

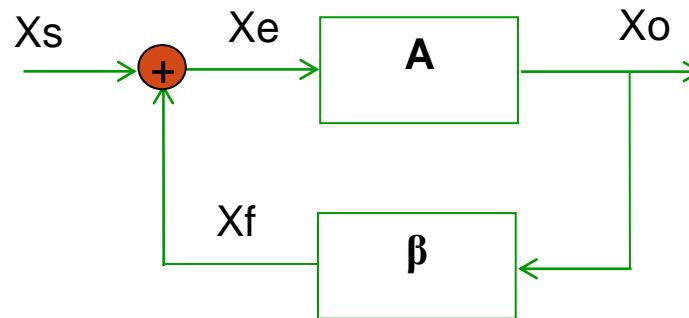
Circuitos Electrónicos I

Realimentación de amplificadores



EL CONCEPTO DE REALIMENTACIÓN

Dado un sistema con una dada salida y una dada excitación, la realimentación consiste en reinyectar a la entrada una porción de la salida de manera tal que sea parte de la excitación del mismo sistema



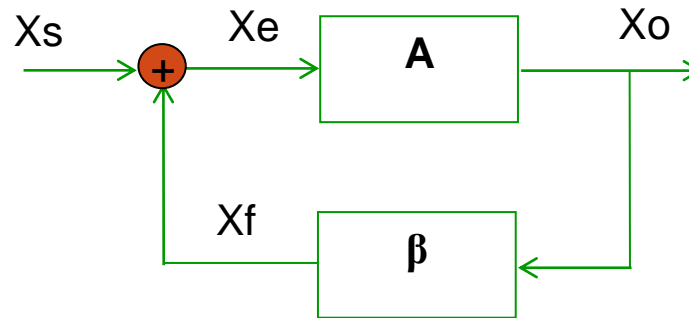
La realimentación suele clasificarse en positiva o negativa:

- ❑ La realimentación positiva reinyecta a la entrada una señal que refuerza la señal de entrada original.
- ❑ La realimentación negativa reinyecta a la entrada una señal que se opone a (o tiende a contrarrestar) la señal de entrada original.

Esta clasificación se justifica por los efectos bien diferentes de la realimentación según sea positiva o negativa.

LA REALIMENTACIÓN EN ELECTRÓNICA ANALÓGICA

Dado un sistema con una dada salida y una dada excitación, la realimentación consiste en reinyectar a la entrada una porción de la salida de manera tal que sea parte de la excitación del mismo sistema



En la asignatura de Control Automático I estudiaron la aplicación de la realimentación en los sistemas de control automático.

En *esta Asignatura* estudiaremos la realimentación negativa aplicada a los amplificadores electrónicos.

En la asignatura Circuitos Electrónicos II estudiarán la realimentación positiva aplicada a osciladores y generadores de señal.

LA REALIMENTACIÓN EN ELECTRÓNICA ANALÓGICA

- Estudiaremos las ventajas y desventajas de aplicar realimentación a los amplificadores electrónicos.
- Estudiaremos las topologías de amplificadores realimentados.
- Analizaremos distintas configuraciones de amplificadores transistorizados simples como circuitos realimentados.
- Analizaremos distintos circuitos empleando amplificadores operacionales como circuitos realimentados.
- Estudiaremos amplificadores electrónicos transistorizados de varias etapas realimentados.

RESUMEN DE LOS EFECTOS DE LA REALIMENTACIÓN EN LOS AMPLIFICADORES:

Ventajas de la Realimentación negativa

- ✓ Desensibilización de la ganancia frente a variación de parámetros.
- ✓ Reducción de las no-linealidades del amplificador
- ✓ Reducción de señales espurias
- ✓ Aumento del ancho de banda
- ✓ Reducción de los efectos de carga

Desventajas asociadas

- ❖ Reducción de la ganancia del amplificador
- ❖ Tendencia a la inestabilidad u oscilación

GANANCIA DEL AMPLIFICADOR REALIMENTADO (REALIMENTACIÓN NEGATIVA)

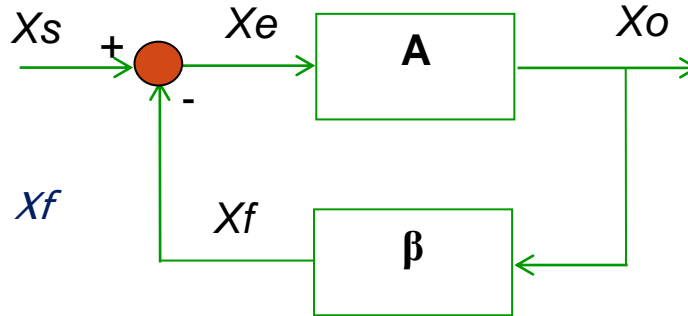
Señales:

de salida X_o

de entrada X_s

de realimentación X_f

de error X_e



$$X_s = X_e + X_f \quad X_e = \frac{X_o}{A}$$
$$X_f = \beta \cdot X_o$$

$$X_s = \frac{X_o}{A} + \beta \cdot X_o$$

Ganancia de lazo abierto: $A = \frac{X_o}{X_e}$

Ganancia de realimentación: $\beta = \frac{X_f}{X_o}$

Ganancia de lazo: $T = \beta \cdot A = \frac{X_f}{X_e}$

Ganancia de lazo cerrado: $A_r \equiv \frac{X_o}{X_s} = \frac{A}{1+T} = \frac{A}{1+\beta \cdot A}$

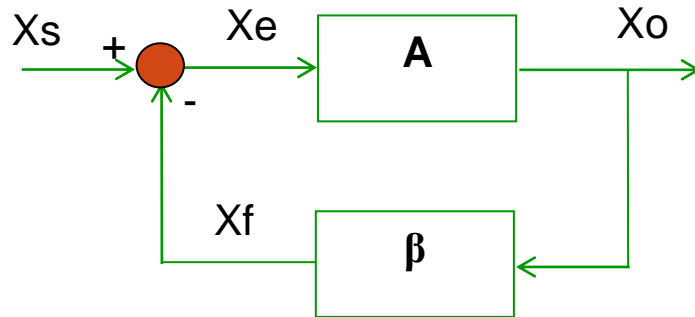
Convencionalmente la comparación entre X_s y X_f se realiza mediante una resta.

Así, la condición de realimentación negativa es

$$\beta \cdot A > 0$$

La realimentación negativa disminuye la ganancia: $A_r < A$

GANANCIA DEL AMPLIFICADOR REALIMENTADO (ejemplo numérico)



Ganancia de lazo abierto: $A = 1000$

Ganancia de realimentación: $\beta = 0,01$

Ganancia de lazo: $T = \beta \cdot A = 10$

Ganancia de lazo cerrado: $A_r = \frac{A}{1+T} = \frac{1000}{11} = 90,90$

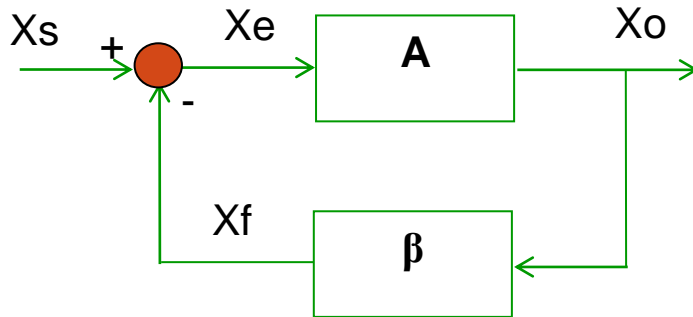
Señal de entrada: $X_s = 1$

Señal de error: $X_e = \frac{X_o}{A} = \frac{1}{1+T} X_s = 0,09090$

Señal de realimentación: $X_f = \beta \cdot X_o = \frac{T}{1+T} X_s = 0,9090$

Señal de salida: $X_o = \frac{A}{1+T} X_s = 90,90$

DESENSIBILIZACIÓN DE LA GANANCIA DEL AMPLIFICADOR REALIMENTADO



Supongamos que la ganancia A sufre una variación ΔA .
¿Cómo se refleja esta variación en A_r ?

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

Si $\Delta A \ll A$, aplicamos diferenciación: $\Delta A_r \cong \frac{dA_r}{dA} \Delta A = \frac{1}{(1 + \beta A)^2} \Delta A$

Más interesante resulta determinar los efectos relativos:

$$\frac{\Delta A_r}{A_r} \cong \frac{1}{(1 + T)} \cdot \frac{\Delta A}{A}$$

Las variaciones relativas de A_r se reducen $(1 + A\beta)$ veces respecto de las de A

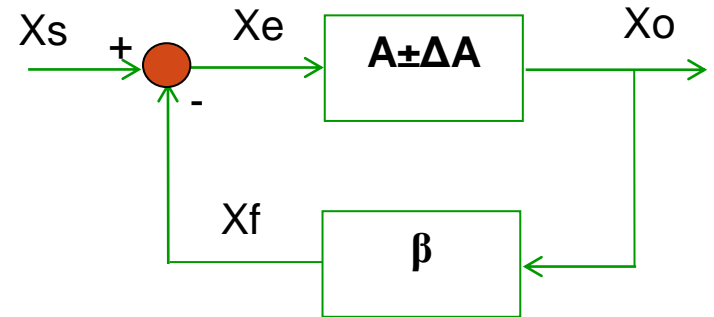
DESENSIBILIZACIÓN DE LA GANANCIA DEL AMPLIFICADOR REALIMENTADO (ejemplo numérico)

$$A = 1000 \quad \Delta A = 220 \quad \frac{\Delta A}{A} = 0,22 = 22\%$$

$$\beta = 0,01$$

$$T = \beta \cdot A = 10$$

$$A_r = \frac{A}{1+T} = \frac{1000}{11} = 90,90$$

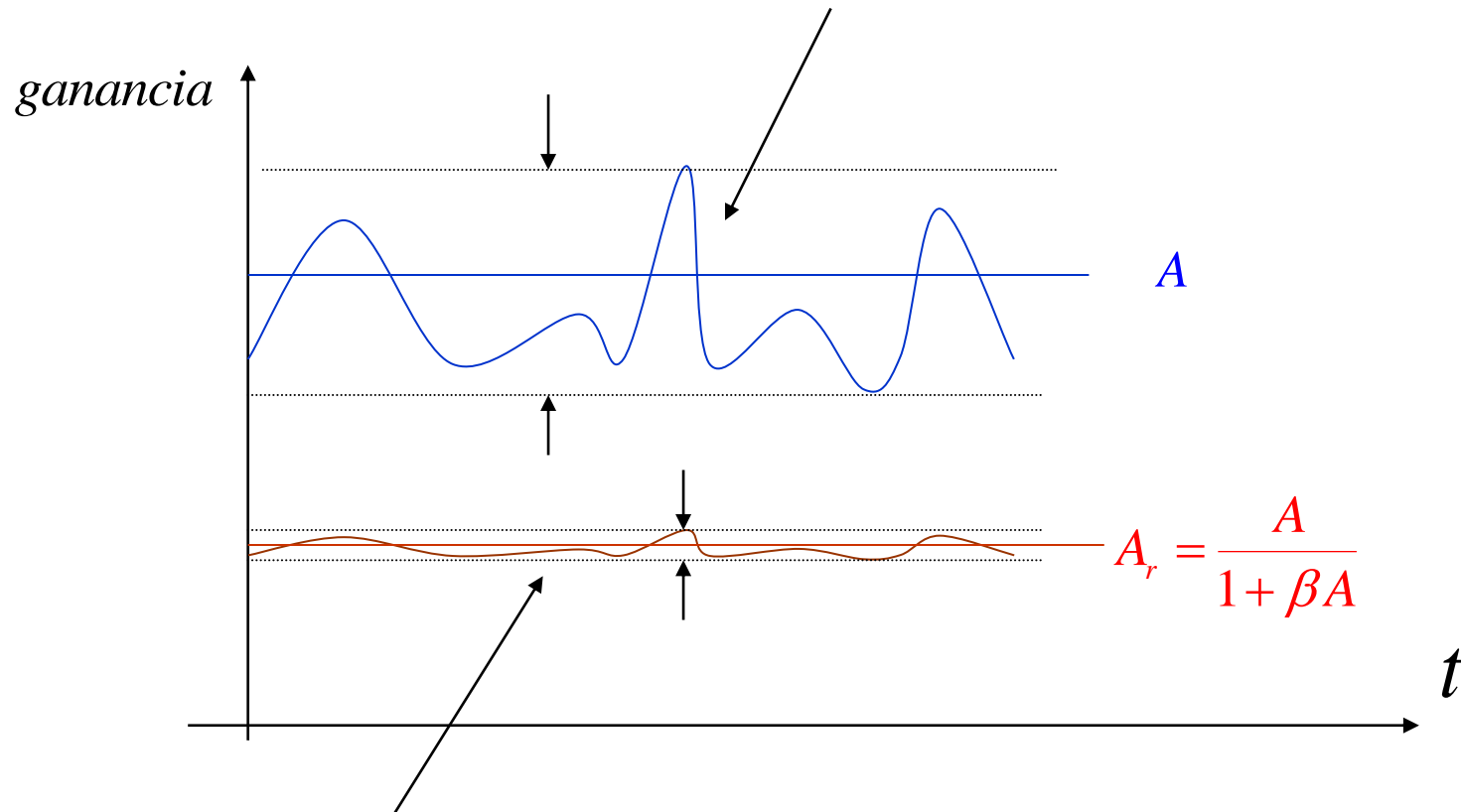


variación absoluta : $\Delta A_r \cong \frac{1}{(1+T)^2} \Delta A = 1,82$ $(1+T)^2 = 121$ veces menor que ΔA

variación relativa : $\frac{\Delta A_r}{A_r} \cong \frac{1}{(1+T)} \cdot \frac{\Delta A}{A} = 2\%$ $(1+T) = 11$ veces menor que $\Delta A/A$

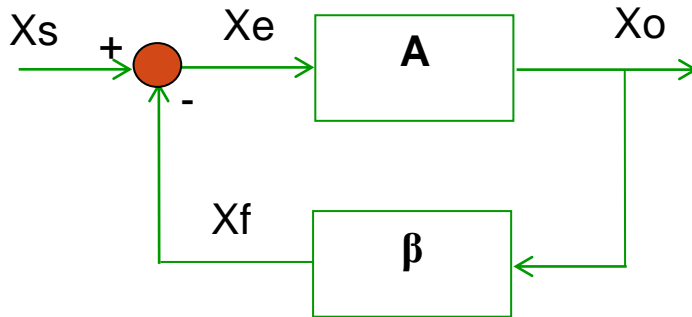
DESENSIBILIZACIÓN DE LA GANANCIA DEL AMPLIFICADOR REALIMENTADO (ejemplo)

Variación en el tiempo de la ganancia de un amplificador



Variación en el tiempo de la ganancia del amplificador realimentado

AMPLIFICADORES DE GANANCIA INFINITA REALIMENTADOS



$$A_r \equiv \frac{X_o}{X_s} = \frac{A}{1 + T} = \frac{A}{1 + \beta \cdot A}$$

$$\frac{A}{A_r} = 1 + T = 1 + \beta \cdot A$$

Si utilizamos un amplificador A con una ganancia mucho mayor a la A_r que deseamos:

$$\frac{A}{A_r} = 1 + T = 1 + \beta \cdot A \gg 1$$

$$1 \ll 1 + \beta \cdot A \cong \beta \cdot A$$

De lo que resulta:

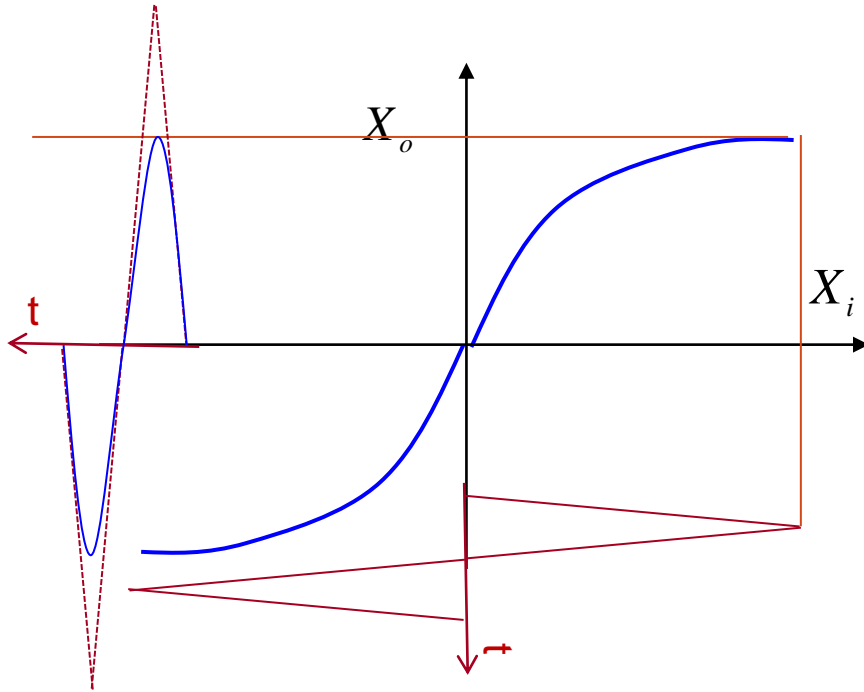
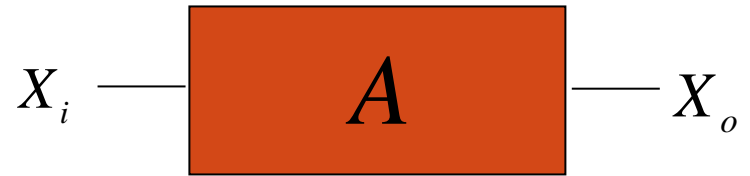
$$\beta \cong \frac{1}{A_r}$$

$$A_r \cong \frac{1}{\beta}$$

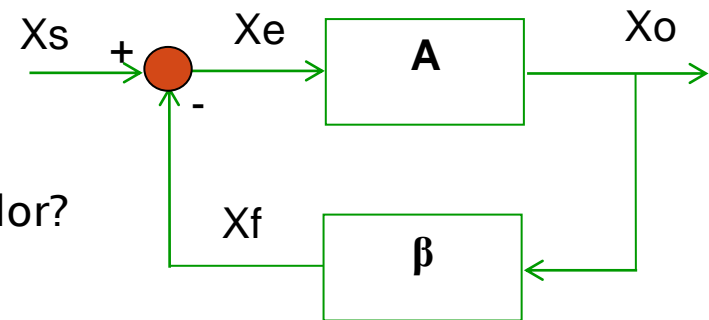
Es decir, la ganancia realimentada pasa a depender casi exclusivamente de β , siendo extremadamente insensible a no linealidades y variaciones paramétricas de A.

REDUCCIÓN DE LA DISTORSIÓN DEL AMPLIFICADOR REALIMENTADO

Consideremos el siguiente amplificador no lineal

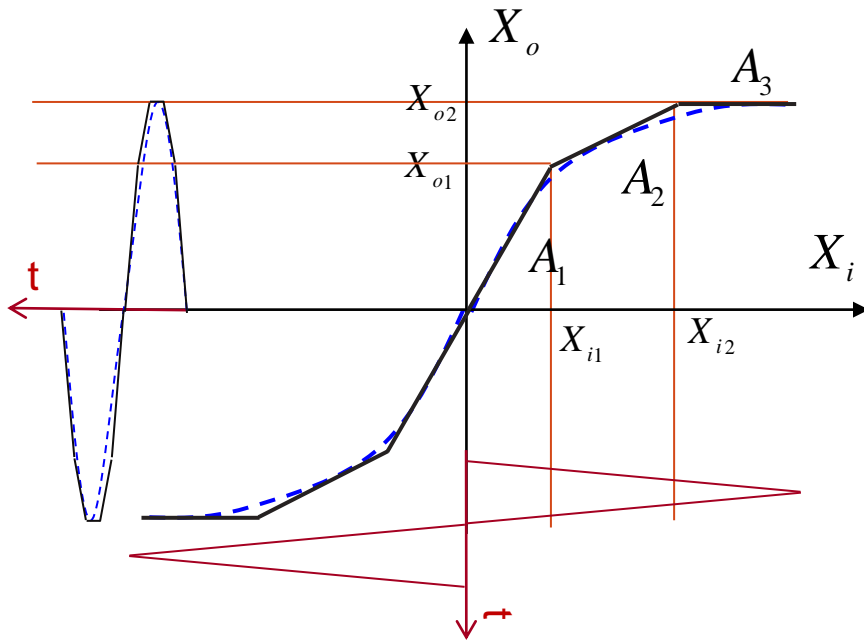


¿Qué sucede si realimentamos este amplificador?



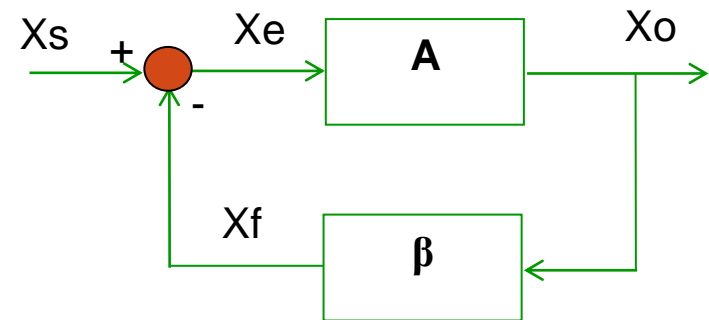
REDUCCIÓN DE LA DISTORSIÓN DEL AMPLIFICADOR REALIMENTADO

Consideremos el siguiente amplificador no lineal X_i — A — X_o



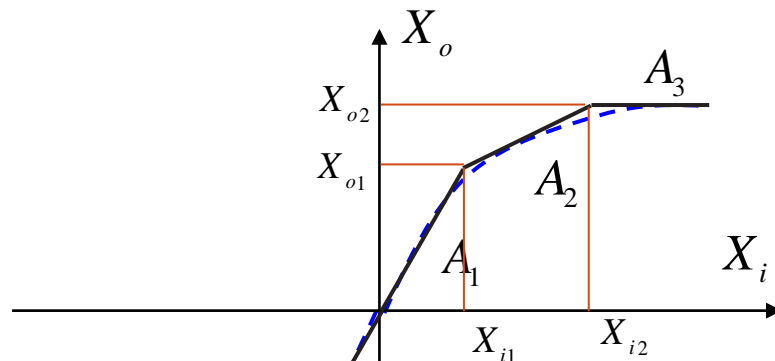
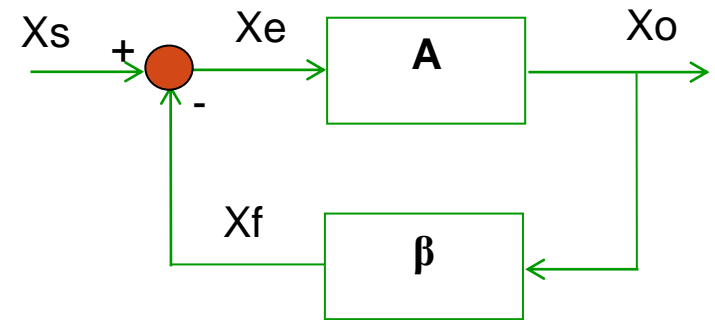
La expresión $A_r = \frac{A}{1 + \beta A}$
fue obtenida a partir de suponer linealidad

Vamos a aproximar la característica no lineal por una linealidad a tramos, así podemos aplicar la expresión lineal para cada tramo.



REDUCCIÓN DE LA DISTORSIÓN DEL AMPLIFICADOR REALIMENTADO

Consideremos el siguiente amplificador no lineal



$$A_{r1} = \frac{A_1}{1 + \beta A_1} \quad A_{r2} = \frac{A_2}{1 + \beta A_2} \quad A_{r3} = \frac{A_3}{1 + \beta A_3} = 0$$

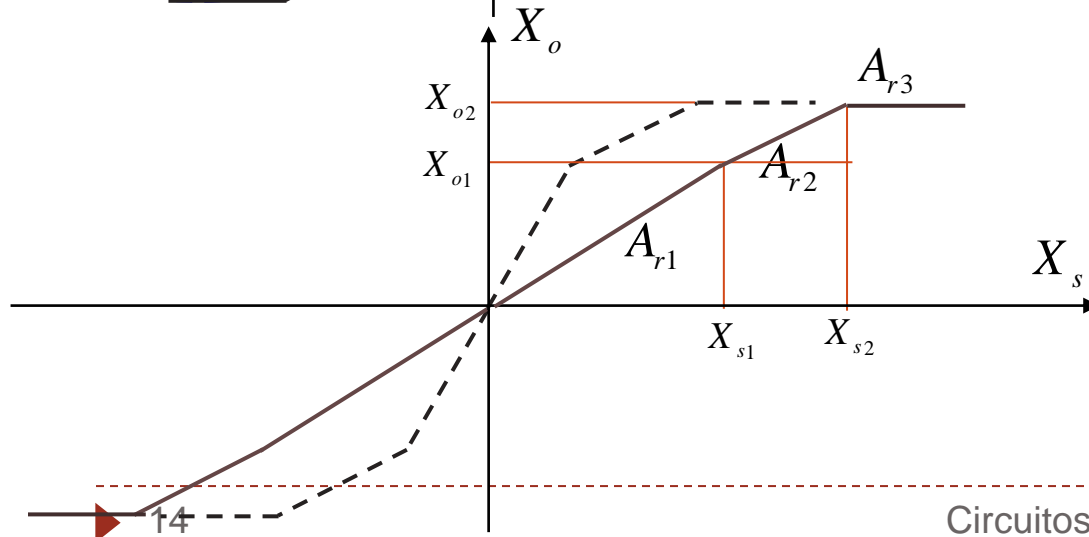
$$X_{s1} = (1 + \beta \cdot A_1) X_{i1}$$

$$X_{s2} - X_{s1} = (1 + \beta \cdot A_2) (X_{i2} - X_{i1})$$

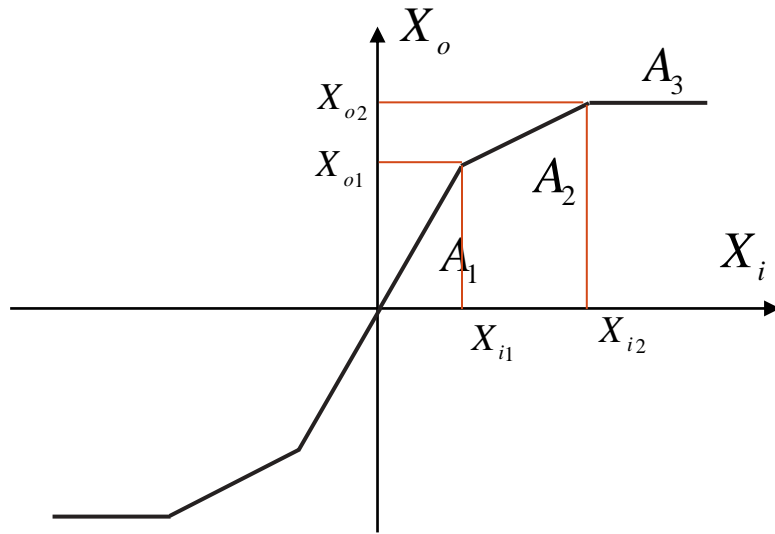
Se verifica que:

$$\frac{A_{r1} - A_{r2}}{A_{r1}} = \frac{1}{1 + \beta A_2} \cdot \frac{A_1 - A_2}{A_1}$$

Ganamos linealidad a costa de perder ganancia



REDUCCIÓN DE LA DISTORSIÓN DEL AMPLIFICADOR REALIMENTADO (ejemplo numérico)



$$A_1 = 1000$$

$$X_{i1} = 1m, \quad X_{o1} = 1$$

$$A_2 = 400$$

$$X_{i2} = 2,5m, \quad X_{o2} = 1,6$$

$$A_3 = 0$$

$$\frac{A_1 - A_2}{A_1} = 60\%$$

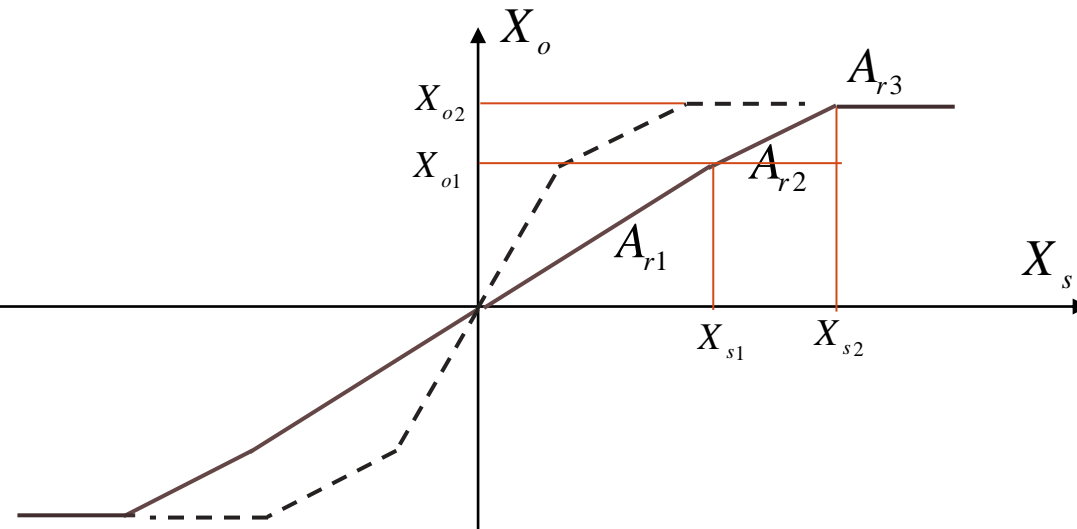
$$\beta = 0,01$$

$$A_{r1} = \frac{A_1}{1 + \beta A_1} = 90,90 \quad X_{s1} = 11m$$

$$A_{r2} = \frac{A_2}{1 + \beta A_2} = 80 \quad X_{s2} = 18,5m$$

$$A_{r3} = \frac{A_3}{1 + \beta A_3} = 0$$

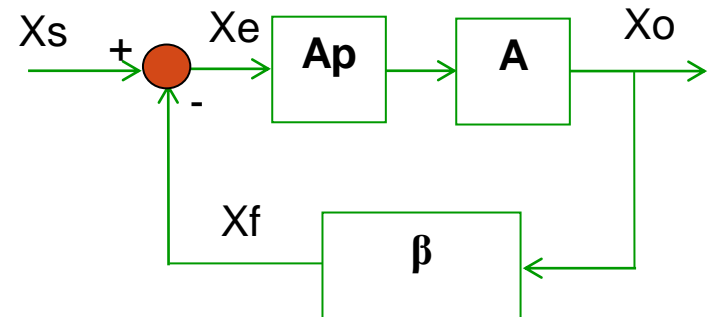
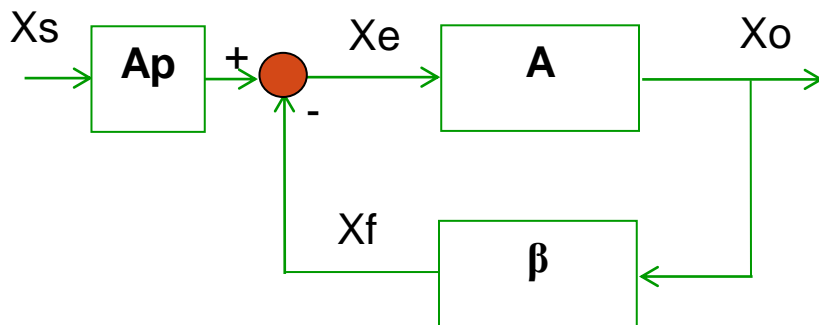
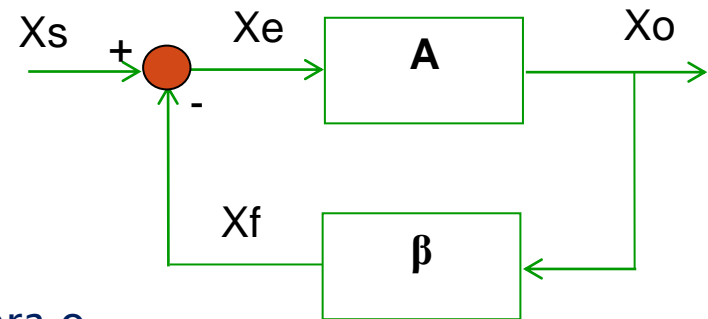
$$\frac{A_{r1} - A_{r2}}{A_{r1}} = 12\%$$



PREAMPLIFICADOR PARA RECUPERACIÓN DE GANANCIA DEL AMPLIFICADOR REALIMENTADO

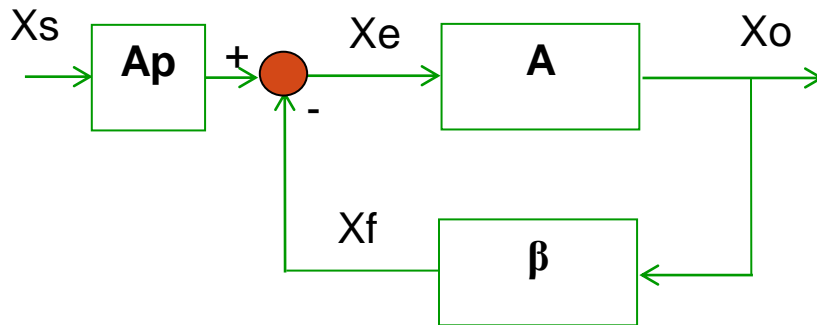


Al realimentar perdemos ganancia. Podemos recuperarla preamplificando la señal, ya sea fuera o dentro del lazo de realimentación



¿Cuál es la mejor opción?

PREAMPLIFICADOR PARA RECUPERACIÓN DE GANANCIA DEL AMPLIFICADOR REALIMENTADO



Preamplificación fuera del lazo:

$$A_T = A_p \cdot A_r = A_p \frac{A}{1+T}$$

$$T = A\beta$$

Para recuperar la ganancia original debemos diseñar A_p , β de manera que $A_p = 1 + T$

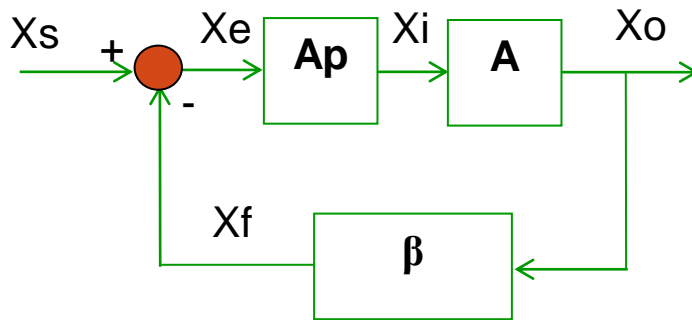
En tanto, la sensibilidad de ganancia (o distorsión), resulta

$$\Delta A_T = A_p \cdot \Delta A_r \cong A_p \cdot \frac{1}{(1+T)^2} \cdot \Delta A = \frac{1}{A_p} \cdot \Delta A$$

Por lo tanto, cuanto mayor sea A_p (y mayor sea la realimentación β), menor será la sensibilidad de la ganancia y menor será la distorsión del amplificador completo.

Sin embargo cuanto mayor sea A_p , mayor será el nivel de señal a su salida, por lo que hay un límite práctico para la ganancia A_p . No parece tener sentido que A_p alcance valores próximos o superiores a A .

PREAMPLIFICADOR PARA RECUPERACIÓN DE GANANCIA DEL AMPLIFICADOR REALIMENTADO



Preamplificación dentro del lazo

$$A_r = \frac{A_p A}{1 + T}$$
$$T = A_p A \beta$$

Igual que en el caso anterior, la ganancia original se recupera con $A_p = 1 + T$

De la misma manera, se llega a la misma expresión para la sensibilidad de ganancia (o distorsión):

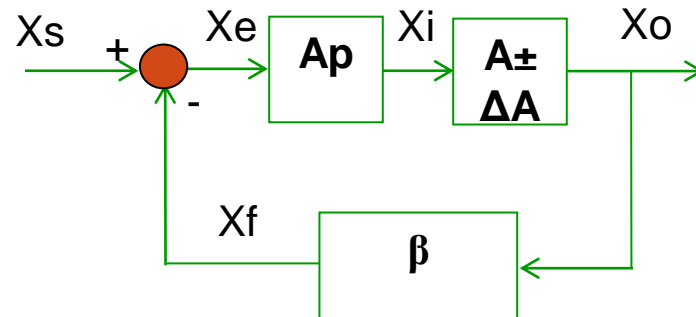
$$\Delta A_r \cong \frac{1}{(1 + T)^2} \cdot (A_p \Delta A) = \frac{1}{A_p} \cdot \Delta A$$

la diferencia es que en este caso el nivel de señal a la salida de A_p no se altera cuando se incrementa A_p (y $1/\beta$), pues $X_i = X_o/A = X_s$. lo que sucede al incrementar A_p (y $1/\beta$) es que se reduce la señal de error X_e . por lo tanto, el límite práctico del caso anterior no existe y pueden elegirse ganancias A_p incluso mayores a A .

PREAMPLIFICADOR PARA RECUPERACIÓN DE GANANCIA DEL AMPLIFICADOR REALIMENTADO (ejemplo numérico)



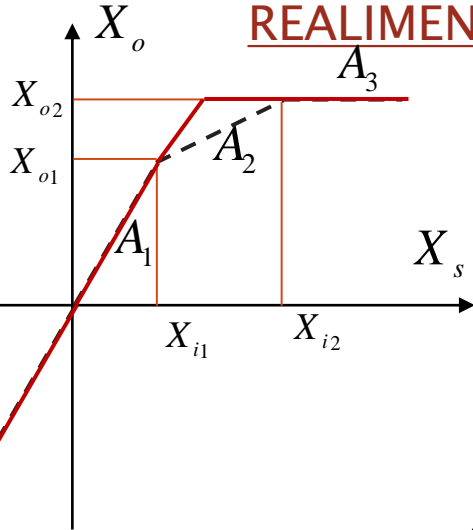
Objetivo de diseño: reducir al 2% (11 veces) la sensibilidad de ganancia, conservando la ganancia nominal.



$$\left. \begin{aligned} A_r &= \frac{A_p A}{1+T} = A \\ T &= A_p A \beta = 10 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \begin{cases} A_p = 11 \\ \beta = \frac{A_p - 1}{A_p} \cdot \frac{1}{A} = \frac{1}{1100} \end{cases}$$

$$\Delta A_r \cong \frac{1}{(1+T)^2} \cdot (A_p \Delta A) = \frac{1}{1+T} \cdot \Delta A = 20 \quad (2\%)$$

PREAMPLIFICADOR PARA RECUPERACIÓN DE GANANCIA DEL AMPLIFICADOR REALIMENTADO (ejemplo numérico)



$$A_1 = 1000$$

$$A_2 = 400$$

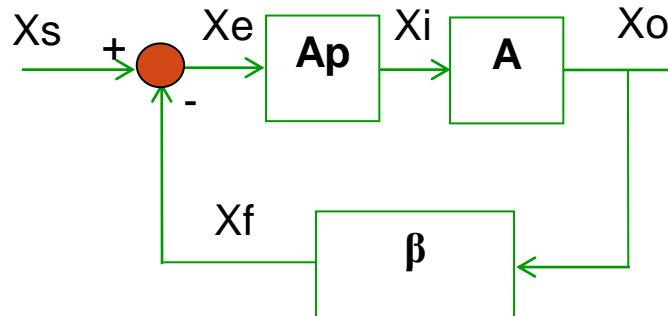
$$A_3 = 0$$

$$\frac{A_1 - A_2}{A_1} = 60\%$$

$$X_{i1} = 1m, \quad X_{o1} = 1$$

$$X_{i2} = 2,5m, \quad X_{o2} = 1,6$$

Objetivo de diseño: reducir 5 veces la distorsión, conservando la ganancia nominal A_1 .



$$A_{r1} = \frac{A_p A_1}{1 + T_1} = A_1$$

$$T_2 = A_p A_2 \beta = 4$$

$$\left\{ \begin{array}{l} T_1 = A_p A_1 \beta = \frac{A_1}{A_2} T_2 = 2,5 T_2 = 10 \\ A_p = 1 + T_1 = 11 \\ \beta = \frac{A_p - 1}{A_p} \cdot \frac{1}{A_1} = \frac{1}{1100} \end{array} \right.$$

$$A_{r1} = \frac{A_p A_1}{1 + \beta A_p A_1} = 1000$$

$$A_{r2} = \frac{A_p A_2}{1 + \beta A_p A_2} = 880$$

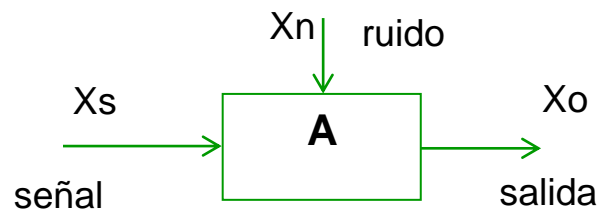
$$A_{r3} = \frac{A_p A_3}{1 + \beta A_p A_3} = 0$$

$$\frac{A_{r1} - A_{r2}}{A_{r1}} = 12\%$$

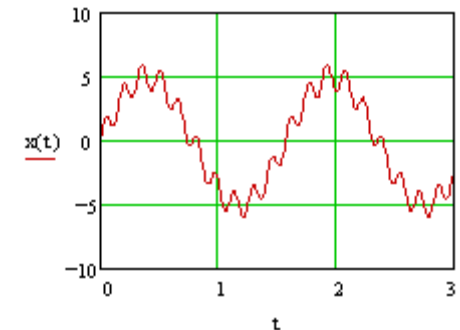
Distorsión:
$$\frac{A_{r1} - A_{r2}}{A_{r1}} = \frac{1}{1 + \beta \cdot A_p \cdot A_2} \cdot \frac{A_1 - A_2}{A_1}$$

MEJORAMIENTO DE LA RELACIÓN SEÑAL-RUIDO CON REALIMENTACIÓN

Determinaremos el efecto de la realimentación negativa sobre perturbaciones, que en el contexto de amplificadores llamaremos ruido.



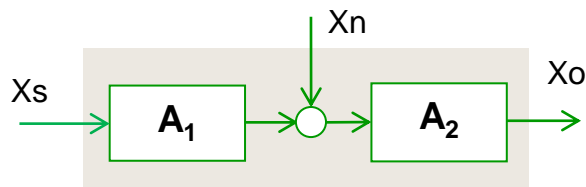
Señal de salida
con ruido



Hay distintas fuentes de ruido como la interferencia electromagnética, el zumbido de fuente, el ruido de medición, etc.

Consideraremos el siguiente modelo lineal del amplificador con entradas de señal y ruido. La ganancia total A es descompuesta en A1 y A2, con la entrada de ruido entre ambas.

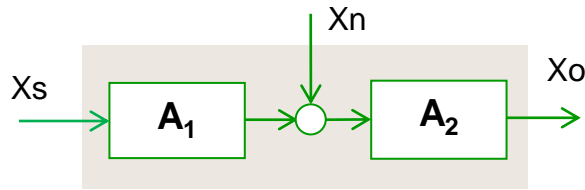
Dependiendo de la fuente de ruido es cómo se repartirá la ganancia entre A1 y A2.



$$X_o = X_{os} + X_{on} = A_1 A_2 X_s + A_2 X_n$$

$$\frac{SNR_o}{SNR_i} = A_1$$

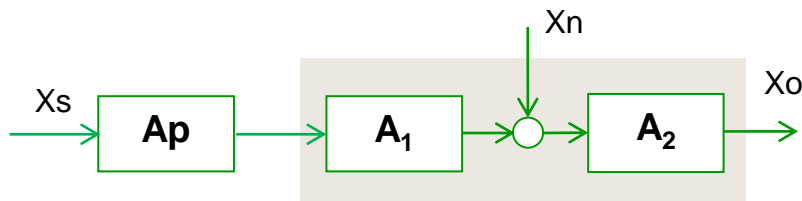
MEJORAMIENTO DE LA RELACIÓN SEÑAL-RUIDO CON REALIMENTACIÓN



$$X_o = X_{os} + X_{on} = A_1 A_2 X_s + A_2 X_n$$

$$\frac{SNR_o}{SNR_i} = A_1$$

La forma de mejorar la relación señal ruido consiste en anteponer ganancia a la entrada de ruido:



$$X_o = X_{os} + X_{on} = A_p A_1 A_2 X_s + A_2 X_n$$

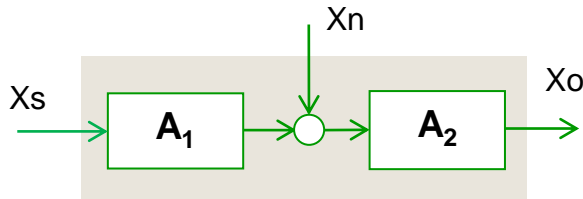
$$\frac{SNR_o}{SNR_i} = A_p A_1$$

Así, se mantiene el nivel de ruido a la salida, pero se eleva el de señal.

El aumento de la ganancia total y el nivel de señal de salida imponen un límite práctico para la ganancia A_p .

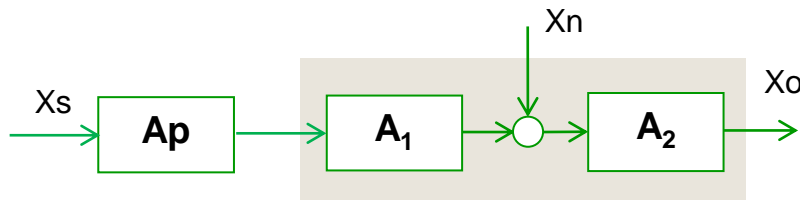
La solución consiste en realimentar el amplificador para recuperar la ganancia original, pudiendo así incrementar A_p a valores más grandes.

MEJORAMIENTO DE LA RELACIÓN SEÑAL-RUIDO CON REALIMENTACIÓN



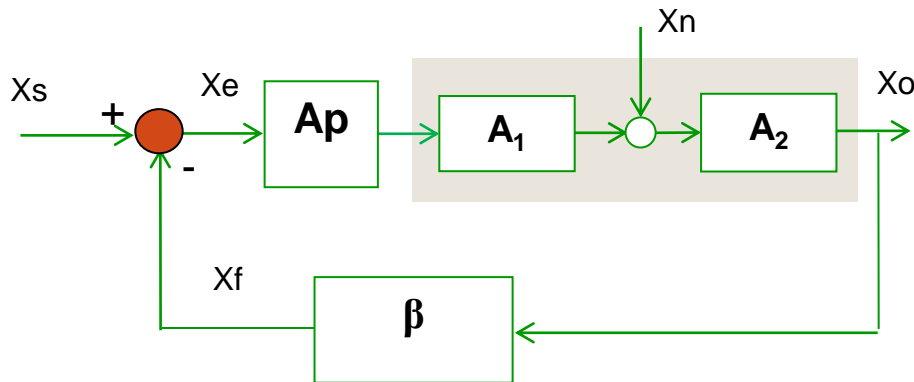
$$X_o = X_{os} + X_{on} = A_1 A_2 X_s + A_2 X_n$$

$$\frac{SNR_o}{SNR_i} = A_1$$



$$X_o = X_{os} + X_{on} = A_p A_1 A_2 X_s + A_2 X_n$$

$$\frac{SNR_o}{SNR_i} = A_p A_1$$



$$X_o = X_{os} + X_{on} = \frac{A_p A_1 A_2}{1 + T} X_s + \frac{A_2}{1 + T} X_n$$

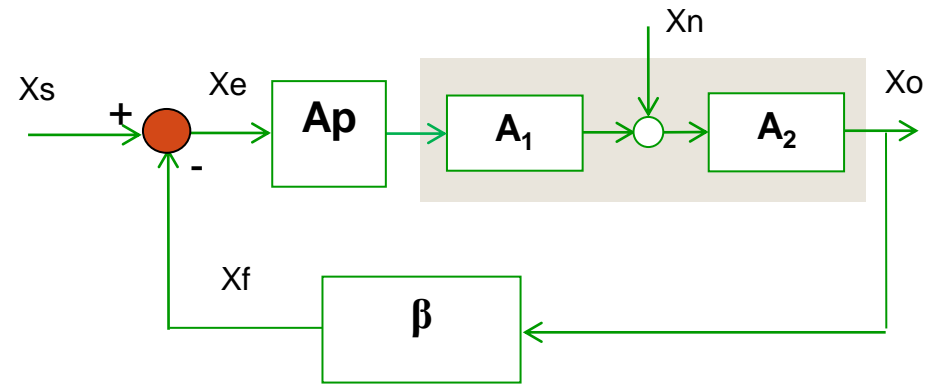
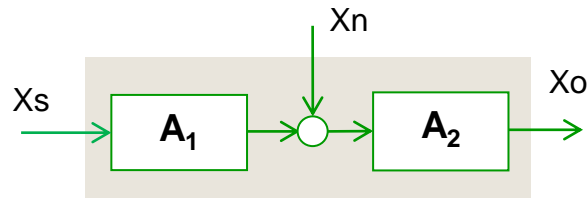
$$T = A_p A_1 A_2 \beta$$

$$\frac{SNR_o}{SNR_i} = A_p A_1$$

Eligiendo $A_p = 1 + T$ se preserva el nivel de señal original y se atenúa A_p veces el ruido:

$$X_o = X_{os} + X_{on} = A_1 A_2 X_s + \frac{A_2}{A_p} X_n$$

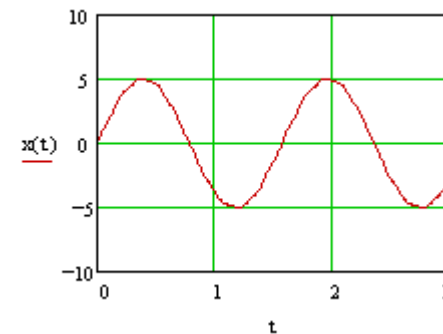
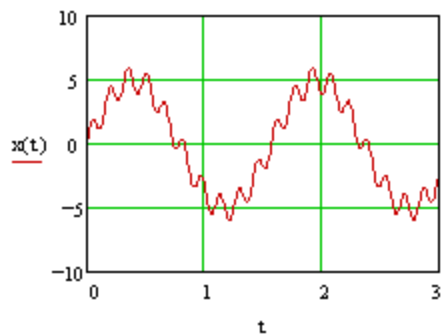
MEJORAMIENTO DE LA RELACIÓN SEÑAL-RUIDO CON REALIMENTACIÓN



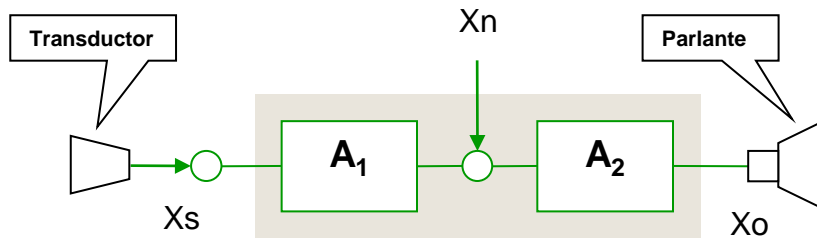
$$A_p = 1 + T$$

$$X_o = X_{os} + X_{on} = A_1 A_2 X_s + A_2 X_n$$

$$X_o = X_{os} + X_{on} = A_1 A_2 X_s + \frac{A_2}{A_p} X_n$$



MEJORAMIENTO DE LA RELACIÓN SEÑAL-RUIDO CON REALIMENTACIÓN (ejemplo numérico)



$$A_1 = 40 \quad A_2 = 25$$

Señal de entrada: sinusoidal,

$$\hat{X}_s = 1mV \quad f_s = 1000Hz$$

Ruido: componente fundamental

$$\hat{X}_n = 20mV \quad f_n = 100Hz$$

$$X_o = A_1 A_2 X_s + A_2 X_n = 1000 X_s + 25 X_n \quad \begin{cases} \hat{X}_{os} = 1V \\ \hat{X}_{on} = 500mV \end{cases}$$

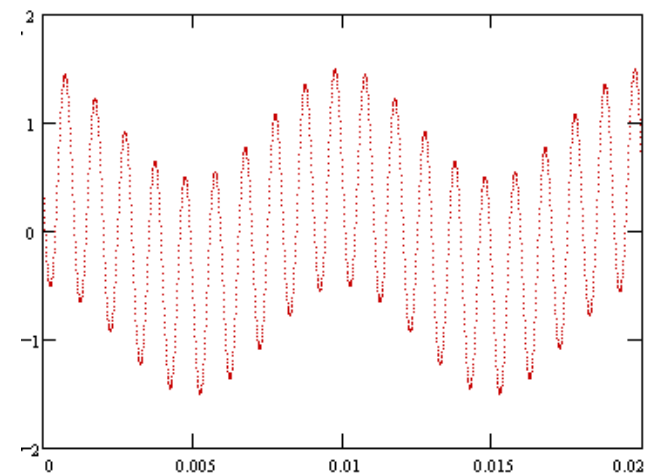
$$SNR_i = 0,05$$

$$SNR_o = 40 SNR_i = 2$$

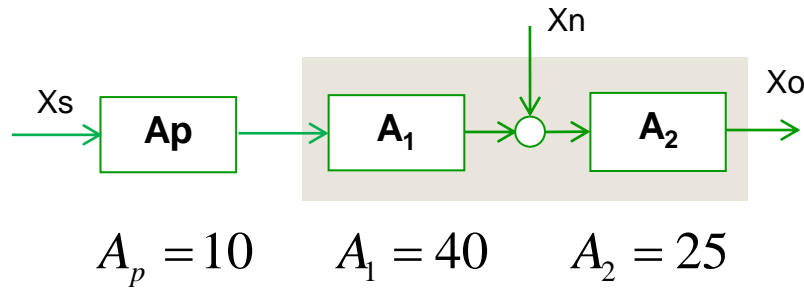
Se pretende mejorar la relación señal ruido 10 veces

El amplificador tiene un zumbido de fuente que podemos representar mediante una señal de ruido equivalente X_n a la entrada de A_2

Efecto del ruido de fuente sobre la salida

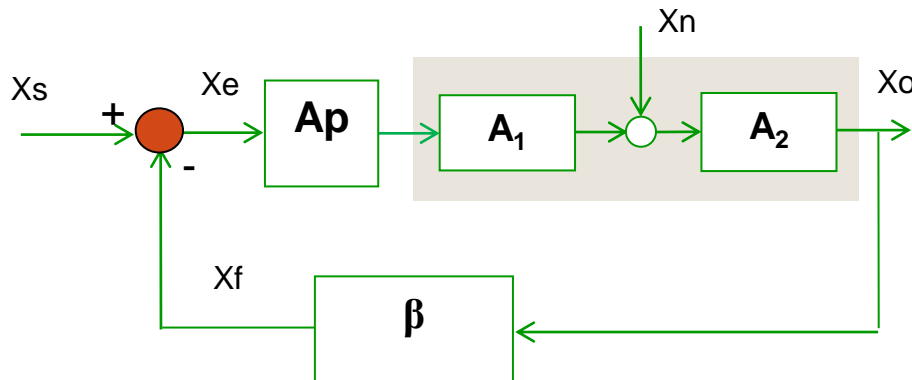


MEJORAMIENTO DE LA RELACIÓN SEÑAL-RUIDO CON REALIMENTACIÓN (ejemplo numérico)



Para mejorar la SNR 10 veces debemos amplificar la señal (y no el ruido) 10 veces

$$X_o = A_p A_1 A_2 X_s + A_2 X_n = 10000 X_s + 25 X_n \quad \left\{ \begin{array}{l} \hat{X}_{os} = 10V \\ \hat{X}_{on} = 500mV \end{array} \right. \quad SNR_o = 10 \times 40 SNR_i = 20$$

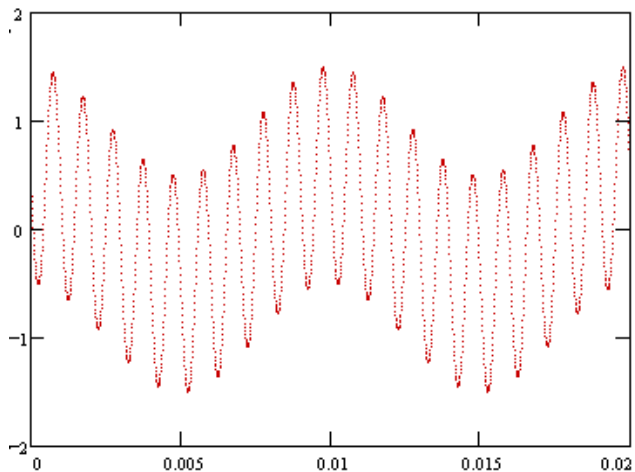
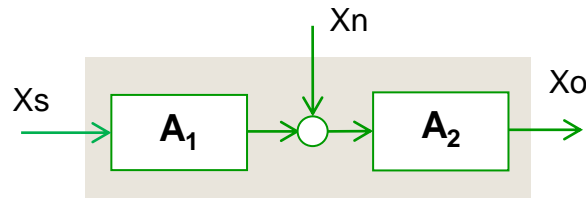


$$A_p = 1 + T = 1 + A_p A_1 A_2 \beta = 10$$

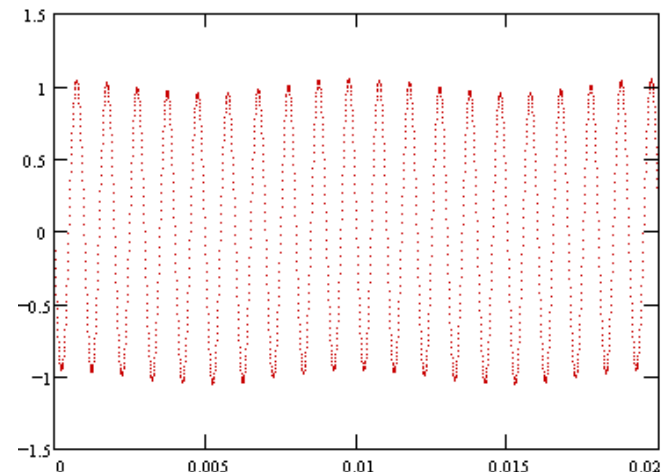
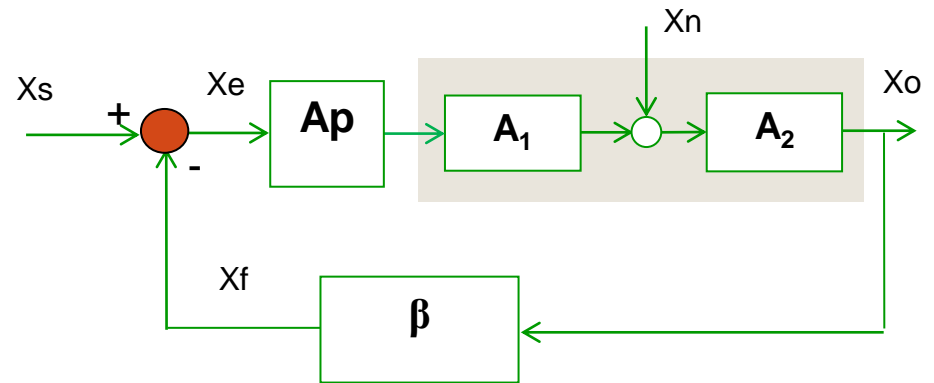
$$\beta = \frac{A_p - 1}{A_p} \cdot \frac{1}{A_1 A_2} = 0,9 \times 10^{-3}$$

$$X_o = X_{os} + X_{on} = A_1 A_2 X_s + \frac{A_2}{A_p} X_n = 1000 X_s + 2,5 X_n \quad \left\{ \begin{array}{l} \hat{X}_{os} = 1V \\ \hat{X}_{on} = 50mV \end{array} \right. \quad SNR_o = 10 \times 40 SNR_i = 20$$

MEJORAMIENTO DE LA RELACIÓN SEÑAL-RUIDO CON REALIMENTACIÓN (ejemplo numérico)



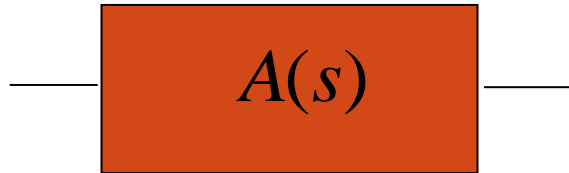
$$\left. \begin{array}{l} \hat{X}_{os} = 1V \\ \hat{X}_{on} = 500mV \end{array} \right\} SNR_i = 2$$



$$\left. \begin{array}{l} \hat{X}_{os} = 1V \\ \hat{X}_{on} = 50mV \end{array} \right\} SNR_o = 20$$

AUMENTO DEL ANCHO DE BANDA DEL AMPLIFICADOR REALIMENTADO

Consideremos un amplificador con una respuesta en frecuencia del tipo pasa-bajos de primer orden.



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

A_m es la ganancia del amplificador en bajas frecuencias.

ω_H es el ancho de banda del amplificador, o frecuencia de corte.

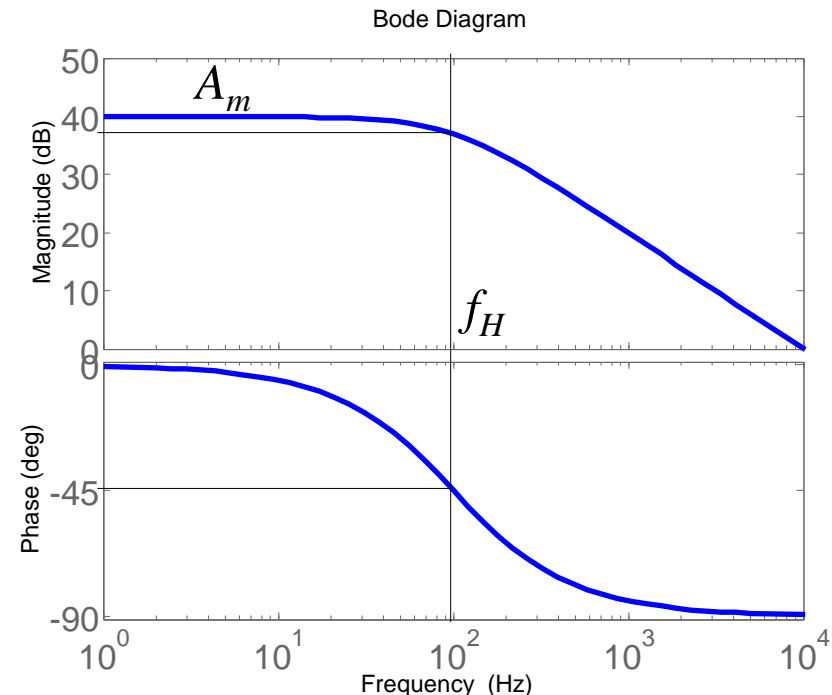
A esta frecuencia la ganancia cae 3dB y la fase se retrasa 45°

ABW es el producto ganancia x ancho de banda, factor de mérito muy usado

$$A_m = 100 \quad (40dB)$$

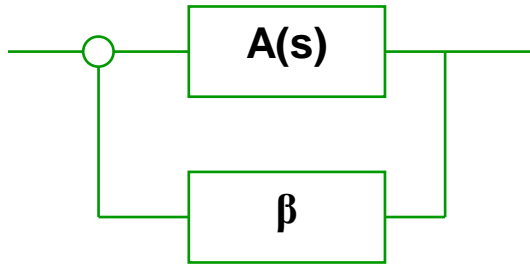
$$\omega_H = 2\pi 100 \text{ r/s} \quad (f_H = 100Hz)$$

$$ABW = A_m \times f_H = 10kHz$$



AUMENTO DEL ANCHO DE BANDA DEL AMPLIFICADOR REALIMENTADO

Ahora realimentemos negativamente el amplificador con una ganancia β real.



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

$$A_r(s) = \frac{A(s)}{1 + \beta A(s)}$$

$$A_r(s) = \frac{A_m}{1 + \frac{s}{\omega_H}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{A_m \beta}{1 + \frac{s}{\omega_H}}} = \frac{A_m}{1 + A_m \beta + \frac{s}{\omega_H}} = \frac{A_m}{1 + A_m \beta} \times \frac{1}{1 + \frac{s}{\omega_H (1 + A_m \beta)}}$$

$$A_r(s) = \frac{A_{mr}}{1 + \frac{s}{\omega_{Hr}}}$$

$$A_{mr} = \frac{A_m}{1 + A_m \beta}$$

$$\omega_{Hr} = (1 + A_m \beta) \cdot \omega_H$$

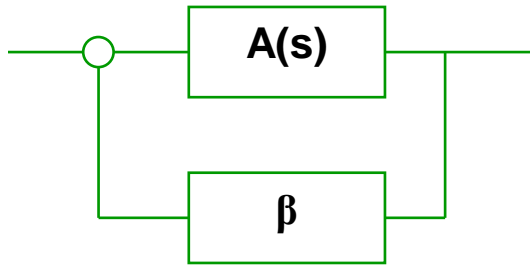
La ganancia de baja frecuencia se reduce $(1 + \beta A_m)$ veces.

El ancho de banda aumenta $(1 + \beta A_m)$ veces.

El producto ganancia x ancho de banda se mantiene constante:

$$ABW_r = A_{mr} \times \omega_{Hr} = \frac{A_m}{1 + \beta A_m} \times (1 + \beta A_m) \cdot \omega_H = A_m \times \omega_H = ABW$$

AUMENTO DEL ANCHO DE BANDA DEL AMPLIFICADOR REALIMENTADO (ejemplo numérico)



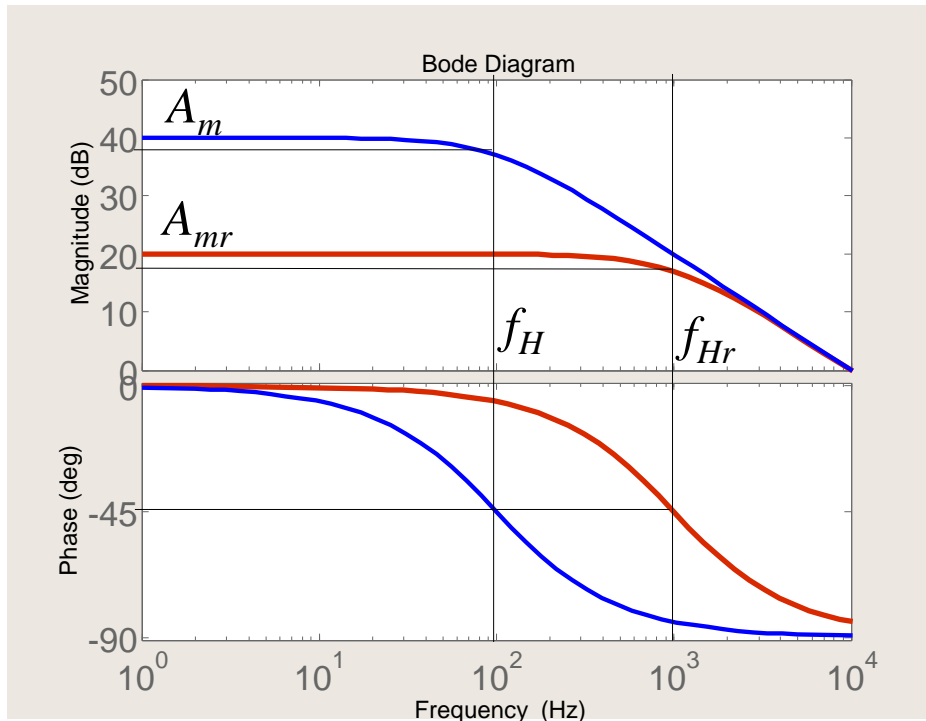
$$A(s) = \frac{A_m}{1 + s/\omega_H}$$

$$A_m = 100 \quad (40dB)$$

$$\omega_H = 2\pi 100 \text{ r/s} \quad (f_H = 100Hz)$$

$$ABW = A_m \times f_H = 10kHz$$

$$\beta = 0,09, \quad 1 + \beta A_m = 10$$

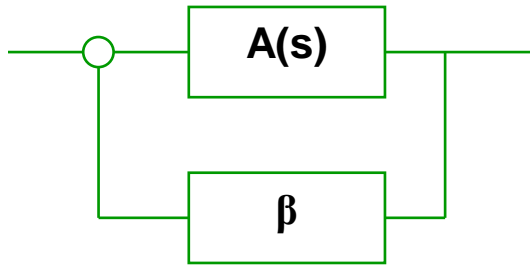


$$A_r(s) = \frac{A_{mr}}{1 + s/\omega_{Hr}}$$

$$A_{mr} = \frac{A_m}{1 + A_m \beta} = 10$$

$$f_{Hr} = (1 + A_m \beta) f_H = 1kHz$$

TENDENCIA A LA INESTABILIDAD DEL AMPLIFICADOR REALIMENTADO



$$A_r(s) = \frac{A(s)}{1 + \beta A(s)}$$

La realimentación negativa se caracteriza por tener una ganancia de lazo T positiva. Cuando la ganancia A del amplificador (o β), depende de la frecuencia, T resulta una función que toma valores complejos. Así el concepto de realimentación positiva o negativa se relativiza y pasa a depender de la frecuencia.

Si $A(s)$ tiene un solo polo, la diferencia de fase de la realimentación entre frecuencia 0 y frecuencia infinita es 90° , por lo que no alcanza a invertir el signo de la parte real. Sin embargo, cuando $A(s)$ tiene varios polos, la parte real de la ganancia de lazo se puede hacer negativa e incluso se puede alcanzar la condición $T = -1$. Así, lo que a frecuencias bajas es realimentación negativa, a frecuencias altas pasa a ser realimentación positiva.

RESUMEN DE LOS EFECTOS DE LA REALIMENTACIÓN EN LOS AMPLIFICADORES:

Ventajas de la Realimentación negativa

- ✓ Desensibilización de la ganancia frente a variación de parámetros.
- ✓ Reducción de las no-linealidades del amplificador
- ✓ Reducción de señales espurias
- ✓ Aumento del ancho de banda
- ✓ Reducción de los efectos de carga

Desventajas asociadas

- ❖ Reducción de la ganancia del amplificador
- ❖ Tendencia a la inestabilidad u oscilación