

# 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.

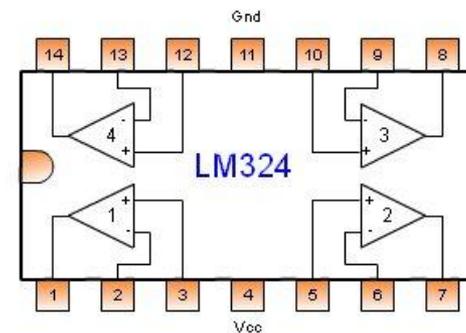
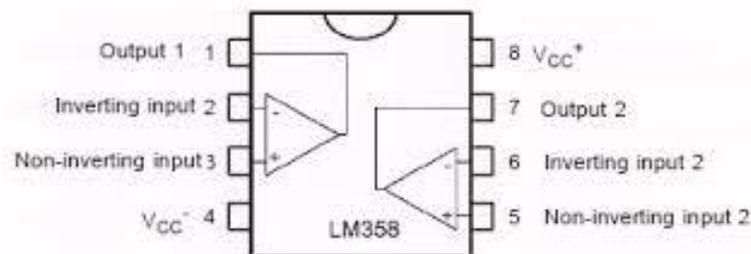
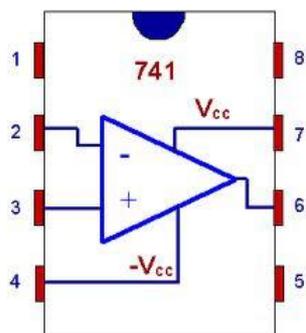
La idea principal de estos "operacionales" originales era la de ser utilizados en calculadoras analógicas, para sumar, restar, multiplicar y realizar operaciones más complejas.

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.

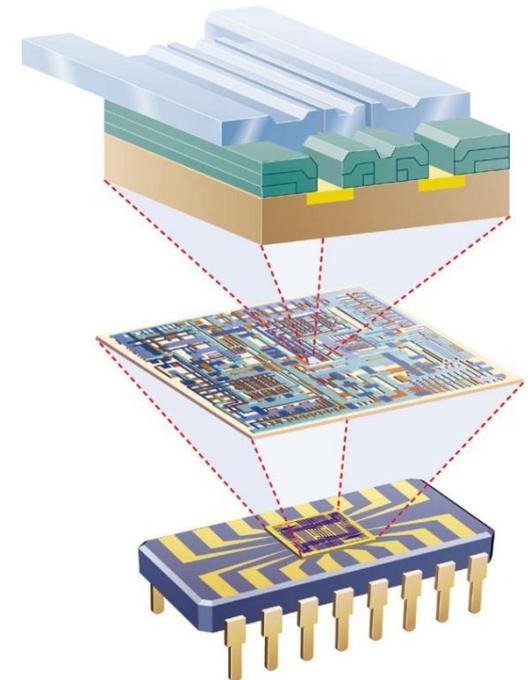
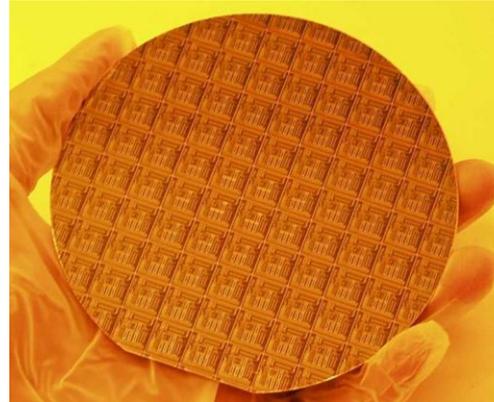
Estos circuitos integrados son: **muy versátiles, de bajo precio, tamaño pequeño, con excelentes características y redujeron el diseño de un amplificador a la adición de unas resistencias.**

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

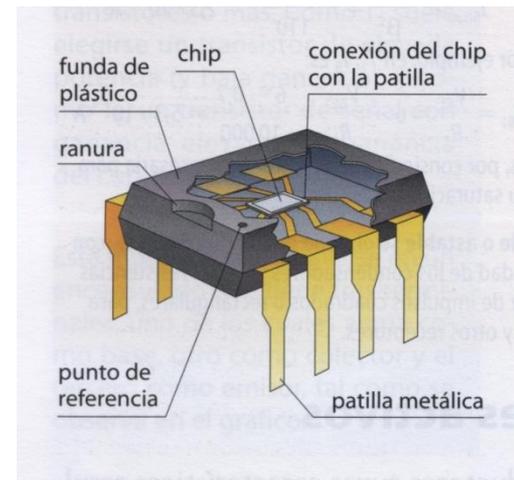
En un único soporte físico, generalmente de silicio, se integran diferentes componentes individuales, pasivos y/o semiconductores, que constituyen en conjunto un sistema electrónico.



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.

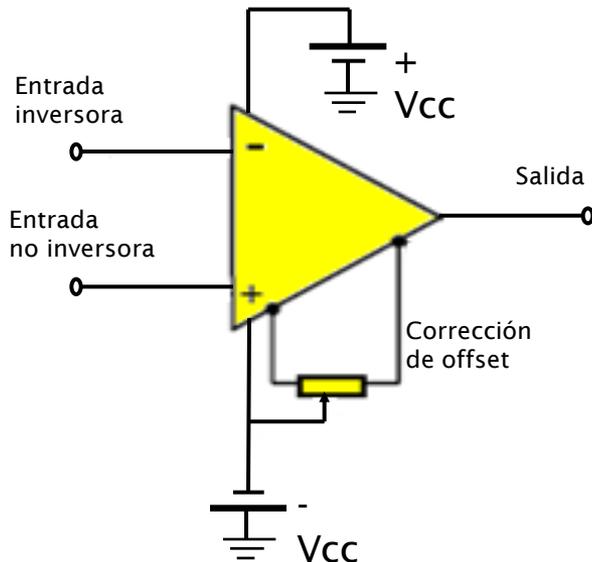
**Específicos:** se encargan a medida para cada aplicación concreta. Su denominación responde a códigos propios del cliente que los solicita.



## 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.

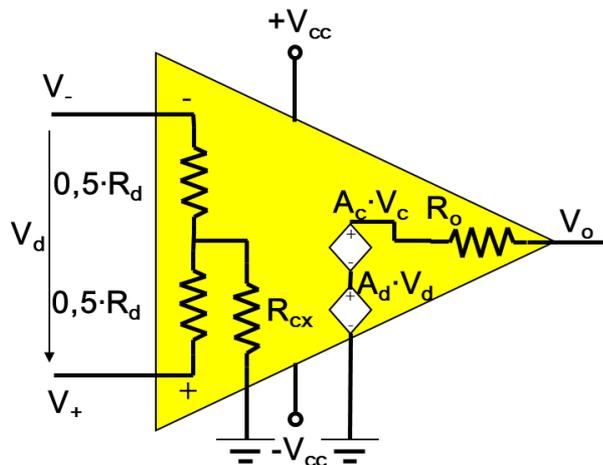
**Ganancia en modo común** nos indica la amplificación que se produce de las señales que son comunes a las dos entradas del amplificador. Esta ganancia debe ser lo más pequeña posible, puesto que la parte común a las dos señales de entrada suele ser ruido e interferencias que no nos interesa amplificar.

**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.

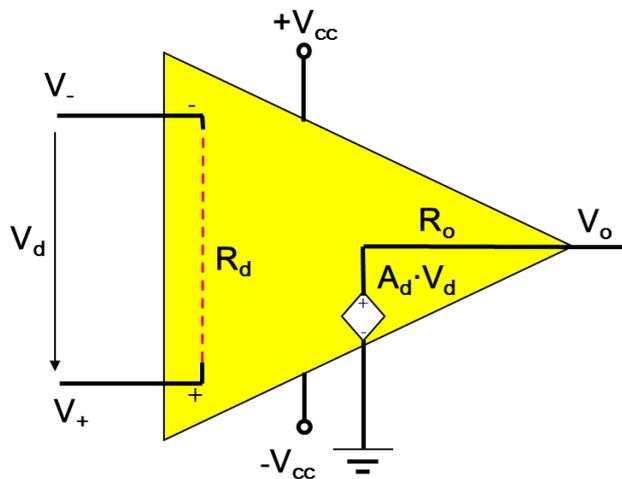
## Circuito equivalente real



## 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

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

$$V_o = A_d \cdot V_d$$

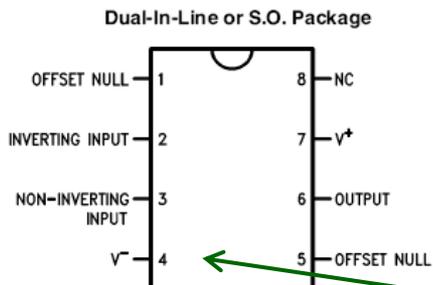
$$V_d = V_+ - V_-$$

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

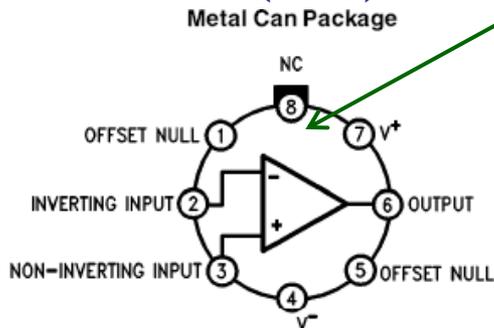
## Encapsulado DIP 8 patillas



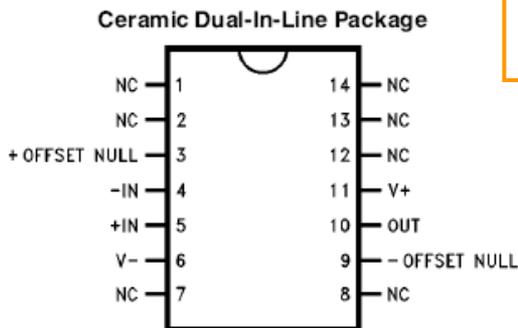
### Conexión de patillas del A.O (formato de 8 patillas)

- 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)

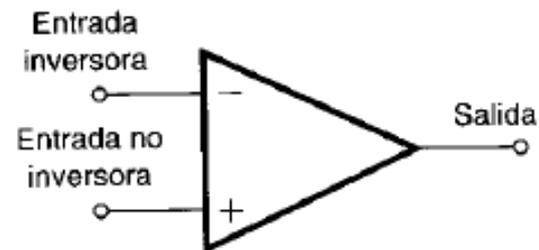
Se añaden mas patillas sin conectar para mantener el formato

## Modos de trabajo del A.O

El amplificador operacional puede trabajar en tres modos distintos:

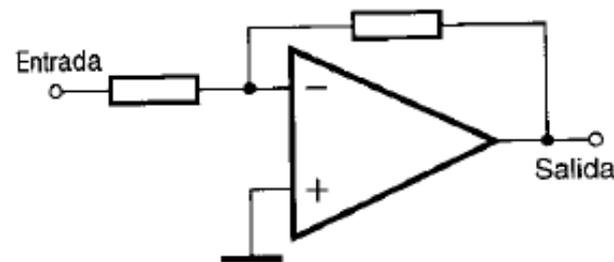
### En lazo abierto, sin realimentación

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.



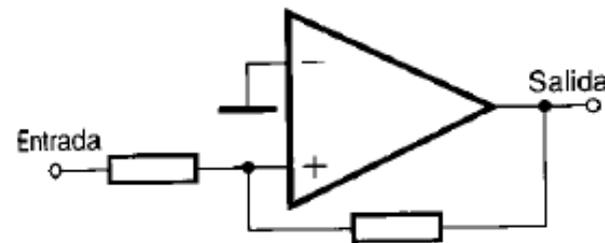
### En lazo cerrado, con realimentación negativa

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:

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

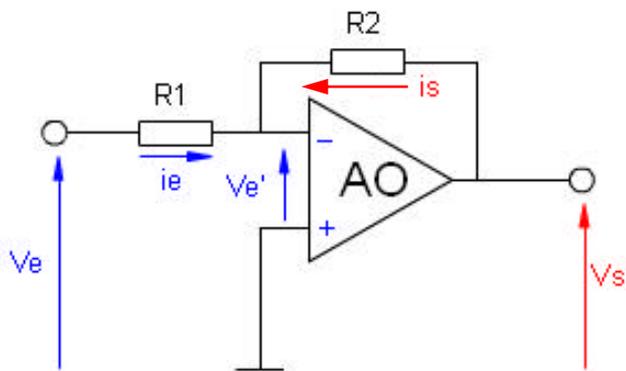
- 3) Definir las corrientes en cada una de las ramas del circuito.
- 4) Aplicar el método de los nodos en todos los nodos del circuito excepto en los de salida de los amplificadores (porque en principio no se puede saber la corriente que sale de ellos).
- 5) Aplicando las reglas del segundo apartado 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  $180^\circ$  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

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

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

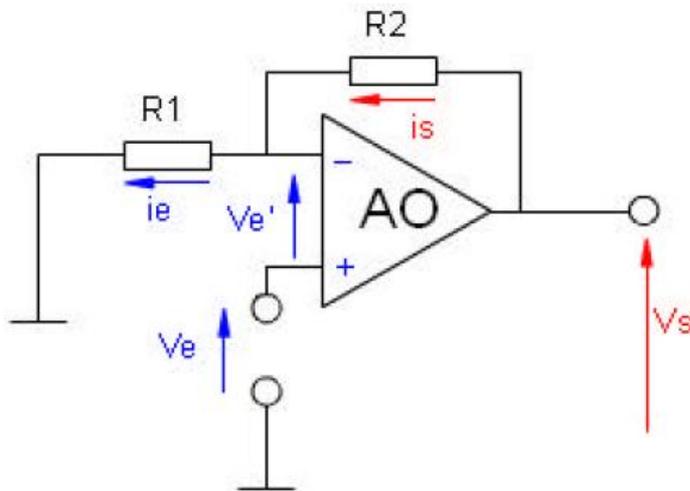
$$i_s = \frac{V_s - V_-}{R_2} = \frac{V_s - 0}{R_2} = \frac{V_s}{R_2}$$

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

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.

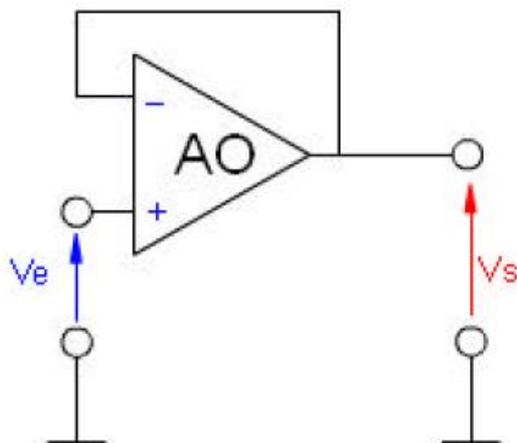
En este caso, la señal de salida está en fase con la señal de entrada, puesto que la ganancia es de valor positivo.

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.



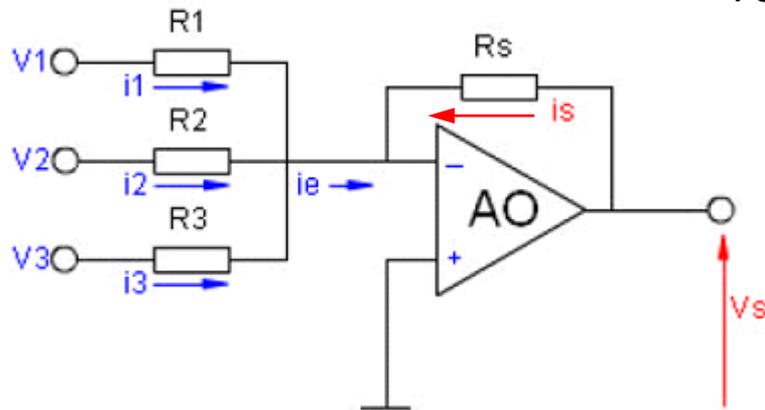
De esta manera, y debido al «cortocircuito virtual» entre la entrada inversora y la no inversora, se cumple que:  $V_e = V_s$ . La tensión de salida es igual que la tensión de entrada.

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

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:  $V_s = -(R_s / R) \cdot (V_1 + V_2 + V_3)$

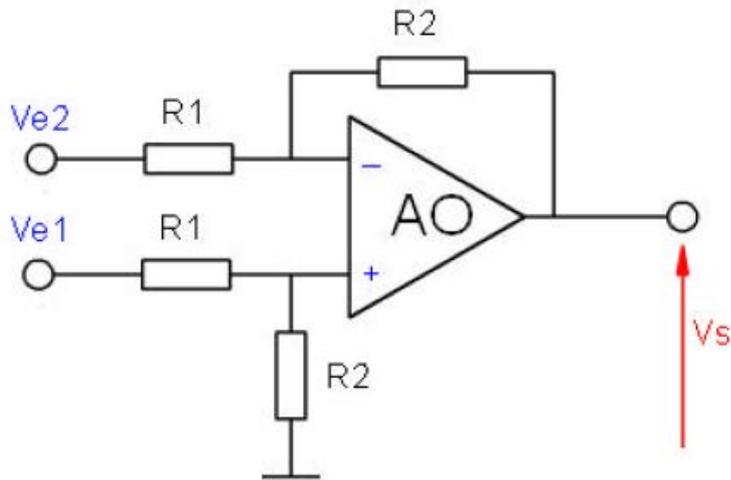
Si hacemos  $R_s = R$ , nos queda:  $V_s = -(V_1 + V_2 + V_3)$

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  $Ve2$ ).

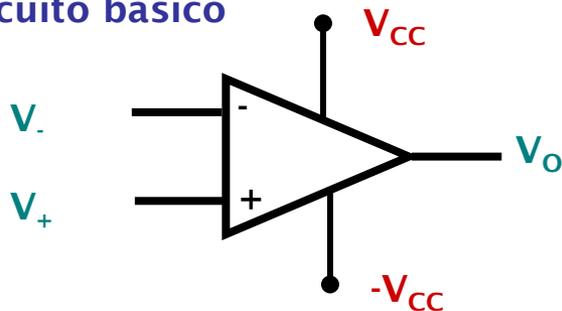
El amplificador diferencial se utiliza en aplicaciones en las que nos interesa eliminar señales de ruido introducidas por el ambiente o perturbaciones.

## 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.

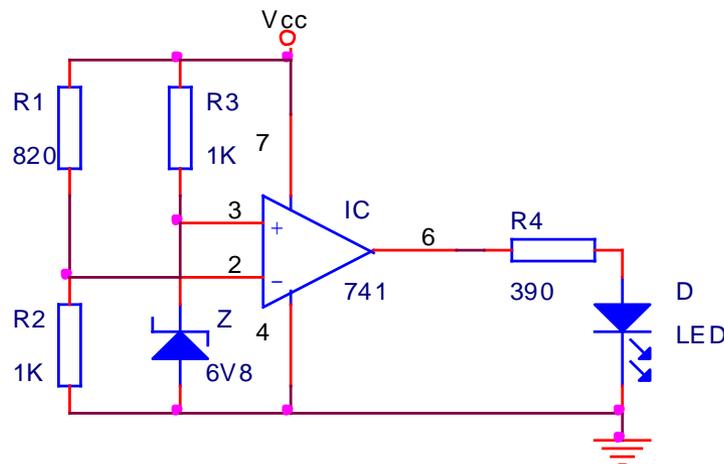
#### Circuito básico



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.

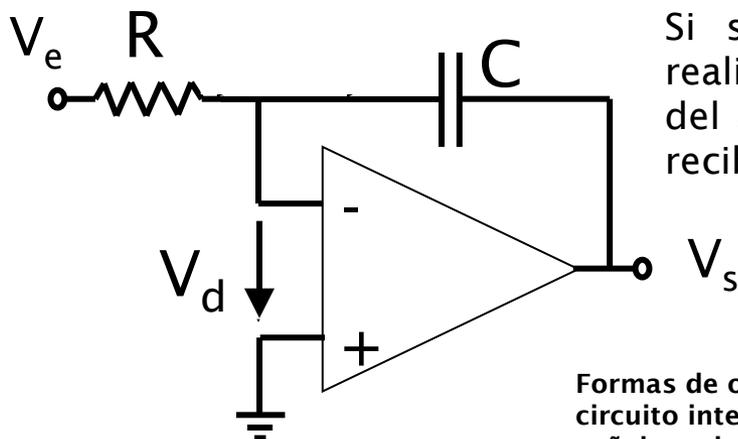


En este caso, la tensión de entrada ( $V_-$ ) es comparada con una tensión de referencia ( $V_+$ ) fijada por el diodo Zener.

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  $-V_{max}$ .

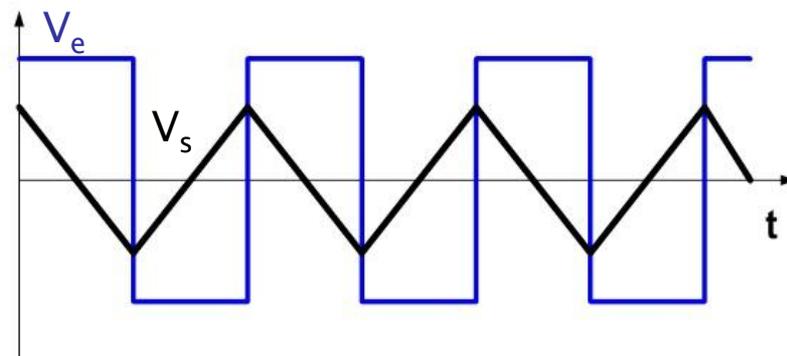
Si se necesita una tensión de referencia negativa, se alimenta el divisor de tensión con  $-V_{CC}$ .

## Integrador

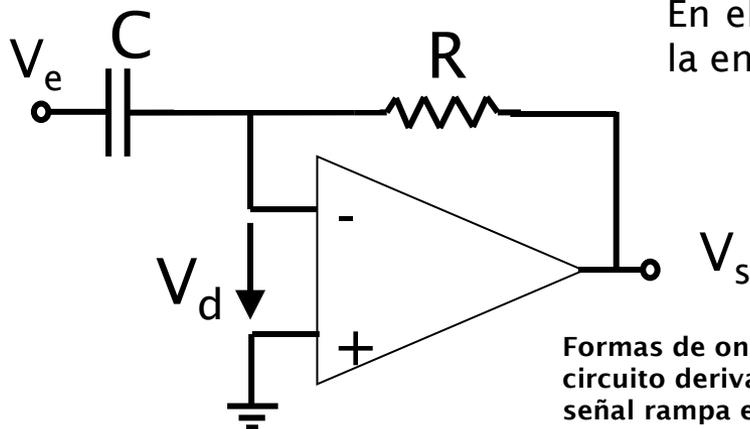


Si se utiliza un condensador de capacidad  $C$  en la realimentación de la salida a cualquiera de las entradas del amplificador operacional, obtenemos un circuito que recibe el nombre de integrador.

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

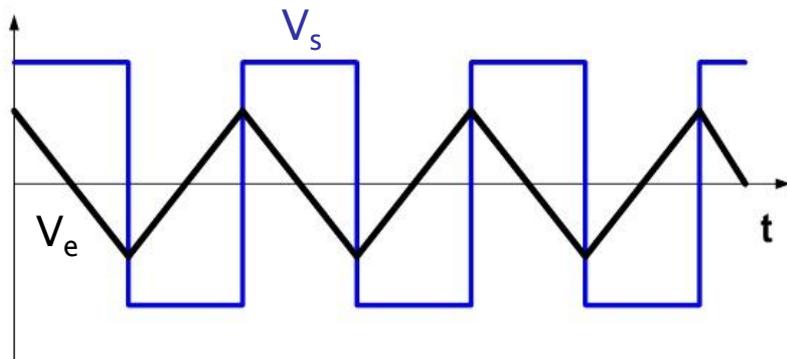


## Derivador



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.

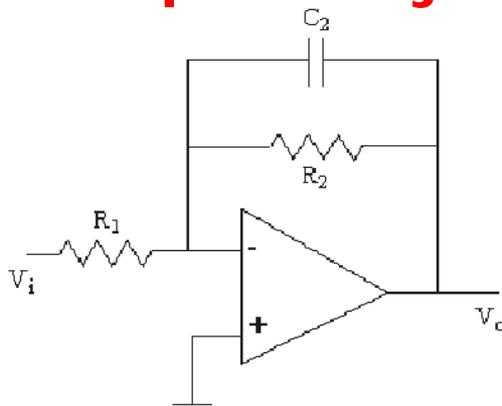
## Filtros activos

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



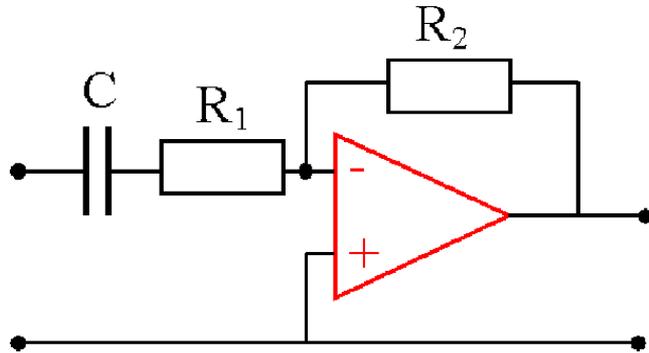
Utiliza una red  $RC$  (una resistencia y un condensador) conectada a la entrada inversora de un amplificador configurado como inversor.

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

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

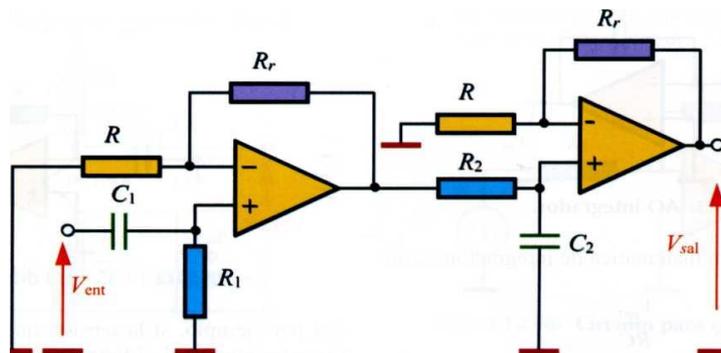


Frecuencia de corte (Hz)  $f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_1 \cdot C_2}$

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.

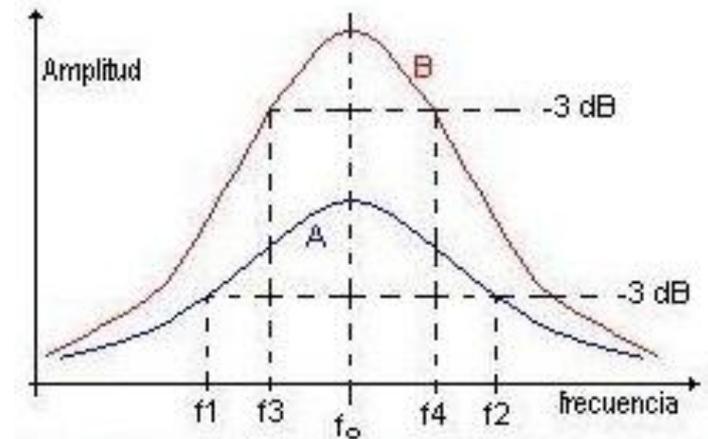
## Ejemplo:

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:

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

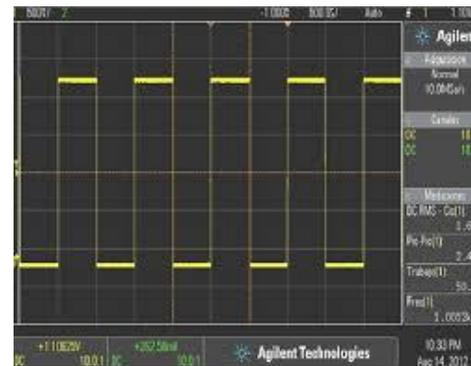
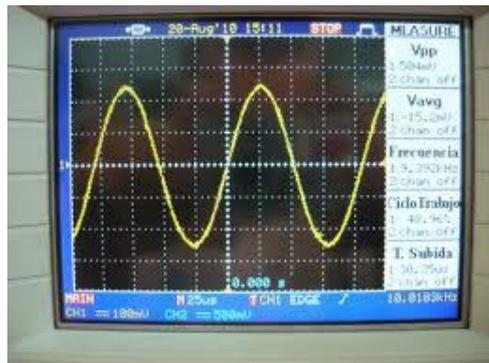
Donde:  $f_o$  = frecuencia de central o de resonancia  
 $B_w$  = Ancho de banda ( $f_2 - f_1$ ) o ( $f_4 - f_3$ ).

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

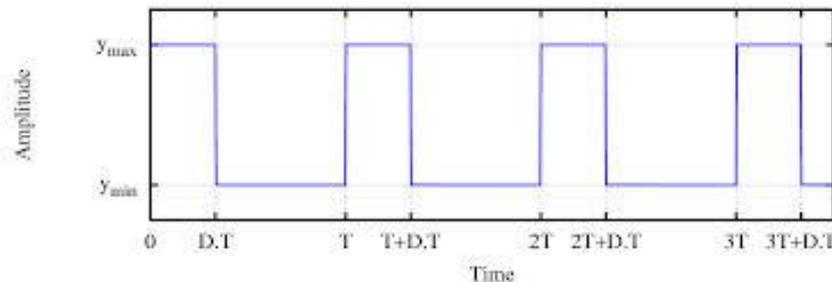
## Circuitos generadores de señales

Son circuitos muy utilizados en telecomunicaciones. Podemos clasificarlos atendiendo al tipo de señal que producen, en:

- **Circuitos osciladores:** Circuitos capaces de generar señales alternas periódicas partiendo de una señal continua, y se dividen en: **Osciladores Senoidales** (generan una señal alterna senoidal) y **Multivibradores** (generan una señal alterna cuadrada).



- **Circuitos temporizadores:** Circuitos capaces de generar señales alternas cuadradas no periódicas.



## Osciladores

En la figura se muestra el esquema de principio de un oscilador, en el que se observa un amplificador con una red de realimentación.

Dos condiciones son imprescindibles para que los amplificadores realimentados se conviertan en osciladores:

- 1) Que la señal realimentada esté en fase con la entrada (realimentación positiva).
- 2) Que la ganancia de bucle cerrado sea mayor o igual a 1.



Esquema en bloques de un oscilador

**Por la primera condición:** si la señal realimentada está en fase con la señal de entrada, el resultado es una señal efectiva mayor, llegando incluso a darse el caso de que sin señal de entrada, se puede obtener una forma de onda de salida.

**Por la segunda condición:** si la ganancia es inferior a 1, la señal de salida se iría amortiguando y llegaría, con el tiempo, a desaparecer. Si la ganancia de bucle es igual a 1, la señal de salida se automantiene, obteniéndose una forma de onda senoidal; si, por el contrario, es mayor que 1, dicha señal se autoeleva de nivel y hace variar al amplificador entre los puntos de corte y saturación, consiguiéndose de esta manera una forma de onda de salida cuadrada.

A estos requisitos se los conoce con el nombre de **condiciones de Barkhausen**, que son las condiciones necesarias y suficientes para que cualquier amplificador realimentado oscile.

Generalmente estos circuitos se realizan con componentes discretos, como los que se han estudiado en las unidades anteriores, aunque dada su amplia utilización, se han desarrollado circuitos integrados para su implementación, como el circuito integrado 555, muy utilizado en infinidad de aplicaciones.

Uno de los parámetros más importantes en los osciladores es la frecuencia de la señal que generan. Normalmente esta frecuencia vendrá determinada por los componentes que se añaden al circuito principal en forma de resistencias, bobinas y condensadores.

## Osciladores Senoidales

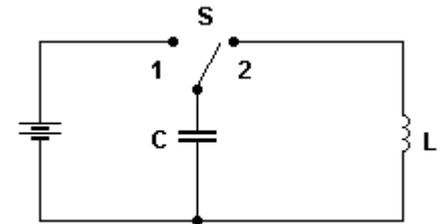
Dentro del grupo de osciladores senoidales podemos hacer una subdivisión en función de la frecuencia de la onda de salida:

- **Osciladores de radiofrecuencia (LC):** Su frecuencia de salida está comprendida dentro de la gama de radiofrecuencia ( desde 100 KHz hasta 300 GHz), se caracterizan porque incluyen un circuito tanque (LC paralelo) o un cristal piezoeléctrico.
- **Osciladores de baja frecuencia (RC):** Debido al gran volumen que ocuparían las bobinas o cristales de cuarzo contruidos para una frecuencia baja, los osciladores de este tipo están compuestos por una red de resistencias y condensadores. Su frecuencia de salida está comprendida dentro de la gama de baja frecuencia (menos 100KHz).

## Osciladores de radiofrecuencia (LC)

### El circuito tanque

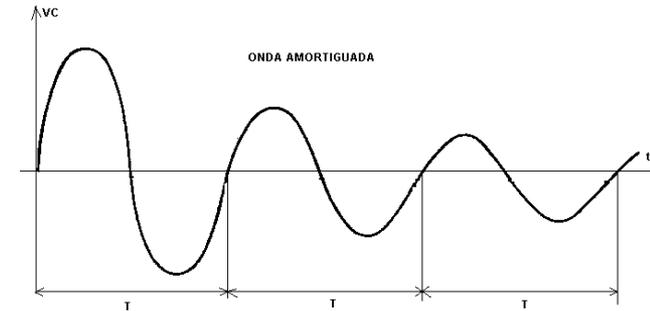
Se conoce con el nombre de circuito tanque al formado por la conexión en paralelo de un condensador y una bobina; el nombre proviene de su capacidad de almacenar energía eléctrica y magnética.



Con C inicialmente descargado, conmutamos S a la posición 1, el condensador C se carga. Cuando C está totalmente cargado, conmutamos a la posición 2, por lo cual circulará una corriente de descarga a través de L, creando un campo magnético en ésta. Cuando la corriente de descarga tiende a desaparecer, la bobina, a costa de la energía almacenada en su campo magnético, induce una corriente del mismo sentido que la que lo había creado, dando como resultado una carga de C de polaridad opuesta a la anterior. Al agotarse la energía del campo magnético nos encontramos con un condensador cargado con polaridad inversa a la inicial; en ese momento comienza a descargarse, nuevamente, a través de L con una corriente de sentido inverso, repitiéndose el proceso anterior.

## Osciladores de radiofrecuencia (LC) (continuación)

Así, se completa un ciclo del proceso de oscilación, que seguiría, indefinidamente si no fuera porque la resistencia interna de los componentes produce una pérdida de energía por efecto Joule; por ello, al cabo de cada ciclo, la tensión entre extremos de C es inferior a la del ciclo anterior, llegando con el tiempo a desaparecer, si bien el tiempo que tarda en completarse cada ciclo es constante.



Ahora bien, si mediante algún método se pudiera hacer que, al agotarse el campo magnético, durante el semiperíodo de carga directa de C, el interruptor S conmutase durante un breve período de tiempo a la posición 1, se conseguiría reponer la cantidad de energía perdida en las resistencias para, acto seguido, volver a la posición 2 y comenzar un nuevo ciclo.

Este es el método empleado por los osciladores de radiofrecuencia, obligando a un transistor que se encuentra cortado a conducir durante un breve período de tiempo para reponer la energía del tanque.

La frecuencia de la señal responde a la expresión: 
$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Se usan en aplicaciones dentro de las bandas de HF y VHF, por lo que pueden encontrarse en equipos como transmisores y receptores de radio en AM y FM, centrales telefónicas, etc

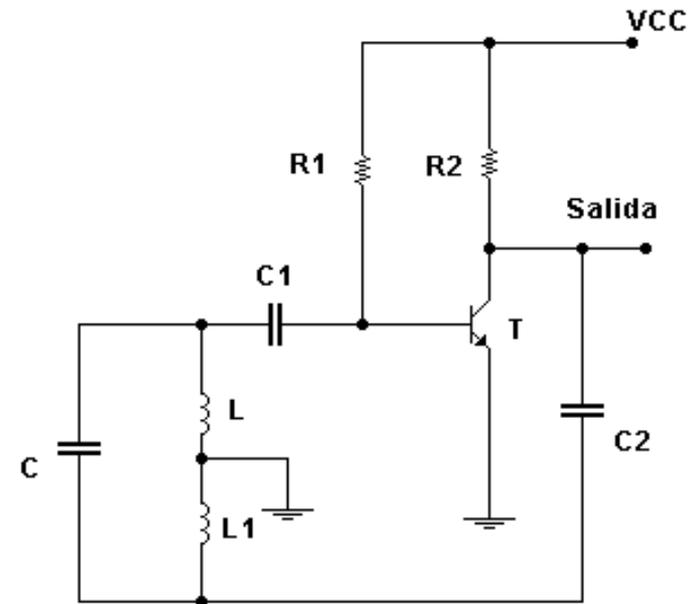
Osciladores típicos de radiofrecuencia que difieren en la forma en que el impulso de mando se aplica al transistor son:

- **OSCILADOR HARTLEY**
- **OSCILADOR COLPITTS**

## OSCILADOR HARTLEY

El circuito de este tipo de oscilador es el mostrado en la figura. En el se observa el circuito tanque con la particularidad de que la bobina está dividida en dos partes; vemos, igualmente, que la corriente continua de polarización no atraviesa el tanque, razón por la cual a este circuito se le llama oscilador Hartley alimentado en paralelo.

Las resistencias R1 y R2 proporcionan la polarización del TBJ, y los condensadores C2 y C1 sirven para acoplar la señal alterna al tanque y a la base del transistor e impiden el paso de la corriente continua.



El tanque está formado por C y L-L1, haciendo la bobina, además, la función de autotransformador en el circuito de realimentación. El transistor está montado como amplificador en la configuración de emisor común, por lo cual existe un desfase de la señal de 180°, que unidos a los 180° del transformador componen una señal realimentada en fase.

La frecuencia de oscilación del circuito corresponde a la de resonancia del circuito tanque, influyendo en muy pequeña medida la inducción mutua del autotransformador, razón por la que puede aproximarse a la expresión:

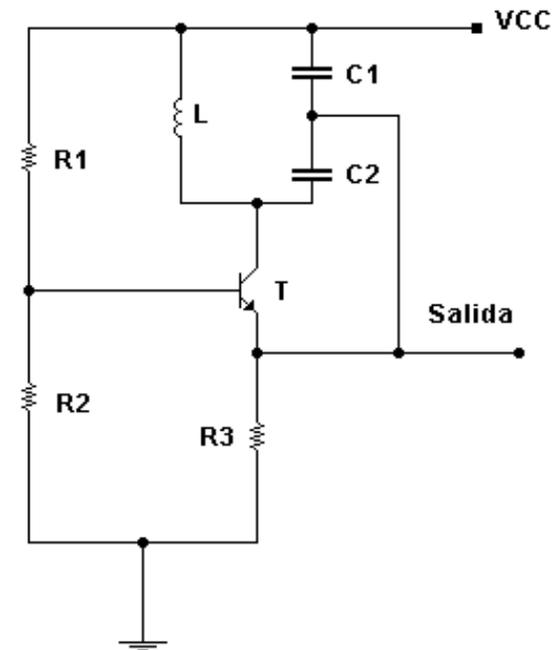
$$f := \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{(L1 + L) \cdot C}}$$

## OSCILADOR COLPITTS

Este tipo de oscilador, al igual que el anterior, emplea un circuito tanque generador de oscilaciones, pero a diferencia del oscilador Hartley, es el condensador el que se encuentra dividido. En la figura se muestra un circuito típico de este tipo de oscilador, en el que el circuito tanque es recorrido por la corriente continua, siendo por tanto, un oscilador Colpitts alimentado en serie.

El circuito consta de un transistor en configuración de colector común y polarizado de base mediante el divisor formado por R1 y R2. La bobina L forma la resistencia de colector del transistor. Del punto de unión de los dos condensadores se toma una realimentación a la entrada mediante variación del potencial de emisor. Al estar el transistor en colector común, no existe desfase entre la señal y la tensión realimentada, cumpliéndose por tanto, las condiciones para la oscilación.

También en este circuito la frecuencia de oscilación será la de resonancia del circuito tanque, pero ahora, al estar en serie los condensadores, es necesario emplear el condensador equivalente para hallar su frecuencia de oscilación, que responderá a la expresión:



$$f := \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{\frac{C1 \cdot C2}{C1 + C2} \cdot L}}$$

## Osciladores de baja frecuencia (RC)

Para frecuencias menores que 100 kHz, se trata de evitar el uso de bobinas, surgiendo así los osciladores RC. Pueden ser fundamentalmente de dos tipos:

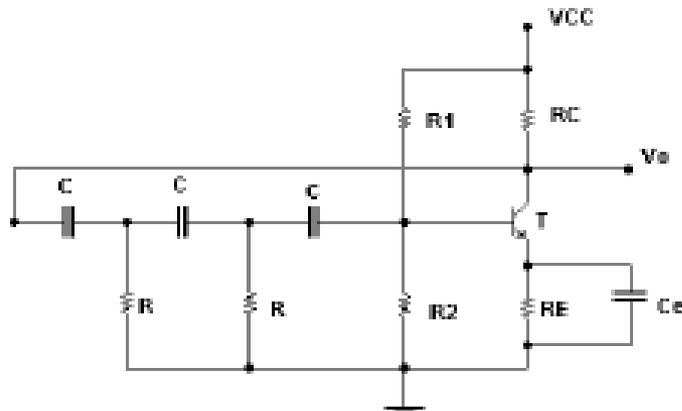
- **Osciladores por rotación de fase.**
- **Osciladores con puente de Wien.**

### Osciladores por rotación de fase

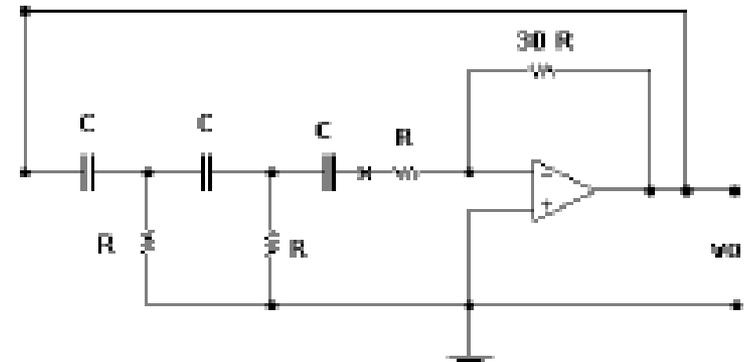
Consiste en utilizar como elemento activo un amplificador inversor y una cascada de células RC que producen rotaciones de fase que sumadas proporcionan los  $180^\circ$  requeridos por el criterio de Barkhausen. Dado que una célula RC produce un desfase de  $60^\circ$ , se requieren al menos tres células para que en alguna frecuencia se alcancen los  $180^\circ$ , que unidos a los  $180^\circ$  que genera el amplificador inversor, generan una salida senoidal de bastante calidad. Son baratos, fáciles de construir y estables para frecuencias medias y bajas.

La frecuencia que proporciona el oscilador se calcula en función del número de células y del valor de los componentes:

$$f = \frac{1}{2\pi RC\sqrt{2n}} \quad (\text{donde } n \text{ es el número de células})$$



Oscilador por rotación de fase con transistor BJT



Oscilador por rotación de fase con A.O.

## Osciladores en puente de Wien

Un **oscilador de puente de Wien** es un tipo de oscilador que genera ondas sinusoidales, (de 5 Hz a los 5 Mhz), sin necesidad de ninguna señal de entrada. Puede generar un amplio rango de frecuencias. El puente está compuesto de cuatro resistencias y dos condensadores.

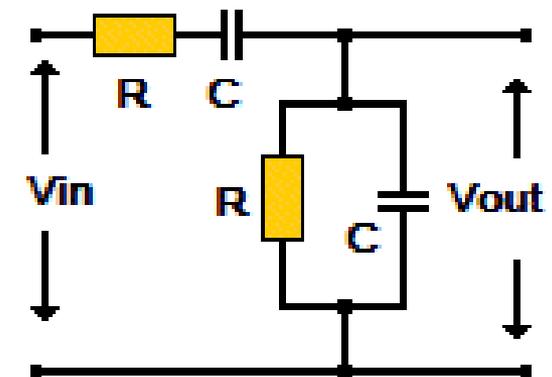
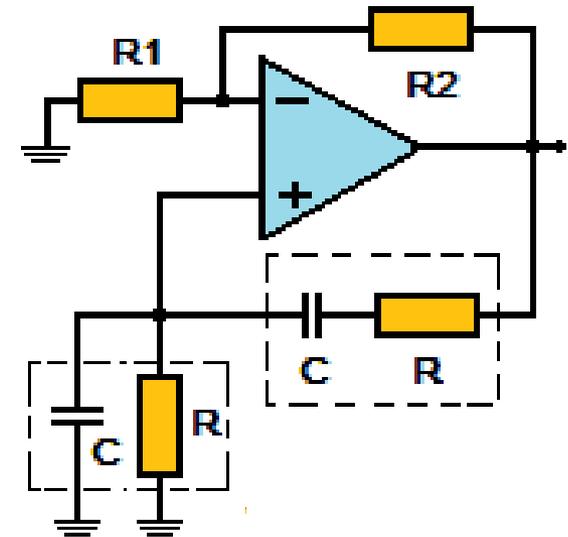
Es más utilizado que el oscilador por rotación de fase porque tiene menos componentes y el ajuste de la frecuencia de oscilación es más fácil.

El circuito básico consta de un amplificador y una red de realimentación compuesta de dos redes RC, una serie y otra paralelo. Los dos valores de resistencias (R) y condensadores (C) son iguales.

La ganancia del amplificador es el cociente de R2 y R1 debe ser igual o mayor que 2.

El valor de la frecuencia (en Hz) de la señal que se obtiene a la salida del oscilador se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$f = \frac{1}{2\pi RC}$$



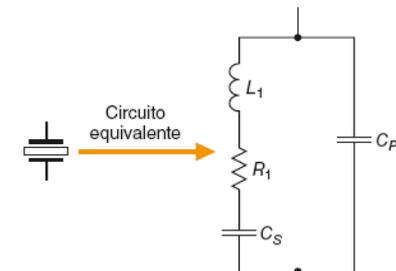
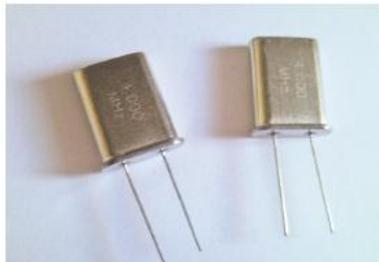
## Osciladores de cristal de cuarzo

Un oscilador de cristal de cuarzo es aquel oscilador que incluye en su realimentación un resonador piezoeléctrico.

Un cristal es un dispositivo electromecánico que se comporta como un circuito muy selectivo en frecuencia, es decir con un factor de calidad  $Q$ , muy alto. Está construido a base de cuarzo, la turmalina, la sal de Róchele o de una cerámica sintética con propiedades piezoeléctricas. Sus propiedades son muy estables en el tiempo e insensibles a los cambios de temperatura o humedad.

Pueden encontrarse en los microprocesadores y microcontroladores para generar impulsos de reloj sobre los cuales se basa toda la sincronización del sistema. También en relojes, emisores y receptores de radio, telefonía móvil, etc.

El cristal actúa como una bobina grande en serie con un pequeño condensador. Por ello, la frecuencia de resonancia casi no se ve afectada por el amplificador ni las capacidades parásitas. El causante de la vibración de un cristal de cuarzo es el efecto piezoeléctrico, por el cual, al aplicar una tensión al cristal, este vibra según la frecuencia de la tensión aplicada. Y, de forma inversa, si se los obliga a que vibren, generan una tensión alterna de la misma frecuencia.



Si el cristal no está vibrando, equivale a la capacidad  $C_p$ . Cuando vibra, se produce la frecuencia de resonancia para la que está fabricado.

## Multivibradores (Osciladores no senoidales)

Un **multivibrador** es un circuito oscilador capaz de generar una onda cuadrada. Según su funcionamiento, los multivibradores se pueden dividir en dos clases:

**De funcionamiento continuo estable o de oscilación libre:** Se conoce como **Multivibrador estable**. Es el circuito utilizado para generar oscilaciones a partir de la propia fuente de alimentación. No tienen ningún estado estable, por lo que, una vez puestos en marcha, generan un estado de oscilación ininterrumpida.

**De funcionamiento impulsado:** a partir de una señal de disparo o impulso sale de su estado de reposo. Se distinguen dos tipos:

- **Multivibrador biestable.** se caracteriza por poseer dos estados estables de conducción. Mientras no se aplique un disparo externo, permanece en uno de los dos estados, saliendo de él al aplicar un nuevo impulso. También se le conoce con el nombre de flip-flop, y tiene gran aplicación en los circuitos que utilizan técnicas digitales.
- **Multivibrador monoestable.** se caracterizan por poseer un estado de conducción estable una vez aplicada una señal externa. Transcurrido cierto tiempo, que viene determinado por los componentes del circuito, vuelve al estado inicial. Dan lugar a los circuitos temporizadores.

Todos estos circuitos se utilizan en alarmas electrónicas, circuitos digitales, etc.

Se pueden encontrar contruidos con transistores, con amplificadores operacionales y con circuitos integrados, como el C.I 555, que usa un sofisticado diseño para lograr una gran precisión y flexibilidad con muy pocos componentes externos.

# El circuito integrado 555

## Características

El circuito integrado 555 es uno de los integrados mas utilizados en el mundo de la electrónica por su bajo costo y su gran fiabilidad.

Las dos aplicaciones fundamentales de este tipo de circuitos integrados son:

- Como **generador de ondas**: es un oscilador (modo **astable** o **biestable**).
- Como **temporizador**: capaz de producir pulsos de temporización muy precisos (modo **monoestable**).

Los tiempos de las señales que se generan en cada uno de los casos se controlan con resistencias y condensadores que se añaden a las patillas del circuito.

Fue desarrollado y construido en el año 1971 por la empresa Signetics con el nombre: SE555/NE555 y se lo llamó: "The IC Time Machine" (Circuito integrado la máquina del tiempo)

Según el fabricante lo podemos encontrar marcado con distinta designación: LM555, NE555, LC555, MC1455, MC1555, SE555, CA555, XR-555, RC555, RM555, SN72555.

El **556** es un circuito integrado con 2 temporizadores tipo 555 en una sola unidad de 14 pines y el **558** tiene 4 temporizadores tipo 555 en una sola unidad de 14 pines.

## Especificaciones generales del 555

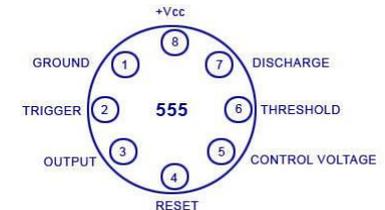
- Tensión de alimentación Vcc de **4.5 a 16 voltios**.
- Frecuencia máxima de **500Khz a 2Mhz**.
- Corriente de salida máxima de **200ma**.

## Aplicaciones

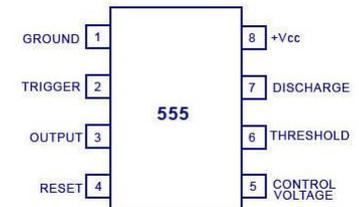
- Oscilador
- Temporizador
- Modulador de frecuencia
- Divisor de frecuencia
- Generador de señales rectangulares y triangulares
- Control de sistemas secuenciales



Encapsulado TO99



Encapsulado Minidip 8 patillas



Independientemente del tipo de encapsulado, la numeración de las patillas del 555 es la misma.

## Estructura interna y patillaje

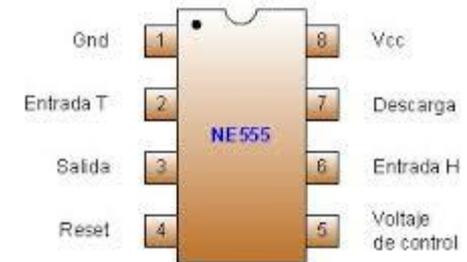
El C.I 555 consta de:

- **Dos comparadores:** que ofrecen a su salida dos estados perfectamente diferenciados (alto y bajo) en función de las tensiones aplicadas a sus entradas (+ y -), de tal forma que:
  - si  $V(+)$  >  $V(-)$ , la salida del comparador toma nivel alto
  - si  $V(+)$  <  $V(-)$ , la salida del comparador toma nivel bajo

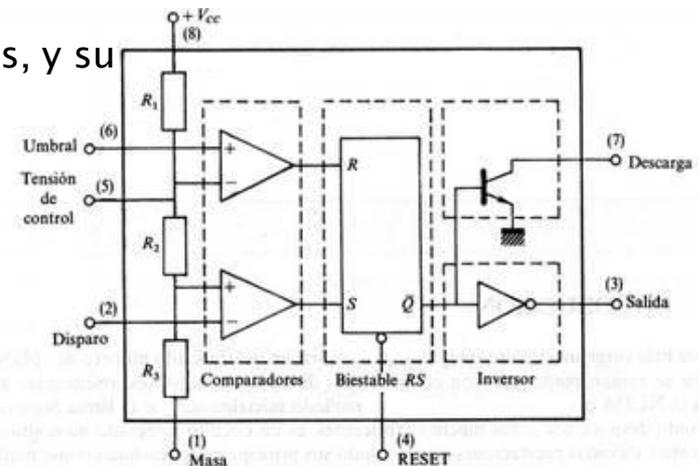
No se contempla el caso de que sean iguales, ya que una pequeña variación entre ambas hace que la salida adopte el nivel determinado por el sentido de la variación.

- **Un Biestable (Flip-Flop):** Ofrece dos estados estables, y su funcionamiento responde a la siguiente tabla:

	R	S	Salida $\bar{Q}$
Nivel	Alto	Bajo	Alto
	Bajo	Alto	Bajo



Estructura interna  
Diagrama de bloques



- **Un inversor:** Invierte el nivel de la salida  $\bar{Q}$  del biestable (cambia un nivel alto a bajo y viceversa). Su salida se conecta a la patilla 3 y constituye la salida del circuito.
- **Descarga:** Lo constituye un transistor gobernado por la salida del biestable y sirve para ofrecer un camino de descarga al condensador que se conecta exteriormente y que determina la constante RC (tiempo de temporización). Se conecta a la patilla 7.
- **Entrada de RESET:** Se conecta a la patilla 4 del circuito y, cuando está a nivel bajo (menos de 1V), pone a nivel bajo la salida del circuito independientemente de los niveles existentes en las otras entradas.

## Funcionamiento del C.I 555

Su funcionamiento es el siguiente:

Las tres resistencias  $R_1$ ,  $R_2$  y  $R_3$ , conectadas entre  $+V_{cc}$  y masa, ofrecen valores exactamente iguales (típicos de  $5\text{ k}\Omega$ ), lo que implica que entre sus puntos de unión y masa existan exactamente  $2/3$  de  $V_{cc}$  y  $1/3$  de  $V_{cc}$ , respectivamente.

El punto de unión de  $R_1$  y  $R_2$  está conectado a la entrada (-) del comparador superior.

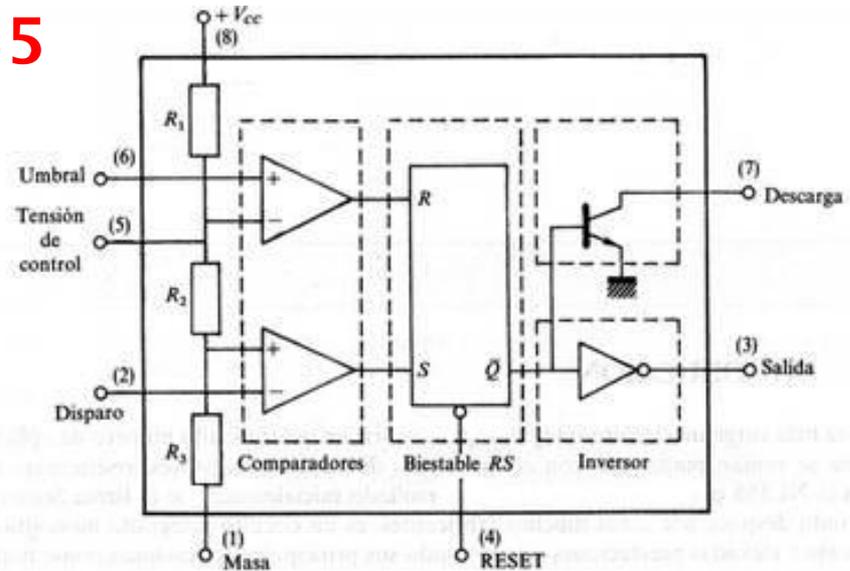
Mientras la entrada de umbral (patilla 6) esté a un nivel inferior a  $2/3$  de  $V_{cc}$ , la salida de dicho comparador permanecerá a nivel bajo.

Cuando la tensión sea mayor, la salida del comparador pasará a nivel alto, con lo que  $Q$  adoptará un nivel alto y la salida del circuito (patilla 3) pasará a nivel bajo.

Por otra parte, el transistor se encuentra directamente polarizado y en condiciones de saturarse si el circuito asociado al colector lo polariza adecuadamente.

Por otro lado, la entrada (+) del comparador inferior está conectada a un potencial de  $1/3 V_{cc}$ .

Cuando la tensión de disparo (patilla 2) cae por debajo de dicho valor, la salida del comparador actúa sobre la entrada  $S$  del biestable y su  $Q$  pasa a nivel bajo, el transistor de descarga pasa por tanto al corte y la salida del circuito (patilla 3) se pone a nivel alto.



## Multivibrador astable con C.I 555

En este modo, la principal característica del circuito es una forma de onda rectangular a la salida, en la cual el ancho de la onda puede ser manejado, en el diseño, con los valores de ciertos elementos externos.

Para esto debemos aplicar las siguientes formulas:

$$T_A = 0.693 (R_1 + R_2) C_1$$

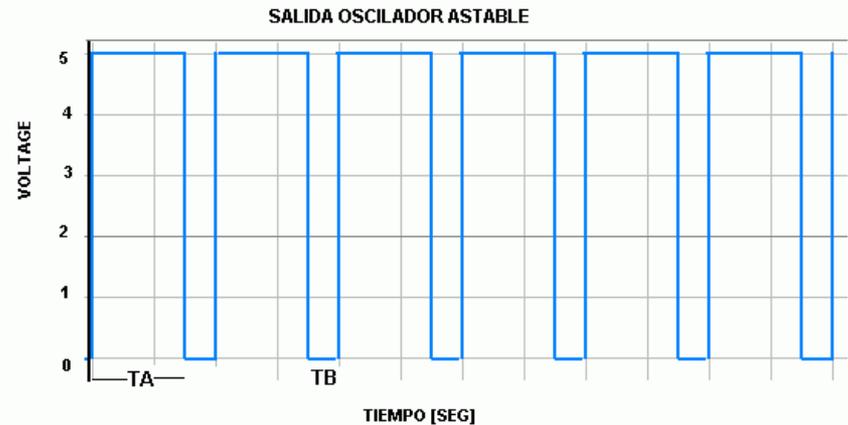
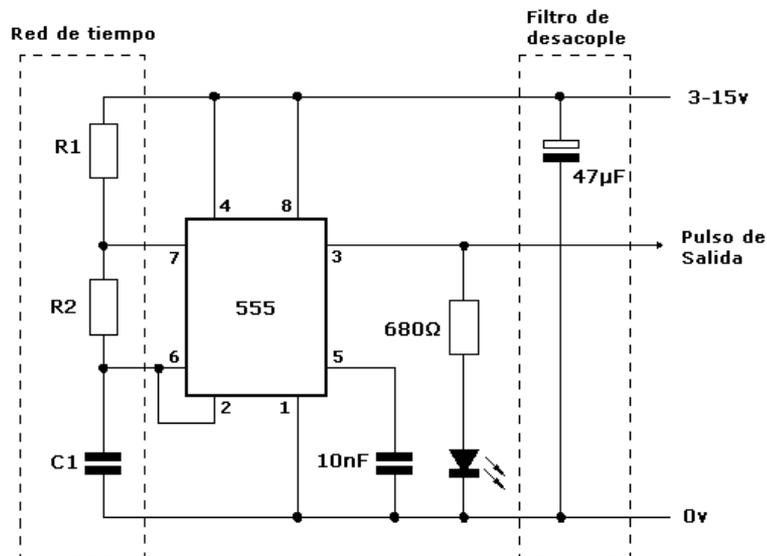
$$T_B = 0.693 (R_2 * C_1)$$

Donde  $T_A$  es el tiempo del nivel alto de la señal y  $T_B$  es el tiempo del nivel bajo de la señal. Este tiempo dependen de los valores de  $R_1$  y  $R_2$ .

Recordemos que el periodo es:  $T = 1/f$ .

La frecuencia con que la señal de salida oscila está dada por la fórmula:

$$f = 1/(0.693 \times C_1 \times (R_1 + 2 \times R_2))$$



## Multivibrador astable con temporizador 555 y $t_1 = t_2$

El **circuito astable** original que se diseña con el **temporizador 555** no permite obtener  $t_1 = t_2$ .

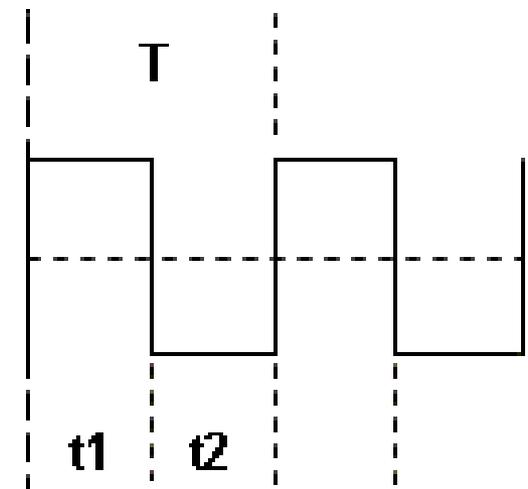
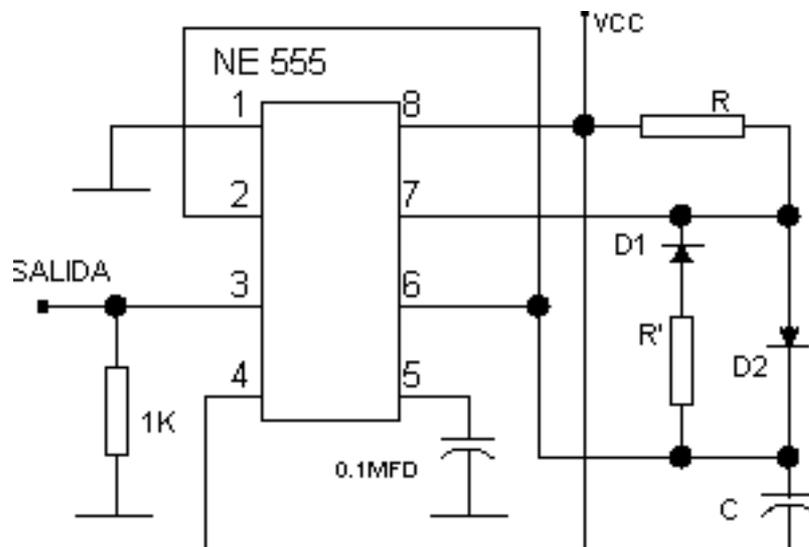
Este siguiente circuito, con la ayuda de unos elementos adicionales diodos (D1 y D2) y haciendo que las resistencias  $R = R'$  logra este cometido.

El circuito permite generar una onda cuadrada con  $t_1 = t_2$ , aplicando:

$$t = 0.693 RC$$

Los tiempos de carga y descarga del condensador son iguales

El periodo:  $T = t_1 + t_2$  y la frecuencia:  $f = 1/T$



## Multivibrador monoestable con C.I 555 (Temporizador)

En este caso el C.I 555 en su modo monoestable funcionará como un circuito de un tiro.

El transistor interno del 555 mantiene a C1 descargado inicialmente.

Cuando un pulso negativo de disparo se aplica a terminal 2, el flip-flop interno se setea, lo que quita el corto de C1 y esto causa una salida alta en la salida (patilla 3).

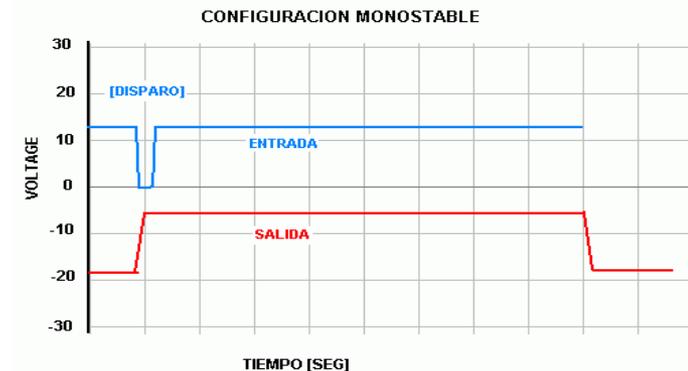
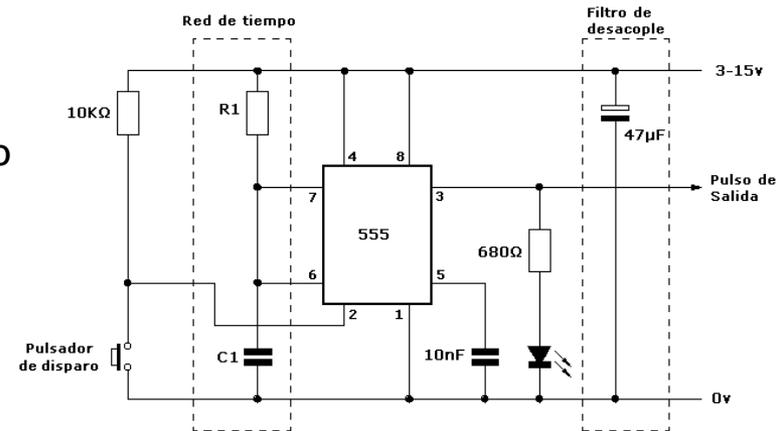
La salida a través del condensador aumenta exponencialmente con la constante de tiempo  $t=R1C1$ . Cuando el voltaje a través de C1 iguala los dos tercios de Vcc, el comparador interno del 555 resetea el flip-flop, que entonces descarga el condensador C1 rápidamente y lleva al terminal de salida a su estado bajo (low).

El circuito es activado con un impulso de entrada que va en dirección negativa cuando el nivel llega a un tercio de Vcc. Una vez disparado, el circuito permanece en ese estado hasta que pasa el tiempo de seteo, aun si se vuelve a disparar el circuito.

La duración del estado alto (high) es dada por la ecuación:

$$T=1.1(R1*C1)$$

El intervalo es independiente del voltaje de Vcc. Cuando el terminal reset no se usa, debe atarse alto para evitar disparos espontáneos o falsos.



## Convertidores de señal

En la electrónica podemos encontrar dos clases de convertidores:

- 1) Convertidor Analógico-Digital.
- 2) Convertidor Digital-Analógico.

1 - Una conversión analógica-digital consiste en la transcripción de señales analógicas en señales digitales, con el propósito de facilitar su procesamiento (encriptación, compresión, etc.) y hacer la señal resultante (la digital) más inmune al ruido y otras interferencias a las que son más sensibles las señales analógicas.

2 - La conversión digital-analógica es un proceso que permite la lectura de un código binario, por ejemplo el grabado en un CD, y con la misma frecuencia de muestreo (controlada por un reloj) con que se grabó el sonido en el cd y una cantidad de bits determinada se pueden leer los cds y reproducirse. Por eso el nombre: Convierte de Digital a Analógico.

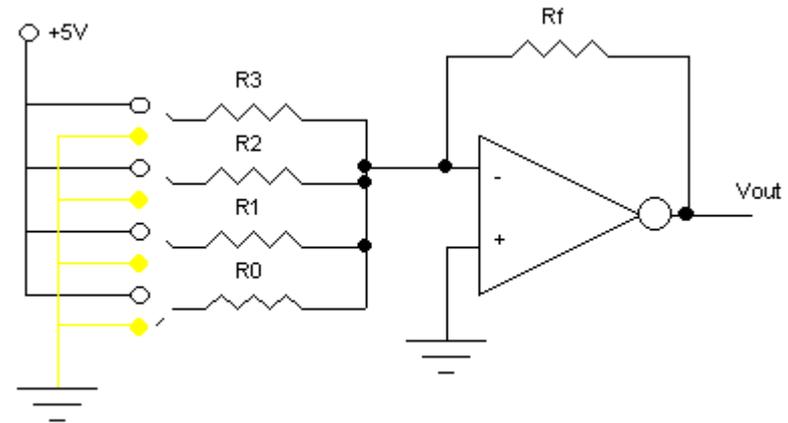
## Convertidor Digital/Analógico

El convertidor *Digital/Analógico (D/A)*, produce una salida igual a la suma ponderada de las entradas, donde el peso de cada entrada esta dado por la ganancia de cada canal.

Tensión de 2 valores  
 5VDC -> 1 Lógico  
 0VDC -> 0 Lógico  
**(Datos de 4 bits)**

$R_0 = R_0 / 2^0 = R_0 / 1 = R_0$   
 $R_1 = R_0 / 2^1 = R_0 / 2$   
 $R_2 = R_0 / 2^2 = R_0 / 4$   
 $R_3 = R_0 / 2^3 = R_0 / 8$

$R_f = R_3$  (Resistencia mas baja de las entradas digitales)



$$V_{out} = -\left(\frac{R_f}{R_0} + \frac{R_f}{R_1} + \frac{R_f}{R_2} + \frac{R_f}{R_3}\right) \cdot V_{in}$$

v3	v2	v1	v0	Vout (V)
0	0	0	0	0
0	0	0	1	0,625
0	0	1	0	1,25
0	1	0	0	2,5
1	1	1	1	9,375

