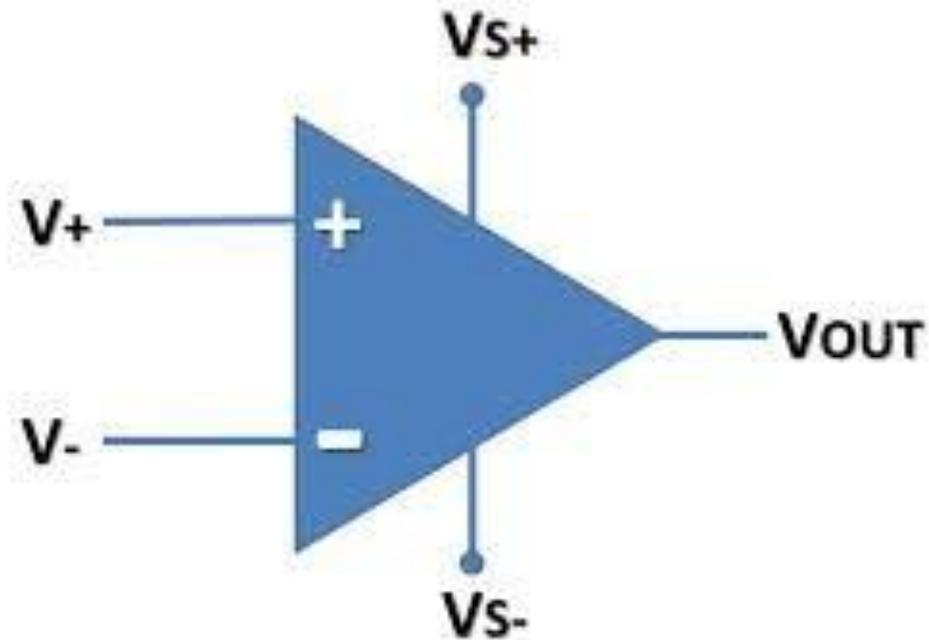


Amplificador Operacional



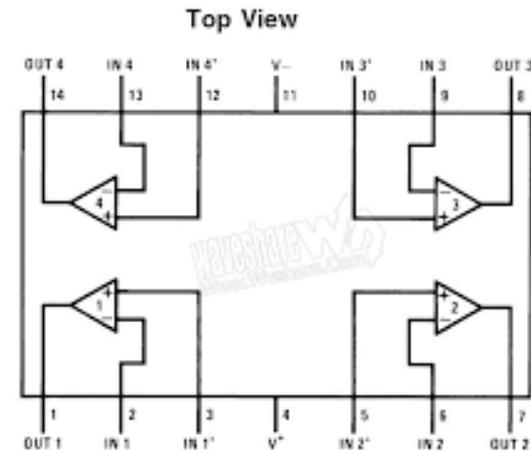
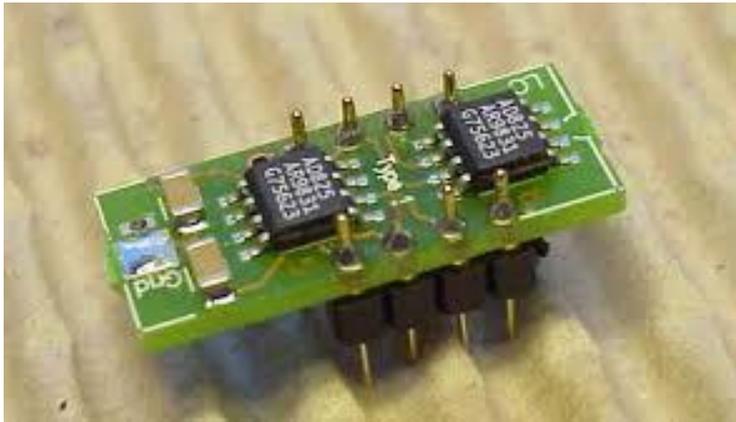
Introducción

El gran objetivo de los investigadores en el campo de la electrónica es conseguir realizar operaciones cada vez más complejas en el menor espacio posible y con el mínimo coste; de ahí que se empezaran a usar los circuitos integrados, es decir, circuitos muy pequeños donde todos los componentes que los forman se encuentran muy juntos y en un espacio muy reducido. Uno de los componentes más importantes de este tipo de circuitos es el **Amplificador Operacional (AO)**.



El A.O. como elemento imprescindible en electrónica

Si a cualquier ingeniero electrónico se le preguntase cuál es el elemento más importante, más utilizado o más útil de los que existen actualmente, al margen evidentemente de los básicos, como resistencias, condensadores, inductancias y transistores, probablemente diría que los **amplificadores operacionales, A.O.**

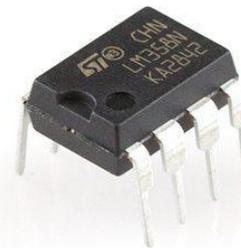


El A.O. como dispositivo de cálculo

Hay que retroceder un poco en la historia de la electrónica para razonar el porqué de la denominación "*amplificador operacional*" para los circuitos que ahora nos ocupan. El tipo de amplificador integrado en el chip se utilizó en los albores de la era de la integración electrónica pero en dispositivos de **cálculo analógico**. Dichas máquinas realizaban cálculos matemáticos mediante funciones electrónico-matemáticas, tales como la "*integración*" y la "*diferenciación*". De aquí proviene la denominación histórica de estos circuitos. Posteriormente, debido a sus excelentes características -como conjunto de componentes discretos- se comenzaron a fabricar en forma continua e integrada, hasta llegar a la época actual en la que comprar un amplificador operacional es tan sencillo como adquirir, por ejemplo, un transistor. Ambos pueden contemplarse como un **ente compacto** y diferenciado dentro del diseño electrónico (con la salvedad de que el primero contiene un buen número de los segundos).

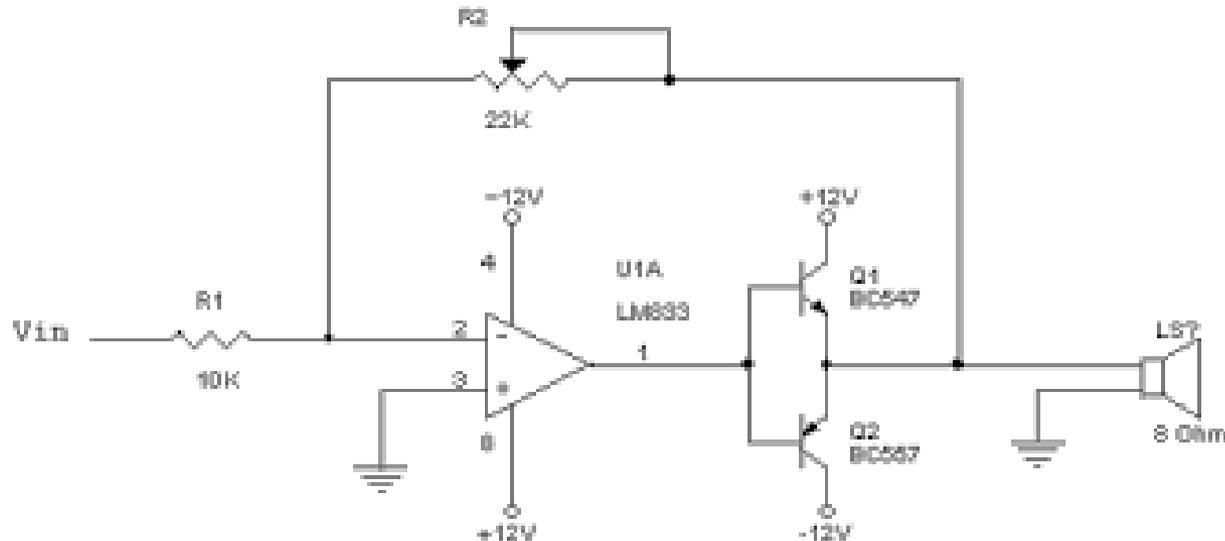
Su desarrollo

El desarrollo de este tipo de **amplificadores** durante la década de los 60, junto con el gran avance tecnológico en la fabricación de sistemas integrados ha conseguido que, en la actualidad, dispongamos de amplificadores operacionales con un gran margen de fiabilidad, compactos y de muy fácil utilización.



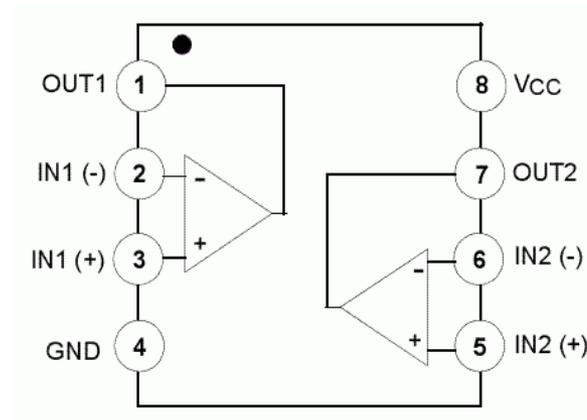
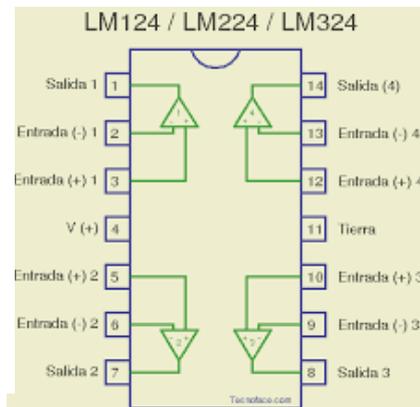
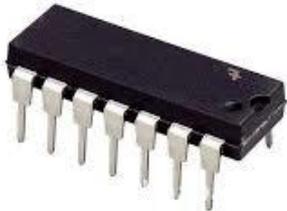
Propósito

Actualmente, en lugar de diseñarse un **amplificador** perfectamente detallado con sus etapas individuales a base de decenas de componentes, se suele diseñar un circuito con unos cuantos amplificadores operacionales encapsulados y unos pocos elementos básicos, tales como resistencias, condensadores, diodos y algún que otro transistor que pudiera necesitar.



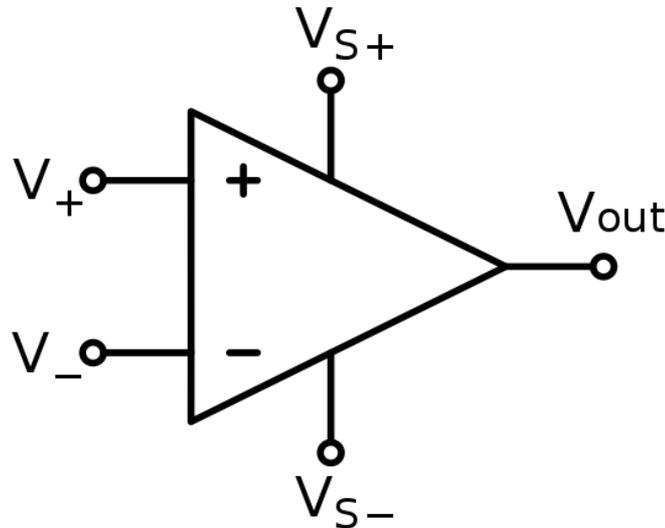
Su tamaño

El tamaño final del circuito es otra de las ventajas que presentan los amplificadores contruidos con **amplificadores operacionales**, ya que estos se pueden encontrar en la actualidad perfectamente encapsulados, de 8 y 14 pines, reduciendo así el espacio que ocuparían otros componentes. Por último, señalaremos como ventaja la **alta fiabilidad** que presentan estos amplificadores, evitando así un tedioso proceso de pruebas iniciales y mediciones con el fin de determinar las características finales del circuito.



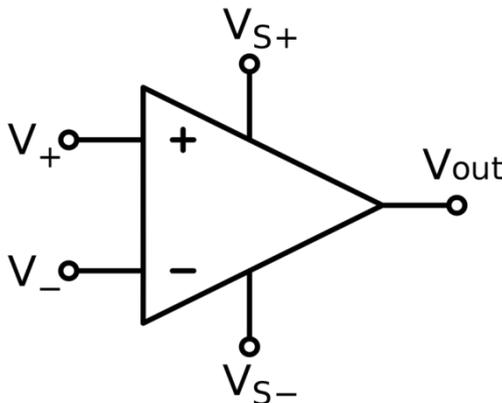
Simbología del A.O.

El símbolo del amplificador operacional que se representa en los esquemas de circuitos es un **triángulo** del que salen tres terminales. Esto no quiere decir que un **A.O.** tan solo tenga tres conexiones sino que sus tres señales principales (dos para la entrada y una para la salida) son las únicas que se dibujan. Además de estos terminales principales, las patas del conexionado de un amplificador operacional pueden también proveer conexión para la compensación de la **respuesta en frecuencia** y una red de compensación del desplazamiento de corriente continua.



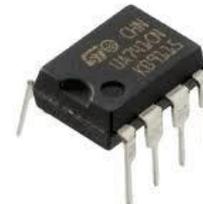
Representación de un A.O.

Como se ha comentado, su representación dentro del esquema de un circuito es de un **triángulo** en el que entran dos terminales que son las dos entradas: una **positiva V_+** , llamada entrada **no inversora** y la otra **negativa V_-** , o entrada **inversora**, y del que sale un terminal que se toma como salida del circuito **V_{out}** . La salida del circuito amplificador operacional va a estar amplificada respecto a las dos entradas, pudiendo estar **en fase** con ellas, lo que se llamaría **circuito no inversor**, o **desfasada**, siendo entonces un circuito **inversor**. Por otra parte, debido a que la impedancia de entrada es muy elevada, no va a circular corriente del terminal de entrada positivo al negativo y, por lo tanto, ambos terminales van a tener la misma tensión.



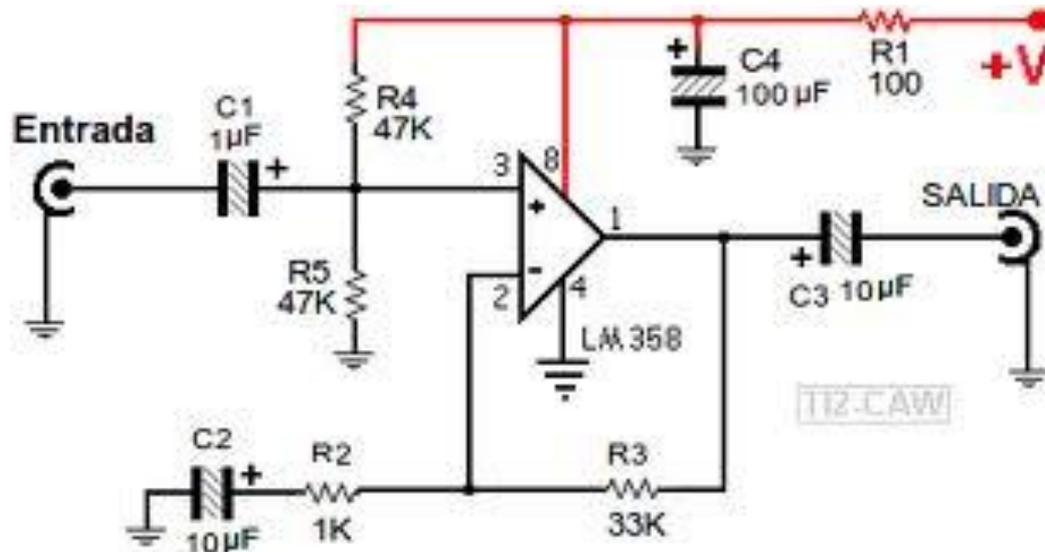
Métodos de fabricación

Existen dos métodos básicos en la fabricación del amplificador operacional (**A.O.**), en forma discreta o integrados. Para realizarlos mediante forma discreta hay que reunir todos los elementos necesarios para su construcción (transistores, resistencias) y montarlos en un pequeño **circuito impreso**. Este circuito queda encapsulado saliendo por fuera únicamente las conexiones necesarias para su funcionamiento. En este tipo de amplificadores, los transistores utilizados pueden ser tanto **BJT** como **FET**. En la fabricación de amplificadores operacionales de forma integrada se sigue un delicado proceso mediante la técnica de circuitos híbridos de película delgada, película gruesa y/o técnicas de circuitos integrados monolitos.



Ventajas de los A.O.

Con esto se consiguen innumerables ventajas: en primer lugar una mayor **sencillez** en el **diseño**. Otra ventaja es que las principales características de un amplificador, como son su ganancia y su respuesta en frecuencia, son controladas con precisión mediante **elementos pasivos estables** (por ejemplo resistencias, condensadores o diodos).



Ventajas del uso de los A.O.

Puede parecer un poco presuntuoso por nuestra parte asignar a los operacionales un papel estelar dentro de la electrónica pero, si hacemos honor a la verdad, este componente es, realmente, uno de los más socorridos dentro del apartado que denominamos "*electrónica analógica*".

Queda claro que cualquier circuito que contenga un **operacional** puede también diseñarse sin él. Para ello tendríamos que utilizar componentes discretos y no un integrado específico. Ahora bien, el uso de un operacional en vez de los componentes a los que éste sustituye redundante en unas cuantas **ventajas** que el diseñador, o el simple aficionado, no puede pasar por alto. Entre éstas podemos destacar las siguientes:

- **Ahorro en la etapa de diseño:** el A.O. se contempla como una "*caja negra*" ideal a la que sólo hay que alimentar correctamente y conectar sus terminales de entrada y salida.

Ventajas del uso de los A.O.

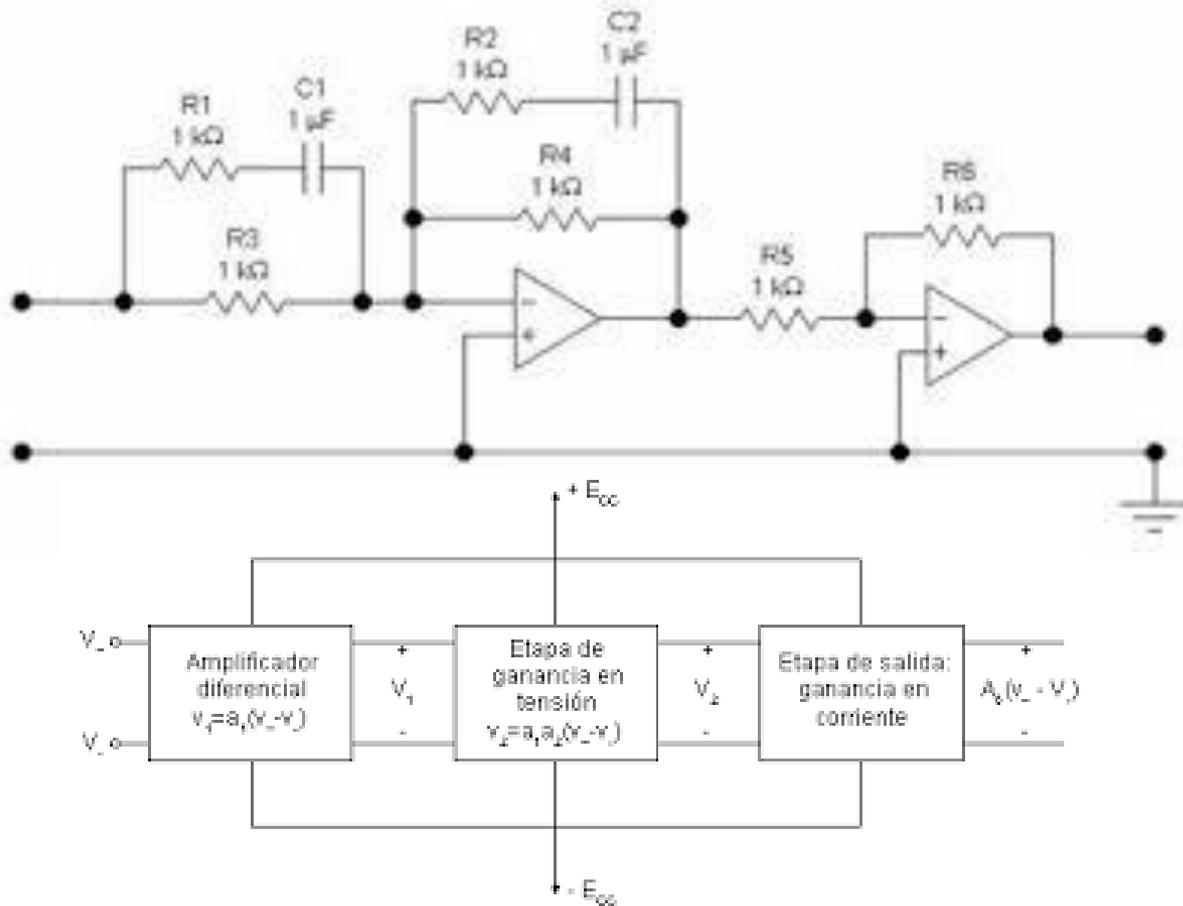
- **Sencillez de sustitución** en caso de avería: al ir contenido en un "*chip*", el operacional puede ser sustituido de forma rápida. Para ello sólo tenemos que colocarlo en el circuito sobre un zócalo adecuado.
- **Fiabilidad**: el hecho de que un buen número de transistores de nuestro montaje venga contenido en un único chip, que es verificado en fábrica, evita la posibilidad de errores si se cablearan de forma discreta los transistores contenidos en el A.O.
- **Ahorro económico**: no hay que ser un experto en finanzas para apreciar la diferencia de costo que representaría adquirir los componentes integrados en un operacional, en vez de comprar directamente este chip.
- **Ahorro de espacio**: a pesar de que nos empeñemos en verlo así, la preocupación por la miniaturización electrónica no es tan sólo una "*obsesión nipona*". Sólo tenemos que pensar que el coste de un circuito dado también se incrementa con el aumento del circuito impreso (soporte para soldar los componentes). O, dicho de otra forma: a menor superficie de circuito menor coste del mismo.

Un diseño para varios modelos

El **amplificador operacional** es el resultado de un largo período de investigación y pruebas sobre circuitos más o menos complicados. El hecho de que este tipo de amplificadores haya tenido tanta trascendencia en la electrónica moderna se debe a las numerosas ventajas que ya hemos enumerado. No obstante, como parece lógico, no existe un único tipo de amplificador operacional con el mismo número de componentes y las mismas conexiones, sino que hay varios modelos con mejores o peores características.

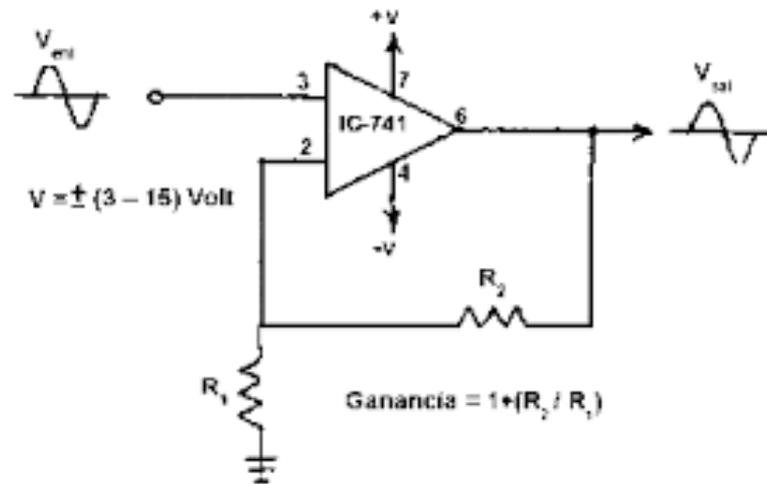
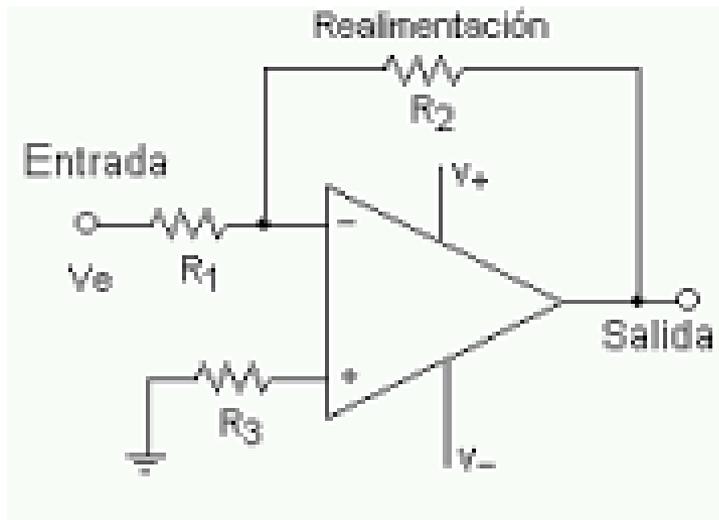
La mayoría de los amplificadores operacionales disponibles en el mercado en la actualidad poseen una **configuración en cascada**, denominada habitualmente "*amplificador operacional de dos etapas*". Esto es debido a que, de las cuatro etapas que la componen, únicamente dos de ellas contribuyen a la amplificación de la señal propiamente dicha.

Amplificación en cascada



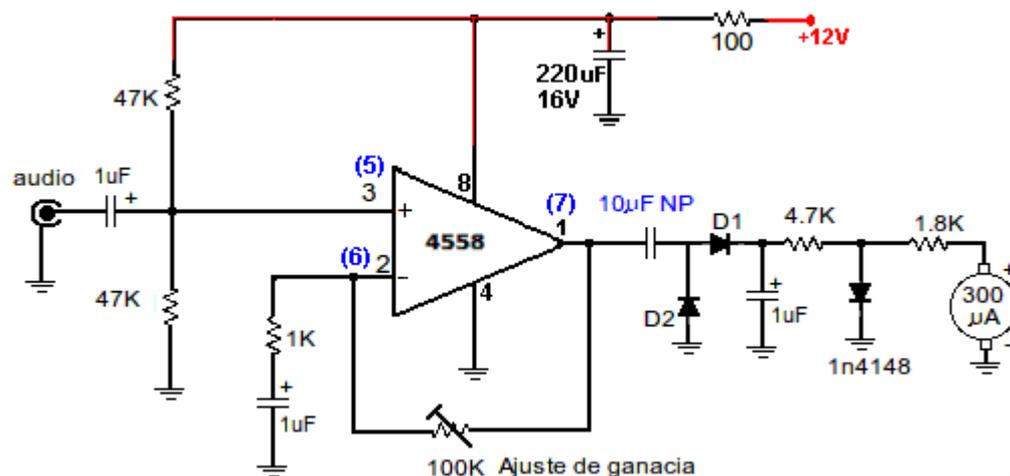
Técnicas de realimentación

Además las técnicas de realimentación se pueden aplicar al transistor sin ningún problema para evitar así comportamientos no lineales (ruidos, distorsiones) ante variaciones considerables de temperatura, de frecuencia o incluso variaciones de otros amplificadores.



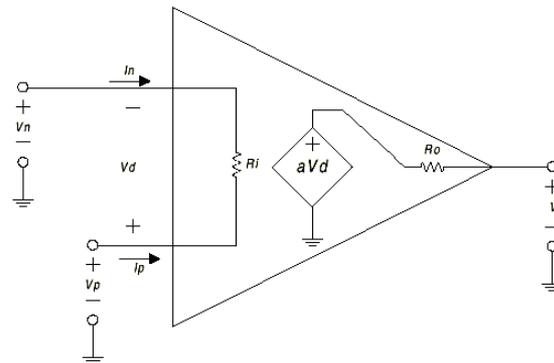
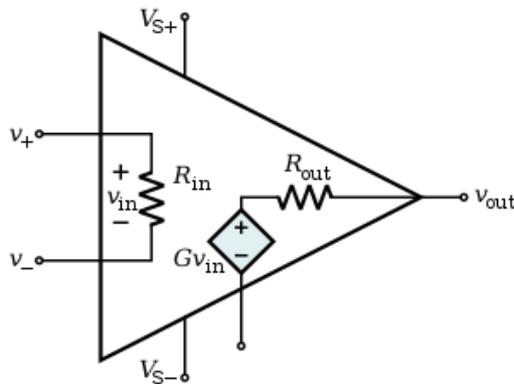
Diseño para operaciones de matemáticas

Al principio, este tipo de amplificadores se usaba para realizar toda clase de operaciones matemáticas, de ahí su nombre de amplificadores operacionales, como luego veremos; pero pronto se descubrieron otras aplicaciones mucho más importantes, aunque siguieron manteniendo el nombre. Entre estas **nuevas aplicaciones** dadas a estos amplificadores caben destacar las siguientes: amplificadores de señales, transformadores de impedancias, reguladores de tensión, comparadores, filtros activos, etc.



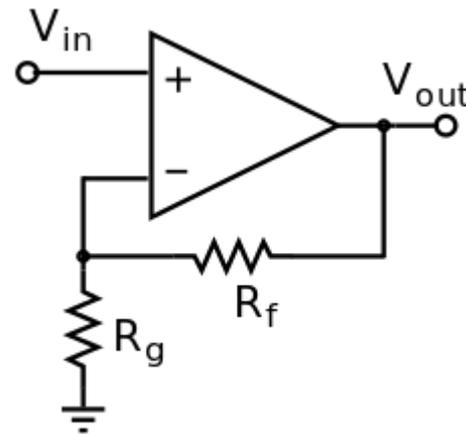
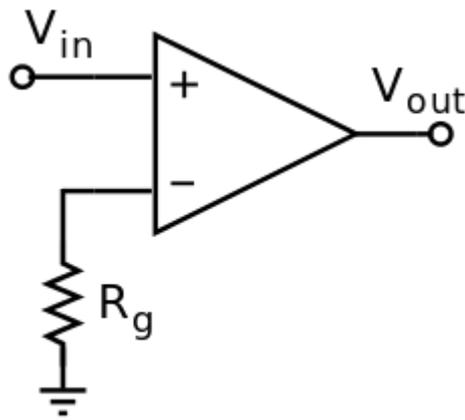
Propiedades de un A.O. ideal

Si consideramos el amplificador operacional como un amplificador operacional ideal tendríamos un circuito capaz de producir una ganancia en tensión **infinita**, una impedancia de salida igual a cero, una impedancia de entrada infinita, un ancho de banda **infinito** y una gran facilidad para poder gobernar la ganancia que obtengamos mediante una resistencia externa que actúa como lazo de realimentación entre la entrada y la salida. Todas estas propiedades son imposibles de conseguir, ya que, como hemos dicho al principio, son ideales, pero cuanto más se aproxime a ellas un **circuito amplificador** mejor va a ser su funcionamiento.



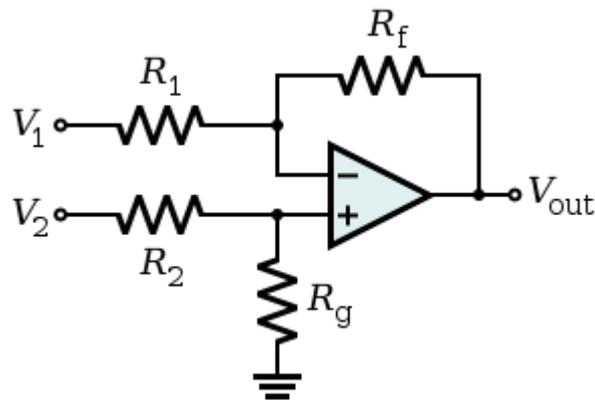
Características de un A.O.

La importancia del amplificador operacional radica en que se aproxima muchísimo a todas ellas. Es capaz de obtener una ganancia de tensión muy alta, aunque no infinita, su impedancia de salida es muy baja mientras que la de entrada es muy elevada, el ancho de banda es bastante grande y, por último, podemos conseguir regular bastante bien la ganancia mediante la **resistencia de realimentación**.



Características de un A.O.

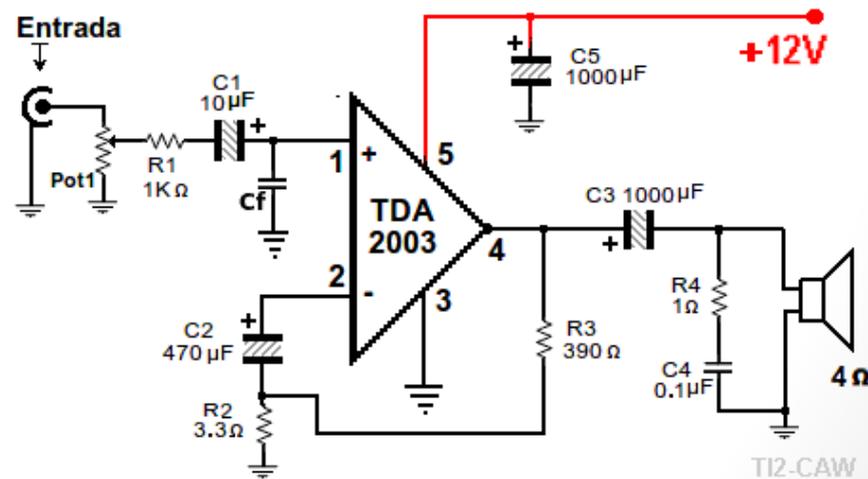
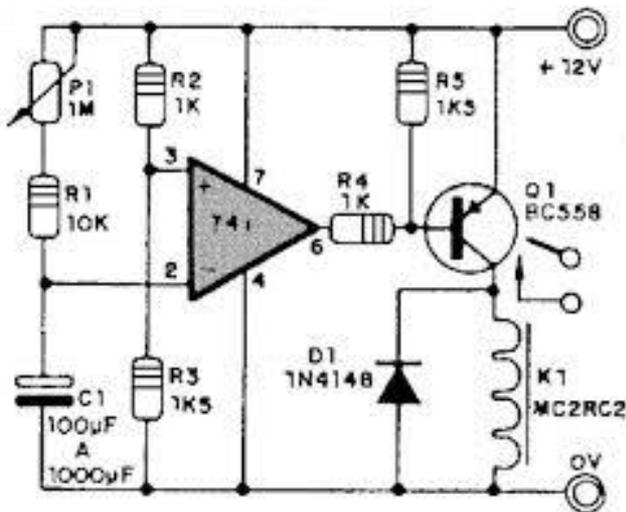
El considerar al **amplificador operacional** como un amplificador ideal es una técnica muy habitual, ya que así es mucho más sencillo obtener resultados en los diferentes circuitos en los que se utiliza, produciéndose un error muy pequeño respecto al que obtendríamos si no considerásemos al amplificador como ideal, sino que tratásemos de realizar sus medidas exactas. El amplificador operacional se ha convertido en uno de los elementos más importantes, hoy en día, dentro de la electrónica moderna debido a sus **ventajas**: sencillez, fiabilidad, bajo precio, reducido espacio, innumerables aplicaciones y propiedades casi ideales como amplificador.



Aplicaciones de los A.O.

Hay un montón de aplicaciones de los amplificadores operacionales relacionadas con las operaciones matemáticas (suma, resta, diferenciación, etc.), aunque también hay muchas otras que no tienen nada que ver con las operaciones y son mucho más importantes.

Es significativo el auge que ha tenido la aplicación de los operacionales en el mercado electrónico actual. De constituir un elemento de cálculo (operacional) en las aplicaciones de computación electrónica ha pasado a formar parte de un buen número de **circuitos electrónicos** del campo analógico.



Circuitos de aplicación

Vamos a enumerar a continuación alguno de los **circuitos de aplicación** de los operacionales:

- Circuitos detectores de tensión.
- Circuitos comparadores.
- Circuitos rectificadores.
- Circuitos limitadores.
- Generadores de señal.
- Osciladores.
- Filtros activos.
- Convertidores V/f y V/I

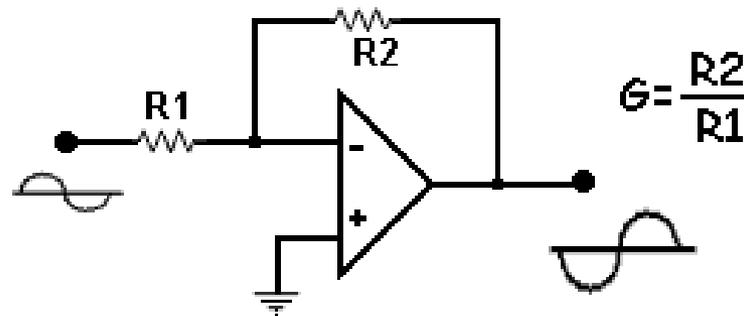
y, por supuesto,

- Circuitos aritméticos.
- Circuitos de amplificación.
- Circuitos integradores y diferenciadores.

Queda claro que el campo de los operacionales **no tiene límite** y que será la evolución tecnológica la que motive la aparición de otras aplicaciones.

Amplificador inversor

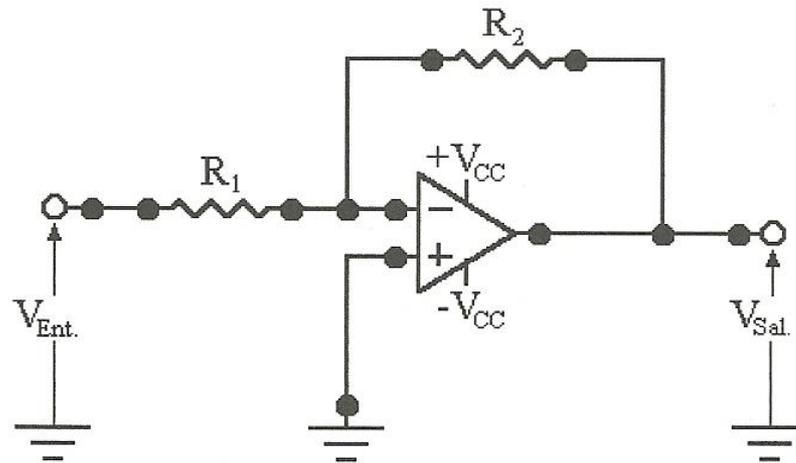
El primero que vamos a analizar es el **circuito amplificador inversor**. Es un circuito que además de amplificar la señal de entrada la **invierte**, es decir, la señal de salida está desfasada 180° con la de entrada. El circuito inversor más sencillo está formado por un **A.O.** ideal, que tiene una entrada conectada a tierra, la positiva, por lo que la otra entrada, la negativa, también va a estar a tierra, al ser infinita la impedancia de entrada. Tiene dos resistencias, una entre la señal de entrada, V_e , y una de las entradas, la negativa, y la otra entre la señal de salida y la entrada negativa, siendo esta última resistencia la encargada de realizar la **realimentación**.



amplificador inversor

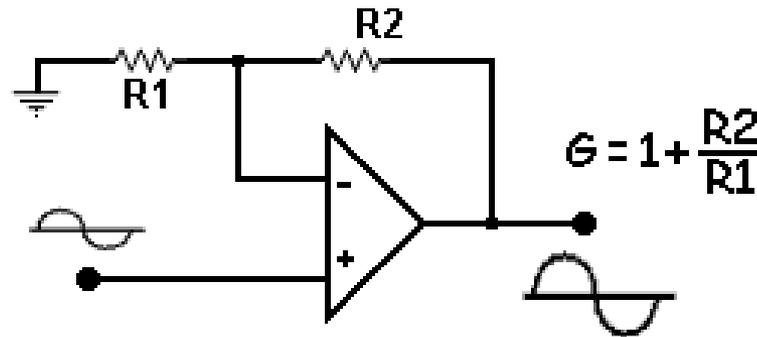
Amplificador inversor

Para que esto funcione, las corrientes que van al amplificador operacional se tienen que anular, por lo que van a ser iguales y con diferente signo. Por lo tanto, la tensión de salida va a estar invertida respecto a la de entrada, y va a estar amplificada más o menos, dependiendo de la relación que haya entre las dos resistencias. Si las dos resistencias son iguales, el circuito se va a comportar como un simple inversor y la V_e , tensión de entrada, y la V_s , tensión de salida, serán iguales en amplitud pero estarán desfasadas 180° .



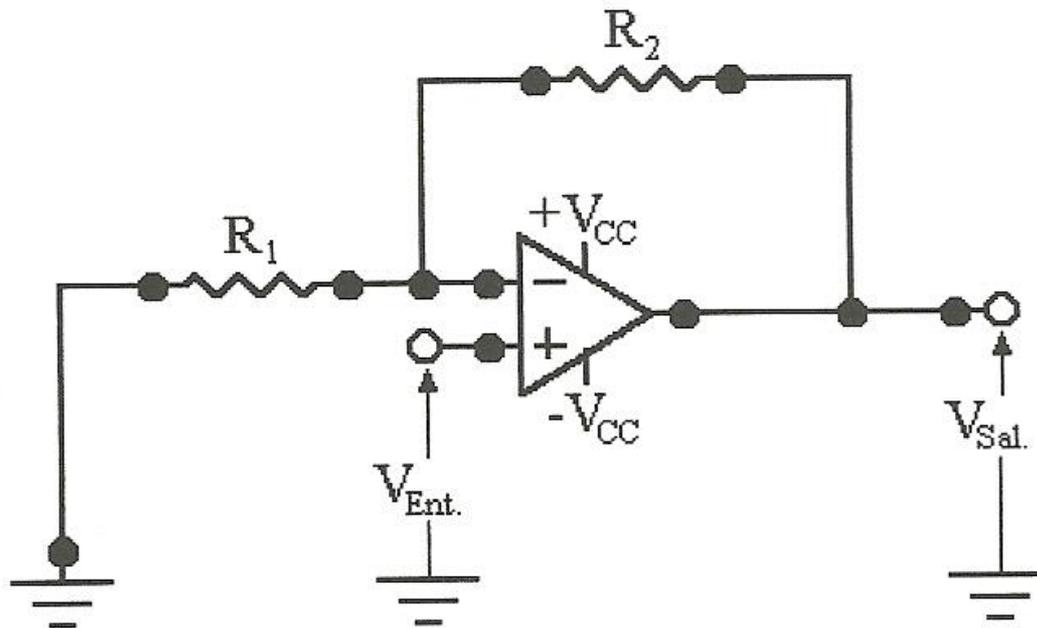
Amplificador no inversor

Hay veces en que es necesario que la señal de salida esté amplificada con respecto a la de entrada y que, además, ambas se hallen en fase. En este tipo de casos vamos a usar un **amplificador no inversor**. Considerando al amplificador operacional como ideal, la tensión de las dos entradas va a ser igual debido a que la impedancia de entrada es **infinita**. Operando con las dos corrientes que llegan a la entrada negativa, obtenemos que la señal de salida, **V_s**, está amplificada respecto a la de entrada, y además tiene la misma fase. Un caso especial es cuando no colocamos ninguna resistencia. La tensión de entrada y la tensión de salida van a ser iguales en amplitud y en fase.



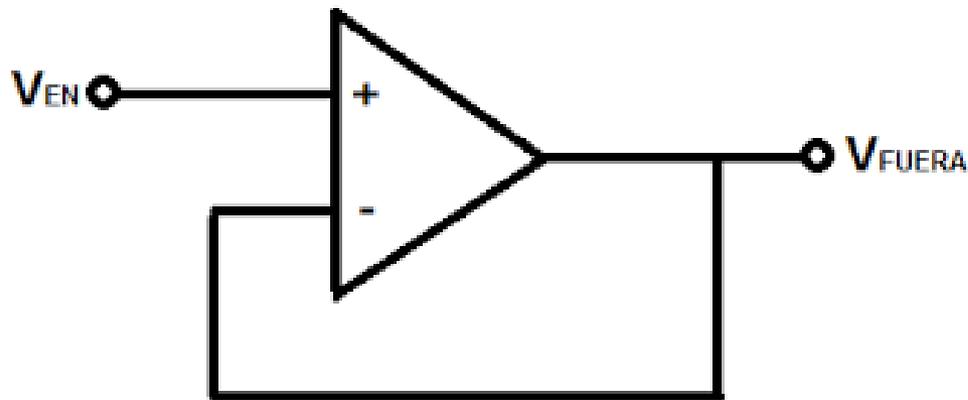
amplificador no-inversor

Circuito amplificador no inversor



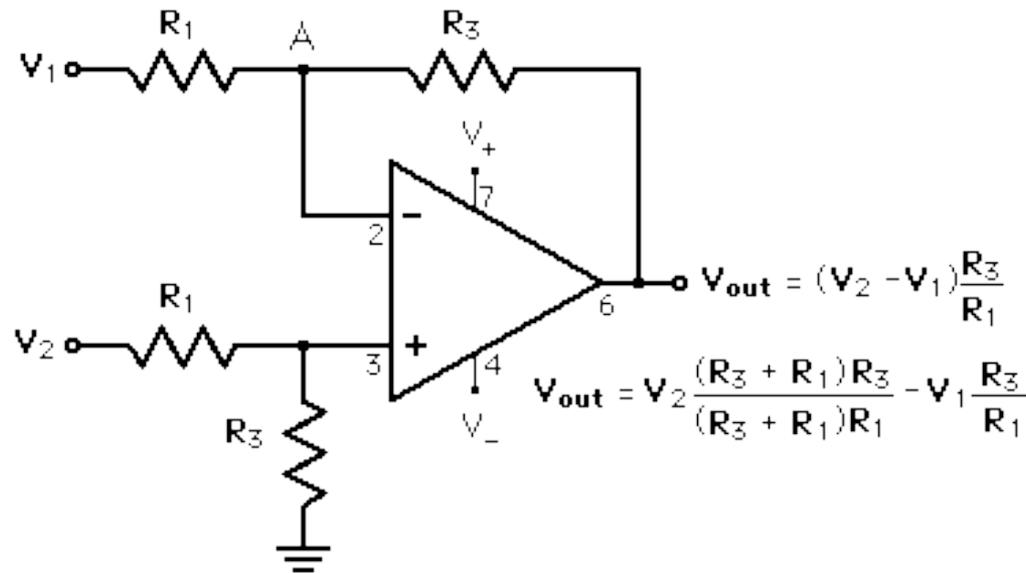
Seguidor de tensión

A este tipo de circuitos se le denomina **seguidor de tensión**, ya que las tensiones de entrada y de salida son iguales. En estos circuitos tenemos una elevada impedancia de entrada y una baja impedancia de salida por lo que se usan como etapas intermedias para realizar **acopladuras de impedancias**.



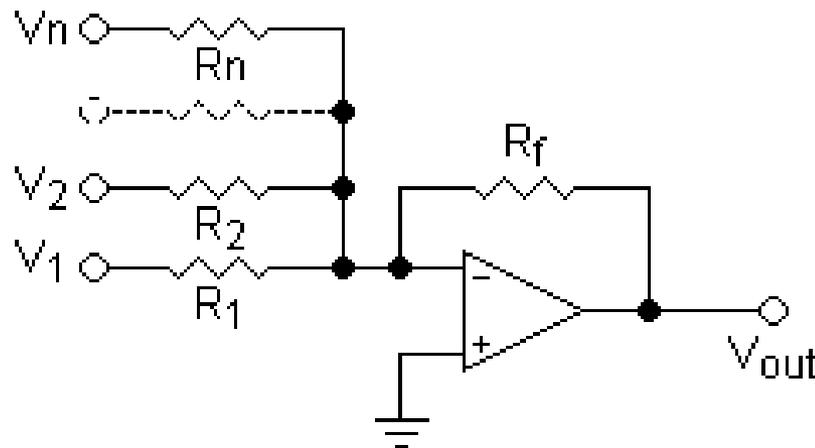
Sumador

Con los amplificadores operacionales podemos conseguir que la señal de salida sea suma de varias señales de entrada con la misma fase que ellas o desfasada. Esto lo vamos a conseguir usando un **sumador**, que puede ser inversor o no inversor.



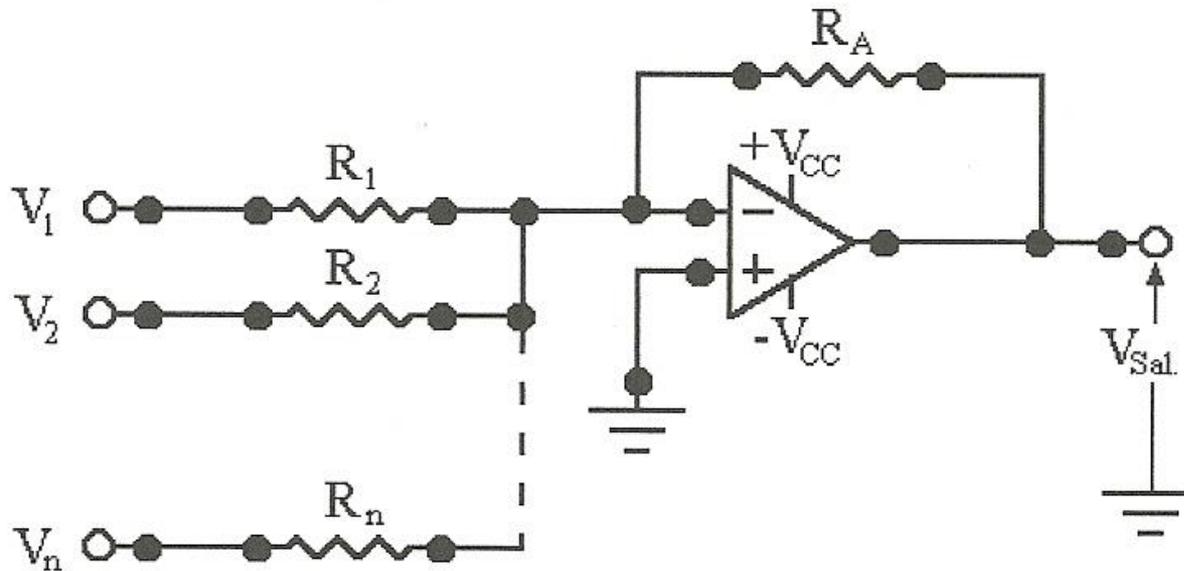
Sumador inversor

Veamos primeramente el **A.O.** ideal que se comporta como un **sumador inversor**, es decir, la señal de salida está desfasada con la de entrada. Como en el caso del inversor simple, uno de los terminales de entrada está a tierra y si consideramos el caso de un **A.O.** ideal, el otro terminal de entrada va a ser también 0 voltios. Ahora la tensión de salida va a ser proporcional a la suma de todas las tensiones de entrada, es decir, va a ser la suma de todas y, además, esta suma va a estar amplificada y desfasada 180° respecto a las tensiones de entrada.



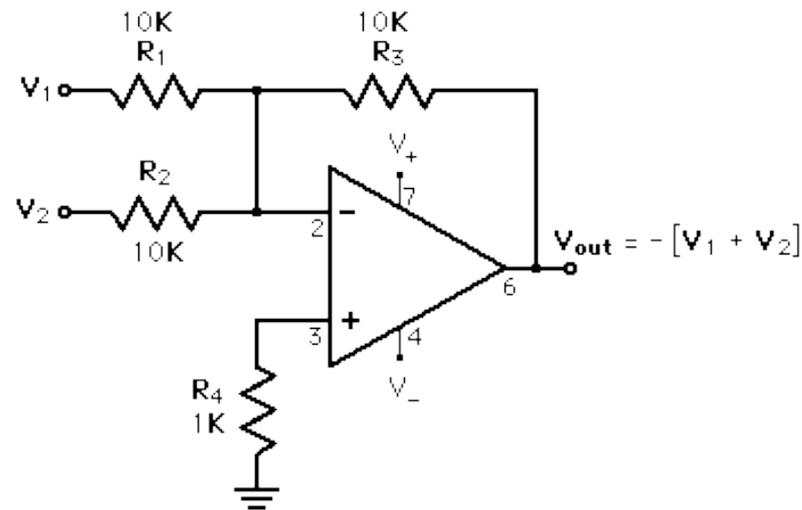
Sumador

Si queremos que la salida corresponda "*exactamente*" a la suma de las señales de entrada en valor, tenemos que poner todas las resistencias iguales. Así, la señal de salida no estará amplificada respecto a la suma de las de entrada.



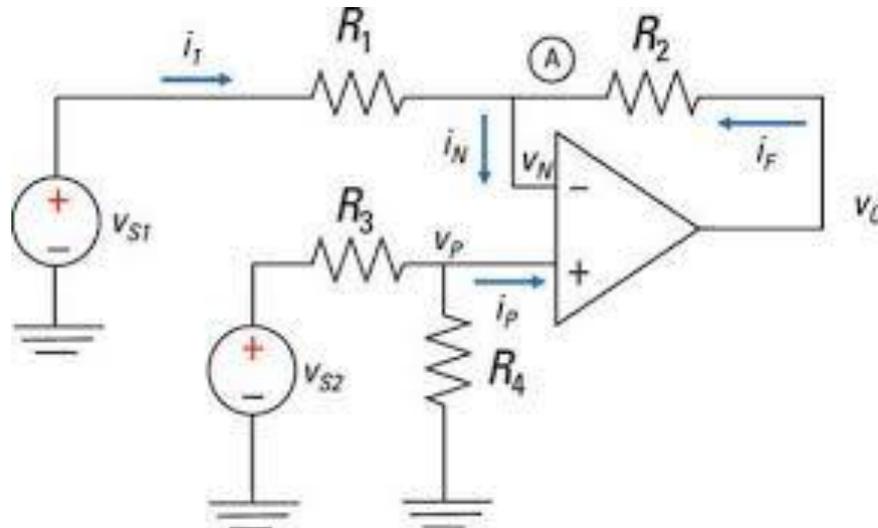
Sumador no inversor

Podemos conseguir que la señal de salida no esté desfasada con las de entrada, para ello usamos un **sumador no inversor**. Está basado en los circuitos no inversores simples, donde una de las señales de entrada está conectada a tierra mediante una resistencia. Al no haber caída de potencial entre las entradas del **A.O.**, ambas van a ser iguales, y vamos a obtener a la salida una señal proporcional a la suma de las tensiones de entrada y en fase con ellas.



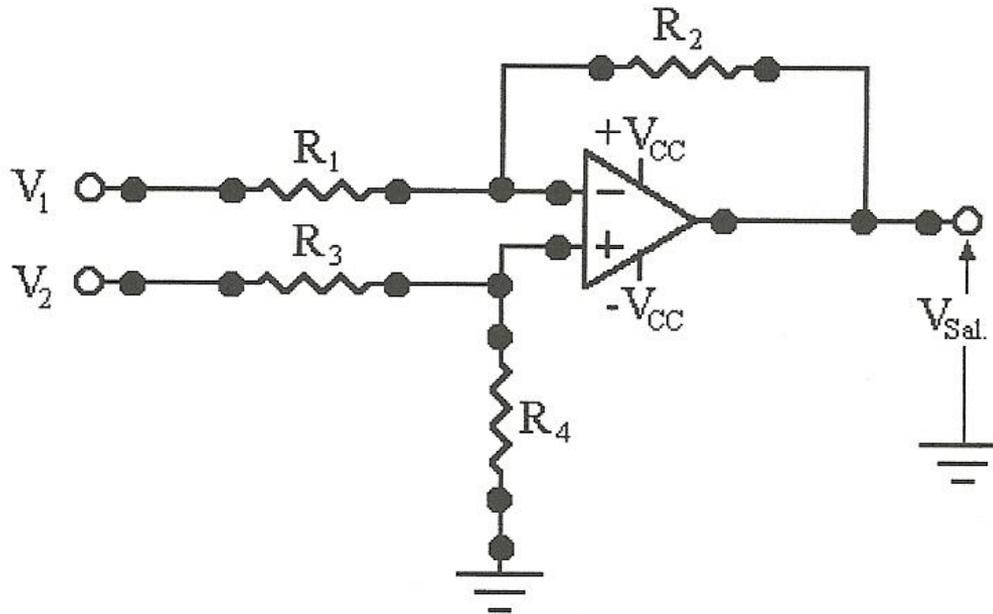
Restador

Otro tipo de circuito operacional es el "*restador*". En este circuito, la señal de salida va a ser proporcional a la suma de las entradas que se aplican a uno de los terminales de entrada, menos la suma de las entradas que se aplican al otro terminal de entrada. Entre cada una de las tensiones que conectamos y los terminales de entrada se va a encontrar una **resistencia**. Vamos a tener otra resistencia para realimentar la salida a una de las entradas, a la entrada negativa. Y otra resistencia entre la entrada positiva y una toma de tierra.



Restador

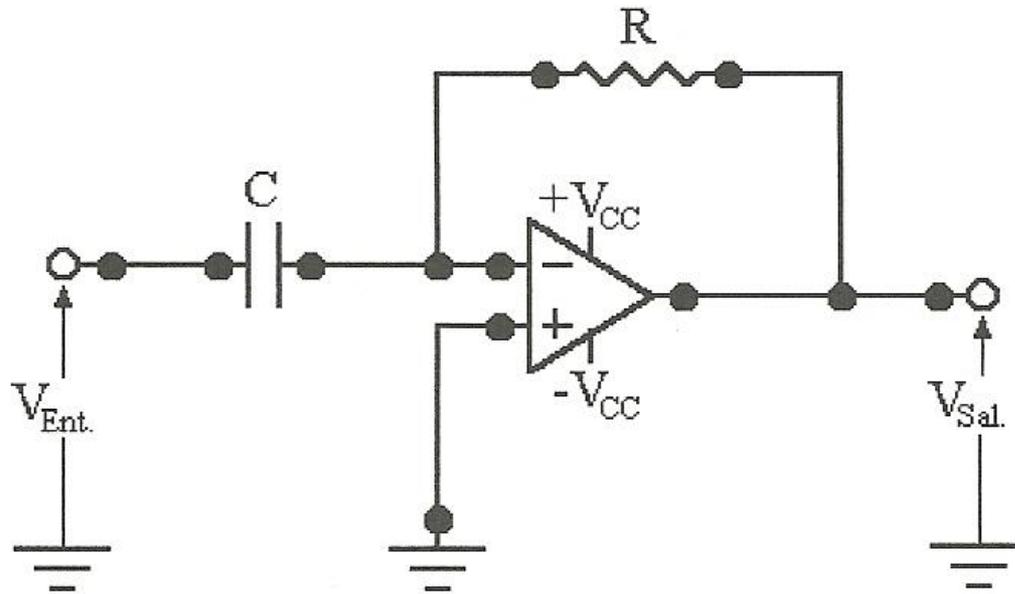
Si todas estas resistencias son iguales, la salida es "*exactamente*" igual a la suma de las tensiones de entrada aplicadas a la entrada positiva menos la suma de las aplicadas a la entrada negativa. Este tipo de circuitos es una mezcla de los sumadores que acabamos de ver y el **circuito diferencial** que analizaremos ahora.



A.O. diferencial

Otro tipo de circuitos que podemos formar con un **A.O.** son los llamados **circuitos diferenciales**. La tensión de salida que vamos a obtener con ellos va a ser proporcional a la diferencia de dos tensiones de entrada después de atravesar el **amplificador operacional**. El circuito tiene dos tensiones con dos resistencias intermedias conectadas a los terminales de entrada, una realimentación desde la salida por medio de otra resistencia y una última resistencia que separa a una de las entradas de una toma de tierra.

Amplificador diferencial



A.O. diferencial

Como siempre, consideraremos que el amplificador operacional es ideal; con el **circuito de resistencias** que le hemos acoplado vamos a conseguir que la salida sea proporcional a la diferencia de las dos señales de entrada. Si todas las resistencias que colocamos son iguales, la salida va a ser exactamente igual a la diferencia de las tensiones de entrada y no va a haber ningún **factor de proporcionalidad**.

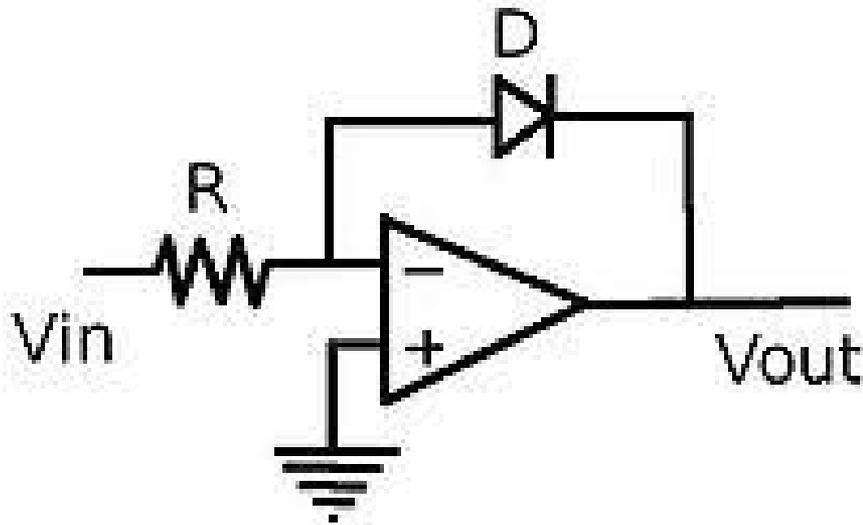
A.O. diferenciador

Otra de las operaciones que se pueden conseguir con un circuito operacional es la derivada. Al circuito que consigue esta operación se le llama **circuito diferenciador**. Colocamos un condensador entre uno de los terminales de entrada, el negativo, y la tensión de entrada. El otro terminal de entrada está conectado a tierra. También tenemos la salida realimentada con una resistencia a la entrada negativa. La tensión de salida va a ser proporcional a la derivada de la tensión de entrada.

Amplificador logarítmico

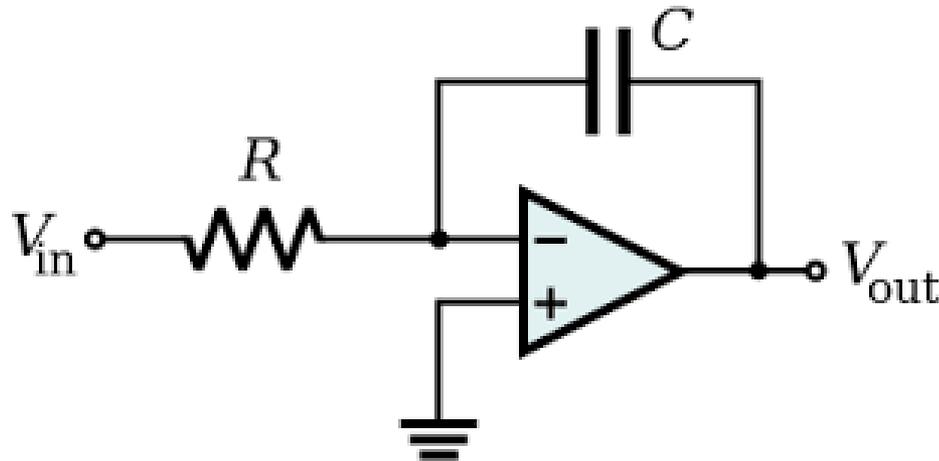
Otras muchas operaciones que se pueden realizar son la **multiplicación, división y potenciación**. Podemos conseguir realizar estas operaciones con un **amplificador logarítmico**, que consiste en conectar un diodo como lazo de realimentación entre la salida y la entrada negativa. Este circuito va a ser igual que el **amplificador inversor**, pero sustituyendo la resistencia de realimentación por un diodo. Aprovechamos las propiedades de la **unión P- N**, que se comporta como una curva logarítmica, y conseguimos que la tensión de salida sea un logaritmo de la de entrada gracias al diodo que hemos conectado. Para realizar operaciones como la multiplicación, división y potenciación se usa la función logaritmo que conseguimos con estos circuitos y quedan reducidas a sumas, restas, multiplicaciones y divisiones.

Amplificador logarítmico

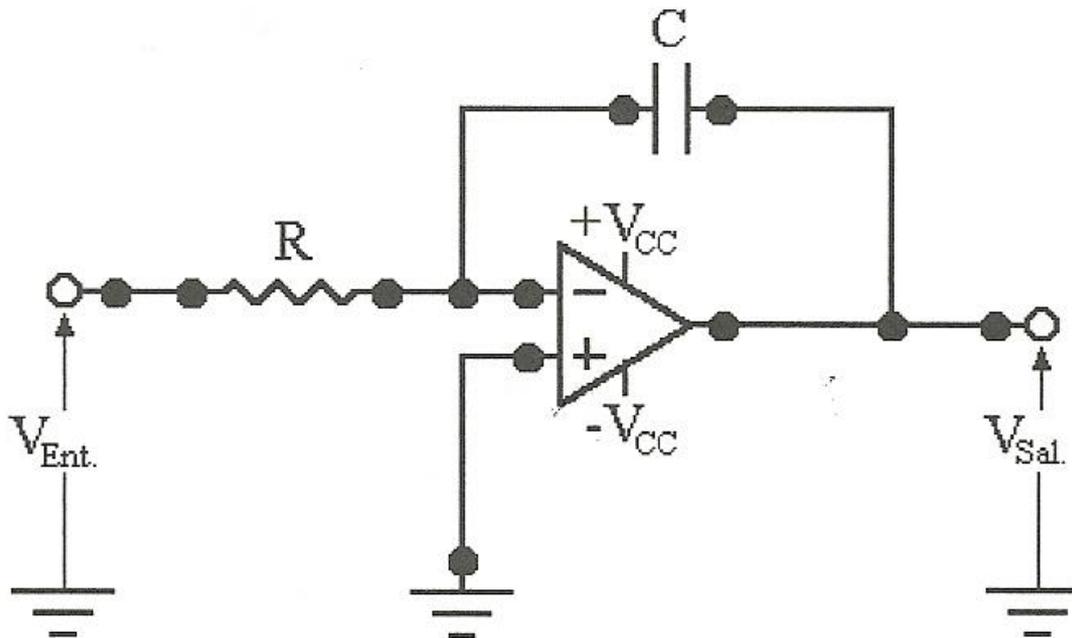


Amplificador integrador

Si colocamos un condensador como lazo realimentado entre la salida y la entrada negativa del amplificador operacional y la otra entrada la conectamos a tierra, podemos conseguir una operación matemática llamada **integración**. Este circuito se denomina **amplificador integrador** y conseguimos que la tensión de salida sea proporcional a la integral de la tensión de entrada.



Amplificador Integrador



El operacional como comparador

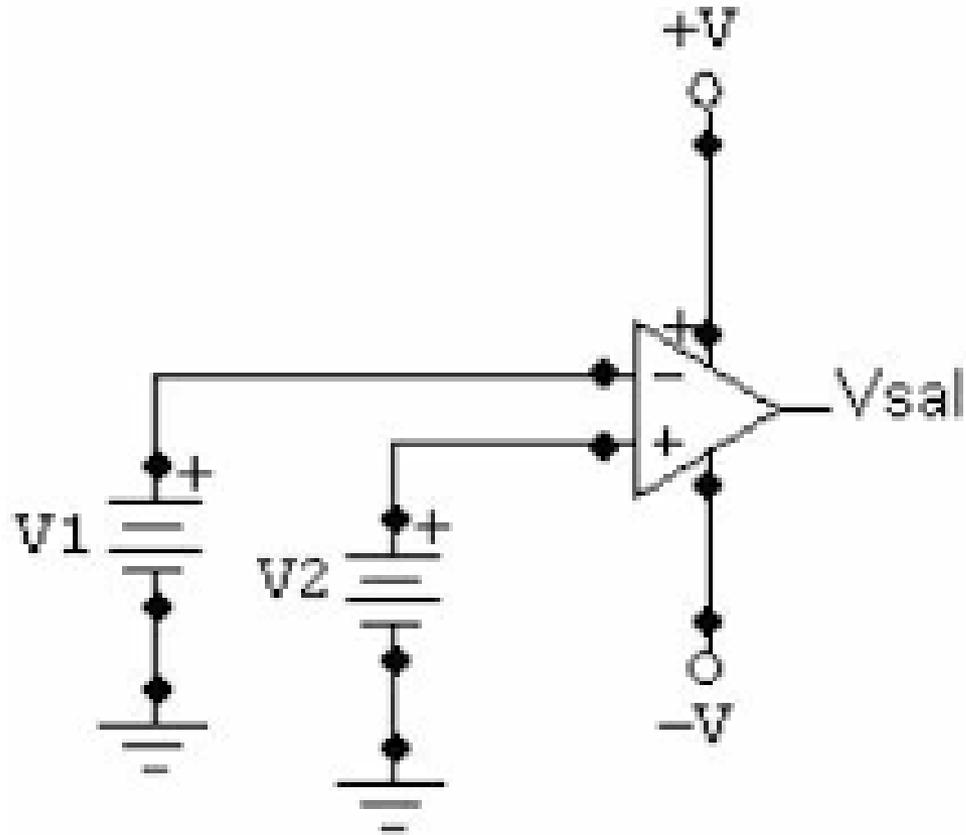
Ocurre, en multitud de ocasiones, que deseamos comparar una tensión con otra para ver cuál de las dos es mayor. Para ello se puede utilizar un **circuito implementado** a partir de amplificadores operacionales y que responde al nombre (claro está) de **comparador**.

Para utilizar como comparador un amplificador operacional sólo tenemos que colocar cierta tensión, por ejemplo, en la **entrada inversora** (V^-) la cual realizará la función de tensión de referencia. Si, a continuación, colocamos una tensión en la **entrada no inversora** (V^+) del mismo operacional obtendremos una **señal de salida** (V_s) que será función del resultado de la comparación de ambas señales.

Como resumen del comportamiento de dicho montaje podemos sentar la siguiente lógica:

- Si la tensión V_{2+} es mayor que V_{1-} la salida **V_{sal}** será de **nivel alto**.
- Si la tensión V_{2+} es menor que V_{1-} la salida **V_{sal}** será de **nivel bajo**.

Amplificador comparador



El operacional como comparador

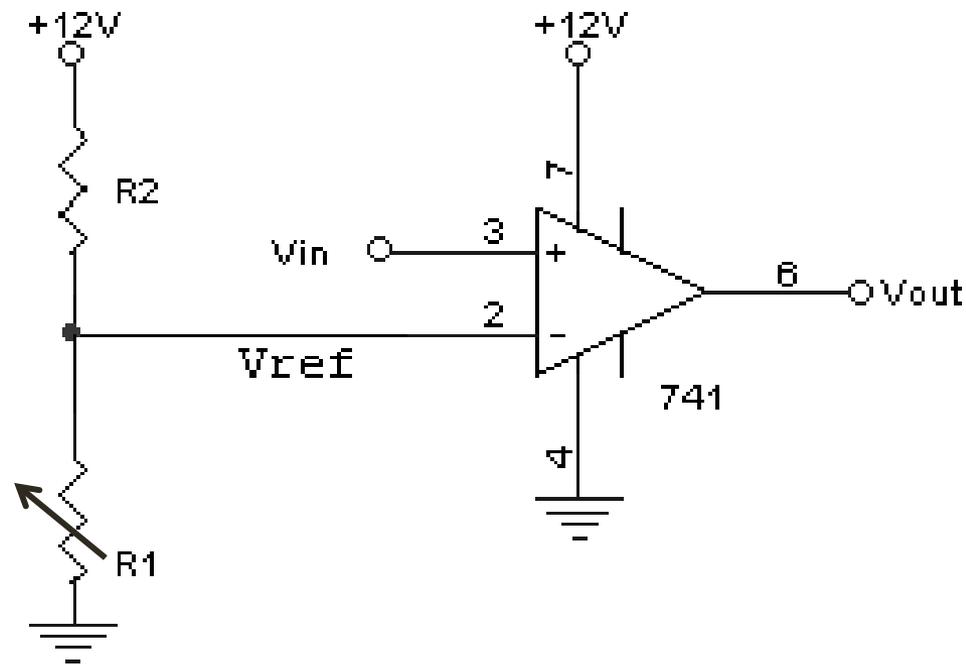
La forma más simple de constituir un comparador con un A.O. consiste en conectar el mismo -sin resistencias de realimentación- de forma que la entrada no inversora haga las funciones de **entrada de señal a comparar**, mientras que la patilla inversora se conecta a masa.

La operativa de este circuito es bastante simple: al presentarse una tensión muy pequeña (unos pocos milivoltios) en la entrada no inversora el operacional pasa a saturarse, con lo que la salida del mismo (patilla **Vs**) ofrece una tensión próxima a la de la alimentación positiva (lo que nosotros denominamos **nivel alto** o "**H**"). Si, por el contrario, se presenta en la patilla no inversora (**V+**) una tensión inferior ligeramente a cero voltios se origina que la salida del operacional pase a un **valor bajo** ("**L**").

El operacional como comparador

Otro modo de obtener un circuito comparador es mediante la utilización de un amplificador operacional de alimentación sencilla. Tal y como podemos ver en la ilustración correspondiente, la tensión a comparar se hace llegar también a la patilla no inversora ($V+$), mientras que la inversora recibe otra tensión que proviene del divisor de tensión conformado por **R1** y **R2**. Dicha tensión constituye la **tensión de referencia** ($V_{ref.}$). Si ocurre, tal y como vemos en la ilustración, que la resistencia R1 es del tipo **regulable** podremos llevar el punto de referencia ($V_{ref.}$) al margen que deseemos.

Amplificador comparador

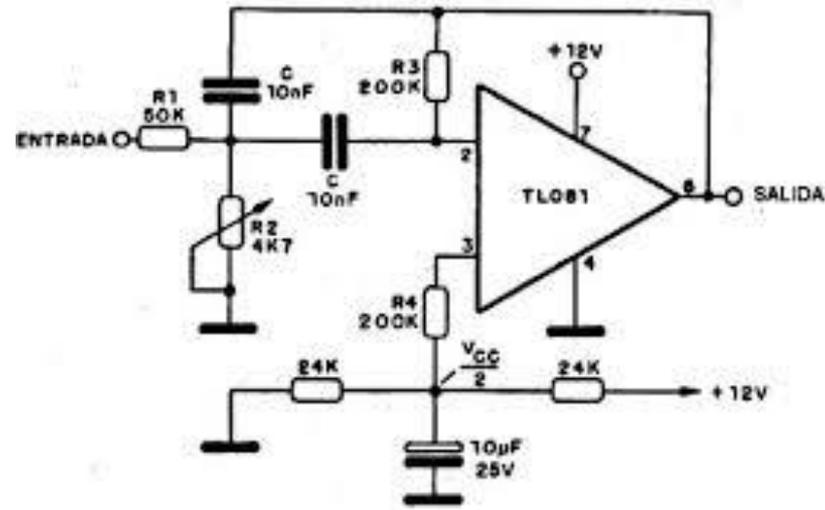
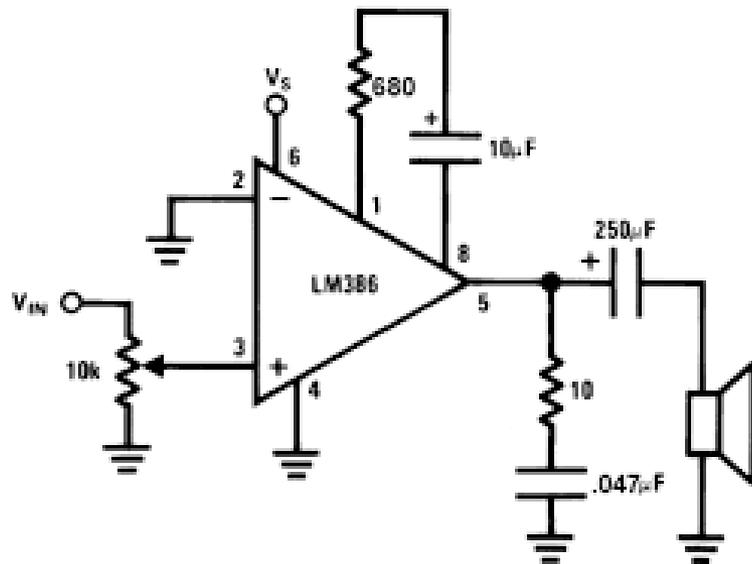


Comparadores específicos

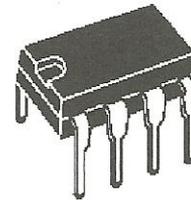
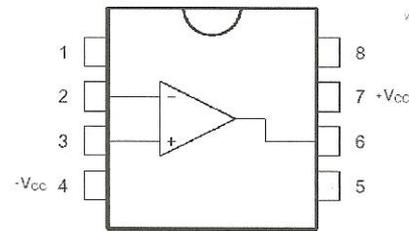
Existen en el mercado circuitos integrados que han sido diseñados específicamente para realizar funciones de comparación. Entre estos podemos citar, por ejemplo, el **LM311**, el **LM339** y el **NE 529**. Estos circuitos poseen una salida en modo colector abierto, por lo que debe conectarse la misma a una resistencia de "*pully-up*" y a positivo.

Otras aplicaciones de los A.O.

Todas las aplicaciones vistas hasta ahora de los amplificadores operacionales son aplicaciones para realizar **operaciones matemáticas**; sin embargo, las principales aplicaciones de los **A.O.** hoy en día son: amplificadores de señales, transformadores de impedancia, osciladores, filtros activos, etc.

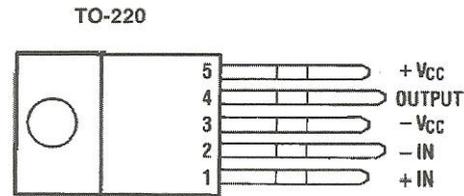
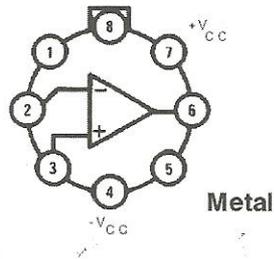


Encapsulado de los A.O.

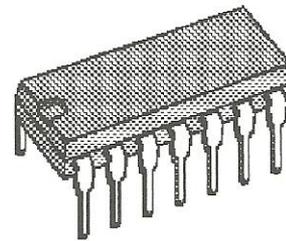
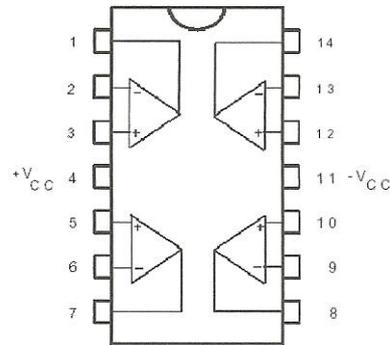


DIP8

Encapsulado de los A.O.



Encapsulado de los A.O.



DIP14

Fin del Tutorial