

Amplificadores Operacionales ~~Osciladores y temporizadores~~ ~~Convertidores analógico/digital~~

6

CONTENIDOS

- Introducción
- Circuitos integrados
- Amplificador operacional (A.O)
 - Conceptos básicos
 - Ganancias
 - Encapsulados
 - Modos de trabajo
- Circuitos con amplificadores operacional. Análisis
 - Circuitos lineales
 - Amplificador inversor
 - Amplificador no inversor
 - Seguidor
 - Sumador
 - Restador
 - Circuitos no lineales
 - Comparador
 - Integrador
 - Derivador
 - Filtros activos: Paso bajo, Paso alto, Pasa banda, Rechaza banda
- ~~- Circuitos generadores de señal~~
 - ~~• Circuitos Osciladores~~
 - ~~- Senoidales~~
 - ~~- De radiofrecuencia~~
 - ~~Oscilador Hartley~~
 - ~~Oscilador Colpitts~~
 - ~~- De baja frecuencia~~
 - ~~Oscilador por rotación de fase~~
 - ~~Oscilador en puente de Wien~~
 - ~~- De cristal de cuarzo~~
 - ~~- Multivibradores: Astable, Biestable, Monoestable~~
 - ~~- El circuito integrado 555~~
 - ~~• Características~~
 - ~~• Estructura interna~~
 - ~~• Funcionamiento~~
 - ~~- Multivibrador astable con C.I. 555~~
 - ~~- Multivibrador biestable con C.I. 555~~
 - ~~- Multivibrador monoestable con C.I. 555 (temporizador)~~
 - ~~- Circuitos convertidores de señal~~
 - ~~• Convertidor analógico/digital~~
 - ~~• Convertidor digital/analógico~~

Introducción

El amplificador operacional, en sus primeros años, era un tubo al vacío. Se le atribuye su invención al Sr. George Philbrick, quien lo introdujo en el mercado en el año 1948.

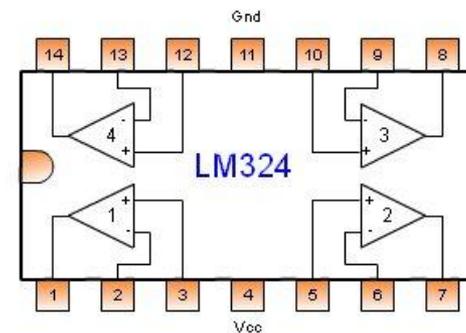
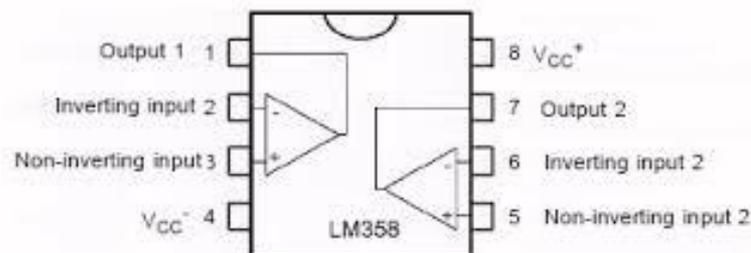
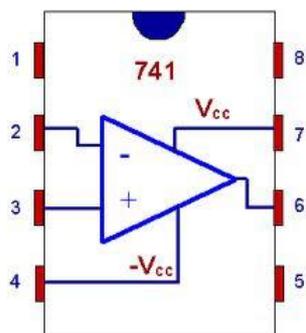
La idea principal de estos "operacionales" originales era la de ser utilizados en calculadoras analógicas, para sumar, restar, multiplicar y realizar operaciones más complejas.

Fue la empresa Fairchild la que en los años 1964 y 1967 introdujo al mercado los conocidos amplificadores operacionales $\mu A702$, $\mu A709$ y $\mu A741$, y la National Semiconductor hizo lo mismo con el LM101 y LM301.

La base de estos circuitos son componentes discretos, como transistores, resistencias, condensadores, etc., que se presentan en un encapsulado como un circuito integrado.

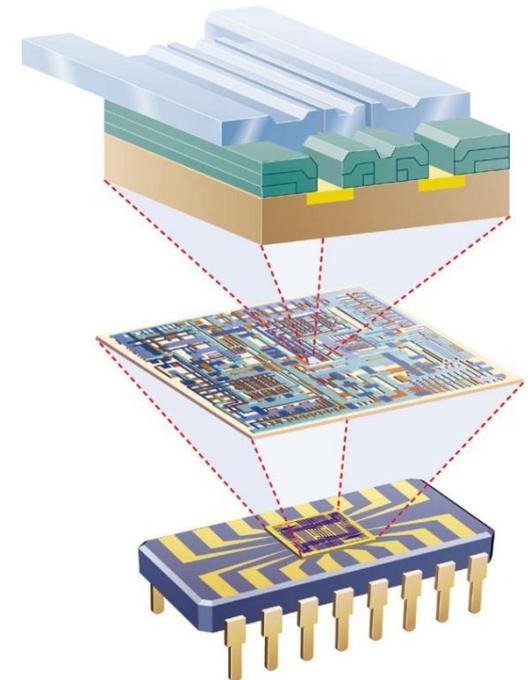
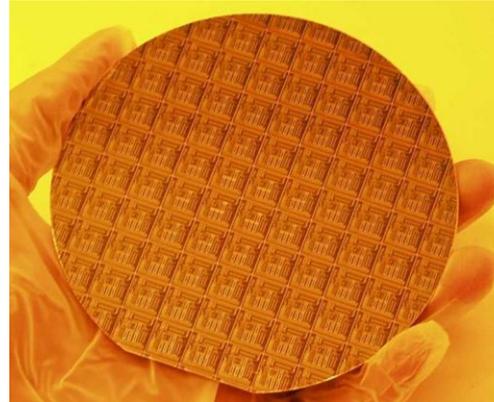
Estos circuitos integrados son: **muy versátiles, de bajo precio, tamaño pequeño, con excelentes características y redujeron el diseño de un amplificador a la adición de unas resistencias.**

Hay versiones con un solo integrado ($\mu A741$), de dos operacionales en un solo integrado como el LM358 y de cuatro como el LM324.



Circuitos Integrados

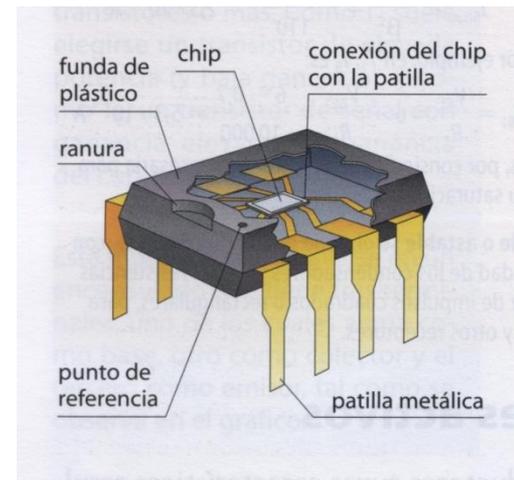
En un único soporte físico, generalmente de silicio, se integran diferentes componentes individuales, pasivos y/o semiconductores, que constituyen en conjunto un sistema electrónico.



Los hay de **dos tipos**:

De carácter general: se pueden utilizar en multitud de aplicaciones. La denominación de los circuitos se corresponde con un prototipo aceptado por los fabricantes.

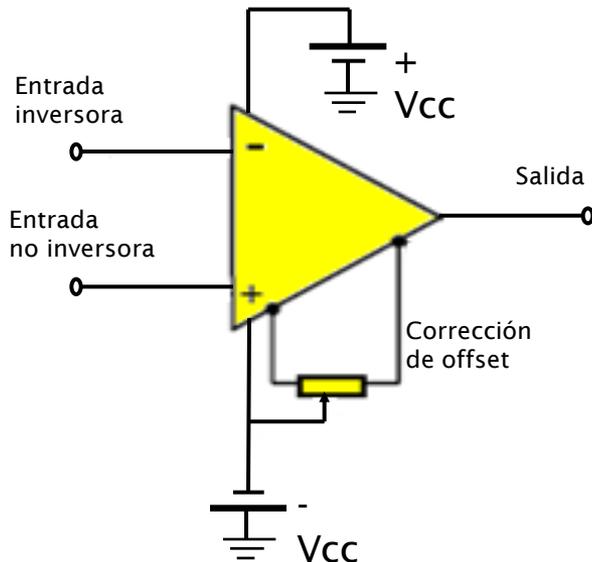
Específicos: se encargan a medida para cada aplicación concreta. Su denominación responde a códigos propios del cliente que los solicita.



Amplificador operacional (A.O.)

El amplificador operacional (AO), es un componente electrónico activo, que se presenta como un circuito integrado de carácter general, y posee entrada diferencial constituida por dos entradas activas referidas a masa, la entrada inversora (-), y la no inversora (+). Tiene una salida y se alimenta con tensión simétrica (dos fuentes de tensión).

Símbolo



La gran ventaja que tiene el A.O. es que sus características de funcionamiento reales se aproximan mucho a sus características ideales:

El offset en un A.O. es un voltaje presente en la salida del amplificador aún cuando los voltajes de las dos entradas sean cero, suele estar entre los 20 y 26 mV. Este efecto es causado por el ruido que el amplificador operacional amplifica y lo presenta a la salida del mismo. Este voltaje lo especifica el fabricante.

Los C.I. operacionales poseen terminales externos para la corrección de la tensión de offset.

Entre las aplicaciones habituales de este tipo de amplificadores encontramos:

- Realización de operaciones matemáticas, tales como sumas, restas...
- Implementación de filtros activos.
- Realización de circuitos rectificadores de alta precisión.
- Convertidores de corriente a tensión (I-V) y de tensión a corriente (V-I)
- Realización de conversores analógico-digitales.

Conceptos básicos del A.O.

Una característica se entiende de valor infinito si es tan grande que al hacerla mayor no se percibe ningún efecto apreciable en las prestaciones del amplificador.

Una característica se entiende de valor cero si es tan pequeña que no produce ningún efecto si se reduce.

Ganancias del A.O.

Ganancia diferencial es la que determina la amplificación de la diferencia de señales de entrada ($V_+ - V_-$). Esta ganancia debe ser lo más grande posible.

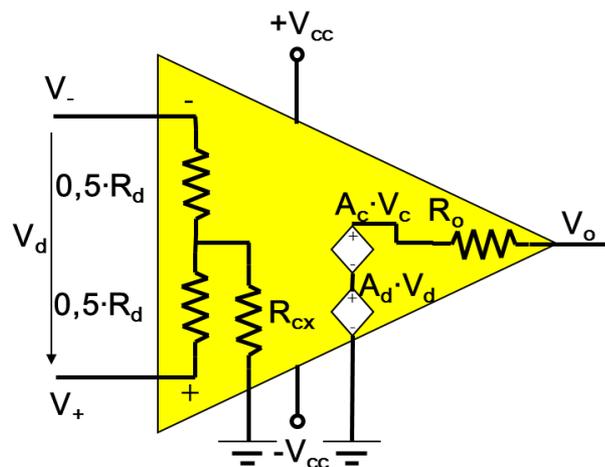
Ganancia en modo común nos indica la amplificación que se produce de las señales que son comunes a las dos entradas del amplificador. Esta ganancia debe ser lo más pequeña posible, puesto que la parte común a las dos señales de entrada suele ser ruido e interferencias que no nos interesa amplificar.

Rechazo en modo común (CMRR) nos indica la relación entre la ganancia de tensión diferencial y la ganancia de tensión en modo común e interesa que sea lo mayor posible. Se especifica en decibelios:

$$\text{CMRR} = 20 \cdot \text{Log} \frac{\text{Ganancia de tensión diferencial}}{\text{Ganancia de tensión en modo común}}$$

Conceptos básicos del A.O.

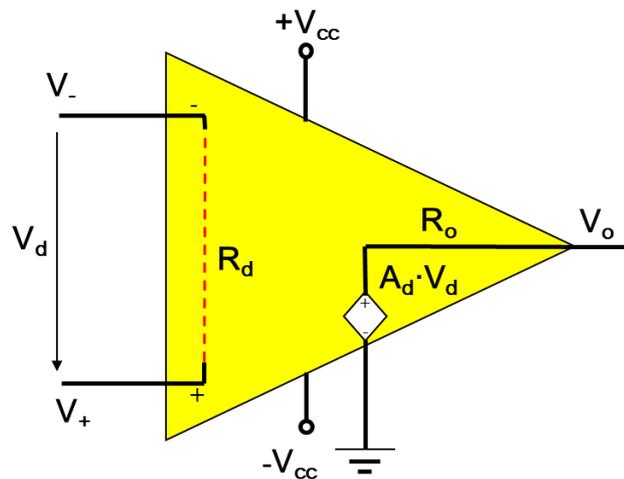
Circuito equivalente real



Características del A.O

- R_d - Impedancia de entrada diferencial: $(R_d = \infty)$
- R_{cx} - Impedancia de entrada de modo común: $(R_{cx} = 0)$
- R_o - Impedancia de salida: $(R_o = 0)$
- A_d - Ganancia diferencial: $(A_d = \infty)$
- A_c - Ganancia de modo común: $(A_c = 0)$
- BW - El ancho de banda: $BW = \infty$
- La tensión de "offset" de entrada: $(0) \quad (V_o = 0 \text{ si } V_d = 0)$

Circuito equivalente ideal



$$V_o = A_d \cdot V_d + A_c \cdot V_c$$

$$V_d = V_+ - V_-$$

$$V_c = (V_+ + V_-) / 2$$

Tensión de salida
 V_o acotada

$$-V_{cc} \leq V_o \leq +V_{cc}$$

$$V_o = A_d \cdot V_d$$

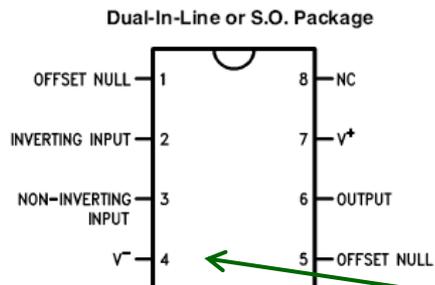
$$V_d = V_+ - V_-$$

Para analizar este circuito partimos de las características ideales del amplificador:

Al ser la impedancia de entrada infinita, por las entradas inversora (-) y no inversora (+) no pasa corriente, por tanto el potencial de la entrada (-) será igual al de la entrada (+). Esta característica se denomina **"cortocircuito virtual"** entre la entrada inversora y la no inversora y se caracteriza por ser un cortocircuito por el que no pasa corriente.

Encapsulados del C.I. del A.O

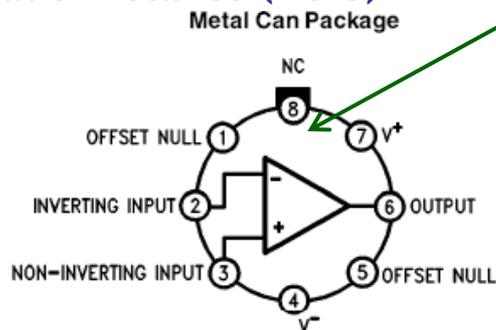
Encapsulado DIP 8 patillas



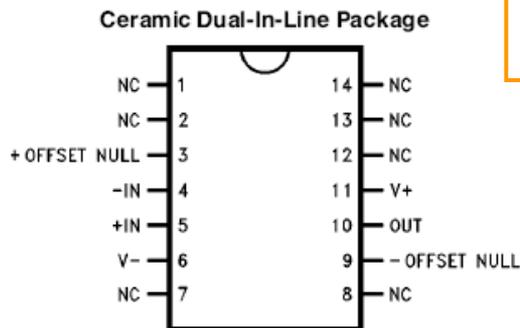
Conexión de patillas del A.O (formato de 8 patillas)

- 1 y 5: Sirven para anular la tensión de offset
- 2: Entrada inversora
- 3: Entrada no inversora
- 4: Entrada de tensión de alimentación negativa
- 6: Salida del amplificador
- 7: Entrada de tensión de alimentación positiva
- 8: Entrada no conectada (NC). Se añade para mantener el formato del circuito integrado, pero no tiene conexión eléctrica.

Encapsulado metálico (TO-5)



Encapsulado DIP 14 patillas



Conexión de patillas del A.O (formato de 14 patillas)

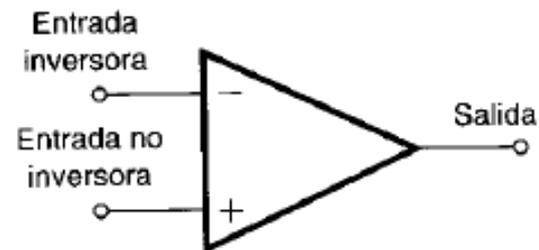
Se añaden mas patillas sin conectar para mantener el formato

Modos de trabajo del A.O

El amplificador operacional puede trabajar en tres modos distintos:

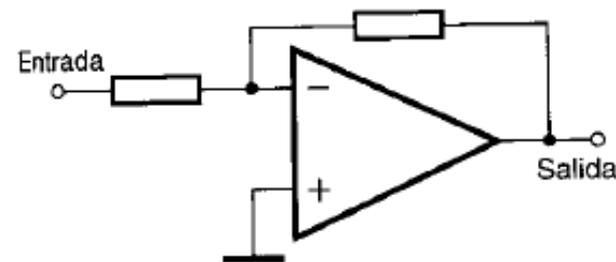
En lazo abierto, sin realimentación

Cuando la tensión en la entrada inversora aumenta, la tensión en la salida disminuye. Cuando la tensión en la entrada no inversora aumenta, la tensión en la salida aumenta. Se utiliza como comparador de tensión.



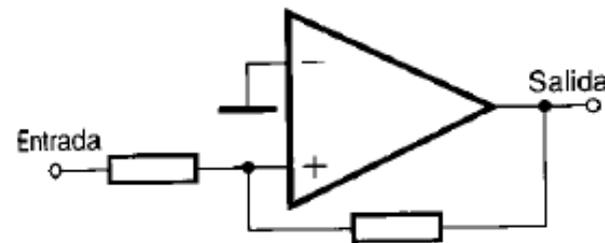
En lazo cerrado, con realimentación negativa

Una parte de la señal de salida se aplica a la entrada inversora. Se utiliza como amplificador de ganancia constante y en todos los circuitos lineales construidos con operacionales.



En lazo cerrado, con realimentación positiva

Una parte de la señal de salida se aplica a la entrada no inversora. Con este tipo de realimentación el operacional trabaja en saturación.



Circuitos con amplificadores operacionales

Los circuitos de aplicación de los amplificadores operacionales se pueden clasificar en **circuitos lineales y no lineales**, atendiendo a la relación que hay entre la señal que se obtiene en la salida y la que se introduce en la entrada del circuito.

En general se consideran:

Lineales aquellos circuitos que mantienen en la salida la forma de onda aplicada a su entrada.

Consideramos como tales: **los amplificadores, los convertidores y los filtros activos.**

No lineales aquellos circuitos que presentan en su salida una forma de onda diferente a la aplicada a su entrada.

Consideramos como tales: **los integradores y diferenciadores, los rectificadores y recortadores y los comparadores.**

Análisis de circuitos con amplificadores operacionales

Para analizar un circuito en el que haya A.O. puede usarse cualquier método, pero uno habitual es:

- 1) Comprobar si tiene realimentación negativa
- 2) Si tiene realimentación negativa se pueden aplicar las siguientes aproximaciones:

$$\begin{aligned}V_+ &= V_- \\I_+ &= I_- = 0\end{aligned}$$

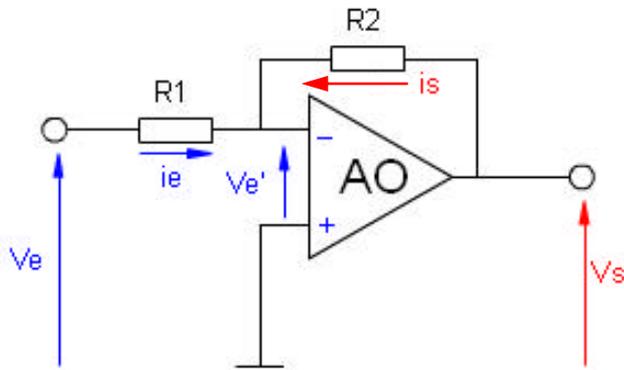
- 3) Definir las corrientes en cada una de las ramas del circuito.
- 4) Aplicar el método de los nodos en todos los nodos del circuito excepto en los de salida de los amplificadores (porque en principio no se puede saber la corriente que sale de ellos).
- 5) Aplicando las reglas del segundo apartado resolver las ecuaciones para despejar la tensión en los nodos donde no se conozca.

Circuitos lineales

Amplificador inversor

Este circuito **amplifica la señal de entrada V_e y la invierte**, es decir, que la señal de salida V_s está desfasada 180° respecto de la señal de entrada.

La entrada no inversora (+) está puesta a masa y la señal de entrada V_e es aplicada a través de la resistencia R_1 a la entrada inversora (-). La señal de salida es realimentada a través de R_2 .



Como $i_e = -i_s$



Calculamos su ganancia, aplicando el principio de cortocircuito virtual.
 $V_+ = V_-$

$$\frac{V_e}{R_1} = -\frac{V_s}{R_2}$$

Calculamos la ganancia

$$A_v = \frac{V_s}{V_e} = -\frac{R_2}{R_1}$$

$$i_e = \frac{V_e - V_-}{R_1} = \frac{V_e - 0}{R_1} = \frac{V_e}{R_1}$$

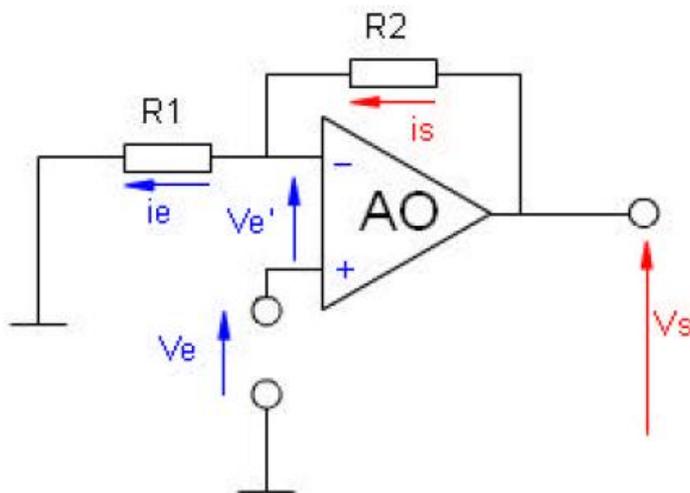
$$i_s = \frac{V_s - V_-}{R_2} = \frac{V_s - 0}{R_2} = \frac{V_s}{R_2}$$

Como se puede observar, **la ganancia de tensión no depende del amplificador operacional y sólo depende de los valores de las resistencias R_1 y R_2 .**

La impedancia de entrada del amplificador inversor será R_1 puesto que la entrada inversora está conectada al potencial cero a través del «cortocircuito virtual» con la entrada no inversora.

La impedancia de salida vista por una carga conectada en la misma sería cero, puesto que estamos suponiendo que el amplificador operacional es ideal.

Amplificador no inversor



Se utiliza este amplificador para evitar la inversión de la señal de salida.

La señal de entrada se conecta a la entrada no inversora (+) del amplificador operacional y una parte de la señal de salida se conecta a la entrada inversora (-) mediante el divisor de tensión formado por R1 y R2.

Calculamos su ganancia, aplicando el principio de cortocircuito virtual.

$$V_+ = V_-$$

$$i_e = \frac{V_- - 0}{R_1} = \frac{V_e - 0}{R_1} = \frac{V_e}{R_1};$$

$$i_s = \frac{V_s - V_-}{R_2} = \frac{V_s - V_e}{R_2}$$

Como $i_e = i_s$ \rightarrow $\frac{V_e}{R_1} = \frac{V_s - V_e}{R_2}$ \rightarrow $\frac{V_s - V_e}{V_e} = \frac{R_2}{R_1} = \frac{V_s}{V_e} - \frac{V_e}{V_e} = \frac{V_s}{V_e} - 1$

Calculamos la ganancia

$$A_v = \frac{V_s}{V_e} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Amplificador no inversor (Continuación)

Como vemos, de nuevo la ganancia de tensión sólo depende de los valores de las resistencias externas R1 y R2 y no depende del amplificador operacional.

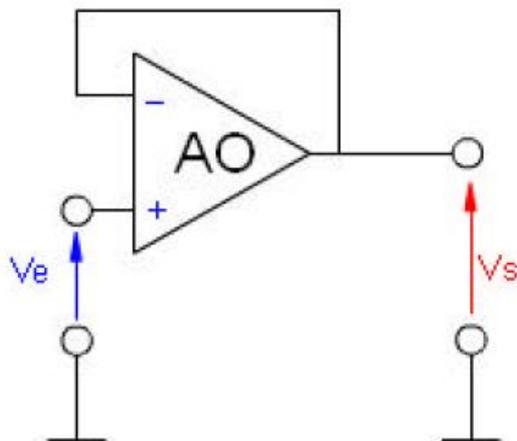
En este caso, la señal de salida está en fase con la señal de entrada, puesto que la ganancia es de valor positivo.

La impedancia de entrada del amplificador no inversor es infinita, puesto que sería la correspondiente a la entrada no inversora y estamos considerando el amplificador operacional ideal.

La impedancia de salida será cero por la misma razón que en el circuito inversor.

Seguidor

Es una variante del amplificador no inversor donde la realimentación de la señal de salida se aplica directamente en la entrada inversora.



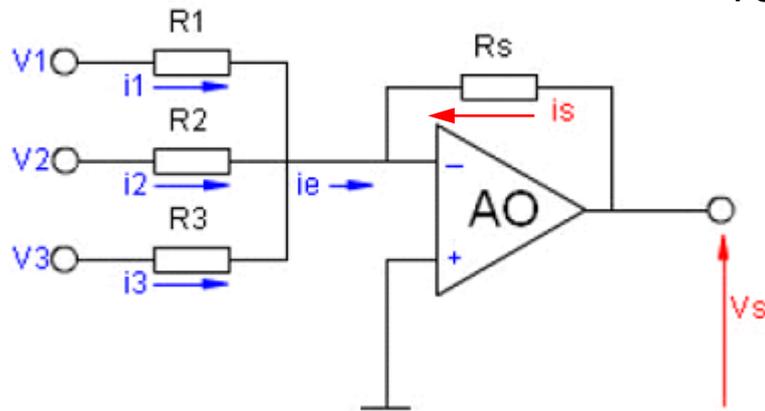
De esta manera, y debido al «cortocircuito virtual» entre la entrada inversora y la no inversora, se cumple que: $V_e = V_s$. La tensión de salida es igual que la tensión de entrada.

$$\text{La ganancia } A_v = 1$$

La señal de salida “sigue” a la de entrada, de ahí el nombre del circuito.

La característica más importante de este circuito es el valor de sus impedancias de entrada y salida, muy grande la primera y muy pequeña la segunda, que lo hacen muy útil para adaptar impedancias.

Sumador



Por el principio de cortocircuito virtual, tenemos que:

$$i_e = i_1 + i_2 + i_3 = -i_s \quad \left\{ \begin{array}{l} i_1 = V_1/R_1 \\ i_2 = V_2/R_2 \\ i_3 = V_3/R_3 \end{array} \right.$$

$$i_s = -(V_1/R_1 + V_2/R_2 + V_3/R_3)$$

$$V_s = R_s \cdot i_s = -R_s \cdot (V_1/R_1 + V_2/R_2 + V_3/R_3)$$

Si hacemos $R = R_1 = R_2 = R_3$, nos queda: $V_s = -(R_s / R) \cdot (V_1 + V_2 + V_3)$

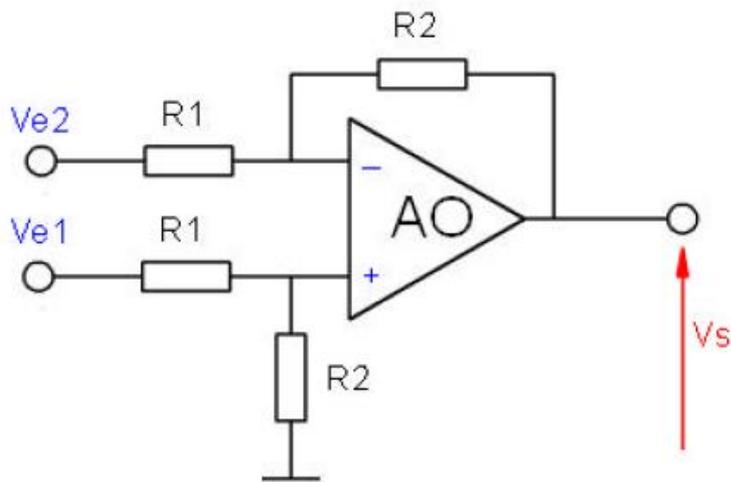
Si hacemos $R_s = R$, nos queda: $V_s = -(V_1 + V_2 + V_3)$

Observamos que la salida es la suma de las señales de entrada y al aplicarlas a la entrada inversora sale invertida (signo -).

Una aplicación típica de este montaje, es la de mezclador de sonidos.

Restador

El amplificador operacional restador básico puede considerarse que está formado por un amplificador operacional inversor y por otro amplificador operacional no inversor.



Para entender su funcionamiento calcularemos el efecto que produce cada entrada y los sumaremos.

Por la entrada 1 obtenemos la siguiente salida:

$$Vs1 = Ve1 \cdot R2/R1$$

Por la entrada 2 obtenemos la siguiente salida:

$$Vs2 = - Ve2 \cdot R2/R1$$

Sumando sus efectos nos quedará:

$$Vs = Vs1 + Vs2 = (Ve1 - Ve2) \cdot R2/R1$$

El único inconveniente es que no presenta la misma impedancia de entrada por las dos entradas, ($R1 + R2$ para $Ve1$ y $R1$ para $Ve2$).

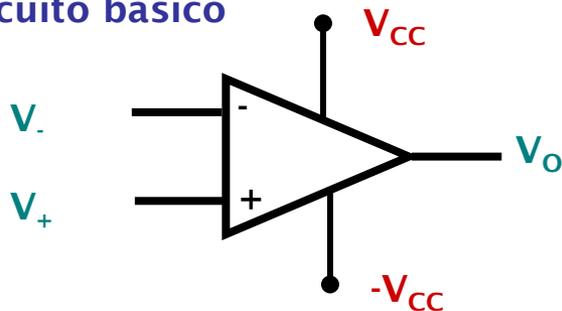
El amplificador diferencial se utiliza en aplicaciones en las que nos interesa eliminar señales de ruido introducidas por el ambiente o perturbaciones.

Circuitos no lineales

Comparador

Cuando se necesita comparar una tensión con otra de referencia para saber si es mayor o menor, se utilizan los comparadores.

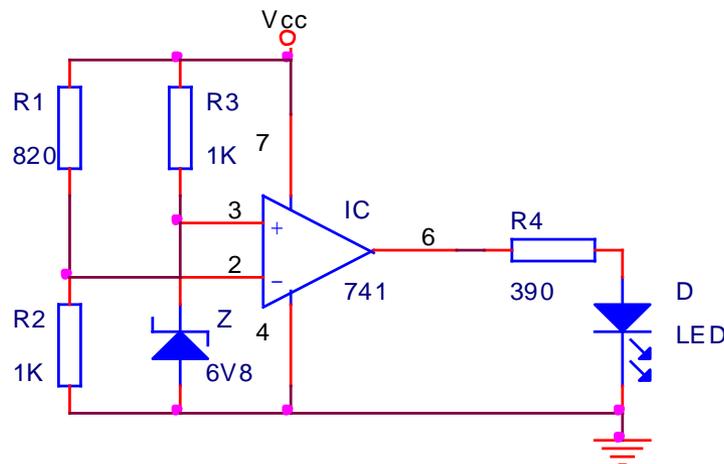
Circuito básico



Una aplicación de estos circuitos son las alarmas

$$V_O = \begin{cases} V_{cc} & \text{si } V_+ > V_- \\ -V_{cc} & \text{si } V_+ < V_- \end{cases}$$

Si se necesita comparar con una tensión distinta de cero, entonces se utilizan otros montajes del circuito comparador.

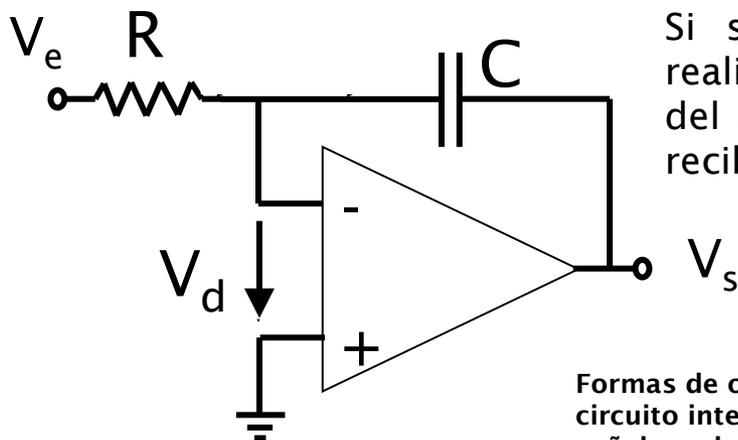


En este caso, la tensión de entrada (V_-) es comparada con una tensión de referencia (V_+) fijada por el diodo Zener.

Cuando la tensión de entrada es superior a la de referencia, el amplificador operacional se satura con una tensión V_{max} y cuando es inferior con $-V_{max}$.

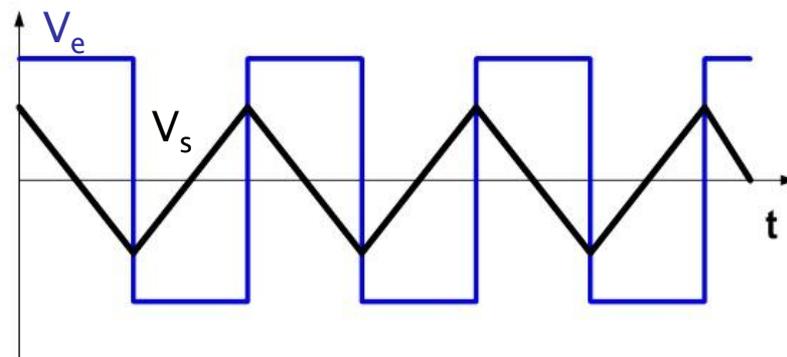
Si se necesita una tensión de referencia negativa, se alimenta el divisor de tensión con $-V_{cc}$.

Integrador

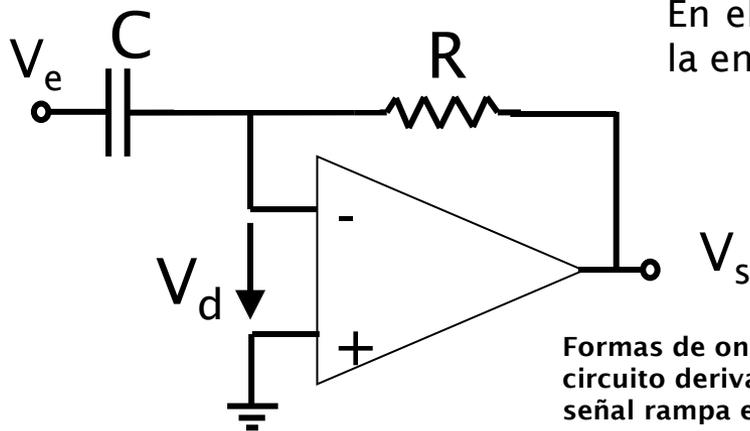


Si se utiliza un condensador de capacidad C en la realimentación de la salida a cualquiera de las entradas del amplificador operacional, obtenemos un circuito que recibe el nombre de integrador.

Formas de onda en un circuito integrador para una señal cuadrada en la entrada

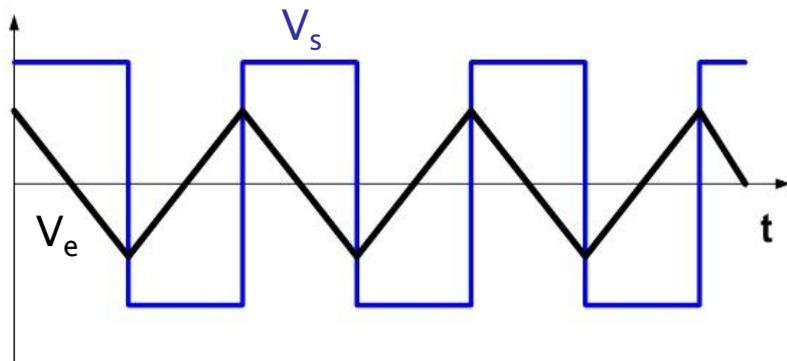


Derivador



En el derivador, el condensador de capacidad C se sitúa en la entrada de señal.

Formas de onda en un circuito derivador para una señal rampa en la entrada



El derivador se utiliza para detectar los flancos de un pulso rectangular o para producir una señal rectangular a partir de una señal en rampa.

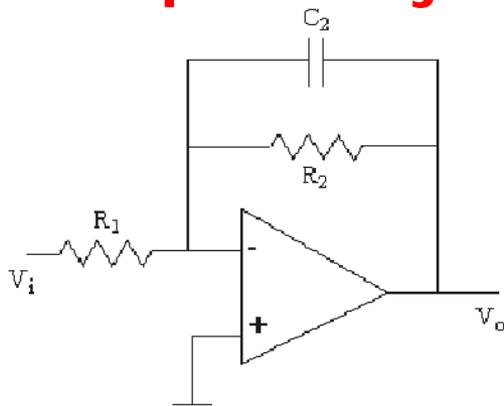
Filtros activos

Un **filtro** es un circuito que sólo deja pasar una parte de las frecuencias que componen una señal.

Un **filtro** puede ser **pasivo** si se construye con componentes pasivos, como resistencias, bobinas y condensadores, o **activo** si se utilizan, además, amplificadores para aportar ganancia y acoplamientos de impedancias.

La utilización de amplificadores operacionales en los filtros permite prescindir de las bobinas, que son componentes voluminosos y caros sobre todo en baja frecuencia.

Filtro paso bajo



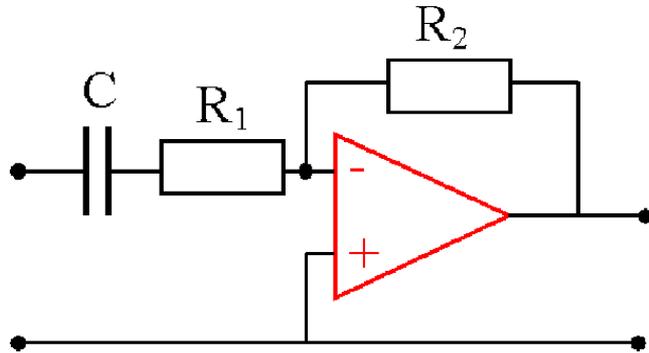
Utiliza una red RC (una resistencia y un condensador) conectada a la entrada inversora de un amplificador configurado como inversor.

$$\text{Frecuencia de corte (Hz)} \quad f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_2 \cdot C_2}$$

Para frecuencias inferiores a la frecuencia de corte, la ganancia será constante y corresponde a la de un amplificador inversor: $A = - R_2 / R_1$

Para frecuencias superiores a la frecuencia de corte, la ganancia disminuye a razón de 20 dB por década. En este caso, la ganancia habrá disminuido 20 dB para una frecuencia diez veces superior a la de corte.

Filtro paso alto

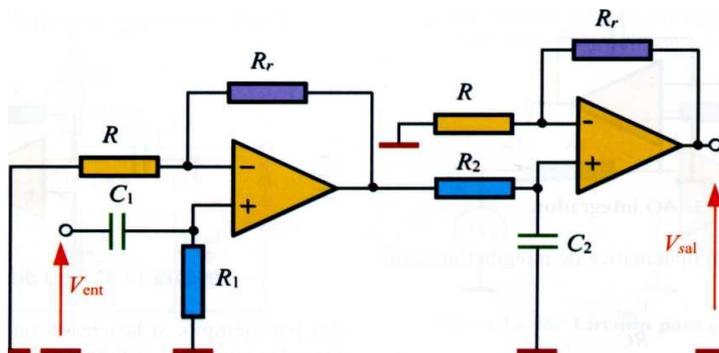


Frecuencia de corte (Hz) $f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_1 \cdot C_2}$

Para frecuencias superiores a la frecuencia de corte, la ganancia será constante y corresponde a la de un amplificador inversor: $A = - R_2 / R_1$.

Para frecuencias inferiores a la frecuencia de corte, la ganancia disminuye a razón de 20 dB por década. En este caso, la ganancia habrá disminuido 20 dB para una frecuencia diez veces superior a la de corte.

Filtro pasa banda y rechazo banda



Si enlazamos en cascada dos filtros, uno de paso alto y otro de paso bajo, obtenemos un filtro pasa banda. Tendrá una frecuencia de corte inferior para las frecuencias bajas y una frecuencia de corte superior para las frecuencias altas.

Para obtener un filtro pasa banda, la frecuencia de corte del filtro pasa alto debe ser menor que la del filtro pasa bajo.

En caso contrario obtendríamos un filtro rechazo banda.

Características de los filtros

Para cualquier tipo de filtros se emplean las siguientes definiciones:

Frecuencia Central (fo).

Se define como aquella frecuencia que permita el paso de las frecuencias inferiores a una frecuencia conocida (frecuencia central o frecuencia de resonancia), atenuando enormemente las frecuencias superiores a dicha frecuencia central.

Frecuencia de corte.

Es aquella en que la ganancia del filtro cae a -3 dB por debajo de la máxima ganancia alcanzada. En los filtros pasa y elimina banda existen dos: una superior y otra inferior.

Ancho de banda (Bw).

El ancho de banda es la anchura, medida en hertz, del grupo de frecuencias que realizan trabajo útil. Este grupo de frecuencias es en donde se encuentra concentrada la mayor energía de la señal.

Es la gama de frecuencias a las cuales se las permitirá el paso, es igual a la diferencia de las frecuencias de corte superior e inferior:

$$B_W = f_2 - f_1$$

Calidad (Q):

Especifica la eficacia del filtro y es la relación entre la frecuencia de corte o central y el ancho de banda:

$$Q = \frac{f_0}{B_W} = \frac{f_0}{f_2 - f_1} = \frac{f_0}{\Delta f}$$

La calidad (Q) en filtros sirve para ver lo selectivos que son, es decir, para ver el ancho de banda. En principio, un filtro con menor ancho de banda (mayor Q), será mejor que otro con más ancho.

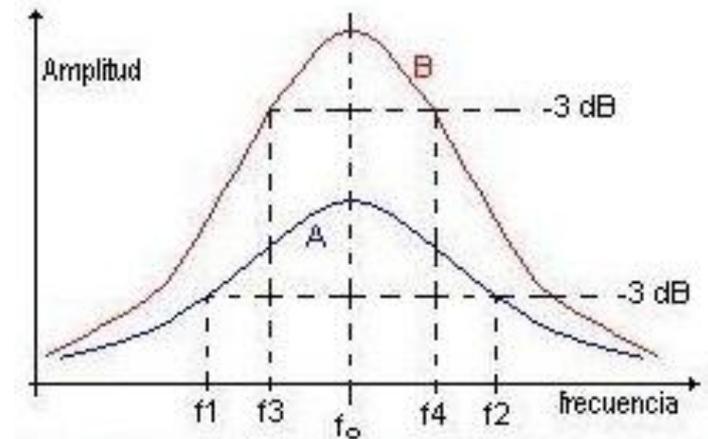
Ejemplo:

El gráfico A:

- Frecuencia central f_o (frecuencia de resonancia)
- Ancho de banda va de f_1 a f_2 .

El gráfico B:

- Frecuencia central f_o (frecuencia de resonancia)
- Ancho de banda va de f_3 a f_4 .



Las frecuencia utilizadas para determinar el ancho de banda (f_1 , f_2 , f_3 , f_4) se llaman frecuencias de corte o frecuencias de mediana potencia y se obtienen cuando la amplitud de la onda cae en 3 dB de su máxima amplitud.

El gráfico B muestra un filtro de mayor selectividad, pues las frecuencias de corte están mas cerca de la frecuencia central f_o . En este caso el ancho de banda del filtro es menor.

El gráfico A muestra un filtro de menor selectividad, pues sus frecuencias están más alejadas de la frecuencia central, pero su ancho de banda es mayor.

Para encontrar el factor de calidad de un filtro se utiliza la fórmula:

$$Q = \frac{f_o}{B_w}$$

Donde: f_o = frecuencia de central o de resonancia
 B_w = Ancho de banda ($f_2 - f_1$) o ($f_4 - f_3$).

En este caso el factor de calidad del filtro B es mayor