

# EL AMPLIFICADOR OPERACIONAL

Hoy: **Miércoles, Octubre 21, 2015** Incluir en [favoritos](#), para volver a visitarnos. Creado por: V. García.

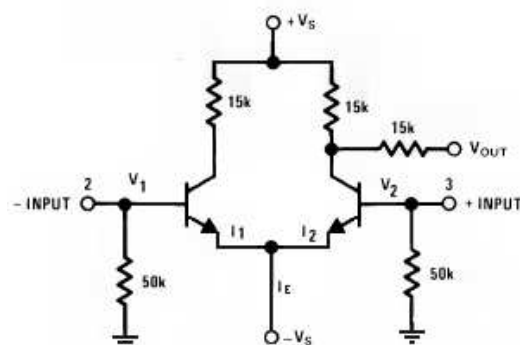
## INTRODUCCIÓN.

Los amplificadores operacionales son, dispositivos compactos activos y lineales de alta ganancia, diseñados para proporcionar la función de transferencia deseada. Un amplificador operacional (A.O.) está compuesto por un circuito electrónico que tiene dos entradas y una salida, como se describe mas adelante. La salida es la diferencia de las dos entradas multiplicada por un factor (G) (ganancia):  $V_{out} = G \cdot (V_+ - V_-)$ .

Estos dispositivos se caracterizan por ser construidos en sus componentes más genéricos, dispuestos de modo que en cada momento se puede acceder a los puntos digamos "vitales" en donde se conectan los componentes externos cuya función es la de permitir al usuario modificar la respuesta y transferencia del dispositivo.

## EL AMPLIFICADOR OPERACIONAL

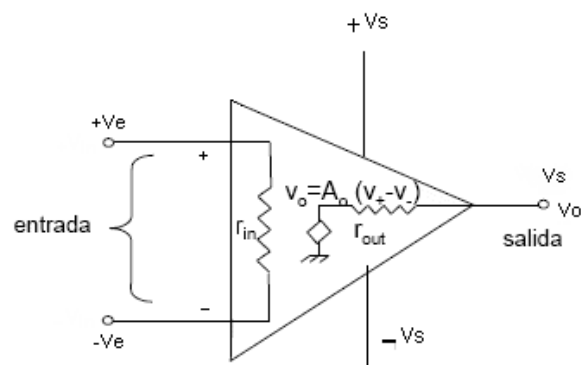
Un amplificador operacional diferencial de tensión (A.O. también op-amp), está compuesto por un circuito con dos transistores T1 y T2 gemelos (están apareados mediante técnicas de integración) y una fuente de corriente constante en el emisor común. Se supone que aplicando en ambas bases una tensión idéntica  $V_s$ , en modo común, las corrientes en las bases serán idénticas,  $I_{b1} = I_{b2}$  por lo tanto la corriente en los emisores es idéntica. Así,  $I_e = I_1 + I_2$ .



Si ahora se incrementa en la misma cantidad la tensión de entrada, el sistema permanecerá en equilibrio ya que la corriente le permanece inalterable por la fuente de corriente constante. En otras palabras, en modo común la ganancias es nula.

Un amplificador operacional (A.O.), es un amplificador de alta ganancia directamente acoplado, que en general se alimenta con fuentes positivas y negativas, lo cual permite que obtenga excursiones tanto por arriba como por debajo de masa o punto de referencia que se considere. Se caracteriza especialmente por que su respuesta en, frecuencia, cambio de fase y alta ganancia que se determina por la realimentación introducida externamente. Por su concepción, presenta una alta impedancia (Z) de entrada y muy baja de salida. Este es el símbolo:

### MODELO IDEAL DEL AMPLIFICADOR OPERACIONAL



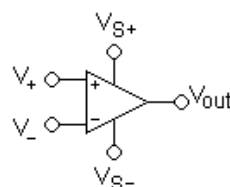
En la figura, se observan dos patillas de alimentación bipolar (+Vs y -Vs), una entrada no inversora (+Ve), una entrada inversora (-Ve) y una de salida (Vout), algunos como el LM386, disponen de una patilla de bypass. El amplificador sólo responde a la diferencia de tensión entre los dos terminales de entrada, no a su potencial común. Es decir, la misión del A.O. es amplificar la diferencia de tensión entre las dos señales de entrada, respecto de masa. Es decir, el mismo resultado obtendremos aplicando una entrada de 1mV en +Vin y 1,001mV en la entrada -Vin, que aplicando 6V en +Vin y 6.001V en -Vin ya que:

$$1 - 1,001 = 6 - 6,001 = 0,001$$

- 1 -  $A_V$  infinita  $\implies V_+ = V_- \implies$  Principio de **TIERRA VIRTUAL**.
- 2 -  $R_{in}$  ( $Z_i$ ) - Infinita (típico algunos MW)  $\implies I_+ = I_- = 0$ .
- 3 -  $R_{out}$  ( $Z_o$ ) nula (entre 100 y 200W)  $\implies$  fuente de tensión ideal.
- 4 - Amplificador de AC y DC.
- 5 - Ancho de banda infinito.

#### Ganancia en lazo abierto.

Cuando se aplica una señal a la entrada, la ganancia es el cociente entre la tensión de salida Vs y la de entrada Ve que tiene el amplificador operacional cuando no existe ningún lazo de realimentación entre la salida y alguna de las dos entradas. Ver el diagrama.



La ganancia del amplificador en lazo abierto está dada por la siguiente fórmula:

$$A_V = V_s / V_e$$

Donde:

$A_V$  = ganancia de tensión

$V_s$  = tensión de salida

$V_e$  = tensión de entrada

En un amplificador operacional ideal, esta ganancia es infinita. Sin embargo, en el operacional real, su ganancia está entre 20,000 y 200,000 (caso del amplificador operacional 741C). Este tipo de configuración se utiliza en comparadores, donde lo que se desea es, saber cual de las dos entradas tiene mayor tensión, de ahí su nombre, amplificador diferencial. La señal de salida Vs del amplificador diferencial ideal debería ser:

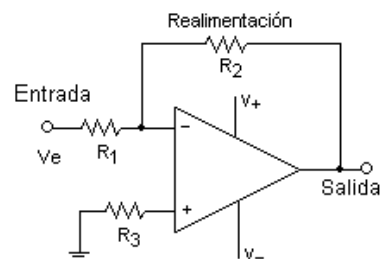
$$V_s = A_v (V_1 - V_2).$$

En la realidad, no es así ya que la salida depende de la tensión diferencial ( $V_d$ ) y del nivel medio llamado señal en modo común ( $V_c$ ), o sea:

$$V_d = V_1 - V_2; \text{ y } V_c = 1/2 (V_1 + V_2).$$

### Ganancia en lazo cerrado.

Como decimos los amplificadores operacionales prácticos tienen ganancia de tensión muy alta (típicamente  $10^5$ ), sin embargo esta ganancia varía con la frecuencia. La forma de compensar esto es, controlar la ganancia de tensión que tiene el amplificador operacional, utilizando elementos externos para realimentar una parte de señal de la salida a la entrada, que hará que el circuito sea mucho más estable.



Con la realimentación, la ganancia de lazo cerrado, depende de los elementos empleados en la realimentación y no de la ganancia básica de tensión del amplificador operacional, por lo que, para modificar la ganancia modificaremos los valores de  $R_1$  y  $R_2$ .

Como veremos a continuación, los circuitos con amplificadores operacionales, resistencias y condensadores, los podemos configurar para obtener diversas operaciones analógicas como sumas, restas, comparar, integrar, filtrar y por supuesto amplificar.

La ganancia se obtiene por la siguiente fórmula:  $A_V = - V_o / V_{in}$ . El signo negativo indica que la señal en la salida será la opuesta a la entrada (se confirma que una señal positiva aplicada a la entrada produce una tensión negativa a la salida y viceversa).

## CONFIGURACIONES BÁSICAS DEL A.O.

Presentaremos, muy por encima, los modos básicos de configuración de un A.O. como: amplificador inversor, amplificador no inversor, amplificador diferencial, derivador, integrador y sumador. El criterio para analizar los circuitos es:

- La impedancia de cada entrada ( $Z_i$ ), se considera tan alta que, las corrientes en ambas se consideran próximas a cero.
- La tensión entre las entradas es muy similar, puede considerarse que están en "cortocircuito virtual", aunque no fluye corriente entre ellas.

### Amplificador Inversor.

En este circuito, la entrada  $V(+)$  está conectada a masa y la señal se aplica a la entrada  $V(-)$  a través de  $R_1$ , con realimentación desde la salida a través de  $R_2$ . La entrada  $V(-)$  es un punto de tierra virtual, ya que está a un potencial cero.

$$v_- = v_+ = 0$$

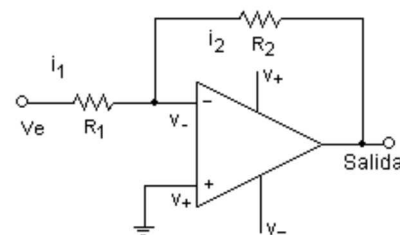
$$i_1 = i_2; \quad i_1 + i_2 = 0$$

$$\frac{v_e - v_-}{R_1} + \frac{v_o - v_-}{R_2} = 0$$

Reduciendo;

$$\frac{v_e}{R_1} + \frac{v_o}{R_2} = 0$$

$$v_o = -\frac{R_2}{R_1} v_e$$



El circuito comúnmente más utilizado es el circuito de ganancia constante. El amplificador inversor amplifica e invierte una señal  $180^\circ$ , es decir, el valor de la tensión de salida está en oposición de fase con la de entrada y su valor se obtiene al multiplicar la tensión de la entrada por una ganancia fija constante,

establecida por la relación entre  $R_2$  y  $R_1$ , resultando invertida esta señal (desfase).

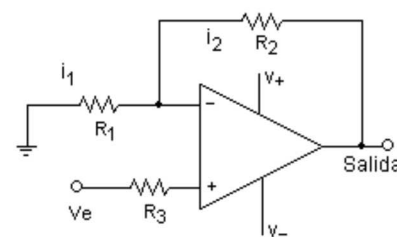
### Amplificador no Inversor.

Este es el caso en que la tensión de entrada  $V_e$ , está en fase con la de salida  $V_s$ , esta tensión de salida, genera una corriente a través de  $R_2$  hacia el terminal inversor, a su vez a través de  $R_1$ , se genera una corriente hacia el mismo terminal pero de signo contrario, por lo que ambas corrientes se anulan, reflejando en la salida la tensión de entrada amplificada.

Según se ha mencionado antes, el valor de  $+V_e$  se refleja en la entrada inversora  $-V_e$  del amplificador operacional y teniendo en cuenta que se considera un "cortocircuito virtual", podemos establecer que  $i_e = V_e/R_1$ .

Y como la corriente en la entrada inversora  $i^- = 0$ ;  $i_1 = i_2$ ; por lo tanto  $V_o = (R_1 + R_2) i_1$ , sustituyendo;  $V_o/V_e = (1 + R_2/R_1)$ ;  $V_o = \frac{(R_1 + R_2)}{R_1} V_e$  y finalmente

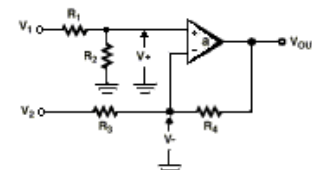
la ganancia en tensión:  $A_v = \frac{(R_1 + R_2)}{R_1}$



### Amplificador Diferencial.

El caso más común de configuración es permitir la entrada de señal, por ambas puertas, tanto por la inversora como por la no - inversora. La señal de salida será proporcional a la diferencia entre las entradas y estará en fase con las señales aplicadas. Aunque está basado en las dos disposiciones vistas anteriormente. El amplificador diferencial tiene características únicas.

En la figura, se muestra un dispositivo activo lineal con dos entradas  $V_1$  y  $V_2$  y una salida  $V_o$ , respecto a la tensión media de alimentación o masa. En el amplificador diferencial ideal, la tensión  $V_o$  viene expresada por :



$$V_o = A_d (V_1 - V_2)$$

Donde  $A_d$  es la ganancia. La señal de salida no se ve afectada por cualquier señal común en ambas entradas. En un amplificador real, debido a que la salida no solo depende de la diferencial  $V_d$  de las entradas sino además del nivel medio  $V_c$ , así:

$$V_o = V_1 - V_2 \quad V_c = 1/2 (V_1 + V_2).$$

Para comprender mejor esta disposición, primero se estudian las dos señales de entrada por separado, y después combinadas. Como siempre la tensión diferencial  $V_d = 0$  y la corriente de entrada en los terminales es cero.

Recordar que  $V_d = V(+)-V(-) \implies V(-) = V(+)$

La tensión a la salida debida a  $V_1$  la llamaremos  $V_{01}$   $V_{(+)} = \frac{V_1}{R_1 + R_2} \cdot R_2$

La tensión de salida debida a  $V_1$  (suponiendo  $V_2 = 0$ ) valdrá:  $V_{01} = \frac{V_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \cdot \frac{R_3 + R_4}{R_3}$

Suponiendo que  $V_1 = 0$ , la salida  $V_2$ , utilizando la ecuación de la ganancia para el circuito inversor será:

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

Que, aplicando el teorema de la superposición de la tensión de salida  $V_o = V_{01} + V_{02}$  y haciendo  $R_3 = R_1$  y  $R_4 = R_2$  tendremos que:

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

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

y la ganancia de la etapa para señales en modo diferencial es:  $\frac{V_o}{V_1 - V_2} = \frac{R_2}{R_1}$

Esta configuración es única porque rechaza una señal común a ambas entradas. Esto se conoce como la propiedad de, tensión de entrada diferencial nula, es decir, en el caso de que las señales  $V_1$  y  $V_2$  sean

idénticas, el análisis es sencillo,  $V_1$  se dividirá entre  $R_1$  y  $R_2$ , apareciendo una menor tensión  $V(+)$  en  $R_2$ .

Debido a la ganancia infinita del amplificador y a la tensión de entrada diferencial cero, una tensión igual  $V(-)$  debe aparecer en el nudo suma (-). Puesto que la red de resistencias  $R_3$  y  $R_4$  es igual a la red  $R_1$  y  $R_2$ , y se aplica la misma tensión a ambos terminales de entrada, se concluye que  $V_o$  debe estar a potencial nulo para que  $V(-)$  se mantenga igual a  $V(+)$ ;  $V_o$  estará al mismo potencial que  $R_2$ , el cual, de hecho está a masa. Esta muy útil propiedad del amplificador diferencial, puede utilizarse para discriminar componentes de ruido en modo común no deseables, mientras que se amplifican las señales que aparecen de forma diferencial. Si se cumple la relación.

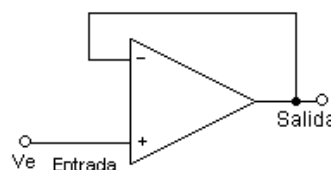
$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3}$$

Puesto que, por definición, el amplificador no tiene ganancia cuando se aplican señales iguales en ambas entradas, la ganancia para señales en modo común es cero.

Las impedancias de las dos entradas de etapa son distintas. Para la entrada no inversora (+), la impedancia de entrada es  $R_1 + R_2$ . La impedancia para la entrada inversora (-) es  $R_3$ . La impedancia de entrada diferencial (para una fuente flotante) es la impedancia entre las entradas, es decir,  $R_1 + R_3$ .

### Seguidor de tensión.

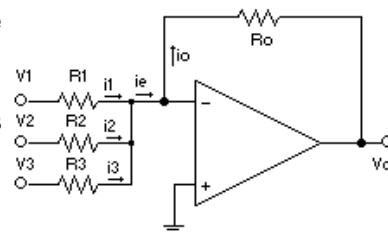
En la figura de la derecha, se puede apreciar que la señal de salida, se aplica a la entrada no inversora en realimentación total, lo que según el criterio anterior, la señal  $V_e$  de entrada es similar al de salida, con lo cual no existe amplificación, lo que aparentemente no tiene sentido, sin embargo tiene su aplicación en los convertidores de impedancia ya que toma la señal del circuito anterior, presentando una alta impedancia y entrega una impedancia prácticamente nula al circuito de carga.



En general, este circuito presenta estos parámetros:  $Z_e > 400\text{MW}$ ;  $Z_s < 1\text{W}$ ; Ancho de banda  $\pm 1\text{MHz}$ .

### El Sumador Inversor.

El sumador inversor, es una aplicación práctica de la característica de tierra virtual en el nudo suma, en la entrada  $V(-)$  del amplificador inversor. Este es de los circuitos que probablemente sea el más utilizado, el amplificador sumador. En el sumador inversor, la suma algebraica de las tensiones de cada entrada multiplicado por el factor de ganancia constante, se obtiene en la salida.



En este circuito, como en el amplificador inversor, la tensión  $V(+)$  está conectada a masa, por lo que la tensión  $V(-)$  estará a una masa virtual, y como la impedancia de entrada es infinita toda la corriente circulará a través de  $R_o$  y la llamaremos  $I_o$ . Lo que ocurre en este caso es que la corriente  $I_e$  es la suma algebraica de las corrientes proporcionadas por  $V_1$ ,  $V_2$  y  $V_3$ , es decir:

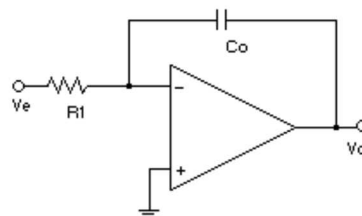
$$i_e = \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3}; \quad i_o = \frac{V_o}{R_o}$$

En conclusión: 
$$i_o = -\left( V_1 \times \frac{V_o}{R_1} + V_2 \times \frac{V_o}{R_2} + V_3 \times \frac{V_o}{R_3} \right)$$

La ganancia global del circuito la establece la  $R_o$ , que, en este sentido, se comporta como en el amplificador inversor básico. La parte más interesante de esta configuración es el hecho de que la mezcla de señales lineales de entrada, no produce interacción entre las entradas, puesto que todas las fuentes de señal alimentan el punto de tierra virtual. El circuito puede admitir cualquier número de entradas.

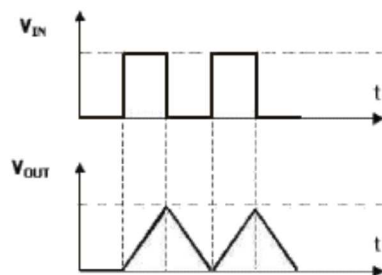
### Amplificador Integrador.

Una modificación del amplificador inversor, es el integrador, mostrado en la figura, se aprovecha de esta característica. Se aplica una tensión de entrada  $V_e$ , a  $R_1$ , lo que da lugar a una corriente  $i_e$ . Como ocurría con el amplificador inversor,  $V(-) = 0$ , puesto que  $V(+)$  = 0 que, por tener impedancia infinita toda la corriente de entrada  $i_e$  pasa hacia el condensador  $C_o$ , a esta corriente la llamamos  $i_o$ .



Se ha visto que ambas configuraciones básicas del AO actúan para mantener constantemente la corriente de realimentación,  $i_o$  igual a  $i_e$ .

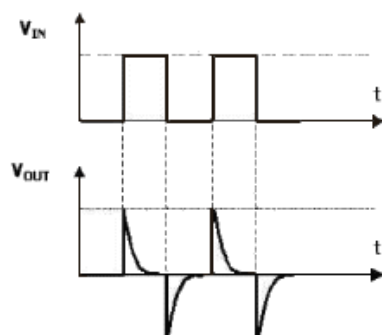
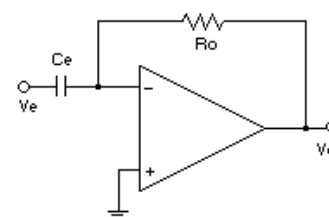
El elemento realimentador en el integrador es el condensador  $C_o$ . Por consiguiente, la corriente constante  $i_o$ , en  $C_o$  da lugar a una rampa lineal de tensión. La tensión de salida es, por tanto, la integral de la corriente de entrada, que es forzada a cargar  $C_o$  por el lazo de realimentación. Este es su diagrama.



Entre las múltiples aplicaciones que tiene el amplificador operacional, es de gran importancia la del computador analógico, lo cual, consiste en la implementación y solución de sistemas de ecuaciones lineales además de la solución de ecuaciones diferenciales de cualquier orden.

### Amplificador Diferenciador.

Otra modificación del amplificador inversor, que igualmente aprovecha la corriente de un condensador, es el diferenciador o derivador mostrado en la figura. En el que, la tensión de salida es proporcional a la derivada de la señal de entrada  $V_i$  y a la constante de tiempo ( $t = RC$ ), la cual generalmente se hace igual a la unidad. En este circuito, la posición de  $R$  y  $C$  están al revés que en el integrador, estando el elemento capacitativo en la red de entrada. Este es el diagrama correspondiente.

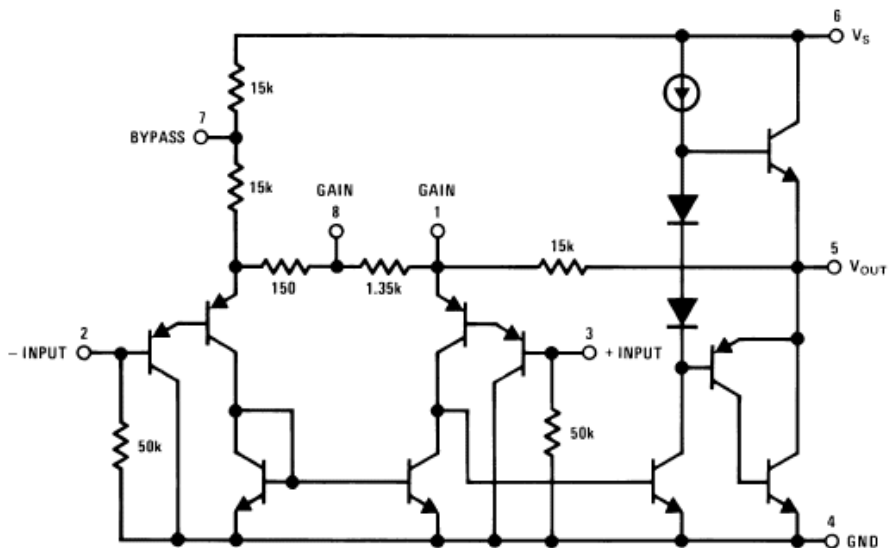


A efectos prácticos el diferenciador proporciona variaciones en la tensión de salida ocasionadas por el ruido para el cual es muy sensible, es la razón por la cual es poco utilizado.

## EL LM386

El LM386 es un amplificador de potencia, diseñado para el empleo en usos de consumo de voltaje bajos. La ganancia interna es puesta a 20 para mantener la parte externa en cuenta baja, pero la adición de una resistencia externa y un condensador entre los pines 1 y 8 aumentarán la ganancia a cualquier valor entre 20 y 200.

Las entradas son referidas a tierra, mientras la salida influye automáticamente a la mitad de tensión del suministro. El drenador de potencia es de sólo 24 miliwatios aplicando un suministro de 6 voltios, esto hace ideal el LM386 para la operación en baterías.



El amplificador operacional, está constituido por un circuito de entrada diferencial, en el diagrama anterior se aprecian los dos transistores que forman el amplificador diferencial y también las entradas (pines 1-8) para el control de ganancia. El encapsulado DIL es de 8 pines y se muestra en la figura.

Para hacer al LM386 que proporcione un amplificador más versátil, dispone de dos pines (1 y 8) para el control de ganancia. Con los pines 1 y 8 abiertos, una resistencia de  $1.35 \text{ kW}$  pone la ganancia en 20 (26 dB). Si se pone un condensador del pin 1 al 8, como bypas de la resistencia interna de  $1.35 \text{ kW}$ , la ganancia se acercará a 200 (46 dB). Si colocamos una resistencia en serie con el condensador, la ganancia puede ser puesta a cualquier valor entre 20 y 200. El control de ganancia también se puede hacer capacitivamente acoplado una resistencia (o FET) del pin 1 a masa.

Con componentes adicionales externos, colocados en paralelo con las resistencias de regeneración internas, se puede adaptar la ganancia y la respuesta en frecuencia para usos concretos. Por ejemplo, podemos compensar la pobre respuesta de bajos del altavoz por frecuencia, mediante la realimentación. Esto se hace con una serie RC del pin 1 a 5 (resistencia en paralelo a la interna de  $15 \text{ k}$ ).

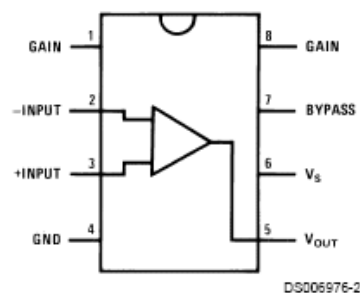
Para un estimulador de bajos (bass boost) de 6 dB eficaces:  $R \pm 15 \text{ kW}$ , el valor más bajo para una buena operación estable es  $R = 10 \text{ kW}$  si el pin 8 está al aire. Si los pines 1 y 8 se evitan, entonces la  $R$  usada puede ser tan baja como  $2 \text{ k}$ . Esta restricción es porque el amplificador sólo es compensado para ganancias en lazo cerrado mayor de 9.

El esquema muestra que ambas entradas (2-3), están puestas a masa con una resistencia de  $50 \text{ kW}$ . La corriente de base de los transistores de entrada es aproximadamente de  $250 \text{ nA}$ , entonces las entradas están en aproximadamente  $12.5 \text{ mV}$  cuando están abiertas. Si la resistencia de la fuente dc que maneja el LM386 es más alta de  $250 \text{ kW}$  esto contribuirá a una muy pequeña compensación adicional (aproximadamente  $2.5 \text{ mV}$  en la entrada,  $50 \text{ mV}$  en la salida). Si la resistencia de la fuente dc es menos de  $10 \text{ k}$ , podemos eliminar el exceso compensado, poniendo una resistencia en la entrada no usada a masa, mantendrá la compensación baja (aproximadamente  $2.5 \text{ mV}$  en la entrada y  $50 \text{ mV}$  en la salida).

Para resistencias de fuente dc menor de  $10 \text{ k}$ , podemos eliminar el exceso compensado, poniendo una resistencia de la entrada no usada a masa, igual al valor de la resistencia de la fuente dc. Desde luego todos los problemas de compensación son eliminados si es acoplada la entrada capacitivamente. Usando el LM386 con ganancias más altas (evitando la resistencia de  $1.35 \text{ k}$  interna entre pines 1 y 8) es necesario evitar la entrada no usada, previniendo la degradación de ganancia e inestabilidades posibles. Esto se hace con un condensador de  $0,1 \text{ uF}$  o un corto a masa según la resistencia de la fuente dc sobre la entrada manejada.

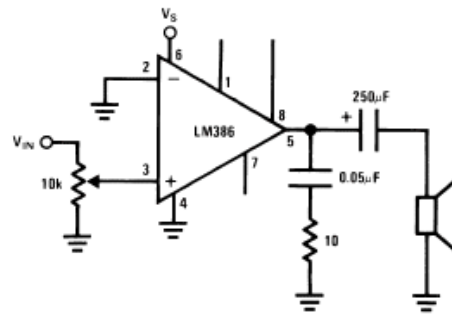
Esta bien, veamos algunos circuitos típicos:

Small Outline,  
Molded Mini Small Outline,  
and Dual-In-Line Packages



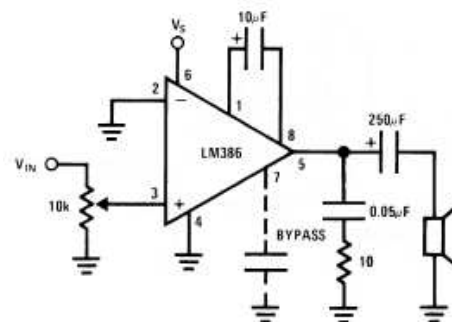
DS006976-2

**Amplifier with Gain = 20  
Minimum Parts**



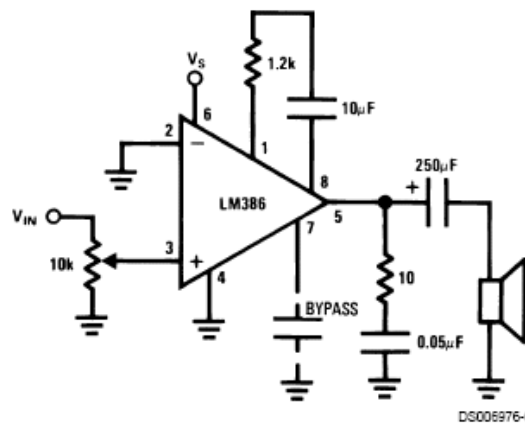
En el circuito amplificador de la figura anterior, la ganancia es de 20, que es el valor mínimo que se consigue al dejar libres los terminales 1 y 8. Sin embargo si lo que queremos es una ganancia  $A_v$  de 200, debemos conectar un condensador entre los mencionados terminales, como se aprecia en la siguiente figura.

**Amplifier with Gain = 200**



En caso de necesitar una  $A_v$  intermedia, por ejemplo 50, debemos conectar una resistencia en serie con el condensador, como se aprecia en la figura que sigue.

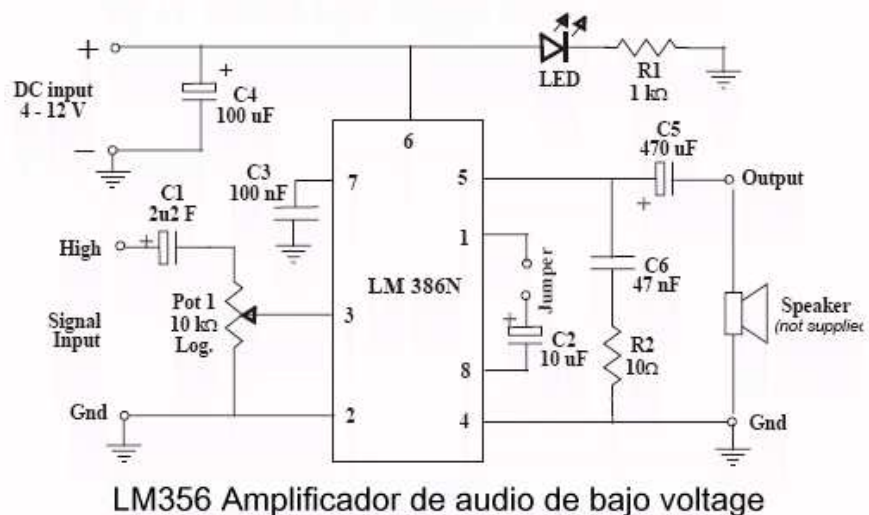
**Amplifier with Gain = 50**



DS005976-6

En estas páginas se ha usado este dispositivo como amplificador de salida de baja frecuencia en la aplicación etapa final del estetoscopio electrónico, en esa ocasión se probó con una ganancia de 200 y luego se bajo a 20, parece que en ese momento era suficiente. Existen muchas aplicaciones en distintos medios electrónicos para este dispositivo.





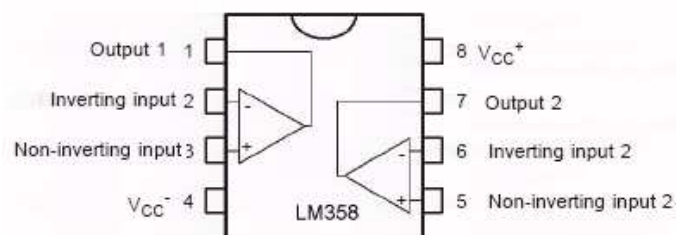
De todos modos si está interesado en conocer más a fondo los circuitos amplificadores operacionales, le recomiendo que adquiera el libro, **Circuitos Integrados Lineales**, de la editorial Paraninfo.

## El amplificador LM358

Un hecho común para el buen funcionamiento de los amplificadores operacionales es la necesaria alimentación simétrica o sea, una alimentación +Vs y -Vs, lo que permite una ganancia balanceada respecto de la señal de masa.

Sin embargo, en algunas aplicaciones sólo disponemos de una alimentación simple, incluso ésta de sólo 5 Voltios. En el caso de los circuitos lógicos como los PICs. En estos casos, una solución es, usar un amplificador operacional que nos permita una respuesta adecuada a las necesidades. Sería interesante conocer las características del LM358 ya que se trata de un OpAmp con alimentación única de 5 Voltios.

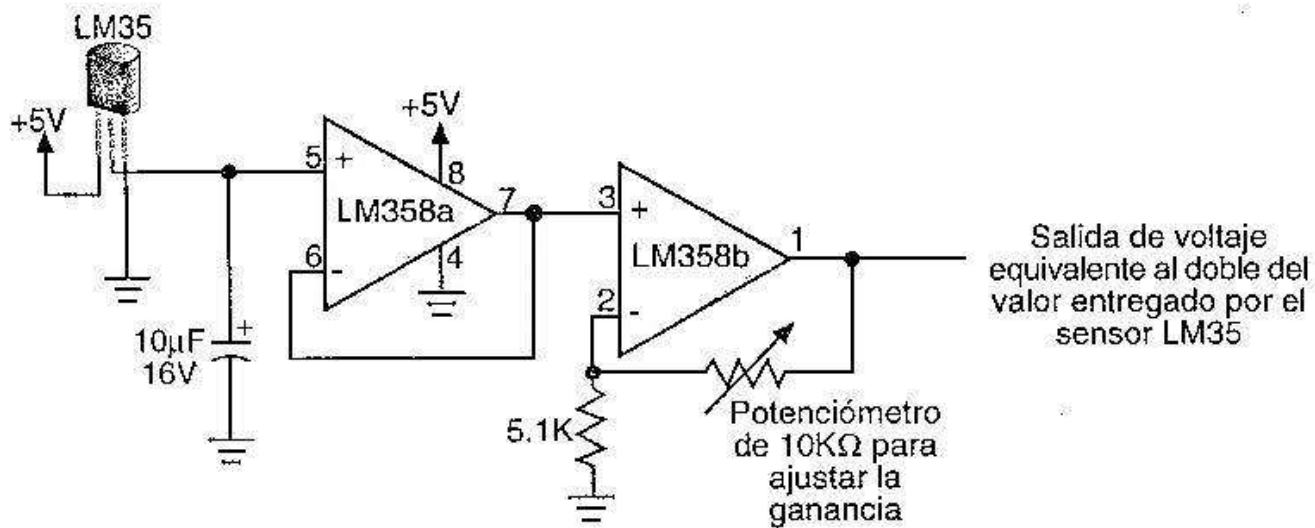
La cápsula contiene dos circuitos identicos independientes de alta ganancia, con frecuencia internamente compensada, fueron diseñados expresamente para funcionar con una sola fuente de energía con una amplia gama de voltajes.



Las áreas de aplicación incluyen amplificadores para transductores, sistemas de ganancia en continua y todos los circuitos de op-amp convencionales que así pueden ser más fácilmente puestos en práctica en sistemas de fuente de energía única. Por ejemplo, estos circuitos pueden ser alimentados directamente de +5V estándar que se usa en sistemas lógicos y proporcionará fácilmente la electrónica de interfaz requerida sin una fuente de energía adicional.

En el modo lineal incluye la gama de voltaje de entrada y salida en modo común que debe balancearse a masa, aun funcionando con una fuente simple de energía.

La resistencia de entrada generalmente tiene un valor con mucha desviación, por lo que recomiendan no usarlos como constante del circuito. Se recomienda aplicar una resistencia en paralelo de valor aproximadamente 3k.



**Figura 4.2.** Circuito para acople del sensor LM35

Referencias: Circuitos integrados lineales. Paraninfo.  
Hojas de datos de fabricantes National, Philips y SThomson.

[<- Atrás](#)

Creado el: 03-11-2006  
Actualizado el: 15-03-2007