Realimentación de los amplificadores

Introducción:

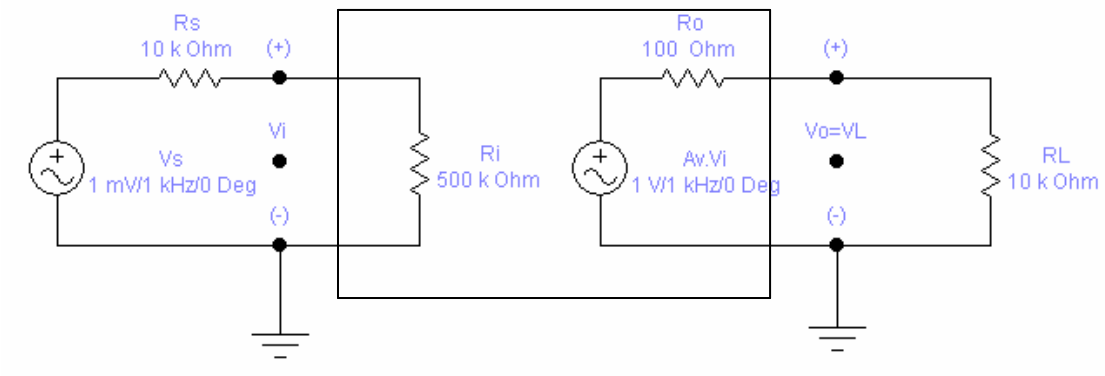
En este capítulo vamos a tratar la realimentación de los amplificadores, introduciendo el concepto de la realimentación negativa, mejoras de las características del amplificador realimentado, como así también los criterios de estabilidad que es necesario tener en cuenta al realimentar negativamente los amplificadores electrónicos.
La realimentación de los amplificadores negativamente, la trataremos en forma general para cualquier tipo de circuito amplificador; para ello, debemos previamente recordar la clasificación de los amplificadores en relación a los valores de sus impedancias de entrada y salida, en relación a las impedancias de la fuente de señal y de la carga respectivamente.De otra forma también, respecto al tipo de función de transferencia.

Amplificador de tensión:

Este amplificador suministra una tensión de salida proporcional a la tensión de entrada y su función de transferencia o factor de proporcionalidad resultan independientes de la resistencia de fuente (Ri) y carga (RL).
En el circuito equivalente de Thevenin de este amplificador, para que se cumplan las características mencionadas, debe ser Ri>>Rs y Ro<<RL. De esta manera se cumple que:

$Vs \approx Vi$

$Vo \approx Av.Vi \approx Av.Vs$



Para el amplificador ideal de tensión $Ri \equiv \infty$ $Ro = 0$

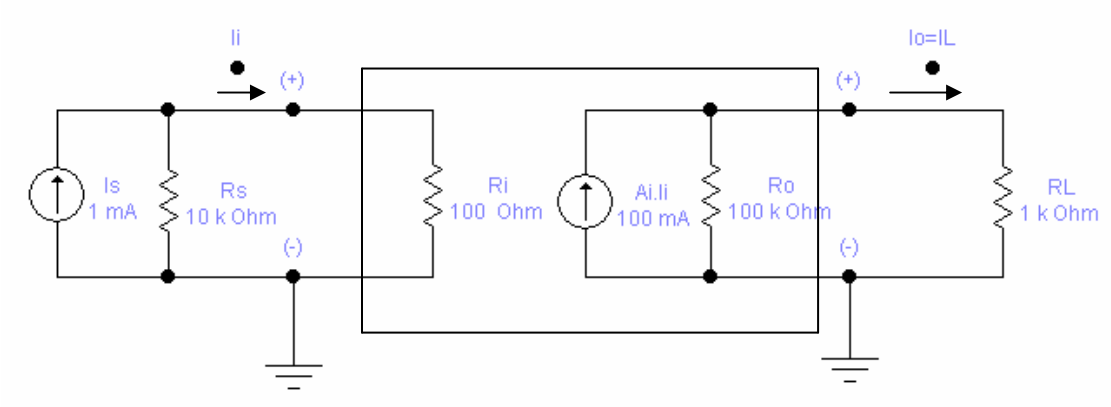
Amplificador de corriente:

El amplificador de corriente, suministra una corriente a la carga, proporcional a la corriente de la señal de entrada, siendo la función de transferencia o factor de proporcionalidad, independientes de las resistencias de fuente (Ri) y carga (RL).
Para este amplificador, conviene su representación, en el circuito equivalente de Norton, como muestra la figura. Para que se cumplan las características deseables debe ser Rs >>Ri
y Ro>>RL. Con estas características, se cumple:

$Ii \approx Is$

$IL \approx Ai.Ii \approx Ai.Is$

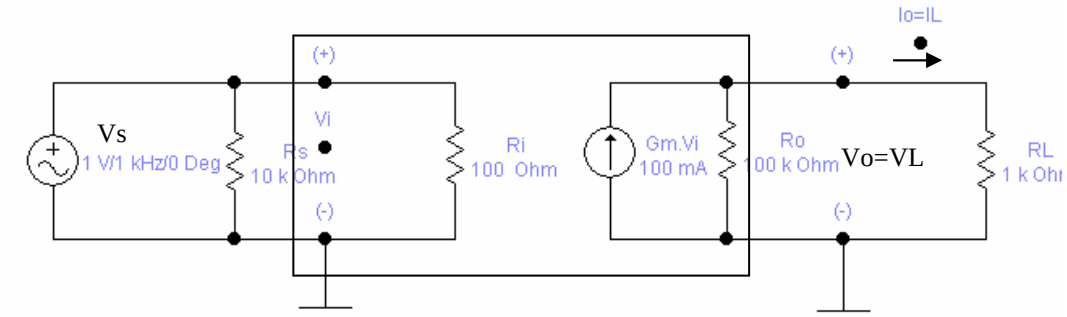
Para el amplificador ideal de corriente, se cumple Ri = 0 Ro ≡ ∞



<u>Amplificador de transconductancia:</u>

Este amplificador entrega una corriente a la carga proporcional a la tensión de de la señal de entrada. Este amplificador, se representa como un circuito equivalente de Norton, teniendo la fuente de corriente, característica de transconductancia. Para que este amplificador, cumpla con las condiciones deseadas, debe ser Ri >> Rs y Ro >>RL. Con estas características se cumple:

Vi ≈ Vs
IL ≈ Gm.Vi ≈Gm.Vs
En condiciones ideales Ri ≡ ∞ y Ro ≡ ∞

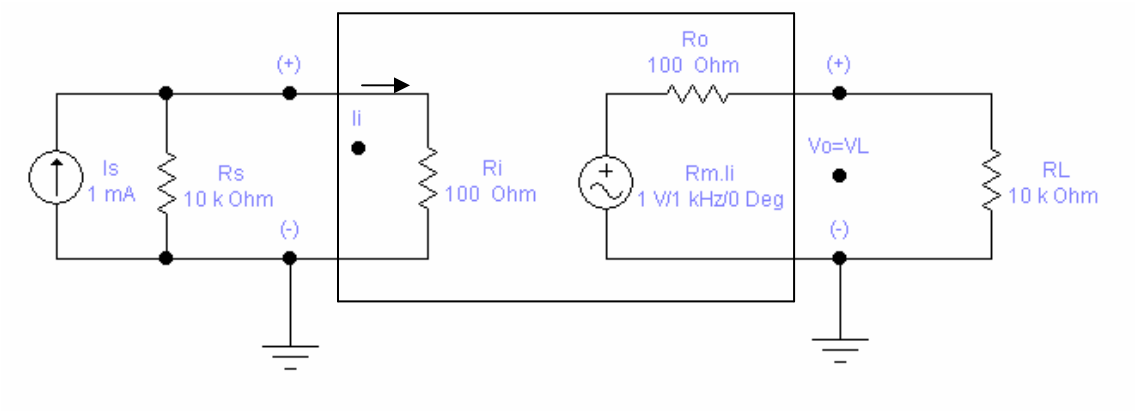


<u>Amplificador de tras impedancia o trasresistencia:</u>

Este amplificador, entrega una tensión a la carga RL, proporcional a la corriente de la señal de entradas. Para su representación circuital, se lo hace con un circuito equivalente de Thevenin donde la fuente de tensión dependiente, tiene características de trasresistencia "Rm".
El cumplimiento de estas características, exige Rs>>Ri y Ro << RL. Con estas condiciones se cumple:

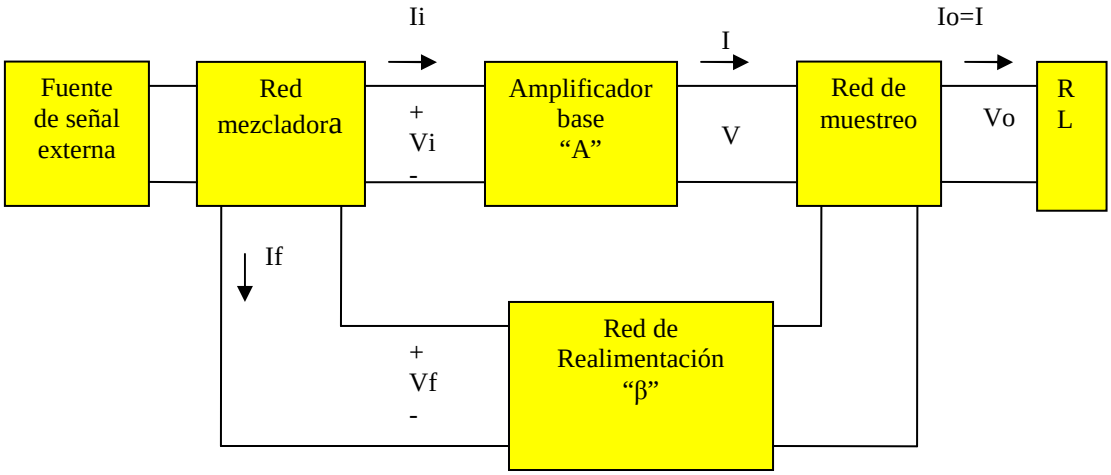
Is ≈ Ii
Vo ≈ Rm.Ii ≈ Rm.Is

En condiciones ideales Ri =0 y Ro = 0



El concepto de la realimentación:

Esta metodología, se puede aplicar a cualquiera de los amplificadores definidos anteriormente, y consiste en tomar una muestra de tensión o corriente (mediante un circuito de muestreo) y combinarla con la señal de entrada (en un circuito de realimentación), para luego a este conjunto de señales, introducirla a la entrada del amplificador base. El siguiente dibujo, muestra el diagrama de bloques de un amplificador "base", realimentado, con ganancia de transferencia "A" (que puede ser Av, Ai, Gm o Rm)



Fuente de señal:

Representa la señal eléctrica que se necesita amplificar, proveniente generalmente de un transductor; De acuerdo al tipo de fuente, se la puede representar como un circuito equivalente de Thevenin (una tensión eléctrica "Vs", seguida de una resistencia eléctrica "Rs"), o un circuito equivalente de Norton (una fuente de corriente eléctrica "Is", en paralelo con una resistencia eléctrica "Rs").

Red de realimentación "β":

Este bloque representa un cuadripolo constituido por una red pasiva formada por resistencias, capacitores e inductancias. Lo normal, es una configuración de resistencias.

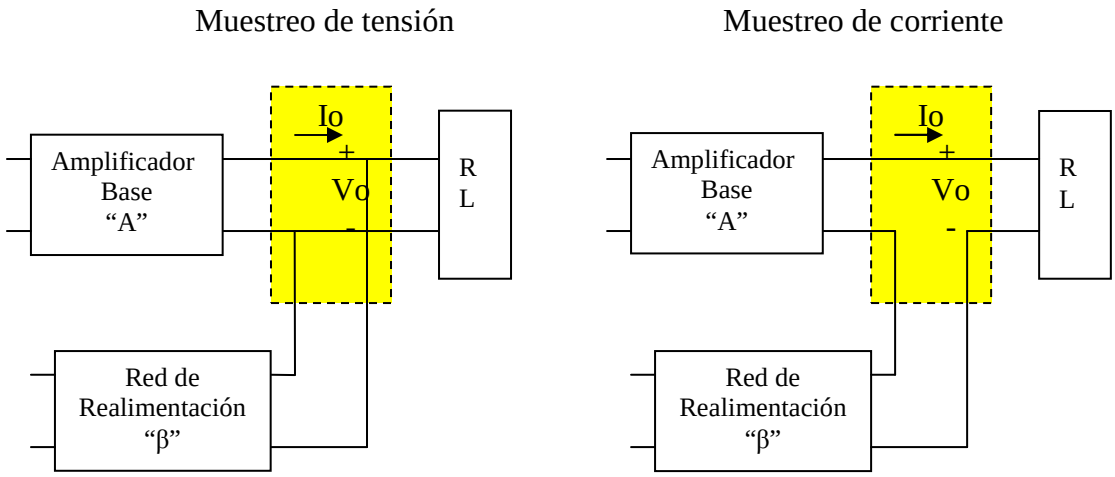
Amplificador básico:

En este bloque, el símbolo "A" representa la relación, entre las señales eléctricas de salida y entrada. Cuando el termino "A" representa una relación de tensiones o de corrientes, representa una ganancia de tensión o corriente respectivamente. Cuando esta expresada como relación entre V / I o entre I / V, no representa una amplificación en el sentido usual de la palabra. No obstante, se la denomina como" la ganancia de transferencia del amplificador base sin realimentación y representa a las relaciones Av, Ai, Gm y Rm en forma gral.

Amplificador realimentado:

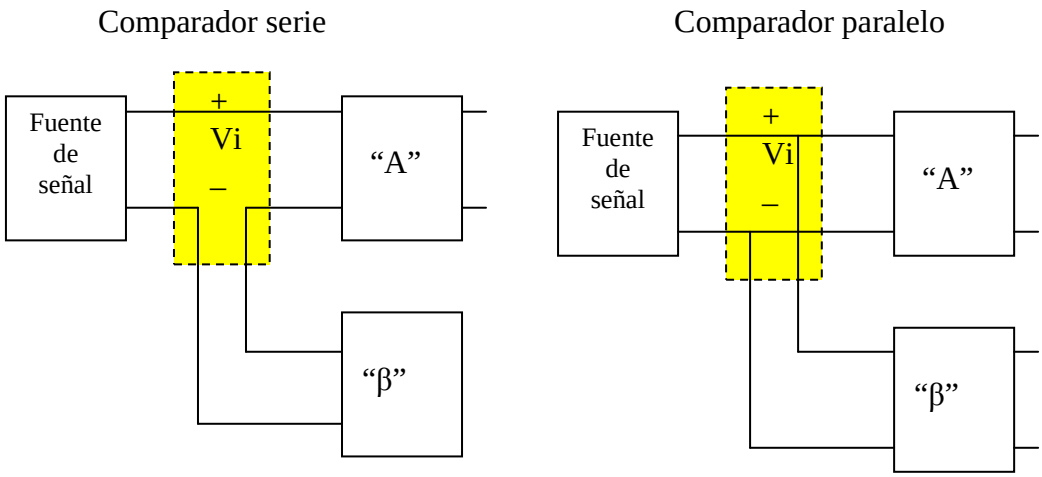
Cuando consideramos la relación entre las señales eléctricas de salida y entrada del amplificador realimentado, definiéndola con el símbolo "Af", se le denomina "ganancia de transferencia del amplificador realimentado". En este caso "Af" puede representar cualquiera de las relaciones Avf ≡ Vo / Vs, Aif ≡ Io / Is, Gmf ≡ Io / Vs o Rmf ≡ Vo / Is. Mas adelante estableceremos la relación entre "A" y "Af".

Circuito de muestreo:

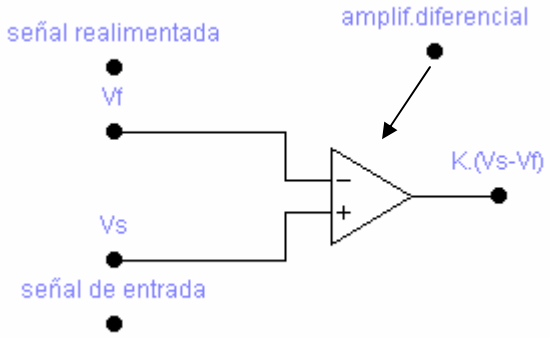


El muestreo de la señal de salida puede ser de tensión o corriente. Cuando se muestra la tensión de salida, el circuito de realimentación "β" se conecta en paralelo con el circuito de salida, como muestra el diagrama de la izquierda. Cuando se muestrea la corriente de salida, el circuito de realimentación se conecta en "serie".(diagrama de la derecha). Es posible encontrar otros tipos de conexiones para tomar una muestra de la señal de salida para realimentar.

Red comparadora o mezcladora:



Los tipos de comparadores más comunes son "el tipo serie" y "el paralelo". Para el primer caso, se utiliza cuando la fuente de señal se representa como un circuito equivalente de Thevenin y el segundo, cuando se representa la fuente de señal por un circuito equivalente de Norton.
Otro circuito importante que se usa como comparador de señales, es el denominado "amplificador diferencial" cuya salida resulta proporcional a la diferencia entre las señales a comparar.



Ventajas de la realimentación negativa

Decimos que un amplificador realimentado tiene "realimentación negativa", cuando para cualquier aumento o disminución de la tensión de salida, la realimentación hacia la entrada, provoca una disminución o aumento de la señal de salida, respectivamente.
La realimentación negativa, en cualquiera de los cuatro amplificadores definidos anteriormente, según su relación de transferencia, mejora sus características eléctricas. Por ejemplo, si tomamos al amplificador de tensión, la realimentación, tiende a llevarlo a sus condiciones ideales: **Aumenta su resistencia de entrada y disminuye la resistencia de salida que "ve" la carga**. Otra mejora producida es mayor estabilidad de la "ganancia de transferencia "Af" frente a las variaciones de los parámetros eléctricos

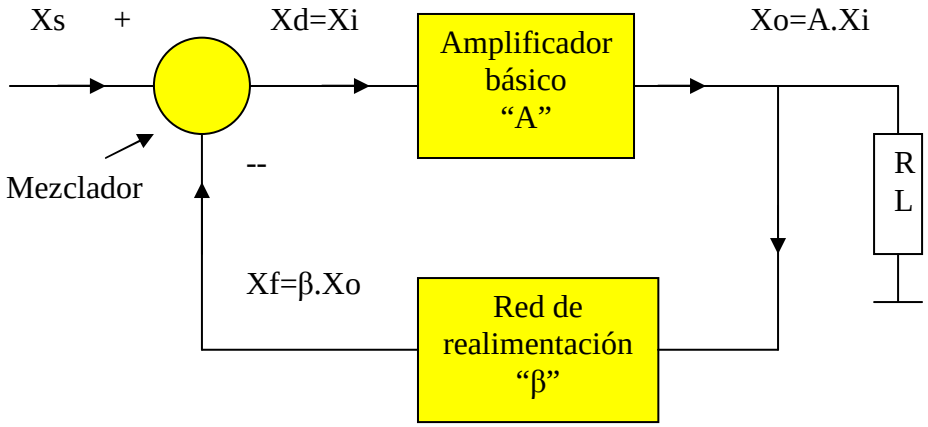
de los elementos activos que componen al amplificador básico. También se obtiene una mejor respuesta en frecuencia, para un amplificador realimentado, que otro sin realimentar.

Inconvenientes de la realimentación negativa

Todos los beneficios mencionados, se logran a costa de una disminución de la ganancia de transferencia con realimentación "Af", respecto a la ganancia de transferencia sin realimentar "A". Además el amplificador realimentado negativamente, debido a elementos reactivos indeseables del circuito, pueden cambiar la realimentación, volviéndola positiva; el amplificador se vuelve inestable y puede entrar en oscilación. (Genera una señal alterna en su salida, sin señal en su entrada). Por ello, para el amplificador realimentado, se deben tomar precauciones para evitar efectos indeseados. (Análisis de estabilidad y acciones de compensación).

Cálculo de la ganancia de transferencia de un amplificador realimentado

Para realizar el cálculo cuantitativo, debemos reemplazar los elementos activos por sus modelos eléctricos equivalentes para señal incremental para luego plantear las ecuaciones de malla o nudos de Kirchoff. A los efectos de obtener una aproximación que nos permita poner en evidencia las características más importantes de la realimentación, lo analizaremos en forma mas Gral., independientemente del tipo de amplificador y forma de realimentación, utilizando los bloques funcionales con las variables intervinientes generalizadas.



Xs: Señal de entrada.

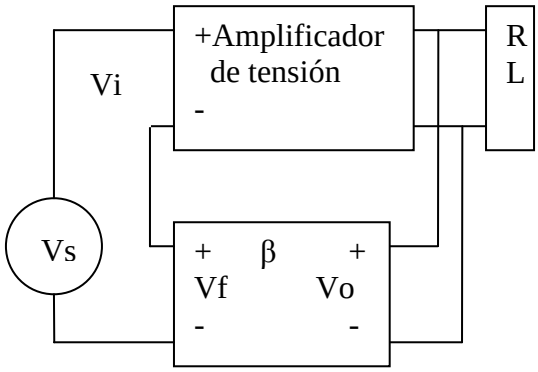
Xf: Señal de realimentación.

Xd: Señal diferencia entre la señal de entrada y la señal de realimentación

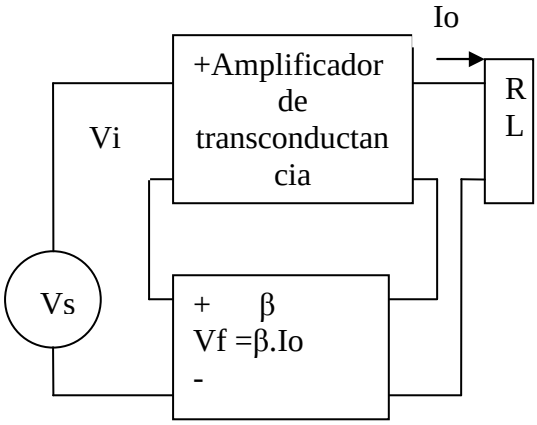
Xi: Señal de entrada del amplificador básico. (Xi = Xd)

Xo: Señal de salida del amplificador
Este esquema, corresponde a cuatro tipos de realimentación que son: a) Realimentación de tensión en serie, b) Realimentación de corriente en serie, c) Realimentación de corriente en paralelo y d) Realimentación de tensión en paralelo. Según sea el tipo de realimentación, los valores de Xs, Xd, Xf, Xi y Xo pueden representar corrientes o tensiones, según sea el caso.

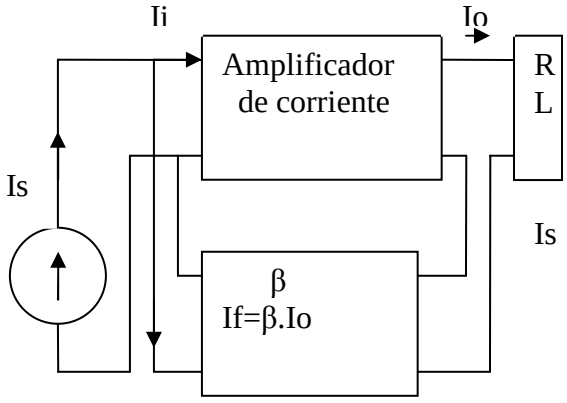
	Tipo de realimentación			
Señal o relación	Tensión en serie	Corriente en serie	Corriente en paralelo	Tensión en paralelo
Xo	tensión	corriente	corriente	tensión
Xs, Xf, Xd	tensión	tensión	corriente	corriente
A	Av	Gm	Ai	Rm
β	Vf/Vo	Vf/Io	If/Io	If/Vo



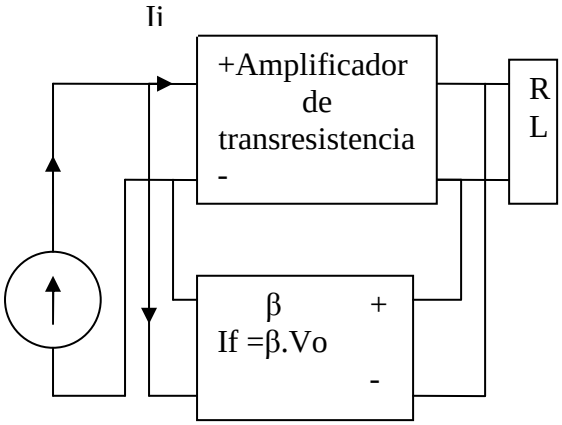
Realimentación de
Tensión serie



Realimentación de
Corriente en serie



Realimentación de
Corriente en paralelo



Realimentación de
tensión en paralelo

En la red comparadora o mezcladora, se suman la señal de entrada (Xs) y la señal de realimentación, con el signo correspondiente, obteniéndose en la salida de este bloque, la denominada "señal diferencia o de comparación" (Xd).

$Xd = Xs - Xf = Xi$

Esta señal diferencia, será la señal de entrada del amplificador base (Xi).
La ganancia de transferencia o función de transferencia del amplificador realimentado, se define como:
$Af \equiv Xo / Xs$
El factor de transmisión inversa "β" se define como:

$\beta \equiv Xo / Xf$

La ganancia de transferencia del amplificador base, sin realimentar, se define como:

$A \equiv Xo / Xi$ (en su calculo, incluye la carga debido a RL y a β)

Reemplazando valores, obtenemos como expresión de ganancia de transferencia con realimentación, la siguiente expresión:

$Af = A / (1 + \beta.A)$

Esta expresión generalizada, nos permite deducir muchos de las características importantes de la realimentación:
a) Cuando $|Af| < |A|$, la realimentación se denomina "negativa o degenerativa". En el caso expuesto la ganancia con realimentación negativa se obtiene de la división de la ganancia del amplificador básico ideal, con el valor $|1+\beta.A|$, que resulta mayor a la unidad.

Cuando |Af| > |A| decimos entonces que la realimentación es “positiva o regenerativa”. Esta situación se presenta solamente en los circuitos osciladores de ondas senoidales o, en los amplificadores realimentados “no compensados”. Pretender usar la técnica de la realimentación positiva para aumentar la ganancia de un amplificador lineal, lo hace inestable, provocando señales oscilatorias indeseables en su salida.

Ganancia de lazo:

La señal Xd=Xi se multiplica por “A” al pasar por el amplificador base, luego se multiplica por “β”, en la red de realimentación y finalmente se multiplica por -1 en la red mezcladora o diferenciadora. Como vemos en todo este recorrido Xi se multiplica por “–β.A” , valor que se denomina “ganancia de lazo o relación de retorno”. La diferencia entre la unidad y la ganancia de lazo, se denomina “diferencia de retorno”

$D=(1+\beta.A)$

Cantidad de realimentación:

La cantidad de realimentación se le denomina a la relación entre la ganancia con realimentación y la ganancia sin realimentación, expresada normalmente en decibelios:

$N = \text{dB de realimentación} = 20 \log_{10} |Af / A| = 20 \log_{10} |1 / (1+\beta.A)|$

Como vemos, si la realimentación es negativa, N resulta un número negativo.

Características grales de la realimentación negativa

A continuación, vamos a desarrollar algunas de las características más importantes de la realimentación negativa, con la aclaración que a los efectos de simplificar los desarrollos siguientes, tendremos que hacer algunas suposiciones a saber:
1) La señal de entrada se transmite solamente por el amplificador básico, de ganancia “A” y no por la red de realimentación “β”, de tal manera que si “A” se hace cero, la señal de salida también se hace cero. Este supuesto nos dice que “β” transmite señal solamente de retorno, hacia la entrada.(en los amplificadores reales “β” suele ser bidireccional)
2) La señal de salida, se transmite hacia la entrada solamente por la red “β” y no por el amplificador de ganancia “A”.
3) El factor de realimentación “β” es independiente de las resistencias de carga RL y de la fuente de señal Rs .

Estabilidad de la ganancia con realimentación:

En el amplificador básico sin realimentar, la ganancia “A” puede sufrir variaciones debido a envejecimiento, temperatura, sustitución de componentes, variaciones paramétricas de los componentes activos, etc. En el amplificador realimentado negativamente, la variación de “A” repercute en menor medida sobre “Af”. La demostración surge, derivando la ecuación anterior respecto al valor de A y acomodándola para obtener una expresión en función de las variaciones relativas:

$|dAf/Af|=1 /|1+\beta.A|. |dA/A|$

Vemos que la variación relativa $|dAf/Af|$ esta disminuida respecto a la variación relativa $|dA/A|$ en la cantidad $1 /|1+\beta.A|$. Por ejemplo si este último valor (llamado "sensibilidad") vale 0,1, la variación relativa de Af, provocada por la variación de A, se reduce a la décima parte.
Otra forma de ver la "insensibilidad" de "Af" respecto de "A" es hacer que el producto $|\beta.A|>>1$ entonces tendremos:

$Af = A / (1 + \beta.A \approx A / \beta.A = 1 / \beta$

De esta forma la ganancia "Af" se hace totalmente dependiente de la red de realimentación. Como ésta, esta compuesta con elementos pasivos estables, de la misma forma se comportara "Af".

<u>Distorsión en frecuencia:</u>

Si la red de realimentación "β" no contiene elementos reactivos, la ganancia "Af" no será función de la frecuencia, lográndose una mejora en la disminución de la distorsión de frecuencia y fase (dentro de ciertos límites de frecuencia).En los amplificadores prácticos realimentados, la curva de respuesta en frecuencia, se hace más plana, para un rango mayor de frecuencias. Por otra parte si hacemos que "β" tenga una dependencia "especial y conveniente con la frecuencia, de la misma manera responderá el amplificador realimentado, como podría ser el de un amplificador selectivo en frecuencia.(sintonizado).

<u>Distorsión no lineal y ruido:</u>

En términos grales y con acotaciones en los valores de ruido y distorsión no lineal, podemos decir que la realimentación negativa reduce los niveles de estas tensiones eléctricas indeseables. El ruido y la distorsión presentes en la salida de un amplificador pueden considerarse como consecuencias de la introducción de una tensión espuria en alguna sección del amplificador y que es amplificada por la parte del amplificador comprendida entre el punto de inyección y la salida. Merced al circuito de realimentación, esta tensión vuelve al punto de origen y, si la realimentación es negativa, llega a este con fase opuesta a la original y tiende a anular la que le dio origen Por ejemplo, si B2 es la tensión espuria de origen, debido al efecto de realimentación, aparecerá una componente B2f, en la salida del amplificador, cuyo valor lo podemos determinar de la siguiente manera:
Aplicando la superposición, en la salida tendremos el termino B2 y el termino $-A.\beta.B2f$ obtenido de la componente $-\beta.B2f$ que alimenta nuevamente la entrada. El valor de B2f lo obtenemos como suma de estos dos términos:

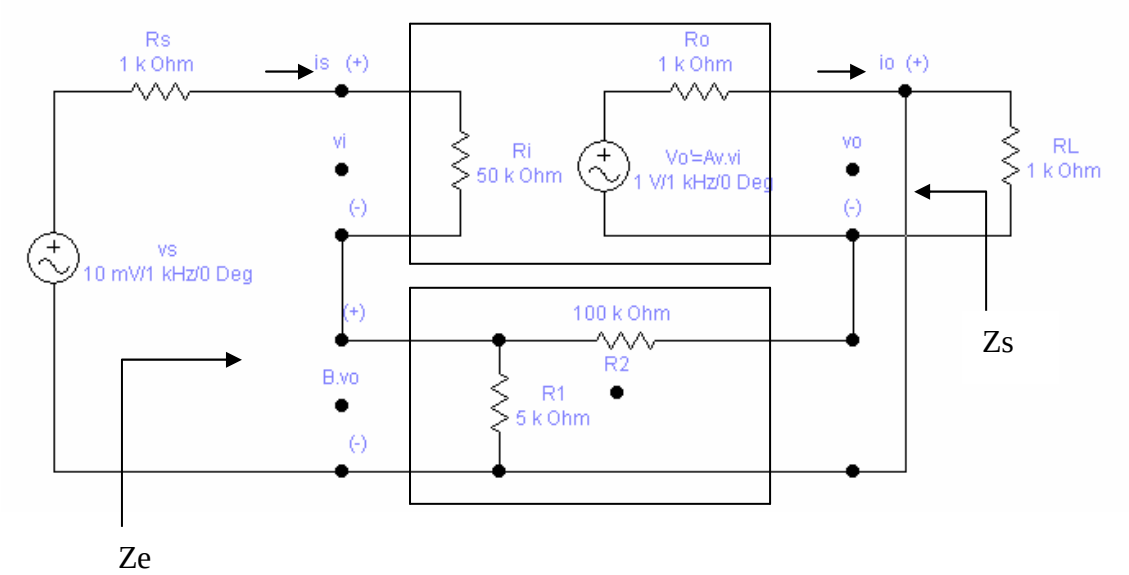
$B2 -A.\beta.B2f = B2f$; despejando B2f

$B2f = B2 / 1+\beta.A$

Como $(1+\beta.A)> 1$ entonces $B2f < B2$.

Impedancias de entrada y salida:

La realimentación negativa, mejora las características de las impedancias de entrada y salida del amplificador realimentado, respecto del amplificador sin realimentar. Por ejemplo para el caso de un amplificador de tensión, es deseable que presente una alta impedancia de entrada para la fuente de señal y una baja impedancia de salida para la carga. La alta impedancia de entrada, evita la sobrecarga y la caída de tensión en la impedancia interna de la fuente de señal. La baja impedancia de salida, tiende a idealizar el equivalente de thevenin de la salida del amplificador, evitando las variaciones de tensión de la salida, por caída de tensión en esta impedancia, ante variaciones de la carga.
Para desarrollar este concepto, tomaremos como ejemplo, el caso de un amplificador de tensión que esta realimentado en serie por la tensión de salida.
En primer termino determinaremos la impedancia de salida y a los efectos de simplificar los cálculos, despreciaremos la impedancia de la fuente de señal (Rs) y la impedancia de salida del amplificador sin realimentar (Ro); además consideraremos que la red de realimentación "β", transmite en forma unidireccional desde su entrada, con la tensión "vo", hacia su salida, con la tensión "β.Vo". Veamos el siguiente circuito que nos permitirá realizar los cálculos con las aproximaciones mencionadas:



Calcularemos la impedancia de entrada que "ve" la fuente de señal como:

$ze \equiv vs / is$

$vs = vi + \beta.vo$
$vo = vo' = Av.vi$
$vi = Ri.is$
Con estas expresiones reemplazando valores y haciendo la relación vs/is tendremos:

$ze \equiv vs/is = Ri. (1+ Av.\beta)$

Como (1+Av.β) > 1 entonces la impedancia de entrada con el amplificador realimentado se incrementa.
Por ejemplo, para el caso del ejemplo del circuito si considerado si que Av =1000, y Ri=50kΩ
β≡ vf / vo = R1/ (R1+R2) = 0,0476

ze= 50.000.(1+1000.0,0476) = 2,38 MΩ

Para la determinación de la impedancia de salida "zo" que ve la carga "RL", cuando el amplificador esta realimentado, aplicaremos el método de la corriente de cortocircuito. En este método, la impedancia "zo" la podemos calcular como:

zo≡ vo / ioc

Siendo vo, la tensión de salida del amplificador de salida en vacío, o sea con RL =∞ y ioc representa la corriente de cortocircuito de salida, o sea para RL = 0
Para calcular la tensión en vacío, aplicamos la relación de transferencia determinada para el amplificador realimentado:

vo = Av.vs / (1+β.Av)

En el cálculo de la corriente de cortocircuitó tenemos que tener en cuenta que vo=0 y por lo tanto no tenemos realimentación, por lo que la tensión en la fuente de tensión del circuito equivalente de Thevenin del circuito de salida vale:

Voc = Av.vs

La corriente de cortocircuito la calculamos como:

ioc = voc / Ro = Av.vs / Ro

Con los valores calculados de voc y ioc podemos determinar la impedancia de salida:

zo≡ vo / (Av.vs)/ Ro = [Av.vs / (1+β.Av)] / [(Av.vs)/ Ro] = Ro / (1+β.Av)

Como (1+β.Av) > 1 entonces la impedancia de salida del amplificador realimentado resulta menor que la impedancia de salida del amplificador sin realimentar.
Para el caso del ejemplo si Ro= 1kΩ , Av = 1000 y β = 0,0476

zo = Ro / (1+β.Av) = 1kΩ / (1+ 0,0476 . 1000) = 27,57 Ω
Como vemos, se redujo de 1000Ω a 27,57 Ω

<u>Estabilidad de los amplificadores electrónicos realimentados</u>

Vimos que la función de transferencia de un amplificador realimentado negativamente, se expresa como:

Af = A / (1+β.A)

Para el caso de realimentación negativa $|1+\beta.A| > 1$. Si este valor resultara menor a uno (1), se dice que la realimentación es positiva y para este ultimo caso, resultaría: $|Af|>|A|$. En primera instancia parecería ser un método para aumentar la amplificación de señales eléctricas. En la práctica no resulta conveniente dado que un amplificador con realimentación positiva, se comporta en forma inestable. La inestabilidad se manifiesta como la posibilidad de que el amplificador comience a oscilar, es decir a generar una señal alterna indeseable en su salida, sin necesidad de aplicar una señal en su entrada. Esta posibilidad, la podemos explicar con el siguiente ejemplo: Supongamos que tenemos un amplificador al cual no se lo alimenta con una señal de entrada, o sea $Xs=0$; debido a una perturbación, puede aparecer en la salida una señal Xo que por realimentación, una parte de esta señal ($-\beta.Xo$) ingresara al circuito de entrada y aparecerá en la salida, una señal incrementada de valor "$-\beta.A.Xo$". Si este ultimo valor, iguala exactamente al valor "Xo", entonces se ha regenerado la salida (espuria) por si misma o sea $-\beta.A.Xo = Xo$ ($-\beta.A = 1$). En esta condición, el amplificador comenzara a oscilar, decir a generar una señal alterna indeseable. Por lo tanto si se intenta obtener una gran ganancia, haciendo $|\beta.A|$ próximo a la unidad, existe la posibilidad de que el amplificador comience a oscilar.

Criterio Gral. de estabilidad

Habíamos visto que si en la expresión $Af = A / (1+\beta.A)$, hacemos $|\beta.A| > 1$ resulta: $Af \approx 1/\beta$.
De este resultado, podríamos pensar que la ganancia de transferencia con realimentación puede hacerse enteramente dependiente de la red de realimentación; además, si "β" resulta constante y estable, por estar formada con elementos pasivos e independiente de la frecuencia, también resultara el comportamiento de Af. En la práctica esta condición no se cumple enteramente, dado que la ganancia "A" no es constante, por ser una función de la frecuencia. Esto significa que, para ciertos valores altos o bajos de frecuencia, el valor $|\beta.A|$ puede no ser mayor que la unidad.
Si tenemos un amplificador con realimentación negativa para un determinado margen de frecuencias, pero oscila a alguna frecuencia mas alta o mas baja, no se lo puede utilizar como amplificador. Un amplificador realimentado, debe ser estable para todas las frecuencias, es decir frente a una perturbación transitoria, la respuesta debe desaparecer espontáneamente. Un amplificador es inestable, cuando una perturbación transitoria, persiste indefinidamente o aumenta hasta que queda limitada tan solo por la alinealidad del circuito.
Como las relaciones de amplitud y fase del amplificador base y su red de realimentación, son funciones de la frecuencia, por la presencia de elementos reactivos (condensadores e inductancias) del circuito, y la dependencia con la frecuencia, de los parámetros incrementales de los elementos activos, es posible que para alguna frecuencia, el desplazamiento de fase de este circuito ($-\beta.A$) denominado ganancia de lazo, sea de 360º. Si una señal de esta frecuencia se aplica al amplificador, la señal realimentada, estará en fase con la señal que se quiere amplificar y por lo tanto la señal neta que ingresa al amplificador base será la suma efectiva de ambas señales, dando lugar a una ganancia resultante de realimentación mayor que la del amplificador base, dando lugar a una realimentación positiva, con el consiguiente riesgo de que el amplificador realimentado comience a oscilar; el amplificador entonces se torna inestable.

Para lograr la estabilidad contra la oscilación, deben ser satisfechas dos condiciones importantes:

1º) Cuando la ganancia de lazo (producto β.A) es mayor a la unidad, el desplazamiento total de fase del circuito debe ser menor de 360º.

2º) Cuando el desplazamiento de fase del circuito es de 360º, la ganancia de lazo debe ser menor de la unidad.
La cantidad por la cual el desplazamiento de fase es menor de 360º, para la frecuencia de ganancia unitaria, se denomina "margen de fase". La cantidad de ganancia menor de uno para la frecuencia de 360º, se conoce como "margen de ganancia". Estas magnitudes proporcionan el grado de estabilidad de un amplificador. Los valores dependerán de las aplicaciones. Por ejemplo un amplificador lineal que requiere una buena estabilidad, necesitara un margen de ganancia de por lo menos 10 dB y un margen de fase de 50º, pero un amplificador de pulsos con un ancho de banda limitado, requerirá valores menores, para tener una buena respuesta a transitorios.
Otra forma que determina la estabilidad de un amplificador realimentado Negativamente, es analizando su función de transferencia en la transformada de Laplace que introduce la variable compleja "s = j.w".
Para el análisis, se expresa la transformada en "s" de función de transferencia del amplificador realimentado como la razón de dos polinomios en la variable "s". Estos polinomios se los expresa en términos de sus raíces y de un multiplicador constante.
Las raíces del polinomio del numerador se les denominan ceros (hacen cero a Af(s)) y la del polinomio del denominador, se le denominan "polos" (hacen infinita a Af(s)).
Estas raíces pueden ser reales o complejas. Estudiando la ubicación de los polos en el plano complejo, se puede determinar la estabilidad del amplificador realimentado y su compensación para estabilizarlo. Por ejemplo si uno de los polos se presenta con parte real positiva, ello da lugar como resultado, un aumento en la magnitud de cualquier perturbación, en forma exponencial con el tiempo. Por ello la condición de estabilidad se establece para la condición de que los "polos" de la transformada de la función de transferencia Af(s), estén todos ellos situados en la mitad izquierda del plano de frecuencia complejo.
La estabilidad, como dijimos exige que los polos de Af(s) estén situados en la mitad izquierda del plano complejo, o de otra forma podemos decir que los "ceros" de la transformada de 1+ β(s).A(s) estén todos ellos situados en la mitad izquierda del plano de frecuencia complejo.
Otro método para determinar la estabilidad de un amplificador realimentado es representando en el plano complejo (diagrama de Nyquist), la transformada del denominador de la función de transferencia con realimentación 1+β(s).A(s) denominado "diferencia de retorno".