

AMPLIFICADORES OPERACIONALES

1 - Introducción

En 1965, la compañía Fairchild Semiconductor introdujo en el mercado el $\mu A709$, el primer amplificador operacional monolítico ampliamente usado. Aunque disfrutó de un gran éxito, esta primera generación de amplificadores operacionales tenía muchas desventajas. Este hecho condujo a fabricar un amplificador operacional mejorado, el $\mu A741$. Debido a que es muy barato y sencillo de usar, el $\mu A741$ ha tenido un enorme éxito. A partir de entonces han aparecido otros diseños del 741 en el mercado. Por ejemplo, Motorola produce el MC1741, National Semiconductor el LM741 y Texas Instruments el SN72741. Todos estos amplificadores operacionales son equivalentes al $\mu A741$, ya que tienen las mismas especificaciones en sus hojas de características. Para simplificar el nombre, la mayoría de la gente ha evitado los prefijos y a este amplificador operacional de gran uso, representado en la *figura 1*, se le llama simplemente 741.

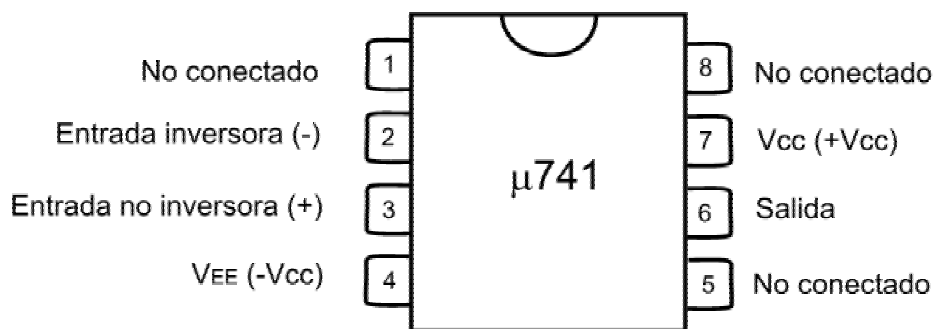


Figura 1 – Patillaje (pinout) del amplificador operacional 741

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 electrónico 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 funcionan, cuáles son sus principios básicos y estudiar sus aplicaciones.

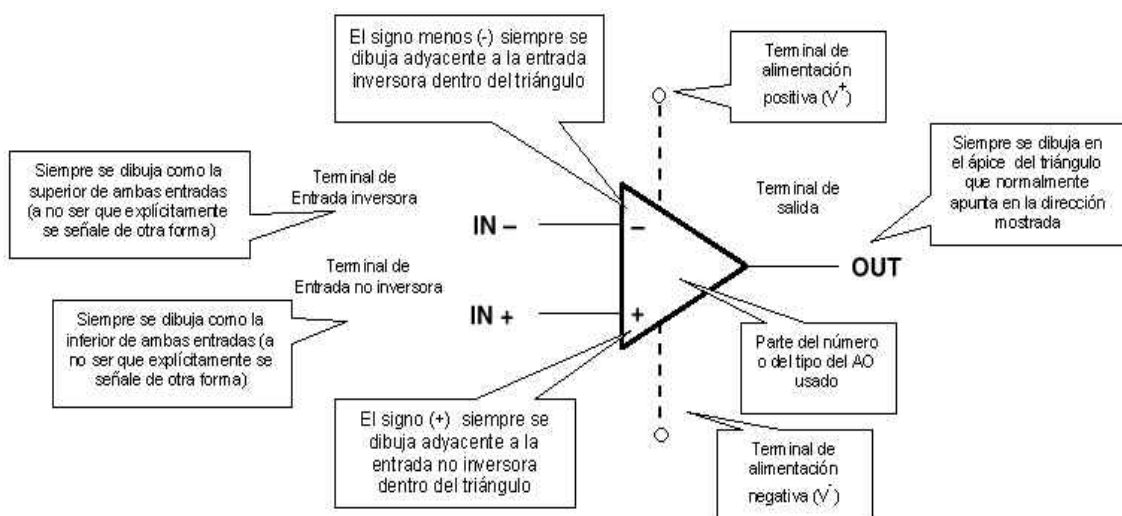


Figura 2 – Símbolo del amplificador operacional

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 2* con algunas aclaraciones 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 vértice. De acuerdo con el convenio normal del flujo de señal, el símbolo se dibuja señalando hacia 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 podría 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.)

2 – Principios básicos de los amplificadores operacionales

2.1 – 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, piense 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.

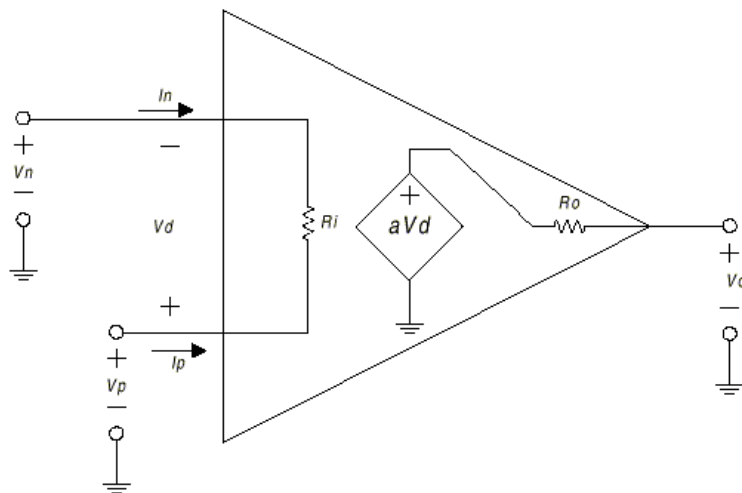


Figura 3 – Abstracción de un amplificador operacional

En la *figura 3* 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 $a \cdot V_d$ 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 ($+V_{cc}$ y $-V_{cc}$).

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: $V_0 = 0$ si $V_d = 0$

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

- *Axioma 1: 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.*
- *Axioma 2: La tensión diferencial de entrada es nula. Asimismo, 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.

2.2 - Configuraciones básicas del amplificador operacional

Los amplificadores operacionales se pueden conectar según dos circuitos amplificadores básicos: las configuraciones inversora (1) y no inversora (2). Casi todos los demás circuitos con amplificadores operacionales están basados, de alguna forma, en estas dos configuraciones básicas o en una tercera, el amplificador diferencial.

2.2.1 – El amplificador inversor

La *figura 4* ilustra la primera configuración básica del AO: el amplificador inversor. En este circuito, la entrada (+) está conectada 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 .

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 es:

$$V_d = V_p - V_n \implies V_d = 0$$

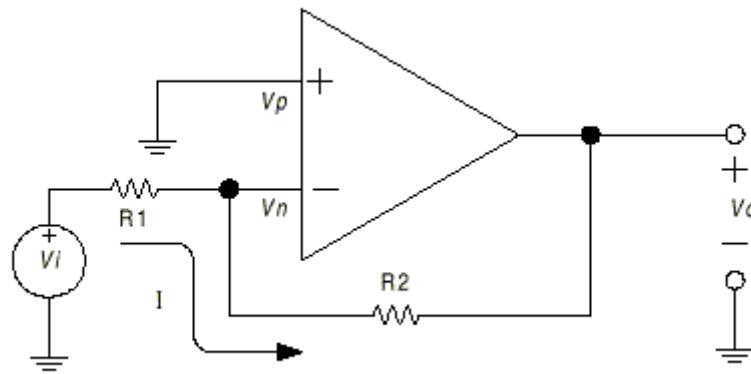


Figura 4 – Amplificador inversor

Y si $V_d = 0$, entonces toda la tensión de entrada V_i deberá aparecer en los terminales de 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 $-V_0$.

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

por lo que:

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

luego la ganancia del amplificador inversor quedará como:

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

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 entrada del amplificador (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:

- **Axioma 3:** 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 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. Esta tensión puede ser masa (como en la *figura 4*) o cualquier potencial que se desee.

2.2.2 – El amplificador no inversor

La segunda configuración básica del AO ideal es el amplificador no inversor, mostrado en la *figura 5*. 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 en ningún terminal de entrada y ambas tensiones de los terminales de entrada son iguales (ya que $V_d = 0$), la tensión en R_1 será igual a V_i .

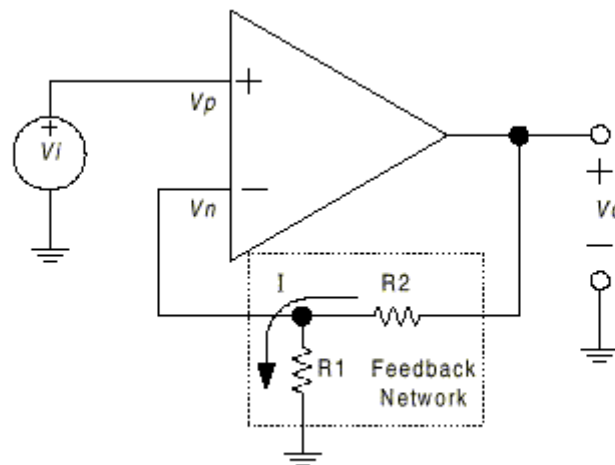


Figura 5 – Amplificador no inversor

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 la unidad hasta un máximo de infinito. La impedancia de entrada es infinita, puesto que se trata de un amplificador ideal.

Una modificación especial del amplificador no inversor es la etapa de ganancia unidad mostrada en la *figura 6*.

En este circuito se han eliminado las resistencias R_1 y R_2 del divisor de tensión con lo cual $R_1 = \infty$ y $R_2 = 0$. Al aplicar la expresión anterior se obtiene que $V_O = V_i$. 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.

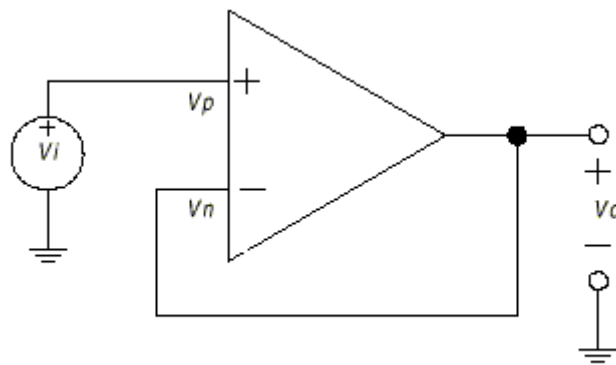


Figura 6 – Amplificador seguidor de tensión

2.2.3 - Configuraciones basadas en los circuitos inversor y no inversor

2.2.3.1 – 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 7*, tiene aplicadas señales en ambos terminales de entrada, y utiliza la amplificación diferencial natural del amplificador operacional.

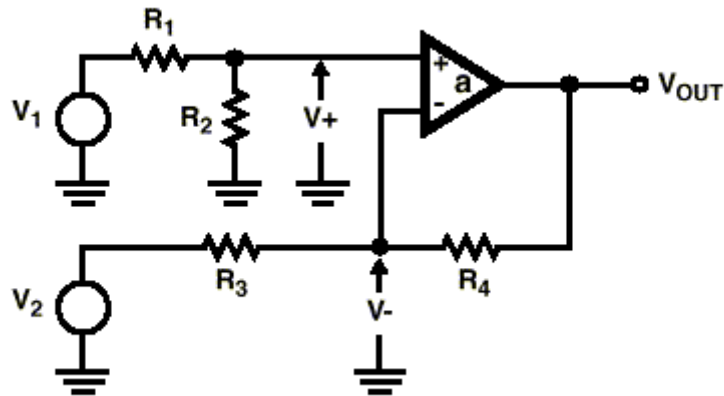


Figura 7 – Amplificador diferencial

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

Llamaremos V_{01} a la tensión a la salida debida a V_1 y V_{02} a la producida por V_2 . Así:

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

y como $V_d = 0$, 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:

$$V_{02}=-V_2\frac{R_4}{R_3}$$

Dado que, aplicando el teorema de la superposición, la tensión total de salida será la suma de ambas contribuciones ($V_0 = V_{01} + V_{02}$) y haciendo que R_3 sea igual a R_1 y R_4 igual a R_2 tendremos que:

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

por lo que concluiremos:

$$V_0=(V_1-V_2)\cdot\frac{R_2}{R_1}$$

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 que la tensión de entrada diferencial es nula, debe aparecer en el nudo suma (entrada inversora) una tensión igual $V(-)$. Puesto que la red de resistencias formada por R_3 y R_4 es igual a la red formada por 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 conectado 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 $R_1 + R_2$, mientras que para la entrada (-) es R_3 . La impedancia de entrada diferencial (para una fuente flotante) es la impedancia entre las entradas, es decir, $R_1 + R_3$.

2.2.3.2 – El sumador inversor

Utilizando la característica de tierra virtual en el nudo suma (-) del amplificador inversor, se obtiene una útil modificación que constituye el sumador inversor mostrado en la *figura 8*.

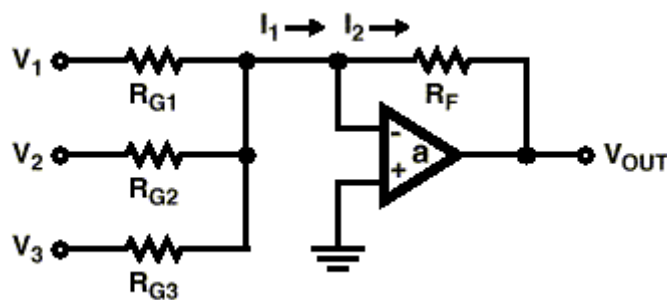


Figura 8 – Circuito del sumador inversor

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

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

Teniendo en cuenta que $I_1 = I_2$ 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 cada una de ellas multiplicada por un factor corrector. En el caso en que se dé la condición $R_F = R_{G1} = R_{G2} = R_{G3}$ cada uno de los factores correctores presentará un valor unidad, con lo cual $V_{OUT} = -(V_1 + V_2 + V_3)$.

La ganancia global del circuito la establece R_F , la cual, en este sentido, se comporta como en el amplificador inversor básico. Las ganancias de los canales individuales vendrán determinadas independientemente por los factores de escala $R_{G1}, R_{G2}, R_{G3}, \dots$ etc (en el caso de que el amplificador poseyese más de tres entradas). 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.

2.2.3.3 – El integrador

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 y el diferenciador.

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

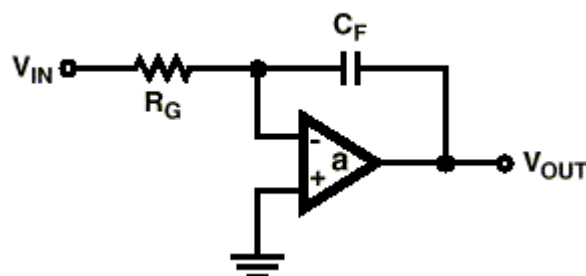


Figura 9 – Circuito integrador basado en amplificador operacional

Una modificación del amplificador inversor, el integrador, mostrado en la *figura 9* 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 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 . El comportamiento de este circuito puede contemplarse en el diagrama de señales de la *figura 10*, donde se aprecia que la salida constituye la integral de la corriente de entrada.

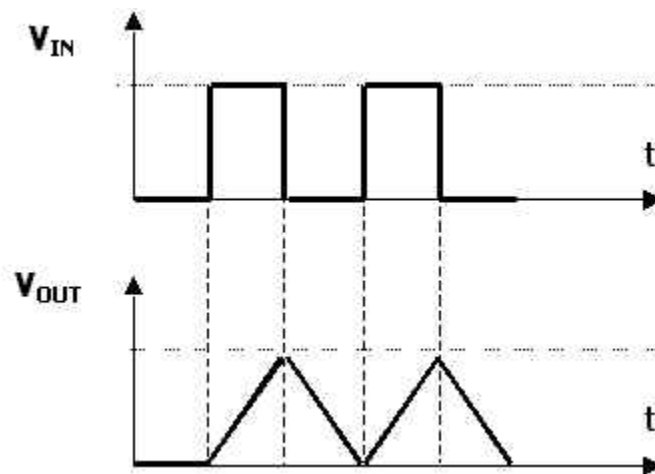


Figura 10 – Comportamiento del integrador

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

2.2.3.4 – El diferenciador

Una segunda modificación del amplificador inversor, que también aprovecha la corriente en un condensador, es el diferenciador mostrado en la *figura 11*.

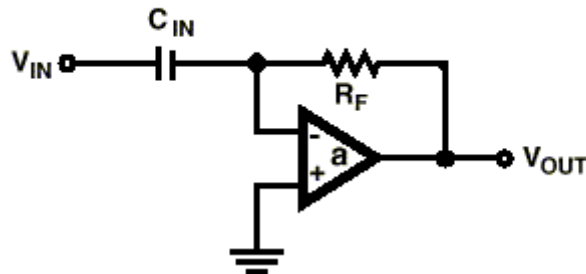


Figura 11 – Circuito diferenciador basado en amplificador operacional

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:

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

cuyo diagrama de funcionamiento corresponde al representado en la *figura 12*. En él puede observarse que la salida del circuito constituye una diferenciación de señal de entrada.

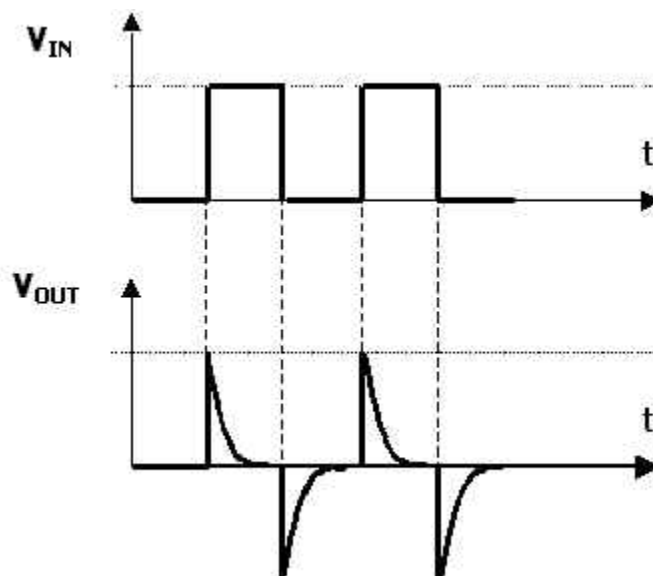


Figura 12 – Comportamiento del diferenciador