

Tema 6.-AMPLIFICADORES OPERACIONALES

INTRODUCCION.-

El concepto original del AO (*amplificador operacional*) procede del campo de los computadores analógicos, en los que comenzaron a usarse técnicas operacionales en una época tan temprana como en los años 40. El nombre de *amplificador operacional* deriva del concepto de un amplificador **dc** (amplificador acoplado en continua) con una entrada diferencial y ganancia extremadamente alta, cuyas características de operación estaban determinadas por los elementos de realimentación utilizados. Cambiando los tipos y disposición de los elementos de realimentación, podían implementarse diferentes operaciones analógicas; en gran medida, las características globales del circuito estaban determinadas **sólo** por estos elementos de realimentación. De esta forma, el mismo amplificador era capaz de realizar diversas operaciones.

Los primeros amplificadores operacionales usaban el componente básico de su tiempo: la válvula de vacío. El uso generalizado de los AOs no comenzó realmente hasta los años 60, cuando empezaron a aplicarse las técnicas de estado sólido al diseño de circuitos amplificadores operacionales, fabricándose módulos que realizaban la circuitería interna del amplificador operacional mediante diseño discreto de estado sólido. Entonces, a mediados de los 60, se introdujeron los primeros amplificadores operacionales de circuito integrado.

Hoy en día el precio de un amplificador operacional integrado de propósito general, con una ganancia de 100 dB, una tensión offset de entrada de 1 mV, una corriente de entrada de 100 nA. Y un ancho de banda de 1 MHz. es inferior a 1 euro.

PRINCIPIOS BASICOS DE LOS AMPLIFICADORES OPERACIONALES

El amplificador operacional ideal.-

$V_0 = a V_d$
 $a = \text{infinito}$
 $R_i = \text{infinito}$

BW (ancho de banda) = infinito
 $V_0 = 0$ si $V_d = 0$
 $R_o = 0$

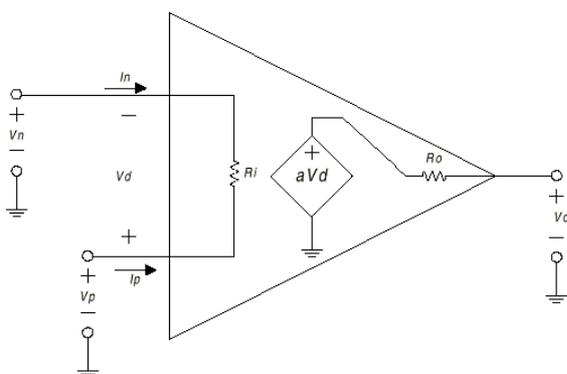


Fig.1

Los fundamentos básicos del amplificador operacional ideal son relativamente fáciles. Quizás, lo mejor para entender el amplificador operacional ideal es olvidar todos los pensamientos convencionales sobre los componentes de los amplificadores, transistores, tubos u otros cualesquiera. En lugar de pensar en ellos, piensa en términos generales y considere el amplificador como una caja con sus terminales de entrada y salida. Trataremos, entonces, el amplificador en ese sentido ideal, e ignoraremos qué hay dentro de la caja.

En la **figura 1** se muestra un amplificador idealizado. Es un dispositivo de acoplo directo con entrada diferencial, y un único terminal de salida. El amplificador sólo responde a la diferencia de tensión entre los dos terminales de entrada, no a su potencial común. Una señal positiva en la entrada inversora (-), produce una señal negativa a la salida, mientras que la misma señal en la entrada no inversora (+) produce una señal positiva en la salida. Con una tensión de entrada diferencial, V_d , la tensión de salida, V_o , será $a V_d$, donde a es la ganancia del amplificador. Ambos terminales de entrada del amplificador se utilizarán siempre independientemente de la aplicación. La señal de salida es de un sólo terminal y está referida a masa, por consiguiente, se utilizan tensiones de alimentación bipolares (\pm)

Teniendo en mente estas funciones de la entrada y salida, podemos definir ahora las propiedades del amplificador ideal, comparadas con las reales:

IDEAL	REAL
1. La ganancia de tensión es infinita: $a = \infty$	La ganancia de tensión es infinita a = elevada
2. La resistencia de entrada es infinita: $R_i = \infty$	La resistencia de entrada es infinita Ri = alta
3. La resistencia de salida es cero: Ro = 0	La resistencia de salida es cero R0 = baja
4. El ancho de banda es infinito: $BW = \infty$	El ancho de banda es infinito BW = alta
5. La tensión offset de entrada es cero: V0 = 0 si Vd = 0	La tensión offset de entrada es cero: V0 = pequeña si Vd = 0

A partir de estas características del AO, podemos deducir otras dos importantes propiedades adicionales.

Puesto que, la ganancia en tensión es infinita, cualquier señal de salida que se desarrolle será el resultado de una señal de entrada infinitesimalmente pequeña.

Luego, en resumen:

La tensión de entrada diferencial es nula.

También, si la resistencia de entrada es infinita. **No existe flujo de corriente en ninguno de los terminales de entrada**

Estas dos propiedades pueden considerarse como axiomas, y se emplearán repetidamente en el análisis y diseño del circuito del AO. Una vez entendidas estas

propiedades, se puede, lógicamente, deducir el funcionamiento de casi todos los circuitos amplificadores operacionales.

Configuraciones básicas del amplificador operacional

Los amplificadores operacionales se pueden conectar según dos circuitos amplificadores básicos: las configuraciones (1) *inversora* y (2) *no inversora*. Casi todos los demás circuitos con amplificadores operacionales están basados, de alguna forma, en estas dos configuraciones básicas. Además, existen variaciones estrechamente relacionadas de estos dos circuitos, más otro circuito básico que es una combinación de los dos primeros: el *amplificador diferencial*.

El amplificador inversor

La **figura 2** ilustra la primera configuración básica del AO. El amplificador inversor. En este circuito, la entrada (+) está a masa, y la señal se aplica a la entrada (-) a través de R_1 , con realimentación desde la salida a través de R_2 .

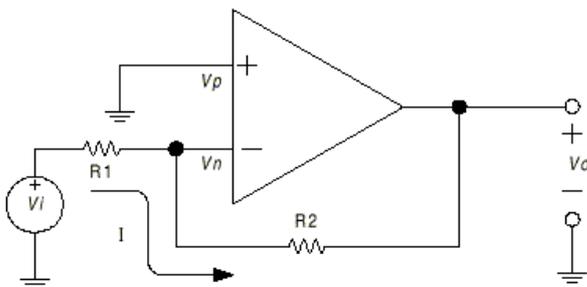


Fig. 2 $V_d = V_p - V_n, \implies V_d = 0.$ - y si $V_d = 0,$

Aplicando las propiedades anteriormente establecidas del AO ideal, las características distintivas de este circuito se pueden analizar como sigue.

Puesto que el amplificador tiene ganancia infinita, desarrollará su tensión de salida, V_0 , con tensión de entrada nula. Ya que, la entrada diferencial de A es:

Entonces toda la tensión de entrada V_i , deberá aparecer en R_1 , obteniendo una corriente en R_1

$$I = \frac{V_i}{R_1}$$

V_n está a un potencial cero, es un punto de *tierra virtual*

Toda la corriente I que circula por R_1 pasará por R_2 , puesto que no se derivará ninguna corriente hacia la entrada del operacional (Impedancia infinita), así pues el producto de I por R_2 será igual a $-V_0$

$$I = -\frac{V_0}{R_2}$$

$$\frac{V_i}{R_1} = -\frac{V_0}{R_2}$$

por lo que:

$$V_0 = -\frac{R_2}{R_1} \cdot V_i$$

luego la ganancia del amplificador inverso sera :

$$\frac{V_0}{V_i} = -\frac{R_2}{R_1}$$

Deben observarse otras propiedades adicionales del amplificador inversor ideal. La ganancia se puede variar ajustando bien R_1 , o bien R_2 . Si R_2 varía desde cero hasta infinito, la ganancia variará también desde cero hasta infinito, puesto que es directamente proporcional a R_2 . La impedancia de entrada es igual a R_1 , y V_i y R_1 únicamente determinan la corriente I , por lo que la corriente que circula por R_2 es siempre I , para cualquier valor de dicha R_2 .

La entra del amplificador, o el punto de conexión de la entrada y las señales de realimentación, es un nudo de tensión nula, independientemente de la corriente I . Luego, esta conexión es un punto de tierra virtual, un punto en el que siempre habrá el mismo potencial que en la entrada (+). Por tanto, este punto en el que se suman las señales de salida y entrada, se conoce también como nudo suma. Esta última característica conduce al tercer axioma básico de los amplificadores operacionales, el cual se aplica a la operación en bucle cerrado:

En bucle cerrado, la entrada (-) será regulada al potencial de entrada (+) o de referencia.

Esta propiedad puede aún ser o no ser obvia, a partir de la teoría de tensión de entrada de diferencial nula. Es, sin embargo, muy útil para entender el circuito del AO, ver la entrada (+) como un terminal de referencia, el cual controlará el nivel que ambas entradas asumen. Luego esta tensión puede ser masa (como en la figura 2), o cualquier potencial que se desee.

El amplificador no inversor

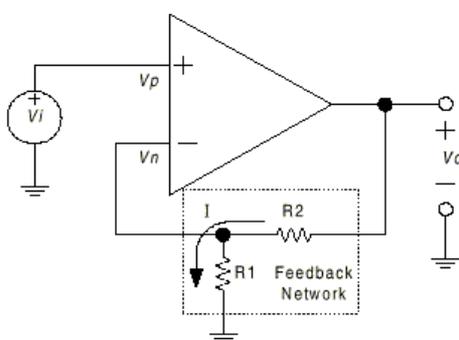


Fig. 3

La segunda configuración básica del AO ideal es el amplificador no inversor, mostrado en la **figura 3**. Este circuito ilustra claramente la validez del axioma 3. En este circuito, la tensión V_i se aplica a la entrada (+), y una fracción de la señal de salida, V_o , se aplica a la entrada (-) a través del divisor de tensión $R_1 - R_2$. Puesto que, no fluye corriente de entrada en ningún terminal de entrada, y ya que $V_d = 0$, la tensión en R_1 será igual a V_i . Así pues

$$V_i = I \cdot R_1$$

$$V_o = I \cdot (R_1 + R_2)$$

y como

tendremos pues que:

$$V_0 = \frac{V_i}{R_1} \cdot (R_1 + R_2)$$

que si lo expresamos en términos de ganancia:

$$\frac{V_0}{V_i} = \frac{R_1 + R_2}{R_1}$$

que es la ecuación característica de ganancia para el amplificador no inversor ideal.

También se pueden deducir propiedades adicionales para esta configuración. El límite inferior de ganancia se produce cuando $R_2 = 0$, lo que da lugar a una ganancia unidad.

En el amplificador inversor, la corriente a través de R_1 siempre determina la corriente a través de R_2 , independientemente del valor de R_2 , esto también es cierto en el amplificador no inversor. Luego R_2 puede utilizarse como un control de ganancia lineal, capaz de incrementar la ganancia desde el mínimo unidad hasta un máximo de infinito. La impedancia de entrada es infinita, puesto que se trata de un amplificador ideal.

Configuraciones basadas en los circuitos inversor y no inversor

El amplificador diferencial.-

Una tercera configuración del AO conocida como el amplificador diferencial, es una combinación de las dos configuraciones anteriores. Aunque está basado en los otros dos circuitos, el amplificador diferencial tiene características únicas. Este circuito, mostrado en la figura 4, tiene aplicadas señales en ambos terminales de entrada, y utiliza la amplificación diferencial natural del amplificador operacional.

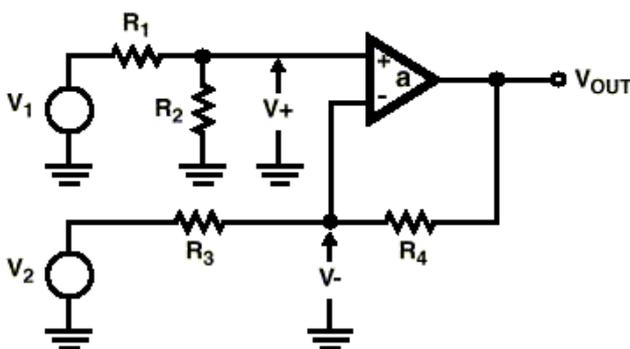


Fig. 4

Para comprender el circuito, primero se estudiarán las dos señales de entrada por separado, y después combinadas. Como siempre $V_d = 0$ y la corriente de entrada en los terminales es cero. Recordar que

$$V_d = V(+)-V(-) \implies V(-) = V(+)$$

La tensión a la salida debida a V_1 la llamaremos V_{01}

$$V(+)=\frac{V_1}{R_1+R_2} \cdot R_2$$

y como $V(-) = V(+)$; La tensión de salida debida a V_1 (suponiendo $V_2 = 0$) valdrá:

$V_{01} = \frac{V_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \cdot \frac{R_3 + R_4}{R_3}$ Y la salida debida a V_2 (suponiendo $V_1 = 0$) será, usando la ecuación de la ganancia para el circuito inversor, V_{02}

$V_{02} = -V_2 \frac{R_4}{R_3}$ Y dado que, aplicando el teorema de la superposición la tensión de salida $V_0 = V_{01} + V_{02}$ y haciendo que R_3 sea igual a R_1 y R_4 igual a R_2 tendremos que:

$$V_{01} = \frac{V_1 \cdot R_2}{R_1} \quad y \quad V_{02} = -V_2 \frac{R_2}{R_1} \quad \text{por lo que concluiremos} \quad V_0 = (V_1 - V_2) \cdot \frac{R_2}{R_1}$$

que expresando en términos de ganancia $\frac{V_0}{V_1 - V_2} = \frac{R_2}{R_1}$

que es la ganancia de la etapa para señales en modo diferencial

Esta configuración es única porque puede rechazar una señal común a ambas entradas. Esto se debe a la propiedad de tensión de entrada diferencial nula, que se explica a continuación.

En el caso de que las señales V_1 y V_2 sean idénticas, el análisis es sencillo. V_1 se dividirá entre R_1 y R_2 , apareciendo una menor tensión $V(+)$ en R_2 . Debido a la ganancia infinita del amplificador, y a la tensión de entrada diferencial cero, una tensión igual $V(-)$ debe aparecer en el nudo suma (-). Puesto que la red de resistencias R_3 y R_4 es igual a la red R_1 y R_2 , y se aplica la misma tensión a ambos terminales de entrada, se concluye que V_0 debe estar a potencial nulo para que $V(-)$ se mantenga igual a $V(+)$; V_0 estará al mismo potencial que R_2 , el cual, de hecho está a masa. Esta muy útil propiedad del amplificador diferencial, puede utilizarse para discriminar componentes de ruido en modo común no deseables, mientras que se amplifican las señales que aparecen de forma diferencial. Si se cumple la relación

$\frac{R_4}{R_3} = \frac{R_2}{R_1}$ La ganancia para señales en modo común es cero, puesto que, por definición, el amplificador no tiene ganancia cuando se aplican señales iguales a ambas entradas.

Las dos impedancias de entrada de la etapa son distintas. Para la entrada (+), la impedancia de entrada es $R_1 + R_2$. La impedancia para la entrada (-) es R_3 . La impedancia de entrada diferencial (para una fuente flotante) es la impedancia entre las entradas, es decir, $R_1 + R_3$.

El sumador inverso

Utilizando la característica de tierra virtual en el nudo suma (-) del amplificador inversor, se obtiene una útil modificación, el sumador inversor, **figura 5**.

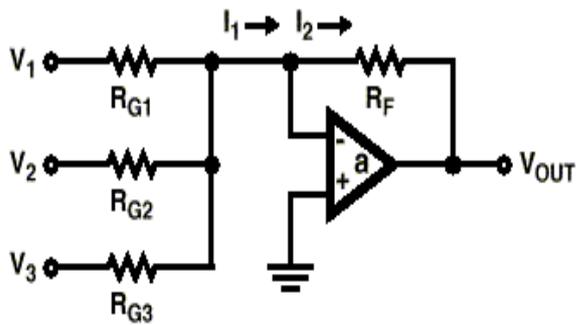


Fig. 5

En este circuito, como en el amplificador inversor, la tensión V(+) está conectada a masa, por lo que la tensión V(-) estará a una masa virtual, y como la impedancia de entrada es infinita toda la corriente I₁ circulará a través de R_F y la llamaremos I₂. Lo que ocurre en este caso es que la corriente I₁ es la suma algebraica de las corrientes proporcionadas por V₁, V₂ y V₃, es decir:

$$I_1 = \frac{V_1}{R_{G1}} + \frac{V_2}{R_{G2}} + \frac{V_3}{R_{G3}} \quad \text{y también} \quad I_2 = -\frac{V_{OUT}}{R_F}$$

$$V_{OUT} = -\left(V_1 \cdot \frac{R_F}{R_{G1}} + V_2 \cdot \frac{R_F}{R_{G2}} + V_3 \cdot \frac{R_F}{R_{G3}} \right)$$

Como I₁ = I₂ concluiremos que:

Que establece que la tensión de salida es la suma algebraica invertida de las tensiones de entrada multiplicadas por un factor corrector, que el alumno puede observar que en el caso en que R_F = R_{G1} = R_{G2} = R_{G3} ==> V_{OUT} = - (V₁ + V₂ + V₃)

La ganancia global del circuito la establece R_F, la cual, en este sentido, se comporta como en el amplificador inversor básico. A las ganancias de los canales individuales se les aplica independientemente los factores de escala R_{G1}, R_{G2}, R_{G3},... etc. Del mismo modo, R_{G1}, R_{G2} y R_{G3} son las impedancias de entrada de los respectivos canales. Otra característica interesante de esta configuración es el hecho de que la mezcla de señales lineales, en el nodo suma, no produce interacción entre las entradas, puesto que todas las fuentes de señal alimentan el punto de tierra virtual. El circuito puede acomodar cualquier número de entradas añadiendo resistencias de entrada adicionales en el nodo suma. Aunque los circuitos precedentes se han descrito en términos de entrada y de resistencias de realimentación, las resistencias se pueden reemplazar por elementos complejos, y los axiomas de los amplificadores operacionales se mantendrán como verdaderos. Dos circuitos que demuestran esto, son dos nuevas modificaciones del amplificador inversor.

El integrador

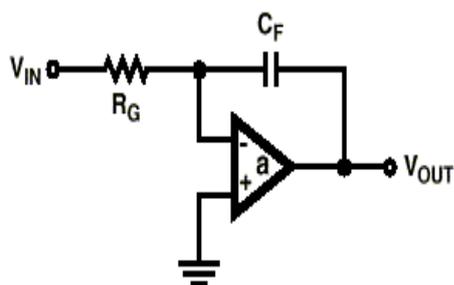


Fig. 6

Se ha visto que ambas configuraciones básicas del AO actúan para mantener constantemente la corriente de realimentación, I_F igual a I_{IN}.

Una modificación del amplificador inversor, el integrador, mostrado en la figura 6, se aprovecha de esta característica. Se aplica una tensión de entrada V_{IN}, a R_G, lo que da lugar a una corriente I_{IN}.

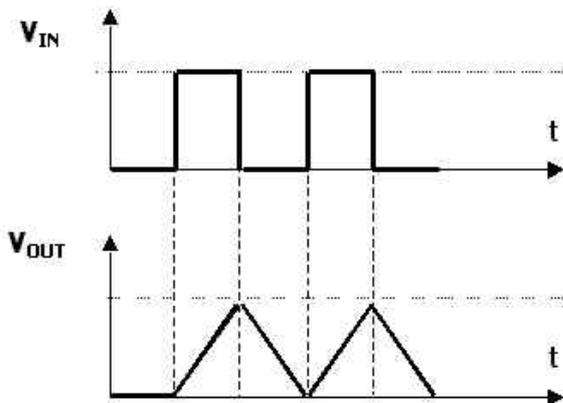
Como ocurría en el amplificador inversor, $V(-) = 0$, puesto que $V(+) = 0$, y por tener impedancia infinita toda la corriente de entrada lin pasa hacia el condensador C_F , llamaremos a esta corriente I_F .

El elemento realimentador en el integrador es el condensador C_F . Por consiguiente, la corriente constante I_F , en C_F da lugar a una rampa lineal de tensión. La tensión de salida es, por tanto, la integral de la corriente de entrada, que es forzada a cargar C_F por el lazo de realimentación. La variación de tensión en C_F es

$$-\Delta V_{OUT} = \frac{I_{IN} \cdot \Delta t}{C_F}$$

lo que hace que la salida varíe por unidad de tiempo según:

$$\frac{\Delta V_{OUT}}{\Delta t} = \frac{-V_{IN}}{R_G \cdot C_F}$$



Como en otras configuraciones del amplificador inversor, la impedancia de entrada es simplemente R_G

Obsérvese el siguiente diagrama de señales para este circuito

Por supuesto la rampa dependerá de los valores de la señal de entrada, de la resistencia y del condensador.

El diferenciador

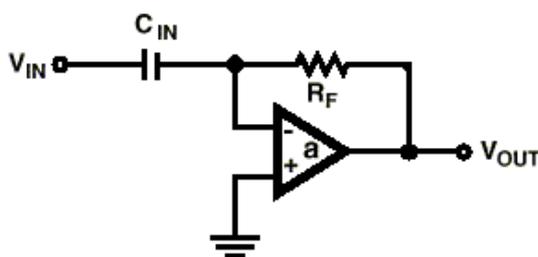
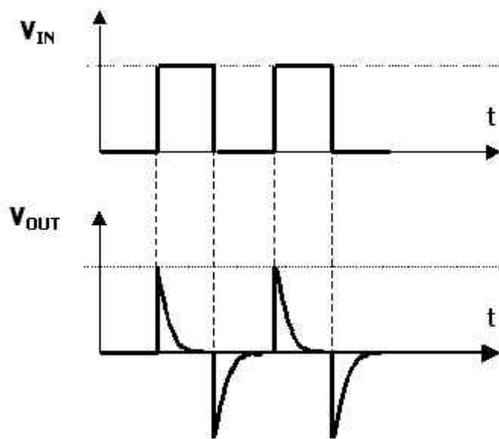


Fig. 7

Una segunda modificación del amplificador inversor, que también aprovecha la corriente en un condensador es el diferenciador mostrado en la fg 7.

En este circuito, la posición de R y C están al revés que en el integrador, estando el elemento capacitivo en la red de entrada. Luego la corriente de entrada obtenida es proporcional a la tasa de variación de la tensión de entrada:

$$\Delta I_{IN} = \frac{V_{IN} \cdot C_{IN}}{\Delta t}$$



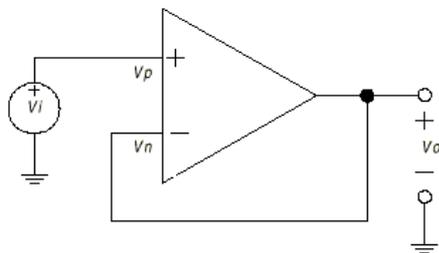
De nuevo diremos que la corriente de entrada I_{IN} , circulará por R_F , por lo que $I_F = I_{IN}$

Y puesto que $V_{OUT} = - I_F R_F$ Sustituyendo obtenemos

$$V_{OUT} = \frac{-\Delta V_{IN} \cdot R_F \cdot C_{IN}}{\Delta t}$$

Obsérvese el siguiente diagrama de señales para este circuito

El seguidor de tensión



Una modificación especial del amplificador no inversor es la etapa de ganancia unidad mostrada en la figura 8

En este circuito, la resistencia de entrada se ha incrementado hasta infinito, y R_F es cero, y la realimentación es del 100%. V_0 es entonces exactamente igual a V_i , dado que $E_s = 0$. El circuito se conoce como "seguidor de emisor" puesto que la salida es una réplica en fase con ganancia unidad de la tensión de entrada. La impedancia de entrada de esta etapa es también infinita.

Resumen de las configuraciones básicas del amplificador y sus características.

Todas las características de los circuitos que se han descrito son importantes, puesto que, son las bases para la completa fundamentación de la tecnología de los circuitos amplificadores operacionales. Los cinco criterios básicos que describen al amplificador ideal son fundamentales, y a partir de estos se desarrollan los tres principales axiomas de la teoría de los amplificadores operacionales, los cuales repetimos aquí:

- 1.- La tensión de entrada diferencial es nula
- 2.- No existe flujo de corriente en ninguno de los terminales de entrada
- 3.- En bucle cerrado, la entrada (-) será regulada al potencial de entrada (+) o de referencia.