

AMPLIFICADORES OPERACIONALES (A.O.)

<i>1.- Un poco de historia.....</i>	<i>Pag: 2</i>
<i>2.- Ideas básicas.....</i>	<i>Pag: 2</i>
<i>3.- Análisis de circuitos con realimentación negativa.....</i>	<i>Pag: 4</i>
<i>3.1.- Introducción.....</i>	<i>Pag: 4</i>
<i>3.2.- Amplificador inversor.....</i>	<i>Pag: 4</i>
<i>3.3.- Amplificador no inversor.....</i>	<i>Pag: 9</i>
<i>3.4.- Pequeño amplificador de audio.....</i>	<i>Pag: 11</i>
<i>3.5.- Sumador inversor.....</i>	<i>Pag: 12</i>
<i>Aplicaciones.....</i>	<i>Pag: 18</i>

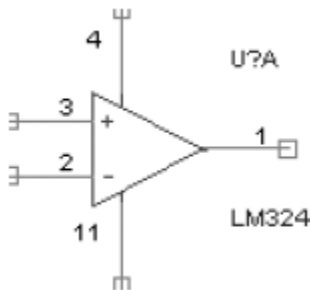
1.- Un poco de historia:

En 1965, la compañía Fairchild Semiconductor introdujo en el mercado el $\mu A709$, el primer amplificador operacional monolítico ampliamente usado.

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

2.- Ideas básicas

Son llamados “Amplificadores Operacionales” porque podemos encontrar circuitos montados a base de estos amplificadores que realizan operaciones matemáticas, como por ejemplo sumadores, diferenciadores, integradores, comparadores... Etc. Son elementos muy usados en la electrónica analógica, como podremos comprobar a lo largo de la exposición de este tema, tienen un montón de aplicaciones.



La figura adjunta muestra el símbolo electrónico típico de un amplificador operacional. Este concretamente es una cuarta parte del LM324 ya que vienen 4 amplificadores operacionales en un mismo circuito integrado. En este ejemplo, los pines 4 y 11 son de alimentación. Un amplificador operacional se puede alimentar con tensión sencilla o con tensión simétrica. La tensión sencilla consiste en alimentar con dos cables, uno el positivo y el otro masa

(por ejemplo a 12 voltios). La tensión simétrica consiste en alimentar el circuito con tres cables, uno el positivo, otro el de masa y otro el negativo, con la misma tensión que el positivo pero negativa (por ejemplo ± 12)

La diferencia entre usar un tipo o el otro de alimentación está en lo que queramos obtener en la salida: si en la salida queremos obtener tensiones positivas y negativas, con respecto a masa, tendremos que usar la alimentación simétrica, si solo queremos obtener tensiones positivas podemos usar alimentación simple.

También tendréis que tener en cuenta que ni las entradas ni las salidas del operacional podrán sobrepasar los límites marcados por la alimentación, es decir, si alimentas a 12 V no esperéis obtener 15 voltios a la salida. Así mismo en ningún momento las señales de entrada pueden superar a las alimentaciones, ya que esto supondría la destrucción del integrado.

Los pines “2 y 3” son las entradas de señal , y el “1” es la salida. A la hora de analizar circuitos con Amplificadores Operacionales se dice que **la corriente por las entradas inversora y no inversora del operacional es cero**, nos quedamos con esta idea porque es muy importante, a la hora de obtener las ecuaciones de transferencia , es decir , la ecuación que relaciona la entrada o entradas con la salida.

Observareis en el símbolo que una de las entradas de señal tiene el signo “+” y en la otra el signo “-“. A la que tiene el signo “+” se le llama **entrada no inversora**, y a la que tiene el signo “-“ **entrada inversora**. La función que realiza el circuito completo, donde el núcleo principal es el Amplificador Operacional , depende de los componentes que conforman la realimentación. De momento, lo único que podemos decir, es que ,el amplificador operacional "lee" la tensión en la entrada **no inversora**, "le resta" la tensión de la entrada **inversora**, el resultado lo multiplica por un número muy alto , $>10^5$ y eso lo saca por la salida. Esto quizás no nos ayude mucho a entender los circuitos con amplificadores operacionales pero poco a poco lo iremos entendiendo.

2.1.-El Amplificador Operacional ideal

Lo primero que vamos a realizar es una exposición de las características ideales que le pedimos a un Amplificador Operacional:

- .-Ganancia en bucle abierto **infinita**
- .-Impedancia de entrada, que es la impedancia existente entre las dos señales de entrada , **infinita**
- .-Impedancia de salida , que es la resistencia interna del generador de salida equivalente, **cero**.
- .-Ancho de banda , que es el conjunto de frecuencias que pueden ser tratadas por el amplificador :**infinito**.

2.2.-El Amplificador Operacional real.

La realidad es que los valores que habitualmente adquieren los A.O. son , por ejemplo para el 741 :

- .-Ganancia en bucle abierto , **100.000**
- .-Impedancia de entrada, que es la impedancia existente entre las dos señales de entrada , **1 M Ω**
- .-Impedancia de salida , que es la resistencia interna del generador de salida equivalente, **10 a 100 Ω**
- .-Ancho de banda , que es el conjunto de frecuencias que pueden ser tratadas por el amplificador : **1 Mhz**

2.3.- Definiciones básicas sobre operacionales.

Ni que decir tiene que los A.O. tienen una serie de parámetros, y que de la combinación de valores de dichos parámetros surgen diversos modelos, en actualidad existen más de 1000 modelos fabricados por los diversos fabricantes.

Siguiendo con esta idea vamos a definir diversos parámetros que justifican la diversidad anteriormente mencionada.

.Tensión offset de entrada : Valor que tenemos que introducir a la entrada como tensión diferencial para que la salida nos de cero.

.Tensión offset de salida : Valor que adquiere la salida cuando la tensión diferencial de entrada es igual a cero.

.Desviación de la tensión offset de entrada: Es la variación que se produce en dicha tensión cuando varía la temperatura. Se mide en V/°C.

.Corriente offset de entrada: Es la diferencia entre las corrientes de entrada al amplificador cuando éste está equilibrado, es decir, tensión de salida cero.

.Impedancia de entrada del A.O. : Es la relación entre la entrada diferencial y la corriente que circula por las entradas de señal.

.Ganancia de tensión en bucle abierto o diferencial: Es el valor de la amplificación que experimenta la diferencia entre la “V+ “ y la “V-“ de las entradas de señal, que en general llamaremos a esa diferencia “Vi”, es decir $V_s = A_v * (V^+ - V^-)$.

.Corriente de salida de cortocircuito : Es el valor máximo de corriente que puede suministrar el dispositivo, aproximadamente 25 mA para el 741.

.Relación de rechazo en modo común: Es el cociente entre la ganancia diferencial y la ganancia en modo común, expresada en dB

$$CMRR = 20 \log \frac{A_v}{A_{mc}}$$

.Ancho de banda para ganancia unidad : La información facilitada por los fabricantes suele indicar el valor de la frecuencia más elevada que puede ser amplificada sin distorsión, cuando la ganancia del circuito es la unidad. El ancho de banda posible va disminuyendo en la medida que aumente la ganancia del circuito.

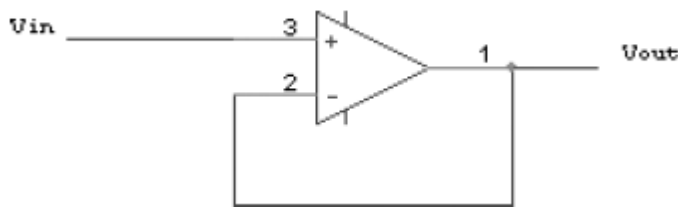
.Factor de mérito : Es el producto del ancho de banda por la ganancia del circuito. este valor está limitado a **1 Mhz** en el modelo 741

3.- Análisis de circuitos con realimentación negativa:

3.1.- Introducción

Se dice que un circuito con operacionales tiene realimentación negativa cuando todo o parte de la salida se reconduce a la **entrada inversora**. Cuando nos encontramos con un circuito con realimentación negativa tenemos que entender que el operacional, por su forma de funcionar, variará la salida de tal forma, que la tensión de la entrada **inversora** será prácticamente igual a la de la entrada **no inversora**, o lo que es lo mismo, "Vi" tiende a cero. Esta es otra idea importante que tenemos que tener en cuenta.

El ejemplo de circuito más sencillo con este tipo de realimentación es el siguiente:



Como vemos en la figura, la tensión de salida se introduce directamente por la entrada inversora, esto quiere decir que nos encontramos ante un circuito con realimentación negativa, por lo tanto podemos decir que la tensión en la entrada no inversora es igual a la de la entrada inversora. Por lo tanto hallamos directamente la tensión de salida, que será igual a la tensión de entrada ($V_{in}=V_{out}$). A este circuito se le llama "seguidor de tensión" o adaptador de impedancia.

Hagamos un breve resumen ecuacional:

Variables, I_i , V_i , $V_{in} = V_e$, $V_{out} = V_s$ como vemos tenemos cuatro incógnitas, como queremos tener la ecuación de transferencia es decir: $V_s = f(V_e)$, tenemos que plantear tres ecuaciones, que son:

$$I_i = 0$$

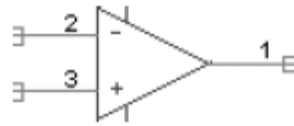
$$V_i = 0$$

y por fin la malla de salida: $V_s - V_i - V_e = 0 \Rightarrow V_s = V_e$ tal como habíamos comentado anteriormente.

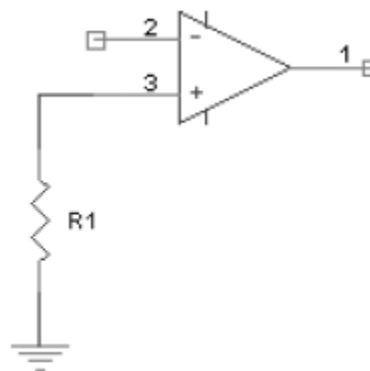
3.2.- Amplificador inversor

Ahora vamos a ver como sería el desglose de la práctica nº15 , si lo hicieramos a partir de un LM324, montado paso a paso

. Partimos de nuestro amplificador operacional:

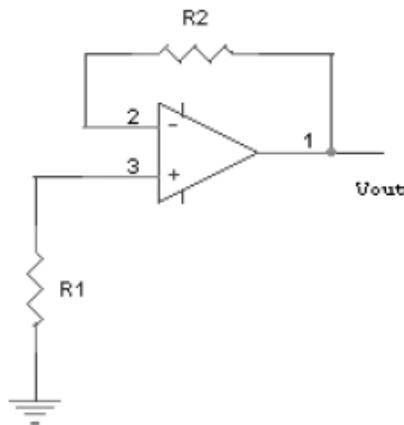


Ahora le vamos a añadir una resistencia R1 desde la entrada “+” a masa:



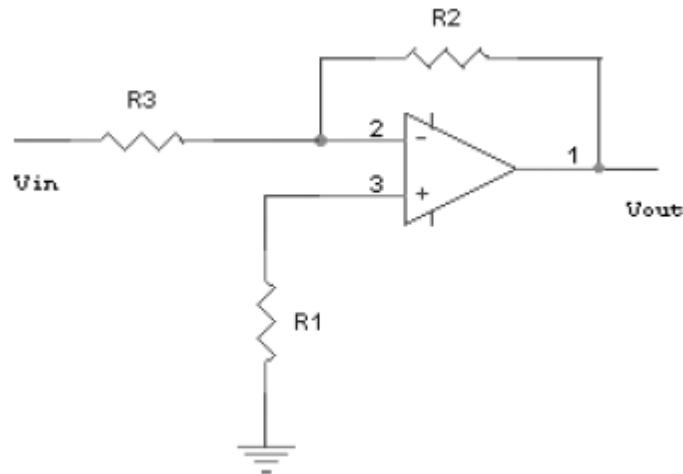
Tenemos que recordar que la corriente que entra por cualquiera de las dos entradas del operacional es aproximadamente cero, por lo tanto no circulará prácticamente corriente por R1 y la tensión en la entrada “+” será 0 ($V=I_i \cdot R_1=0 \cdot R_1=0$). Es lo mismo que si conectáramos la entrada “+” a masa directamente, pero se pone una resistencia para poder compensar la tensión de offset. Este valor se obtiene del valor equivalente del paralelo de R2 y R3.

A continuación le ponemos la realimentación negativa mediante una resistencia R2:

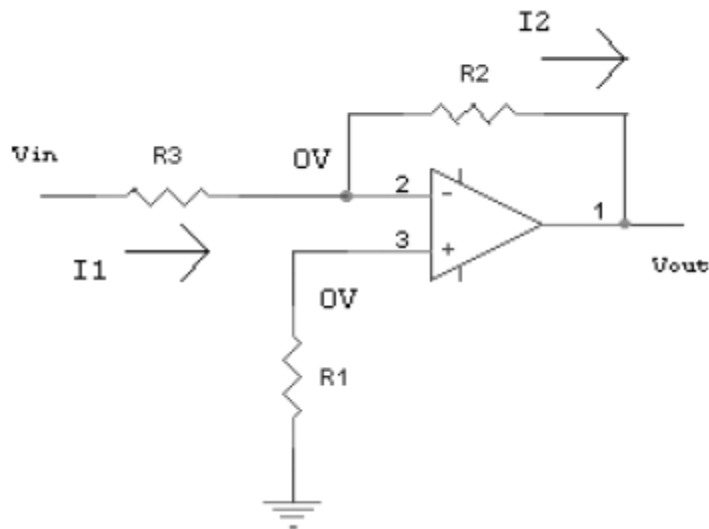


Ya podemos decir que estamos ante un circuito con realimentación negativa, así que podemos decir que la tensión en la entrada “-“ es igual a la tensión de la entrada “+“, ya que V_i hemos acordado que prácticamente es “0”.

Pero nos falta por poner la entrada del circuito, la entrada la pondremos mediante R_3 de la siguiente manera:



Este es el **amplificador asimétrico inversor** completo, y todo lo que hemos dicho hasta ahora se cumple, así que pasemos a analizarlo. Para ello nos apoyaremos en el siguiente esquema, que muestra todas las corrientes y tensiones del circuito:



Todos los circuitos con operacionales se analizan de forma muy parecida, así que prestemos atención. Buscamos una ecuación matemática que nos relacione la entrada con la salida. Primero hallamos la expresión de la corriente de entrada I_1 . Para ello tenemos que tener en cuenta la malla de entrada que abarca la tensión a la que esta sometida R_3 . En resumen la ecuación de la malla de entrada será:

$$V_{in-0} = V_{in} = I_1 \cdot R_3$$

Siempre la tensión en una resistencia vendrá dada según la dirección en que pintemos la corriente, y será: la tensión del lado de la resistencia por donde entra la corriente menos la tensión del lado de la resistencia por donde sale. Por lo tanto según la ecuación:

$$V_{in} = I_1 * R_3 \text{ por lo tanto } I_1 = \frac{V_{in}}{R_3}$$

Si observamos la figura y recordamos que por la entrada del operacional no iba corriente alguna llegamos a la conclusión de que $I_2 = I_1$, así que calcularemos de la misma forma I_2 y la igualaremos a I_1 . Según esto escribiremos:

$$V_{out} - V_i = - I_2 * R_2$$

$$I_2 = \frac{- V_s}{R_2}$$

Igualando I_2 e I_1 :

$$I_2 = I_1$$

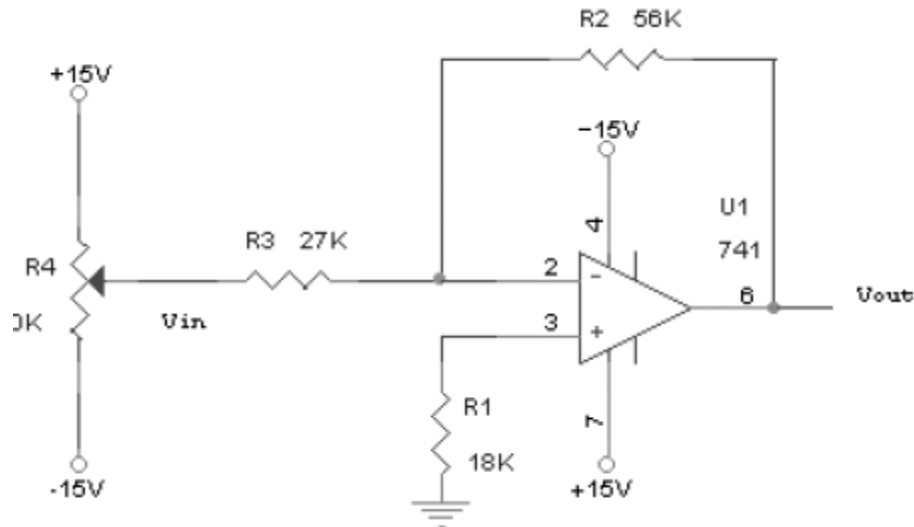
$$\frac{-V_s}{R_2} = \frac{V_i}{R_3} \Rightarrow V_s = - \frac{R_2}{R_3} * V_{in}$$

Según la expresión obtenida llegamos a la conclusión de que la tensión de salida V_{out} es la de entrada cambiada de signo y multiplicado por una constante (R_2/R_3). A esto se le llama Ganancia del circuito. Este circuito tiene una ganancia (A_v) negativa de $-(R_2/R_3)$ y por lo tanto podemos escribir que:

$$V_{out} = A_v * V_{in}$$

Aplicación práctica:

Para que veáis que todo lo que hemos comentado es cierto solo tenemos que alimentar el circuito tal como se especifica en la práctica nº15 del manual de prácticas
El amplificador operacional empleado es el 741:



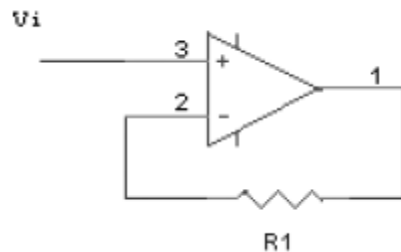
En este circuito la $A_v = - 56K / 27K = -2,07$ para la comprobación podemos seguir los siguientes puntos:

1. Ajustar "Vin" mediante el potenciómetro a 4 voltios
2. Medir "Vout" con respecto a masa y comprobar que $V_{out} = -2,07 * V_{in} = 8,28V$ (se aproxima mucho, ten en cuenta las tolerancias de las resistencias)
3. Medir las tensiones en las entradas "+" y "-" y comprobar que son 0 voltios
4. Cambiar "Vin" y volver a medir "Vout", comprueba que al aumentar "Vin" llega un momento en el que la salida del operacional no puede seguir bajando, habremos llegado a la "tensión de saturación" del operacional. Al disminuir "Vin" acabará pasando lo mismo con la salida.
5. Probad a quitar "R1" y conectemos la entrada no inversora directamente a masa. El circuito sigue funcionando correctamente, sin embargo es aconsejable la colocación de esta resistencia R1 y a de ser de valor:

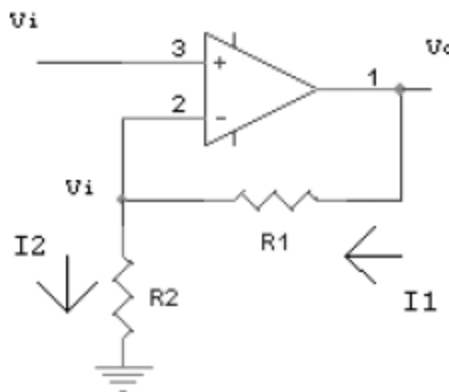
$$R_1 = \frac{R_3 * R_2}{R_3 + R_2}$$

3.3. -Amplificador no Inversor:

En este tipo de amplificador, a diferencia del inversor, la entrada “ V_e ” entrará directamente por la entrada no inversora del amplificador operacional (entrada+):



A continuación pondremos la realimentación negativa por medio de la resistencia $R1$:
Para terminar el circuito añadimos la resistencia $R3$ de la forma siguiente:



Ahora vamos a hallar la relación entre la salida y la entrada. Recordemos una vez más que las tensiones en la entrada no inversora y la entrada inversora son iguales, o sea que “ $V_i = 0$ ” y que la corriente de entrada al operacional es cero, por lo tanto “ I_1 ” es igual a “ I_2 ”. Así que no tenemos más que calcular las dos por separado y luego igualarlas:

Tensión de $R_2 = V_i$

$$V_i = I_2 * R_2$$

$$I_2 = \frac{V_i}{R_2}$$

Tensión de $R_1 = V_o - V_i$

$$V_o - V_i = I_1 * R_1$$

$$I_1 = \frac{V_o - V_i}{R_1}$$

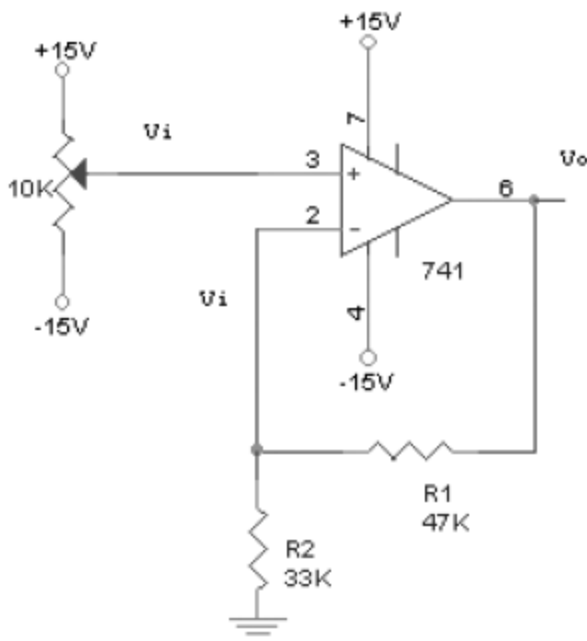
Igualando I_1 e I_2

$$I_1 = I_2$$

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

$$V_0 = \frac{R_1}{R_2} * V_i + V_i = \frac{R_1 + R_2}{R_2} * V_i$$

Por lo tanto, este circuito tiene una ganancia en tensión $A_v = 1 + R_1 / R_2$.
 Esto quiere decir que la salida será A_v veces la entrada, sin invertirse la señal ya que A_v es positiva.
 Aplicación práctica:



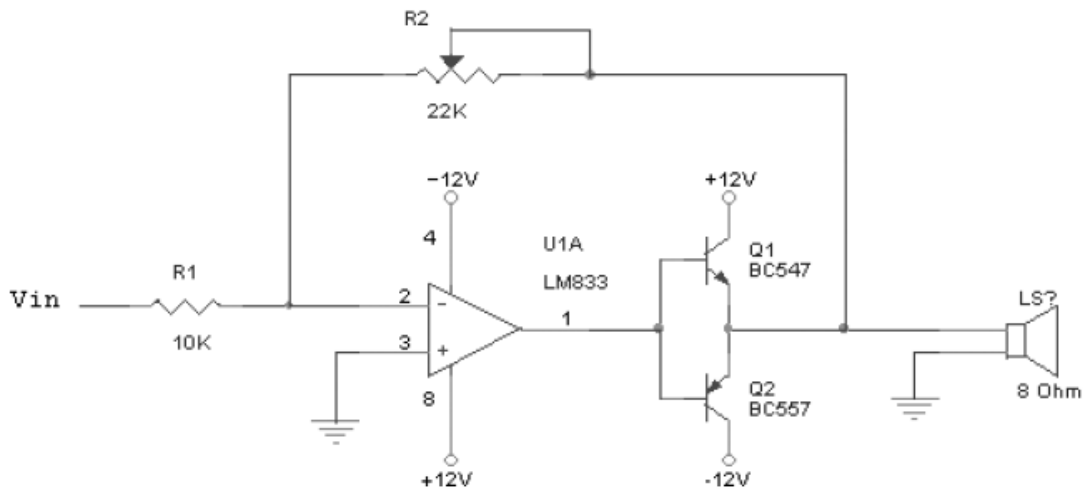
Para comprobar que todo lo que se ha dicho es cierto tenemos que montar la práctica nº16. El amplificador operacional empleado es el 741.
 En este circuito la $A_v = 1 + 47K/33K = 2,42$. El proceso es similar al caso anterior:

1. Ajustamos la tensión de entrada a 4 voltios mediante el potenciómetro de 10K y comprobamos que la salida es $V_o = A_v * 4 = 9,7$ voltios
2. Medimos la tensión en las entradas inversora y no inversora y comprobamos que son iguales.
3. Variamos la posición del eje del potenciómetro y comprobamos que siempre se cumple que $V_o = A_v * V_i$, siempre que no esté saturado.

4. Llega un momento que V_o no puede subir ni bajar mas => tensión de saturación

3.4.- Pequeño amplificador de audio

Un amplificador operacional no es capaz por si solo de entregar corrientes muy grandes por la salida, por lo que no podemos conectarles directamente un altavoz y oír música. Hemos visto hasta ahora que los amplificadores inversores y no inversores tienen una ganancia en tensión A_v . Este no es el problema, el problema está en la corriente (Amperios) que son capaces de entregar, necesitamos entonces añadir algún dispositivo que sea capaz de ampliar esa corriente. El dispositivo capaz de hacer esto es el transistor, y la forma más sencilla de utilizarlo es la siguiente:



En la figura podemos distinguir un amplificador inversor en el que hemos hecho algunos cambios.

El amplificador operacional empleado es un LM833, especial para audio.

Podemos probar con otros operacionales y veremos la diferencia.

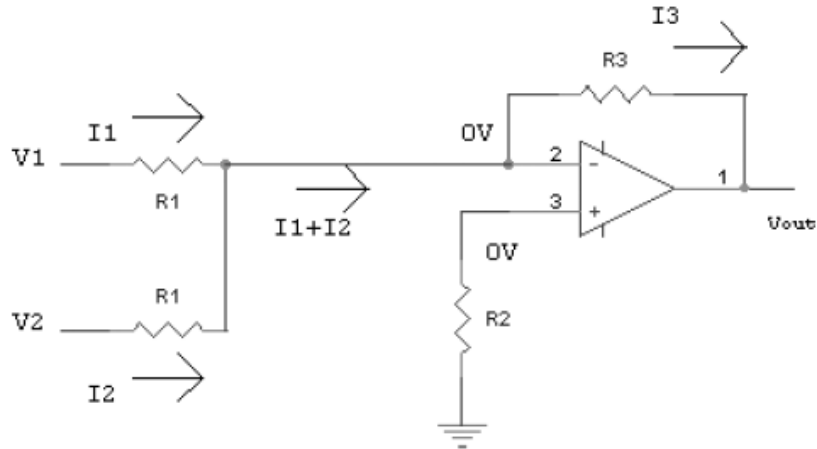
La etapa de transistores formada por Q1 y Q2 tiene como única finalidad suministrar toda la corriente que no puede el operacional. Los transistores empleados son los BC547 y BC557, Estos no son de gran potencia por lo que tendremos que usar un altavoz pequeño. Fijémonos donde tiene puesta la realimentación, directamente en la salida pasando por encima de los dos transistores. Esto soluciona algunos problemas de falta de linealidad en la etapa de los transistores. Además, si analizamos el circuito igual que hacíamos en el apartado del amplificador inversor veremos que nos sale exactamente lo mismo:

$$V_{out} = - \frac{R_2}{R_1} * V_{in}$$

Además, R_2 es una resistencia variable, que puede hacerlo de 0 a 22K. Esto hace que la ganancia en tensión (A_v) del circuito varía desde 0 hasta -2,2 variando así el volumen del altavoz, si queremos conseguir más volumen podemos cambiar R_2 por una mayor.

3.5.- Sumador Inversor

Podemos usar el amplificador operacional para sumar varias señales, con su masa común. Un amplificador de este tipo se denomina amplificador sumador. Amplificadores de este tipo se encuentran en cualquier mesa de mezclas. La forma básica del sumador inversor es:



Si nos fijamos un poco veremos que no es más que un amplificador inversor con dos entradas, y por lo tanto, con dos resistencias de entrada. Para facilitar el análisis pondremos estas dos resistencias iguales (R_1).

V_1 y V_2 representan las señales de entrada. El circuito se analiza igual que el amplificador inversor con la diferencia que aquí la I_3 es la suma de las corrientes I_1 e I_2 , suponiendo que $I_i = 0$ e $V_i = 0V$

$$I_3 = I_2 + I_1$$

Calculemos I_1 , aplicando la ecuación de la malla de entrada correspondiente a V_1

$$V_1 = R_1 * I_1 \Rightarrow I_1 = \frac{V_1}{R_1}$$

Ahora calculamos la I_2 , aplicando la malla de entrada correspondiente a V_2

$$V_2 = R_2 * I_2 \Rightarrow I_2 = \frac{V_2}{R_2}$$

Igualando $I_3 = I_1 + I_2$:

$$I_3 = \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2}$$

Pero por otra parte podemos calcular también I_3 , como la corriente que pasa por R_3 con una tensión de $0 - V_{out} = -V_{out}$:

$$V_{out} = -R_3 \cdot I_3$$

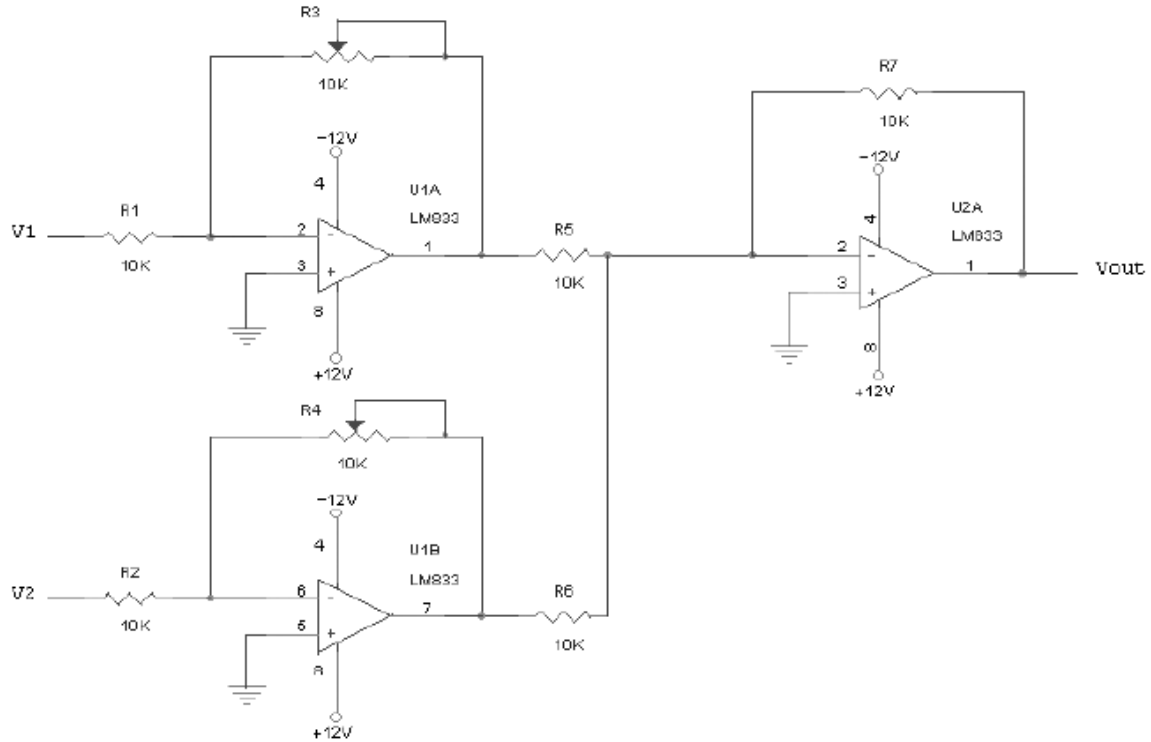
Sustituyendo este valor de I_3 en la ecuación antes obtenida tenemos que:

$$I_3 = \frac{-V_{out}}{R_3} \Rightarrow V_{out} = -\frac{R_3}{R_1} \cdot (V_1 + V_2)$$

Esta ecuación nos dice que la salida será la suma de las dos entradas multiplicadas por un número: $A_v = -(R_3/R_1)$. Puedes ponerle todas las entradas que quieras y la salida será la suma de todas las entradas por “ A_v ”.

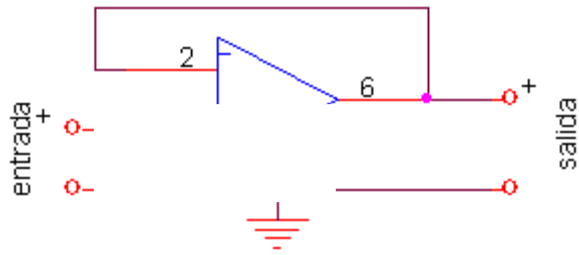
Aplicación práctica:

Como ejemplo podemos analizar el siguiente circuito . El operacional empleado es el LM833, que es un amplificador operacional doble especial para audio.

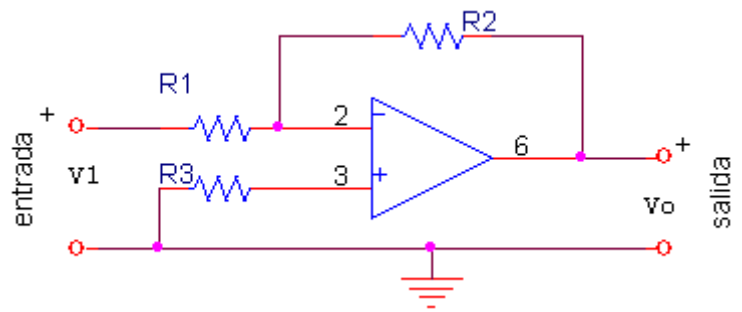


Las dos entradas (V1 y V2) pasan antes de ser mezcladas por sendos amplificadores inversores de ganancia variable. La ganancia de V1 será, según lo que hemos visto hasta ahora, $A_{v1} = -(R3 / R1)$. como R1 es 10K y R3 puede variar entre 0 y 10K, la ganancia de "V1" variará entre "0 y -1". Esto quiere decir que podremos variar el volumen de la entrada V1 desde "0" hasta el mismo nivel de entrada. Y lo mismo pasa con V2. Y después viene el mezclador. En el circuito anterior tenemos todas las resistencias iguales, así que tendrá una ganancia fija de "-1". A la salida podemos poner el pequeño amplificador de audio que hemos visto en el apartado anterior y así puedes escuchar tus mezclas.

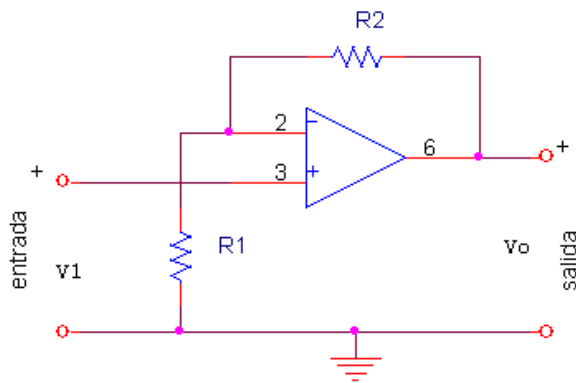
Adaptador de impedancia



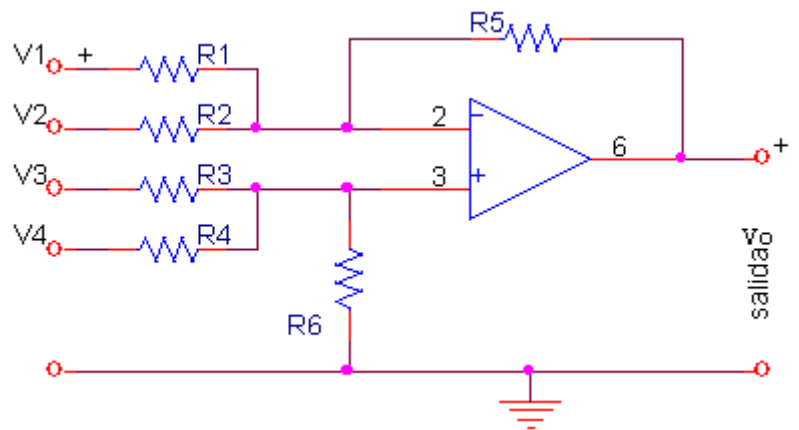
Amplificador Asimetrico Inversor



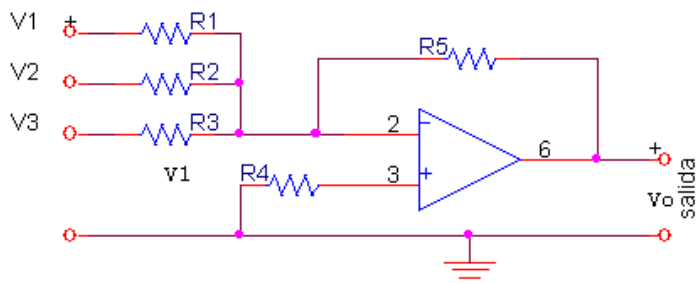
Amplificador Asimétrico No Inversor



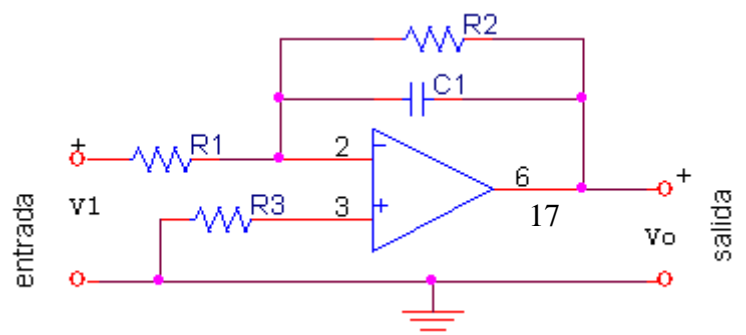
Amplificador Restador



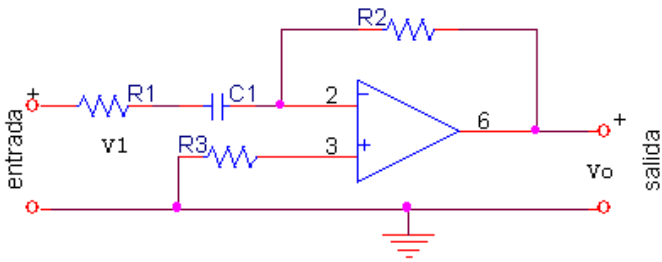
Amplificador Sumador



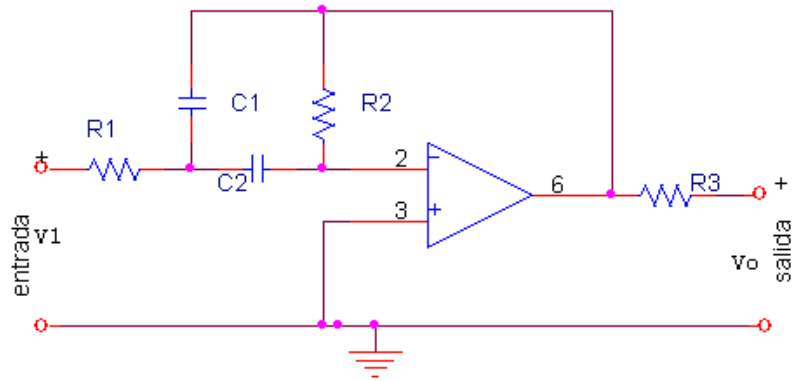
Amplificador Integrador



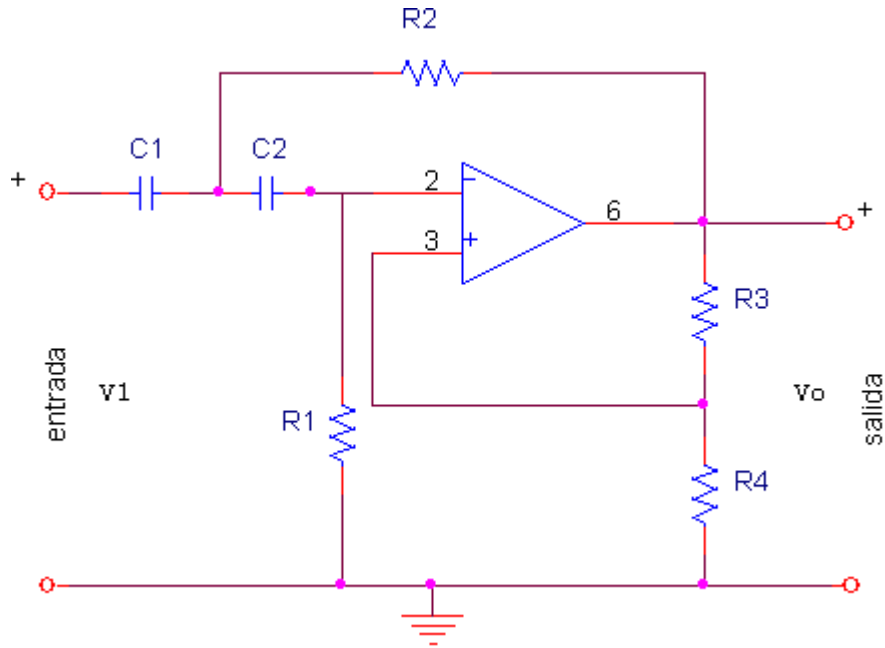
Amplificador Derivador



Filtro "Paso-Banda"



Filtro "Pasa-Altos"



Filtro

"Pasa-Bajos"

