

Capítulo 4. CIRCUITOS LINEALES

TEMA 11. AMPLIFICADORES.

11.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS AMPLIFICADORES.

Los circuitos lineales¹ trabajan con señales analógicas, es decir, señales que toman un margen continuo de valores de amplitud. Uno de los circuitos lineales más importante es el amplificador.

Un amplificador es un circuito electrónico capaz de elevar el valor de la tensión, corriente o potencia de una señal, procurando mantenerla lo más fiel posible.

11.1.1 Definiciones.

Consideremos el amplificador genérico de la figura 11.1:

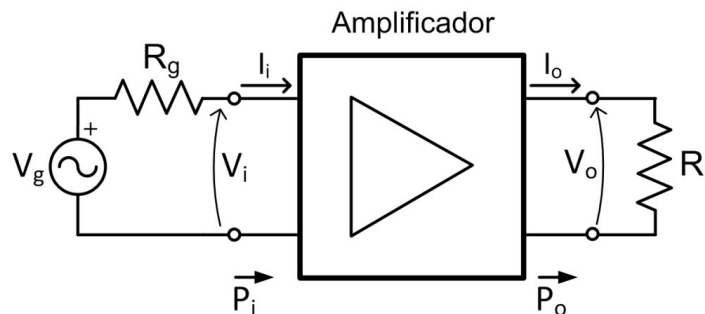


Fig. 11.1. Esquema de un circuito con un amplificador genérico.

En este amplificador genérico se han definido los siguientes parámetros:

- V_g, R_g : Fem y resistencia interna de la fuente de señal (equivalente Thévenin).
- V_i, I_i, P_i : Tensión, corriente y potencia de señal a la entrada del amplificador.
- V_o, I_o, P_o : Tensión, corriente y potencia de señal a la salida del amplificador.
- R_L : Resistencia equivalente de carga conectada a la salida del amplificador.

Se definen los siguientes parámetros que permiten caracterizar el comportamiento del amplificador:

- **Ganancia de tensión**: Es el cociente entre la tensión de salida y la tensión de entrada.

$$A_V = \frac{V_o}{V_i}, \quad A_V (dB) = 20 \log \frac{|V_o|}{|V_i|}.$$

- **Ganancia de corriente**: Es el cociente entre la corriente de salida y la corriente de entrada.

¹ Se entiende por circuito lineal aquel que se puede expresar mediante una ecuación lineal.

$$A_I = \frac{I_o}{I_i}; \quad A_I (dB) = 20 \log \frac{|I_o|}{|I_i|}.$$

- **Ganancia de potencia:** Es el cociente entre la potencia de salida y la potencia de entrada.

$$A_P = \frac{P_o}{P_i}; \quad A_P (dB) = 10 \log \frac{P_o}{P_i}.$$

Dado que P_o = Potencia entregada a la carga y P_i = Potencia absorbida a la entrada del amplificador se pueden poner en función de las tensiones y corrientes de entrada y salida, se tiene:

$$A_P = \frac{V_o I_o}{V_i I_i} = A_V A_I.$$

- **Resistencia de entrada:** Es la resistencia equivalente entre los terminales de entrada.

$$R_i = \frac{V_i}{I_i}.$$

- **Resistencia de salida:** Es la resistencia del generador equivalente Thévenin en los terminales de salida.

$$R_o = \frac{V_o (R_L = \infty)}{I_o (R_L = 0)}.$$

11.1.2 Respuesta en frecuencia.

El amplificador presenta siempre una variación de sus características de ganancia con la frecuencia. La ganancia del amplificador permanece prácticamente constante para una franja de frecuencias intermedias comprendidas entre dos extremos denominados **frecuencias de corte**. El intervalo comprendido entre ambas frecuencias se denomina **ancho de banda**. Por debajo de la frecuencia de corte inferior f_{CL} y por encima de la frecuencia de corte superior f_{CH} , se produce una pérdida progresiva de la ganancia y un desfase, también progresivo, entre la señal de salida y la de entrada.

Las frecuencias de corte se definen como aquellas a las que la ganancia de tensión o de corriente se divide por $\sqrt{2}$ $\left(\frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707\right)$, o la ganancia de potencia se divide por 2, con respecto al valor a frecuencias intermedias. Equivale a una caída de 3 dB puesto que:

$$20 \log \frac{A_m}{A_m / \sqrt{2}} = 10 \log \frac{P_m}{P_m / 2} \cong 3dB.$$

La caída de la ganancia en bajas frecuencias en los amplificadores de alterna (AC) se debe a las capacidades de acoplo, y la caída en alta frecuencia en todos los amplificadores se debe a las capacidades internas de los transistores.

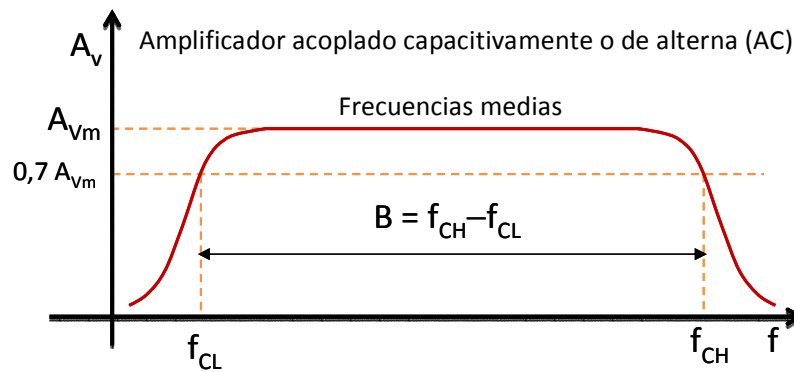


Fig. 11.2. Respuesta en frecuencia del amplificador en alterna.

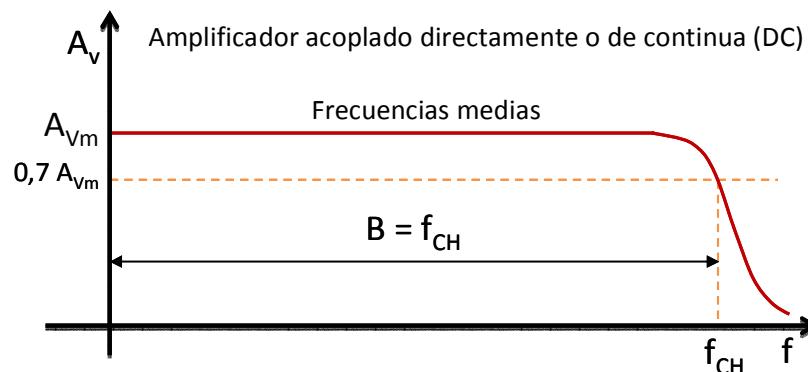


Fig. 11.3. Respuesta en frecuencia del amplificador en continua.

11.2 AMPLIFICADOR DE TENSIÓN.

En la figura 11.4 se ha sustituido el bloque amplificador por su modelo equivalente de Thévenin, siendo R_i la resistencia de entrada, R_o la resistencia de salida y A_{VO} la ganancia de tensión del amplificador con la salida en circuito abierto ($R_L = \infty$). La fuente de tensión dependiente $A_{VO} \cdot V_i$ modela la característica fundamental de amplificación de tensión del amplificador.

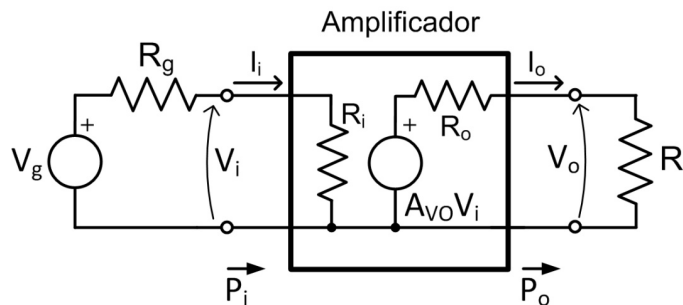


Fig. 11.4. Modelo equivalente de Thévenin de un amplificador de tensión.



$$V_i = V_g \frac{R_i}{R_g + R_i}, \text{ y si } R_i \gg R_g \text{ entonces: } V_i \cong V_g.$$

$$V_o = A_{vo} V_i \frac{R_L}{R_o + R_L}, \text{ y si } R_o \ll R_L \text{ entonces: } V_o \cong A_{vo} V_i.$$

Un amplificador con estas condiciones se denomina **amplificador de tensión**, porque da una tensión de salida proporcional a la de entrada $V_o \cong A_{vo} V_g$, y el factor de proporcionalidad A_{vo} es independiente de los valores de las resistencias de la carga y de la fuente.

Un amplificador ideal de tensión deberá tener una resistencia de entrada $R_i = \infty$, y una resistencia de salida $R_o = 0$.

11.3 REALIMENTACIÓN NEGATIVA.

Realimentar consiste en introducir parte de la señal de salida a la entrada del amplificador. La entrada real al amplificador está ahora gobernada por la señal del generador externo y la señal realimentada.

En la figura 11.5 se muestra el diagrama de bloques de un amplificador realimentado. Sea A la ganancia del amplificador sin realimentación o ganancia de bucle abierto y β la relación de transferencia de la red de realimentación.

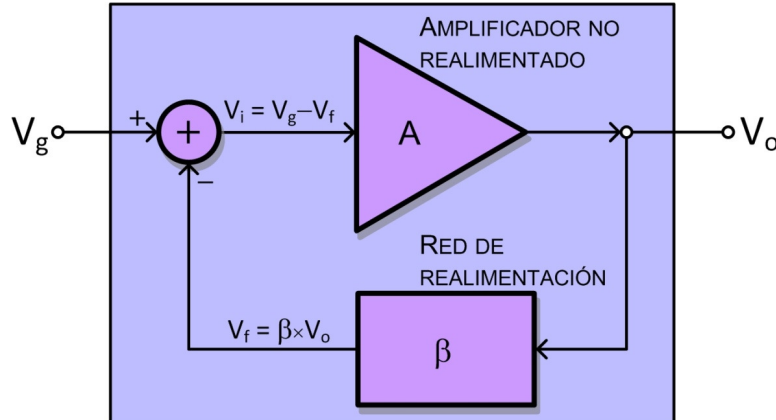


Fig. 11.5. Amplificador realimentado.

La señal V_g de la fuente entra en un sumador en el que se le sustrae la señal de realimentación $V_f = \beta V_o$. La señal diferencia $V_i = V_g - V_f$ se aplica al amplificador, que genera una señal de salida $V_o = A V_i$.

La ganancia del amplificador realimentado o ganancia de bucle cerrado viene dada por: $A_f = \frac{V_o}{V_g}$. Como $V_o = A V_i = A(V_g - V_f) = A V_g - \beta A V_o$, entonces se obtiene:

$$A_f = \frac{V_o}{V_g} = \frac{A}{1 + \beta A}.$$

Si $|A_f| < |A|$, la realimentación se denomina **negativa** porque la señal de salida realimentada se opone a la de entrada, y si $|A_f| > |A|$, la realimentación se denomina **positiva**, porque la señal de salida realimentada refuerza la de entrada.

En el caso de realimentación negativa, nótese que la ganancia del amplificador básico queda dividida por el denominado *factor de desensibilización* $D \equiv |1 + \beta A|$, que será mayor a la unidad.

11.3.1 Ventajas de la realimentación negativa.

Si bien la realimentación negativa reduce la ganancia del amplificador, introduce mejoras en las características del mismo que compensan ampliamente esta reducción. De entre las ventajas de la realimentación negativa destacamos las siguientes:

a) *Estabilidad de la ganancia.*

En un amplificador con una fuerte realimentación negativa se tiene: $|\beta A| \gg 1$, y entonces:

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

con lo que la ganancia del amplificador realimentado puede hacerse depender únicamente de la red de realimentación. Dado que esta red suele estar formada por elementos pasivos que pueden ser muy estables, vemos que se puede conseguir una ganancia también muy estable.

b) *Mejora del ancho de banda.*

En el amplificador realimentado se produce una mejora del ancho de banda en la misma proporción que se reduce la ganancia, pues se cumple que $B \cdot A = B_f \cdot A_f$, siendo B_f el ancho de banda del amplificador realimentado y que, teniendo en cuenta la relación obtenida entre la ganancia del amplificador realimentado y la del no realimentado, viene dado por $B_f = B(1 + \beta A)$.

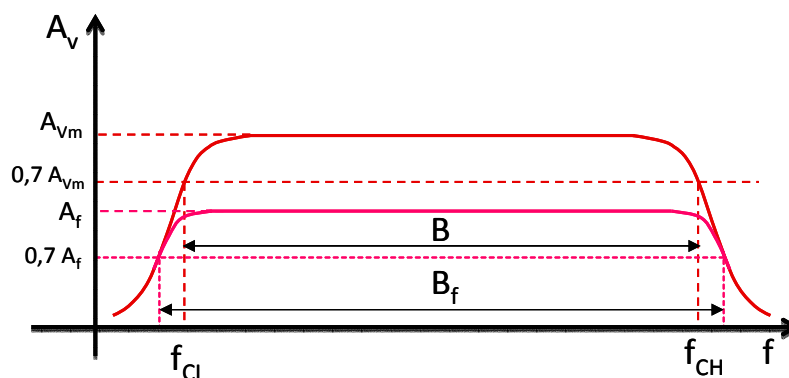


Fig. 11.6. Mejora del ancho de banda con un amplificador realimentado.

c) *Control de resistencias de entrada y de salida.*

Aplicando el modo de realimentación adecuado al amplificador se pueden multiplicar o dividir la resistencia de entrada o de salida de un amplificador por el factor

de desensibilización $|1 + \beta A|$, pudiendo entonces aproximarse más al modelo ideal de amplificador de tensión. Es decir:

$$R_{if} = R_i(1 + \beta A) \quad \text{y} \quad R_{of} = \frac{R_o}{1 + \beta A}.$$

11.4 AMPLIFICADOR DIFERENCIAL.

Se trata de un amplificador que en su concepción ideal amplifica la diferencia entre dos señales sin considerar sus valores absolutos de tensión.

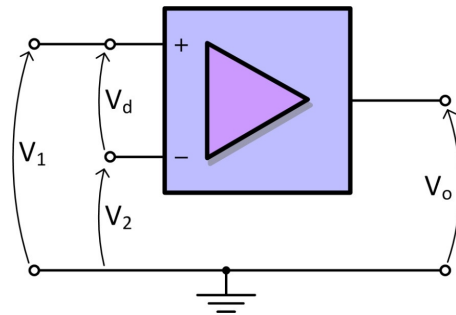


Fig. 11.7. Amplificador diferencial.

La figura 11.7 representa un amplificador diferencial con dos señales de entrada V_1 y V_2 , y una señal de salida V_o , cada una de ellas medida respecto de una masa común de circuitos. Es decir, V_1 , V_2 y V_o son señales simples, asimétricas o no balanceadas.

La diferencia entre las tensiones de entrada se conoce como tensión de entrada diferencial:

$$V_d = V_1 - V_2,$$

es decir, V_d es una señal diferencial, simétrica o balanceada.

En un amplificador diferencial ideal, la señal de salida viene dada por:

$$V_o = A_d \cdot V_d = A_d(V_1 - V_2) = A_d V_1 - A_d V_2,$$

siendo A_d la ganancia diferencial del amplificador. Se observa que la ganancia es positiva para la tensión aplicada al terminal (+), y negativa para la tensión aplicada al terminal (-). Por tanto, el terminal (-) se denomina **entrada inversora** y el terminal (+) **entrada no inversora**.

Se observa además que, idealmente, cualquier señal común a las dos entradas no produce ningún efecto en la salida. En la práctica, la señal de salida de un amplificador diferencial real no sólo dependerá de la diferencia V_d de las dos señales, sino también del valor medio de ambas, denominado señal de modo común V_c , obtenida como:

$$V_c = \frac{V_1 + V_2}{2},$$

de tal modo que podemos definir una A_c como la ganancia para el modo común, que influye sobre la señal de salida añadiendo un término adicional en la forma:

$$V_o = A_d V_d + A_c V_c.$$

Se denomina **factor de rechazo del modo común o CMRR** (*Common Mode Rejection Ratio*) a la relación:

$$CMRR = \frac{|A_d|}{|A_c|} \quad CMRR(dB) = 20 \log \frac{|A_d|}{|A_c|},$$

que constituye una figura de mérito para el amplificador diferencial, pues indica cuanto más es amplificada una señal diferencial que la señal en modo común.

