

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, y el desarrollo gradual de los amplificadores operacionales dio lugar al nacimiento de una nueva era en los conceptos de diseño de circuitos.

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. En unos pocos años los amplificadores operacionales integrados se convirtieron en una herramienta estándar de diseño, abarcando aplicaciones mucho más allá del ámbito original de los computadores analógicos.

Con la posibilidad de producción en masa que las técnicas de fabricación de circuitos integrados proporcionan, los amplificadores operacionales integrados estuvieron disponibles en grandes cantidades, lo que, a su vez contribuyó a rebajar su coste. 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. El amplificador, que era un sistema formado antiguamente por muchos componentes discretos, ha evolucionado para convertirse en un componente discreto él mismo, una realidad que ha cambiado por completo el panorama del diseño de circuitos lineales.

Con componentes de ganancia altamente sofisticados disponibles al precio de los componentes pasivos, el diseño mediante componentes activos discretos se ha convertido en una pérdida de tiempo y de dinero para la mayoría de las aplicaciones dc y de baja frecuencia. Claramente, el amplificador operacional integrado ha redefinido las "reglas básicas" de los circuitos electrónicos acercando el diseño de circuitos al de sistemas. Lo que ahora debemos de hacer es a conocer bien los AOs, cómo funciona, cuáles son sus principios básicos y estudiar sus aplicaciones.

PRINCIPIOS BASICOS DE LOS AMPLIFICADORES OPERACIONALES

El amplificador operacional ideal.-

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.

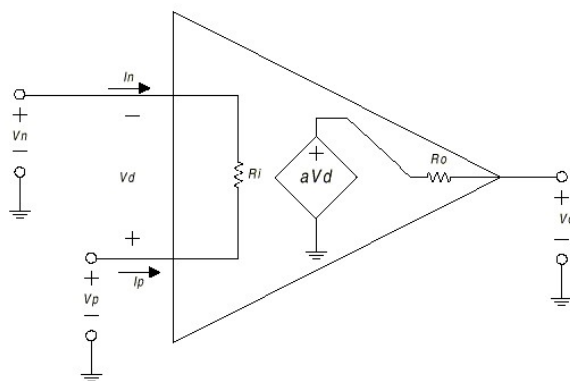


Fig. 1

$$\begin{aligned} V_0 &= a V_d \\ a &= \text{infinito} \\ R_i &= \text{infinito} \\ R_o &= 0 \\ \text{BW (ancho de banda)} &= \text{infinito} \\ V_0 &= 0 \text{ si } V_d = 0 \end{aligned}$$

En la **Figura 1** se muestra un amplificador idealizado. Es un dispositivo de acople 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. Son las siguientes:

1. La ganancia de tensión es infinita:

$$a = \infty$$

2. La resistencia de entrada es infinita:

$$R_i = \infty$$

3. La resistencia de salida es cero:

$$R_o = 0$$

4. El ancho de banda es infinito:

$$BW = \infty$$

5. La tensión offset de entrada es cero:

$$V_0 = 0 \text{ si } V_d = 0$$

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:

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 .

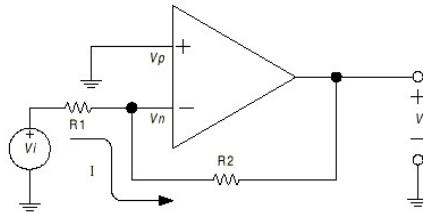


Fig. 2

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_o , con tensión de entrada nula. Ya que, la entrada diferencial de A es:

$$V_d = V_p - V_n \implies V_d = 0 \text{ y si } V_d = 0,$$

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 $-V_o$

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

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

por lo que:

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

luego la ganancia del amplificador inversor:

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

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 entrada 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

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.

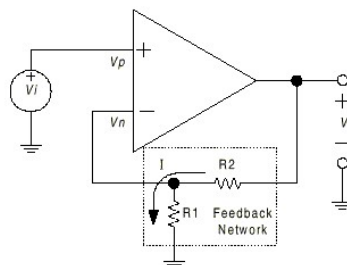


Fig. 3

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

$$V_i = I \cdot R_1$$

y como

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

tendremos pues que:

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

que si lo expresamos en términos de ganancia:

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

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.

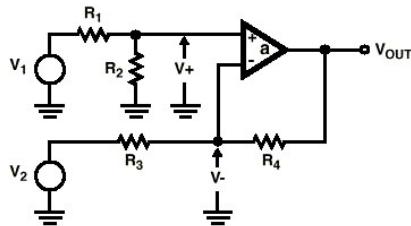


Fig. 4

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 $V_d = V(+) - V(-) ==> V(-) = V(+)$

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 $V_o = V_{01} + V_{02}$ y haciendo que R_3 sea igual a R_1 y R_4 igual a R_2 tendremos que:

$$V_{01} = \frac{V_1 \cdot R_2}{R_1} \quad V_{02} = -V_2 \frac{R_2}{R_1}$$

por lo que concluiremos

$$V_o = (V_1 - V_2) \cdot \frac{R_2}{R_1}$$

que expresando en términos de ganancia:

$$\frac{V_o}{V_1 - V_2} = \frac{R_2}{R_1}$$

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_o debe estar a potencial nulo para que $V(-)$ se mantenga igual a $V(+)$; V_o 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 inversor

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

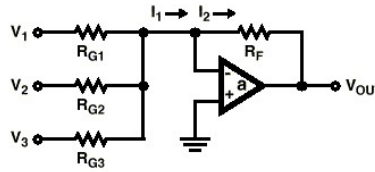


Fig. 5

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 I_1 circulará a través de R_F y la llamaremos I_2 . Lo que ocurre en este caso es que la corriente I_1 es la suma algebraica de las corrientes proporcionadas por V_1 , V_2 y V_3 , es decir:

$$I_1 = \frac{V_1}{R_{G1}} + \frac{V_2}{R_{G2}} + \frac{V_3}{R_{G3}}$$

y también

$$I_2 = -\frac{V_{OUT}}{R_F}$$

Como $I_1 = I_2$ concluiremos que:

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

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 $R_F = R_{G1} = R_{G2} = R_{G3} \Rightarrow V_{OUT} = -(V_1 + V_2 + V_3)$

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} ,... étc. 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

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

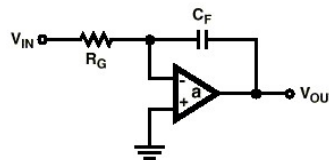


Fig. 6

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 ocurrirá en el amplificador inversor, $V(-) = 0$, puesto que $V(+)=0$, y por tener impedancia infinita toda la corriente de entrada I_{IN} 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

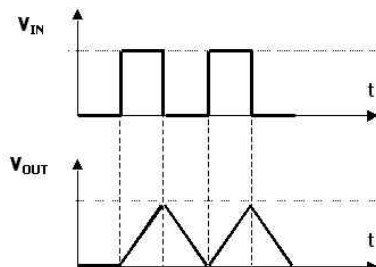
$$-\Delta V_{OUT} = \frac{I_{IN} \cdot \Delta t}{C_F}$$

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

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

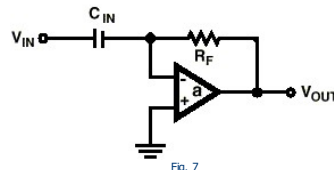


Fig. 7

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:

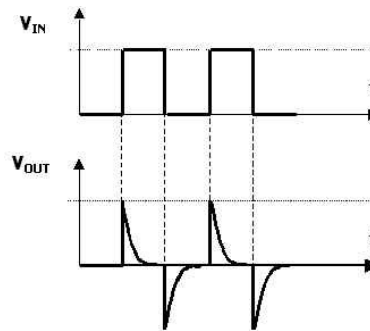
$$\Delta I_{IN} = \frac{V_{IN} \cdot C_{IN}}{\Delta t}$$

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

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

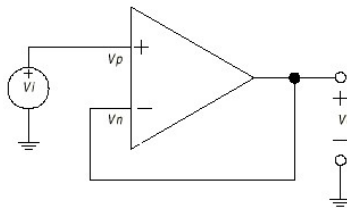
$$V_{OUT} = -\frac{\Delta V_{IN} \cdot R_F \cdot C_{IN}}{\Delta t}$$

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_O 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.

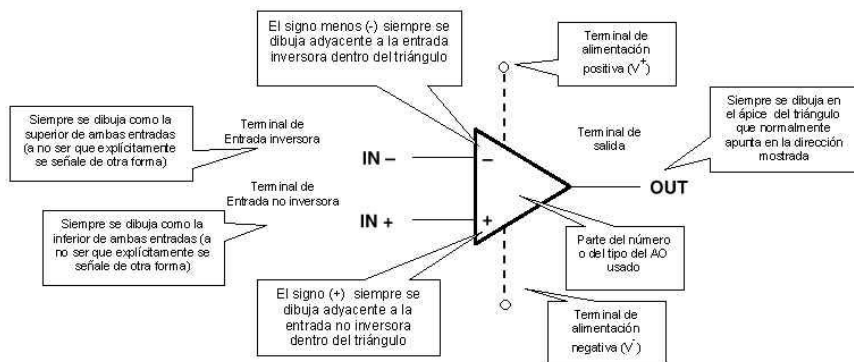
- 1.- La tensión de entrada diferencial es nula
- 2.- No existe flujo de corriente en ninguno de los terminales de entrada
- 3.- En bucle cerrado, la entrada (-) será regulada al potencial de entrada (+) o de referencia.

Estos tres axiomas se han ilustrado en todos los circuitos básicos y sus variaciones. En la configuración inversora, los conceptos de corriente de entrada nula, y tensión de entrada diferencial cero, dan origen a los conceptos de nudo suma y tierra virtual, donde la entrada inversora se mantiene por realimentación al mismo potencial que la entrada no inversora a masa. Usando el concepto de la entrada no inversora como terminal de referencia, el amplificador no inversor y el seguidor de emisor ilustran como una tensión de entrada es indirectamente multiplicada a través de una realimentación negativa en la entrada inversora, la cual es forzada a seguir con un potencial idéntico. La configuración diferencial combina estos conceptos, ilustrando el ideal de la simultaneidad de la amplificación diferencial y del rechazo de la señal en modo común. Las variaciones del inversor ponen de nuevo de manifiesto los principios básicos. En todos estos circuitos, hemos visto también cómo el funcionamiento está solamente determinado por los componentes conectados externamente al amplificador.

Hasta este momento, hemos definido el AO en sentido ideal y hemos examinado sus configuraciones básicas. Con una definición adicional, la simbología del dispositivo, llegaremos al mundo real de los dispositivos prácticos, examinaremos sus desviaciones respecto al ideal, y veremos cómo superarlas.

SIMBOLO ESQUEMATICO DEL AMPLIFICADOR OPERACIONAL ESTANDAR Y SU USO.

Una herramienta adicional básica del AO es su símbolo esquemático. Este es fundamental, dado que un esquema correctamente dibujado nos dice mucho sobre las funciones de un circuito. El símbolo más usado se muestra en la figura 9 con algunas abreviaturas anotadas.



El símbolo básico es un triángulo, el cual generalmente presupone amplificación. Las entradas están en la base del triángulo, y la salida en el ápice. De acuerdo con el convenio normal del flujo de señal, el símbolo se dibuja con el ápice (salida) a la derecha, pero puede alterarse si es necesario para clarificar otros detalles del circuito.

Usualmente, las dos entradas se dibujan como se indica en la figura; la entrada no inversora (+) es la inferior de las dos. Excepciones a esta regla se producen en circunstancias especiales, en las que podrá ser difícil mantener el convenio estándar. Además, las dos entradas están claramente identificadas por los símbolos (+) y (-), los cuales se sitúan adyacentes a sus respectivos terminales dentro del cuerpo del triángulo.

Como se ve, los terminales de las tensiones de alimentación se dibujan, preferiblemente, por encima y debajo del triángulo. Estos pueden no ser mostrados en todos los casos (en favor de la simplicidad) pero siempre están implícitos. Generalmente, en croquis, basta con usar el símbolo de tres terminales para dar a entender el significado, sobreentendiendo las conexiones de alimentación.

Finalmente, el tipo o número del dispositivo utilizado se sitúa centrado en el interior del triángulo. Si el circuito es uno general, indicativo de un amplificador operacional cualquiera, se usa el símbolo A (o A₁, A₂, etc.)