}{1 + j \cdot \frac{f}{fcLa(1 + B.Ao)}}$$

si  $Ao.B \gg 1$ , luego  $fcLc = Ao.B.fcLa$ , lo que  $\Rightarrow fcLc \gg fcLa$

a través de esta última ecuación queda demostrado que cuando hay realimentación negativa, la frecuencia de corte de lazo cerrado es mayor que la frecuencia de corte a lazo abierto.

$$AmedLc = \frac{Ao}{1 + B.Ao}$$

$$fc_{Lc} = fc_{La} \cdot (1 + B.Ao)$$

$$ALc = \frac{ALa}{1 + B.ALa} \Rightarrow 1 + B.ALa = \frac{ALa}{ALc}$$

$$fc_{Lc} = fc_{La} \cdot (1 + B.Ao) = fc_{La} \cdot \frac{ALa}{ALc}$$

así queda demostrado que:

$$fc_{Lc} = (ALa/ALc) \cdot fc_{La} \Rightarrow ALc \cdot fc_{Lc} = ALa \cdot fc_{La}$$

**$ALc \cdot fc_{Lc} = cte$** , esto es:

**ANCHO DE BANDA x GANANCIA DE LAZO CERRADO = CONSTANTE**

y dado que  $ALa \cdot fc_{La} = fu = cte. = ALc \cdot fc_{Lc} \Rightarrow fc_{Lc} = fu/ALc$