

Tema -13-

AMPLIFICADOR OPERACIONAL

Índice

GENERALIDADES.

Características del amplificador operacional ideal.
Características del amplificador operacional real.

REALIMENTACIÓN EN LOS AMPLIFICADORES OPERACIONALES.

EL A.O. COMO AMPLIFICADOR.

Amplificador inversor.
Amplificador no inversor.
Seguidor de tensión.

EL A.O COMO OPERADOR ARITMÉTICO.

Operador sumador (inversor).
Operador restador.
Operador logarítmico y exponencial.
 Amplificación Lineal.
 Amplificación no Lineal.
Operador integrador y diferenciador.

CIRCUITO DE APLICACIÓN: (mezclador de audio).

EL A.O COMO FILTRO ACTIVO.

Filtro pasa bajo.
Filtro pasa alto.
Filtro pasa banda.

EL A.O COMO COMPARADOR.

Comparador no inversor.
Comparador inversor.
Comparadores con histéresis.
 Comparador con histéresis no inversor.
 Comparador con histéresis inversor.

ANEXO: Ejercicios teórico-prácticos.

AMPLIFICADOR OPERACIONAL

GENERALIDADES.

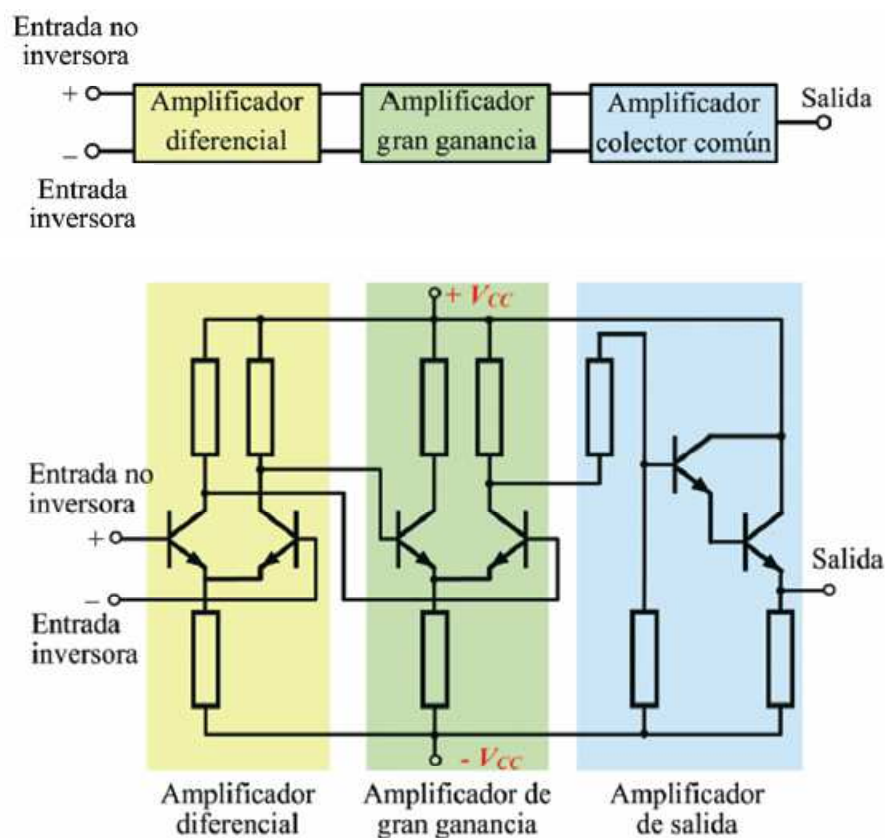
Un amplificador operacional (A.O.) es un ejemplo de un amplificador fabricado con las técnicas de los circuitos integrados (C.I.). Este tipo de circuito ofrece a los diseñadores unas excelentes características a un precio reducido. Con el uso de amplificadores operacionales, se pueden conseguir grandes ganancias de tensión para aplicaciones de señal o de baja potencia, con lo que se puede trabajar en un amplio margen de frecuencias.

Recibe el nombre de "operacional" porque en un principio se utilizó para las calculadoras analógicas, ya que con este tipo de amplificador pueden realizarse operaciones matemáticas (suma, resta, multiplicación, logaritmos, derivadas e integrales). Pero también tiene otras muchas aplicaciones como en la amplificación de señales, filtros, fuentes de alimentación, generadores de señal, comparadores, reguladores de tensión, temporizadores, etc.

El A.O. es un elemento que posee una entrada diferencial, lo que significa que tiene dos entradas en oposición de fase. En la figura se muestra el símbolo que se emplea para representar el AO, junto con uno de los encapsulados típicos en C.I.



Un amplificador operacional está compuesto por diferentes etapas, tal como se muestra en el siguiente diagrama de bloques y en el esquema simplificado del circuito interno.

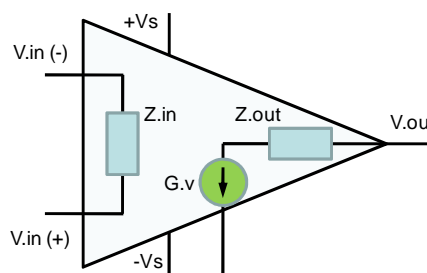


La primera etapa consta de un amplificador diferencial; elemento esencial para conseguir que la señal de salida dependa de la diferencia de las señales aplicadas a la entrada. La segunda etapa amplificadora es la que proporciona una alta ganancia. La etapa de salida es un amplificador de baja potencia, habitualmente en colector común con par Darlington con baja impedancia de salida.

Características del amplificador operacional ideal.

Las características de un A.O. "ideal" se pueden resumir en las siguientes:

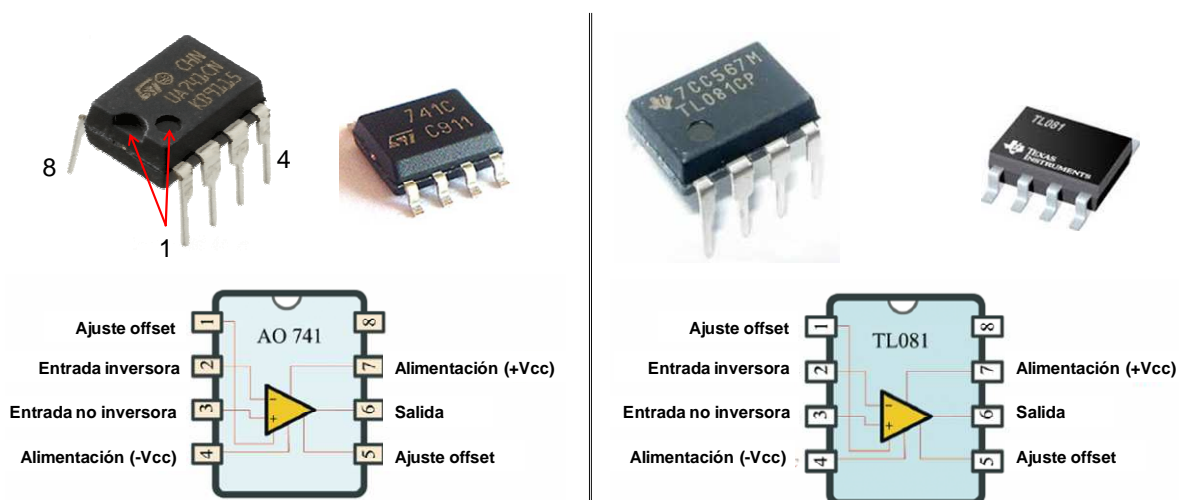
- Impedancia de entrada (Z_i): infinita.
- Impedancia de salida (Z_o): cero.
- Ganancia de tensión (A_v): infinita.
- Ancho de banda (BW): infinita.



Lógicamente, estas prestaciones son imposibles, pero sirven para comparar con las reales y así poder saber su calidad respecto del ideal. Sin embargo en un A.O. real, entre sus cualidades, destaca la extraordinaria ganancia de tensión que posee cuando trabaja en lazo abierto, esto es, sin realimentación de la salida sobre la entrada.

Características del amplificador operacional real.

Considerando un A.O. real, como por ejemplo el LM-741 o el TL-081, que se comercializan en encapsulado del tipo 8-DIP (Dual in-line package) y 8-SOP (Small Outline package), ambos de 8 pines y que se corresponden como se muestra en las siguientes figuras.



Las características de este A.O. "real" LM741 son las siguientes.

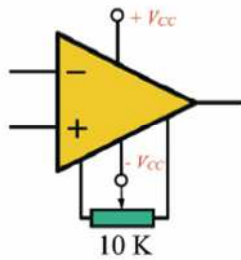
- Ganancia de tensión en bucle abierto: 200.000.
- Impedancia de entrada (Z_i): 1 MΩ.
- Impedancia de salida (Z_o): 150 Ω.
- Ancho de banda: 1 MHz ($G=0$ dB), 100 kHz ($G=80$ dB).
- Corriente de polarización: 100 nA.
- Tensión de alimentación máxima: ± 18 V.
- Tensión máxima de entrada: ± 13 V.
- Tensión máxima de salida: ± 14 V.
- Potencia disipable: 500 mW.

Las características del A.O. LM-741 son similares a las del TL-081, pero con la diferencia de que este último tiene una impedancia de entrada mayor (2 MΩ), puesto que está constituido por transistores de tecnología MOSFET.

También se comercializan circuitos con varios A.O. integrados en una misma cápsula, por ejemplo el TL-082 que, en una cápsula de tipo 8-DIP u 8-SOP, aloja dos A.O. similares al TL-081.

Hay que considerar que con el amplificador diferencial equilibrado (compensado con la tensión de "offset"), en ausencia de señal de entrada (V_{in}) la tensión de salida (V_{out}) es "cero". Por lo tanto puede considerarse que en estas circunstancias la tensión diferencial en ambas entradas (positiva y negativa) es "cero".

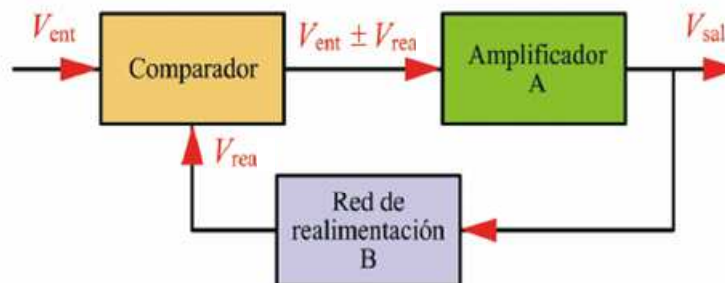
Aunque los A.O. integrados incorporan un sistema automático para la compensación de la tensión offset, en ciertas aplicaciones que requieran mucha sensibilidad es necesario realizar el equilibrado del amplificador diferencial mediante el ajuste de un potenciómetro conectado a los pines correspondientes.



Amplificador equilibrado: si $V_{in} = 0 \Rightarrow V_+ = V_- \Rightarrow V_{out} = 0$

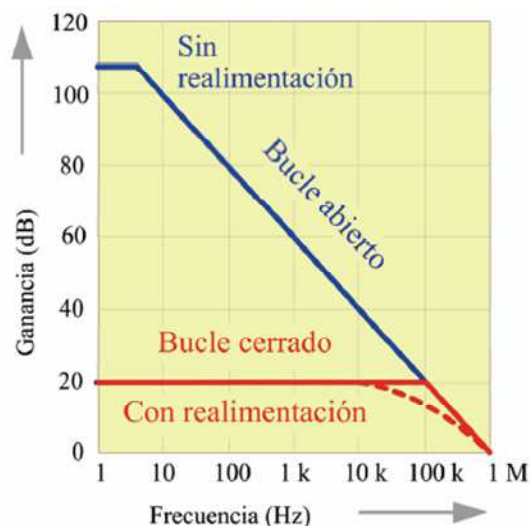
REALIMENTACIÓN EN LOS AMPLIFICADORES OPERACIONALES.

La forma habitual de trabajo de un A.O. es mediante las técnicas de realimentación negativa, dejando la realimentación positiva para los circuitos en los que se desea generar un estado de oscilación, como es el caso de los generadores de señal.

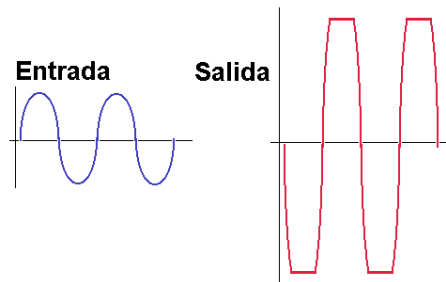


La ganancia de un amplificador operacional integrado para señales de bajas frecuencia es muy elevada, pero muy inestable a los cambios de dicha frecuencia. Por esta razón, conviene disponer de menor ganancia a cambio de una mayor estabilidad dentro de unos límites de frecuencia más grandes. La forma de conseguir esto último es utilizando la realimentación negativa. Esta técnica consiste en tomar una parte de la señal de la salida del amplificador e introducirla de nuevo por la entrada inversora. En el caso de que la señal de realimentación se introdujese por la entrada no inversora se trataría entonces de una realimentación positiva.

En el gráfico se muestra la relación existente entre la frecuencia y la ganancia de un amplificador operacional sin realimentación (bucle o lazo abierto) y con realimentación (bucle o lazo cerrado). En este diagrama se observa cómo, en un A.O. sin realimentar, la ganancia disminuye drásticamente para frecuencias superiores a 10 Hz, mientras que si hay realimentación, la ganancia se mantiene estable hasta los 100 kHz.



Al igual que ocurría con los amplificadores transistorizados, un exceso de amplificación puede derivar en una distorsión por el recorte de las crestas de la señal de salida, debido a que el valor de pico de (V_o) tiende a sobrepasar el valor de la alimentación. La causa de la saturación puede deberse a la amplitud excesiva de la señal de entrada (V_i), o a una ganancia (A_v) elevada.



Este inconveniente se evita con la realimentación negativa, pues se reduce la ganancia y en consecuencia la amplificación.

EL A.O. COMO AMPLIFICADOR.

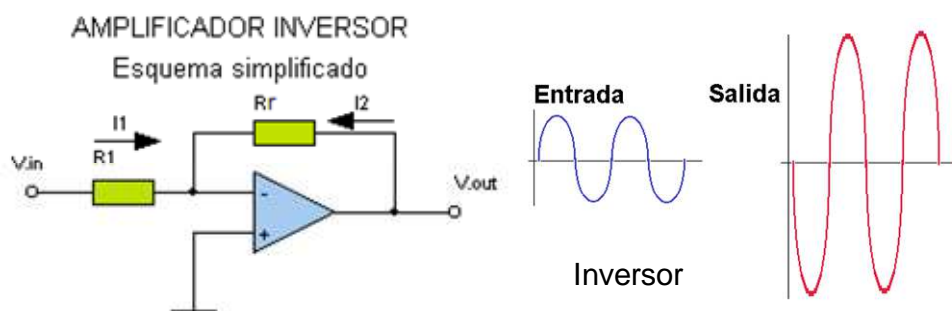
Dependiendo del terminal donde se aplique la entrada ($-V_i$) o ($+V_i$) el circuito puede ser inversor o no inversor, respectivamente, en el primer caso la salida está en contrafase con respecto a la entrada, mientras que en el segundo está en fase.

Amplificador inversor.

La señal a amplificar (V_{in}) se aplica mediante (R_1) a la entrada inversora ($-V_i$) con respecto al común; mientras que la señal de salida (V_{out}) se toma en el propio terminal y también con respecto al común, siendo esta una réplica amplificada de la señal de entrada, pero con polaridad opuesta (180°), razón por la que se le denomina "amplificador inversor".

Es muy frecuente representar los circuitos de A.O. en "esquema simplificado", dando por hecho la existencia de la alimentación. Por lo tanto tampoco se muestra la fuente de alimentación, suponiendo que es simétrica, salvo que se indique lo contrario.

La ganancia de tensión (A_v) se determina por la relación de las resistencias R_1 y R_f que forman un divisor de tensión, lo que hace que una pequeña parte de la tensión de entrada alcance la entrada inversora del A.O. mediante la resistencia de realimentación (R_f), por lo tanto esta resistencia ejerce una realimentación negativa que reduce la ganancia total del circuito.



Como la impedancia de las entradas es muy grande, las corrientes (I_1 e I_2) en ambas resistencias se igualan. Por lo tanto la ganancia del amplificador queda determinada principalmente por la relación de dichas resistencias, tal como se muestra en las siguientes expresiones.

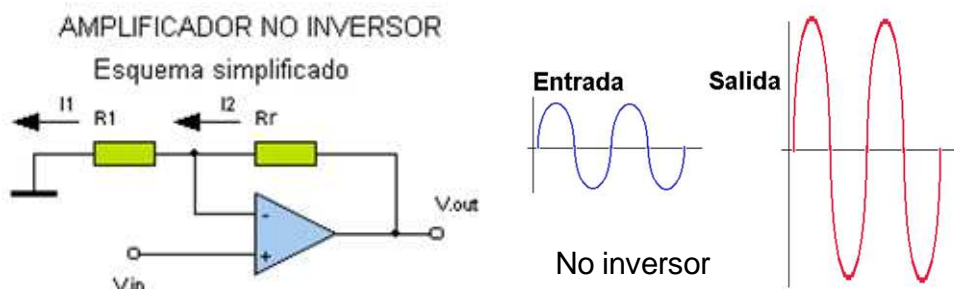
$$A_v = \frac{-V_{out}}{V_{in}} \quad \text{Como } Z_{in} \text{ es muy grande } \Rightarrow I_1 \cong -I_2 \Rightarrow A_v = \frac{-I_2 \cdot R_f}{I_1 \cdot R_1} \Rightarrow A_v = - \frac{R_f}{R_1}$$

El signo "menos (-)" indica que hay un inversión de polaridad.

Para evitar la distorsión por saturación, lo típico es elegir los valores de las resistencias para que la ganancia esté entre 10 y 100, mientras que la impedancia de entrada esté entorno a 1 MΩ.

Amplificador no inversor.

La señal a amplificar (V_{in}) se aplica mediante la resistencia R_1 a la entrada no inversora ($+V_i$) con respecto al común; mientras que la señal de salida (V_{out}) se toma en el propio terminal y también con respecto al común, siendo esta una réplica amplificada de la señal de entrada, con la misma forma frecuencia y fase.



Las resistencias R_1 y R_r forman un divisor de tensión, con el cual y dependiendo del valor de dichas resistencias, se fija la ganancia resultante del circuito.

Razonando lo expuesto anteriormente en cuanto a que si el amplificador está equilibrado en ausencia de señal de entrada, la tensión entre las entradas diferenciales (\pm) es “cero”; por lo cual se deduce que la tensión de entrada (V_{in}) es virtualmente igual a la tensión en la resistencia R_1 .

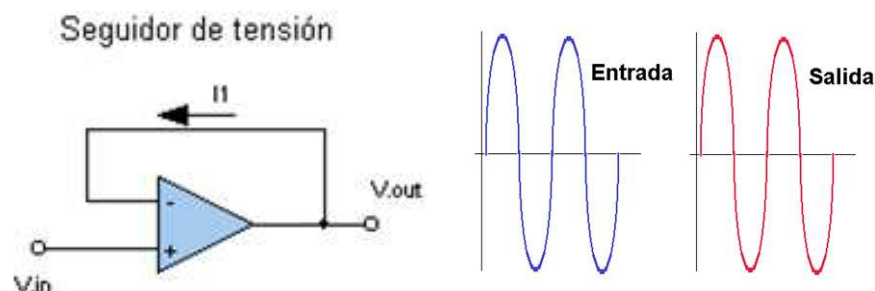
$$\text{Como } Z_{in} \text{ es muy grande} \Rightarrow I_1 \cong I_2 \quad V_{out} = V_{R1} + V_{Rr} \quad V_{in} = 0 \Rightarrow V_+ = V_- = V_{R1}$$

Por lo tanto la ganancia del amplificador queda determinada principalmente por la relación de dichas resistencias, tal como se muestra en las siguientes expresiones.

$$A_V = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{V_{R1} + V_{Rr}}{V_{R1}} = \frac{I \cdot (R_1 + R_r)}{I \cdot R_1} \Rightarrow A_V = 1 + \frac{R_r}{R_1}$$

Seguidor de tensión.

Este es un caso especial amplificador no inversor, donde la realimentación negativa se realiza conectando directamente la salida a la entrada inversora, por lo tanto la resistencia de realimentación (R_r) es “cero”, y la resistencia R_1 es “infinita” (no se contempla). Por lo tanto la ganancia de tensión vale la “unidad” ($A_V = 1$), siendo la señal de salida aparentemente igual a la de entrada, por ello se le denomina “seguidor de tensión”. Sin embargo el circuito se comporta amplificador de corriente y se utiliza como adaptador de impedancias, por lo tanto se utiliza cuando se requiera una alta impedancia de entrada y una baja impedancia de salida.



$$A_V = 1 + \frac{R_r}{R_1} \quad R_1 = \infty; R_r = 0 \Rightarrow A_V = 1$$

Ejercicio -1-.

Ejercicio -2-.

Ejercicio -3-.

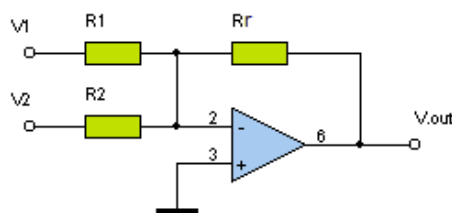
EL A.O COMO OPERADOR ARITMÉTICO.

Además de las funciones de amplificador inversor y no inversor, los A.O. tiene muchas aplicaciones, todas ellas en función del tipo de realimentación y de las características de los componentes que forma la red o bucle de realimentación. El nombre de “amplificador operacional” se le otorga por la posibilidad que tiene de realizar operaciones matemáticas englobadas en dos grupos de operadores.

- Operadores aritméticos lineales: sumador y restador.
- Operadores aritméticos no lineales: logarítmico, exponencial, diferenciador e integrador.

Operador sumador (inversor).

Esta configuración es una variante del amplificador inversor, donde se aplica más de una señal de entrada (V_1, V_2, \dots, V_n). En la salida se obtendrá una tensión (V_{out}) cuyo valor corresponde a la suma de las tensiones aplicadas a las entradas simultáneamente, multiplicada por la ganancia que se establece con el bucle de realimentación. En el caso de que las resistencias de entrada sean iguales, se toma el valor de una y el resultado será.



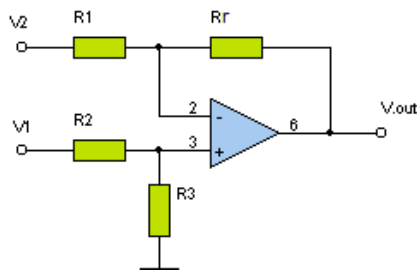
$$-V_{out} = A_V \cdot (V_1 + V_2)$$

$$\text{Si: } R_1 = R_2 \Rightarrow -V_{out} = -\frac{R_r}{R_1} \cdot (V_1 + V_2)$$

Este circuito servirá, por ejemplo, para mezclar dos o más señales de audio, pudiendo sustituir las resistencias de entrada por potenciómetros que permitan obtener diferentes ganancias.

Operador restador.

Con esta configuración el A.O. actúa como un amplificador diferencial, dando en la salida un determinado valor de tensión (V_{out}) y signo, proporcional a la diferencia de las tensiones aplicadas en las dos entradas (V_1) y (V_2). En el caso particular de que las resistencias tengan igual valor ($R_1 = R_2$) y ($R_r = R_3$) se toma la siguiente expresión.



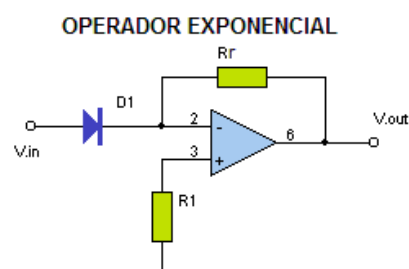
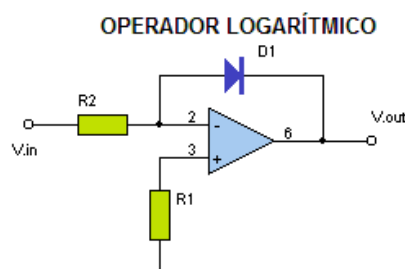
$$V_{out} = A_V \cdot (V_1 - V_2)$$

$$\text{Si: } R_1 = R_2 \text{ y } R_r = R_3 \Rightarrow V_{out} = \frac{R_r}{R_1} \cdot (V_1 - V_2)$$

Operador logarítmico y exponencial.

El logaritmo y su función inversa, la función exponencial, son ejemplos también de configuraciones no lineales, las cuales aprovechan el funcionamiento exponencial del diodo.

Estos circuitos se basan en un amplificador no inversor, pero en el caso de un operador logarítmico se sustituye la resistencia de realimentación de un por un diodo, mientras que en el operador exponencial el diodo sustituye la resistencia de entrada (R_2).



Con estas modificaciones se logra, según el caso, una señal de salida proporcional al logaritmo o a la función exponencial a la señal de entrada.

$$\text{A.O. logarítmico: } V_{\text{out}} = -m \cdot \ln\left(\frac{V_{\text{in}}}{n \cdot R}\right) \quad \text{A.O. exponencial: } V_{\text{out}} = -n \cdot R \cdot e^{\frac{V_{\text{in}}}{m}}$$

Los factores n y m , son factores de corrección, que se determinan por la temperatura y por los parámetros de la ecuación del diodo.

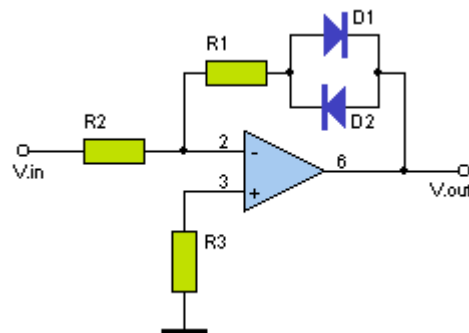
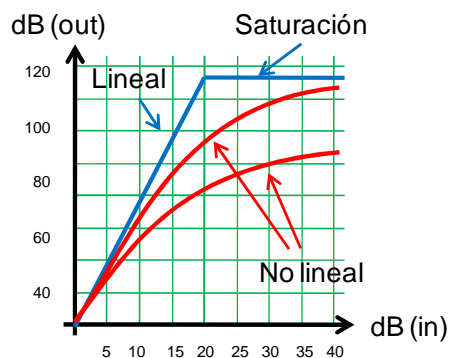
Estos operadores tienen aplicación cuando se necesite una respuesta no lineal, en la que sea necesario comprimir las señales analógicas fuertes (operador logarítmico), o por el contrario, cuando se necesite descomprimirlas (operador exponencial).

Para comprender el concepto de compresión de las señales

Amplificación Lineal. Una vez fijada la ganancia la señal se amplifica fielmente en hasta llegar a los valores de máximos de salida (nivel de saturación).

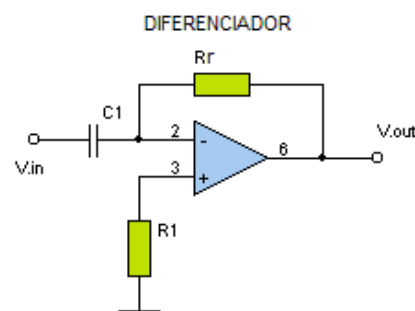
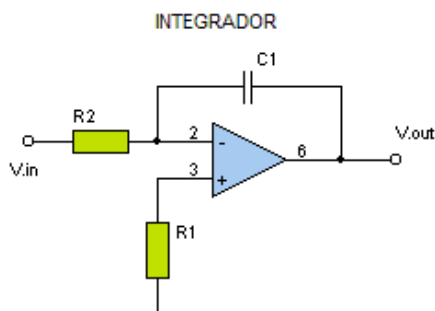
Amplificación no Lineal. Una vez fijada la ganancia en función de unos parámetros prefijados, la señal no es amplificada en igual proporción que la de entrada, haciendo que cuanto mayor sea esta menor es el grado de amplificación, por lo que el amplificador actúa como un compresor de señal.

En el esquema simplificado se muestra un amplificador operacional con realimentación negativa mediante dos diodos (D_1 y D_2) conectados en paralelo inverso, en los cuales se utiliza la cualidad no lineal que presenta la polarización directa mientras no se alcanza la conducción máxima (0,2...0,6 V). Como el amplificador es alimentado con una tensión simétrica ($\pm U_{CC}$), cada uno de los diodos realimenta el correspondiente semiciclo de la señal amplificada ejerciendo el efecto de compresión.



Operador integrador y diferenciador.

Estos circuitos se basan en un amplificador no inversor, pero en el caso del integrador se sustituye la resistencia de realimentación de un por un condensador, mientras que en el diferenciador el condensador sustituye la resistencia de entrada (R_2).



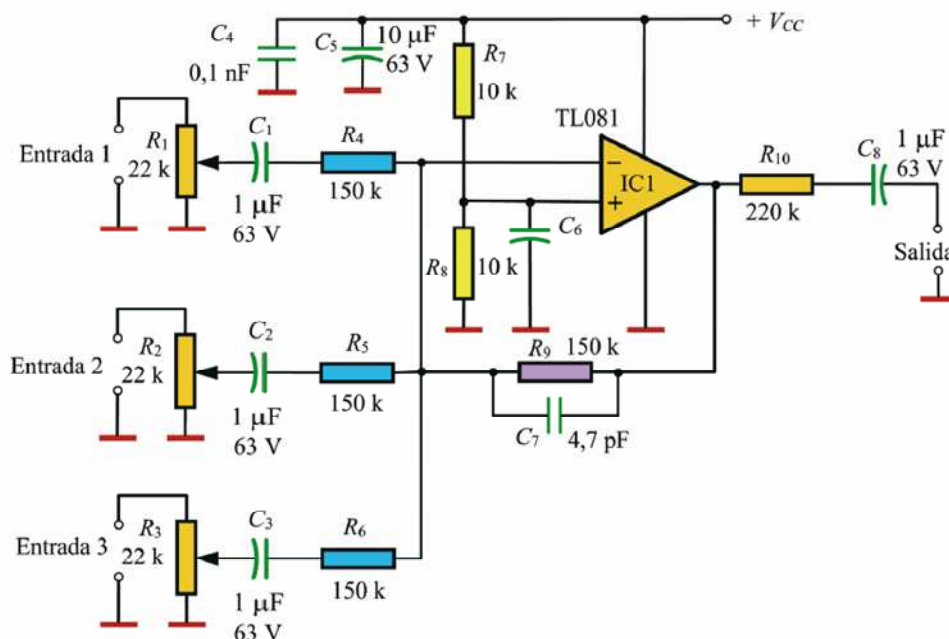
Con estas modificaciones se logra, según el caso, una señal de salida proporcional a la integral o a la derivada de la señal de entrada.

$$\text{Integrador: } V_{\text{out}} = \frac{1}{R_2 \cdot C_1} \cdot \int_0^t V_{\text{in}} \cdot dt \quad \text{Diferenciador: } V_{\text{out}} = -R_r \cdot C_1 \cdot \frac{dV_{\text{in}}}{dt}$$

Ejercicio -4-.

CIRCUITO DE APLICACIÓN: (mezclador de audio).

En el siguiente esquema se muestra un ejemplo de un circuito con A.O. de aplicación como mezclador de señales de audio.



Tal como se puede observar en el circuito, con este mezclador podremos introducir tres señales de audio diferentes, con lo que se consigue a su salida una señal que será la suma de éstas. La utilidad de este pequeño mezclador es muy variada, ya que puede introducir señales preamplificadas provenientes de diferentes fuentes: una cabeza lectora de una pletina, un sintonizador, un micrófono, instrumentos musicales, etc. Un ejemplo de aplicación podría ser el poder hablar por un micrófono durante un evento mientras se escucha la música, o la mezcla que se produce de los diferentes instrumentos musicales en un concierto.

Este circuito consta básicamente de los siguientes elementos: tres entradas a las que se les conecta las diferentes señales a mezclar, tres potenciómetros (R_1 , R_2 , R_3) que se encargan de nivelar las señales de entrada según el efecto que se desee conseguir en el mezclado y un amplificador operacional (IC_1) que realiza la suma de todas las señales.

El amplificador operacional trabaja con realimentación inversora de tensión. Dicha realimentación se produce a través de la resistencia R_9 de 150 kΩ. Como las resistencias (R_4 , R_5 , R_6) aplicadas a la entrada son del mismo valor, la ganancia obtenida por el amplificador será de la unidad:

$$A_v = -\frac{R_9}{R_4} = -\frac{150 \text{ k}\Omega}{150 \text{ k}\Omega} = -1$$

La alimentación de este circuito se puede realizar con una tensión continua que esté comprendida entre 10 V y 30 V. Sin embargo, la mayoría de los circuitos que utilizan amplificadores operacionales necesitan de una fuente de alimentación simétrica que suministre una tensión doble de $\pm V_{CC}$, (por ejemplo, +15 V y -15 V). Este hecho complica notablemente el empleo de estos amplificadores, sobre todo si se quiere hacer funcionar el mezclador aprovechando la alimentación de un equipo de audio, que casi siempre resulta ser monopolar.

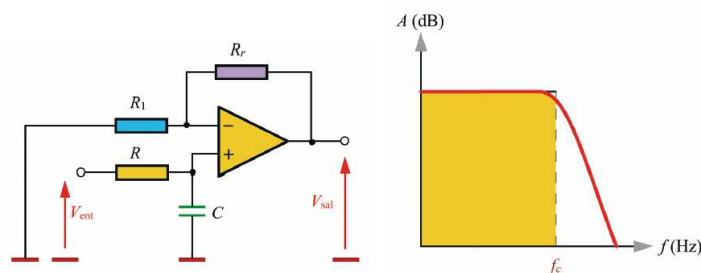
Este problema se soluciona conectando el terminal "4" de IC_1 a masa y el "7" a la tensión positiva de alimentación. Además se polariza el terminal "3" (entrada no inversora) con la mitad de la tensión de alimentación. Para realizar esta última operación se dispone de un divisor de tensión formado por las resistencias R_7 y R_8 del mismo valor.

EL A.O COMO FILTRO ACTIVO.

Los filtros son circuitos capaces de constituir una barrera para determinadas frecuencias, dejando pasar la señal de la gama de frecuencias que interese y eliminando o atenuando el resto. Si estos filtros se constituyen con componentes pasivos (resistencias, bobinas y condensadores), la señal salida obtenida en los mismos será siempre inferior a la de entrada. Con los filtros activos, contruidos a partir con amplificadores operacionales como amplificador inversor no inversor, se consigue cierta ganancia en la señal de salida una vez filtrada., lo cual también mejora la calidad u orden del filtro, es decir, aumenta la pendiente y lo hace más selectivo. Como ya es conocido, los filtros pueden ser: pasa bajo, pasa alto, pasa banda y elimina banda.

Filtro pasa bajo.

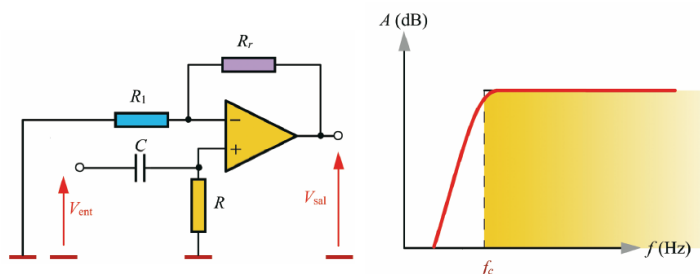
Es el que solo deja pasar las señales cuyas frecuencias estén por debajo de una frecuencia determinada, a la que se le denomina como "frecuencia de corte (f_c)". Las señales con frecuencias superiores a dicha frecuencia de corte serán atenuadas. La frecuencia de corte se determina por los valores de la resistencia (R) y la capacidad del condensador (C).



$$f_c = \frac{1}{2\pi R C}$$

Filtro pasa alto.

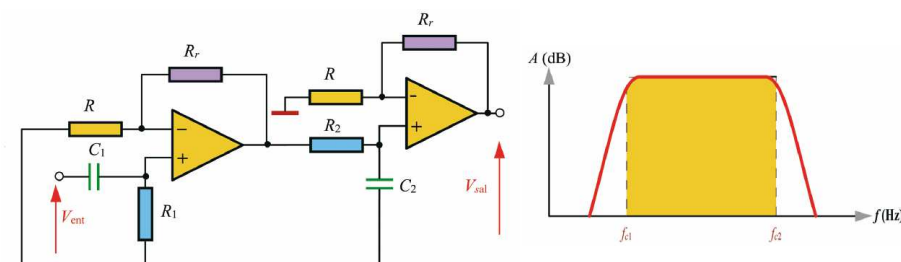
Es el que solo deja pasar las señales cuyas frecuencias estén por encima de la frecuencia de corte. Las señales con frecuencias inferiores a dicha frecuencia de corte serán atenuadas. Al igual que con el filtro pasa bajo, la frecuencia de corte se determina por los valores de la resistencia (R) y la capacidad del condensador (C).



$$f_c = \frac{1}{2\pi R C}$$

Filtro pasa banda.

Un filtro pasa banda es el que solo deja pasar las señales cuyas frecuencias estén comprendidas entre una frecuencia de corte inferior (f_{c1}) y otra de corte superior (f_{c2}). Este tipo de filtro se constituye con la combinación de dos filtros, un pasa alto y un pasa bajo. La frecuencia de corte inferior la determina el primer filtro (R_1 - C_1) que es pasa alto; mientras que la frecuencia de corte superior la determina el segundo filtro (R_2 - C_2) que es pasa bajo. Por lo tanto en la salida de un filtro pasa banda se obtiene las señales filtradas y amplificadas que se presentan en la entrada, lo cual ocupa solo un determinado ancho de banda.



$$f_{c2} \text{ (superior)} = \frac{1}{2\pi R_1 C_1}$$

$$f_{c1} \text{ (inferior)} = \frac{1}{2\pi R_2 C_2}$$

EL A.O COMO COMPARADOR.

El amplificador operacional trabajando en lazo abierto (sin realimentación), hace que su salida entregue una tensión (V_{sal}) resultante del producto de la ganancia (A_V) por la diferencia de tensiones en la entradas (V_1) y (V_2); de este modo se establece una comparación entre ambas tensiones.

$$V_{sal} = A_V \cdot (V_1 - V_2)$$

Si a una de las entradas se le aplica una tensión fija, llamada de “referencia (V_{ref})”, y en la otra una señal externa, denominada “señal de entrada (V_{ent})”, una pequeña variación de dicha señal de entrada hace que el estado de la salida pase del corte a la saturación o viceversa.

Corte: $V_{sal} = 0$

Saturación: $V_{sal} \cong V_{CC}$

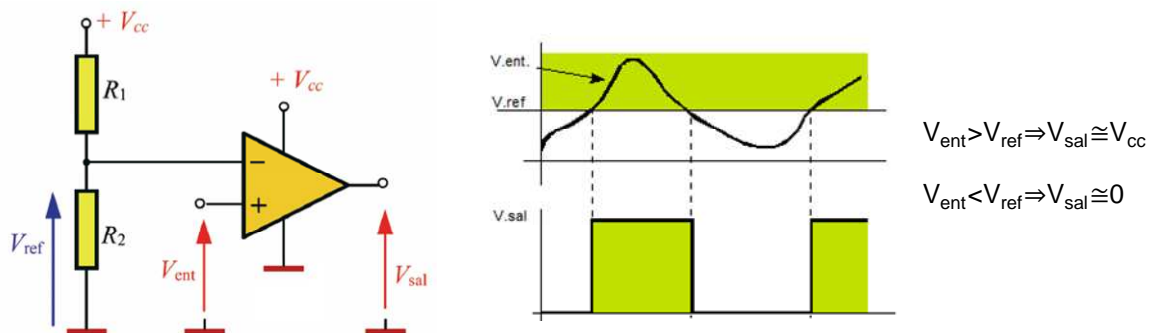
Hay varios tipos de comparadores: el no inversor y el inversor, ambos pueden ser con histéresis.

Comparador no inversor.

En el siguiente esquema se muestra el circuito de un comparador no inversor, en el que la tensión de referencia se fija con el divisor de tensión formado por las resistencias R_1 y R_2 , y se aplica al terminal inversor (-); mientras que la señal de entrada (V_{ent}) se aplica sobre el terminal no inversor (+).

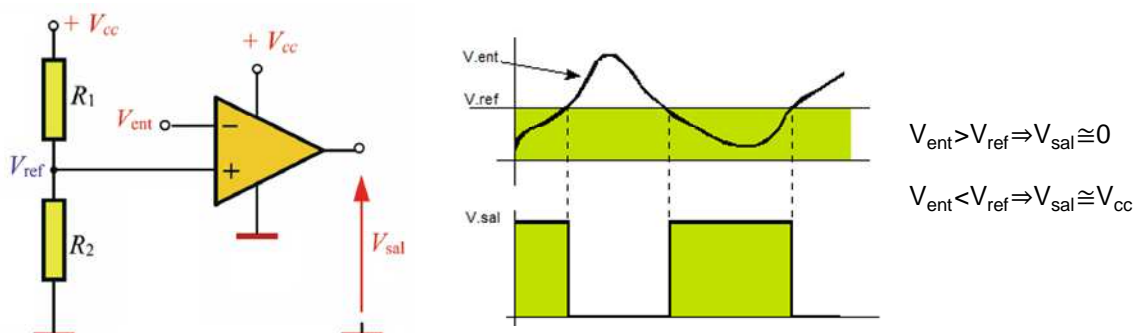
En este circuito se cumple que, cuando la tensión de entrada es superior en unas milésimas de voltio a la tensión de referencia, la tensión de salida se hace máxima ($V_{m\acute{a}x}$), cercano al valor de la tensión de alimentación (V_{CC}); en este caso se dice que la salida est en nivel alto.

Para una tensión de entrada inferior a la de referencia, la tensión en la salida del amplificador pasa a tener un valor mínimo ($V_{mn}$) cercano a 0 voltios; en este caso se dice que la salida est en nivel bajo.



Comparador inversor.

Es aquel en que la señal entrada (V_{ent}) se aplica sobre el terminal inversor (-), siendo el no inversor (+) al que se le aplica la tensión de referencia (V_{ref}); por lo tanto actúa de forma opuesta al comparador no inversor.

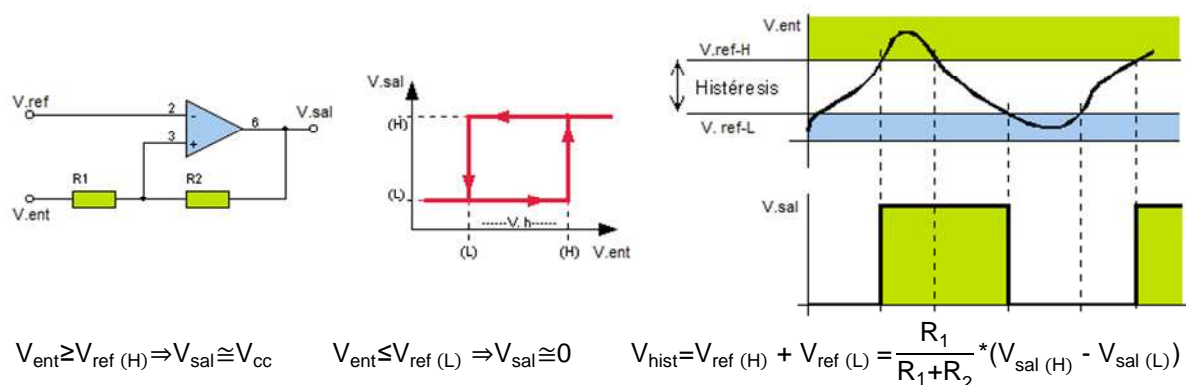


Comparadores con histéresis.

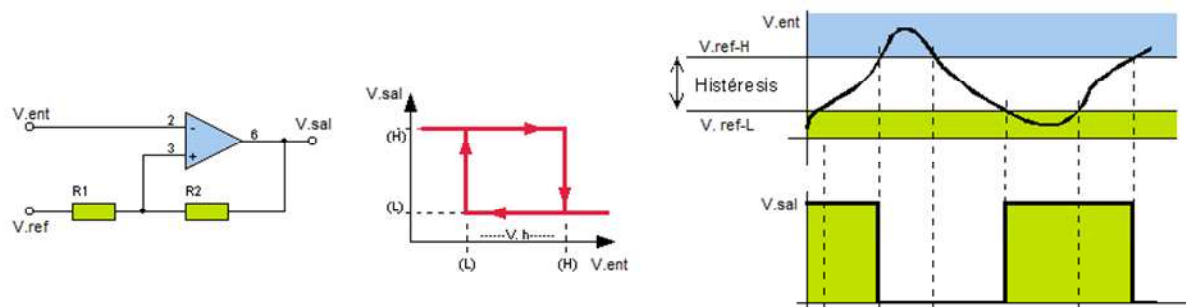
Las transiciones, estado de la salida (corte y saturación), en los comparadores se realizan en el momento en que surja una mínima diferencia entre las tensiones de entrada (valor diferencial). Sin embargo en ocasiones es necesario que dichas transiciones se produzcan después de haber rebasado un cierto nivel o umbral sobre el valor diferencial de las entradas. Dichos umbrales son: el “alto (H)” y el “bajo (L)”; con lo cual crean un efecto de histéresis (inercia).

Este tipo de circuitos recibe el nombre de “comparador con histéresis” o “Disparador Schmitt”, y se distinguen porque que llevan realimentación positiva mediante una resistencia conectada al terminal no inversor. Los comparadores con histéresis pueden ser: inversores, no inversores y de ventana.

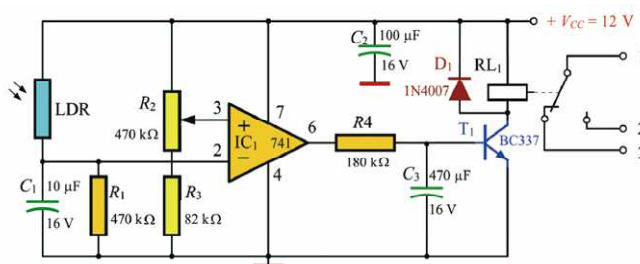
Comparador con histéresis no inversor. El funcionamiento es tal que si la tensión de la señal de entrada supera el nivel alto de referencia (V_{ref-H}), la salida conmuta al estado alto; en el cual se mantiene hasta que la tensión de entrada sea menor que el nivel bajo de referencia (V_{ref-L}); entonces la salida conmuta al estado bajo y en él se mantiene hasta que de nuevo la señal de entrada supere el nivel alto de referencia. La histéresis está determinada por la relación de las resistencias del bucle de realimentación positiva (R_1 , R_2).



Comparador con histéresis inversor. La señal entrada (V_{ent}) se aplica sobre el terminal inversor (-), siendo el no inversor (+) al que se le aplica la tensión de referencia (V_{ref}). Las fórmulas descritas para el comparador con histéresis no inversor son también aplicables a este tipo de circuito.



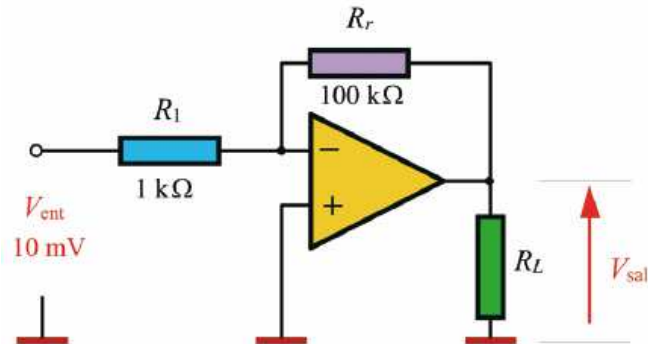
Los circuitos comparadores tienen diversas aplicaciones, por ejemplo como temporizadores a la activación o a la desactivación. También como conmutadores que se accionan automáticamente por las variaciones en transductores sensibles a una magnitud física (luz, temperatura, presión, etc.), tal es el caso del “interruptor crepuscular para el encendido automático del alumbrado”.



Ejercicio -5-

ANEXO: Ejercicios teórico-prácticos.**Ejercicio -1-.**

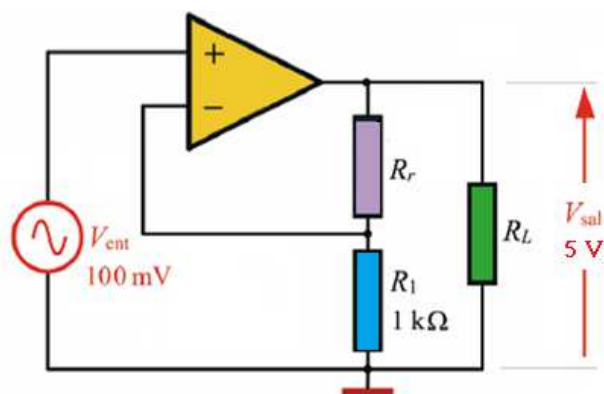
Calcular el valor de la tensión que habrá en la salida del circuito representado en el esquema, si en la entrada se aplica una señal de 10 mV.



Cálculos.

Ejercicio -2-.

Calcular el valor de la resistencia de realimentación (R_f) del circuito representado en el esquema, para que en la salida se obtenga una señal amplificada de 5 V cuando en la entrada se aplique una señal de 100 mV.



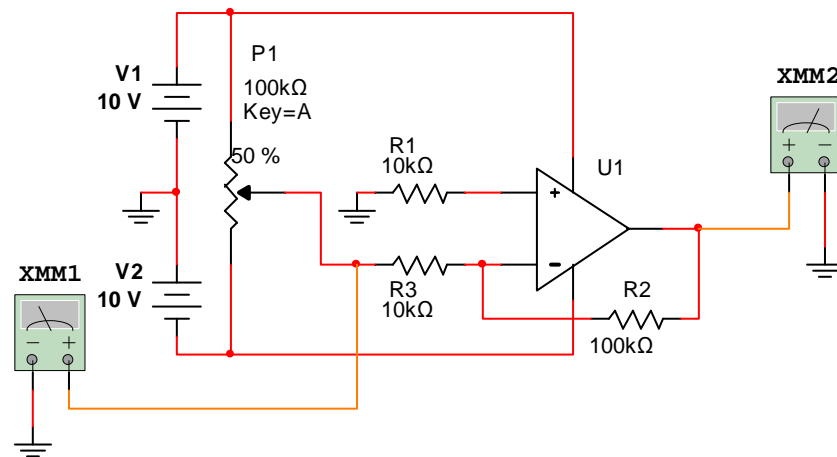
Cálculos.

Ejercicio -3-.

Dados los esquemas del “amplificador inversor” y los componentes, realizar las siguientes operaciones.

1/ Efectuar el montaje del circuito -A- y aplicarle una tensión simétrica de $\pm 10\text{V}$: *Puede utilizarse el simulador.*

2/ Ajustar el potenciómetro para obtener los valores de la tensión de entrada pedidos en la tabla, midiendo a la vez la tensión de salida resultante. Anotar los valores medidos y comprobar su coincidencia con los obtenidos mediante cálculo.

**-A-**

V_{entrada} (medido)	0	+0,2	+0,5	-0,2	-0,5
V_{salida} (medido)					
V_{salida} (cálculo)					
$A_V = -\frac{R_2}{R_3}$ (cálculo)					

Cálculos.

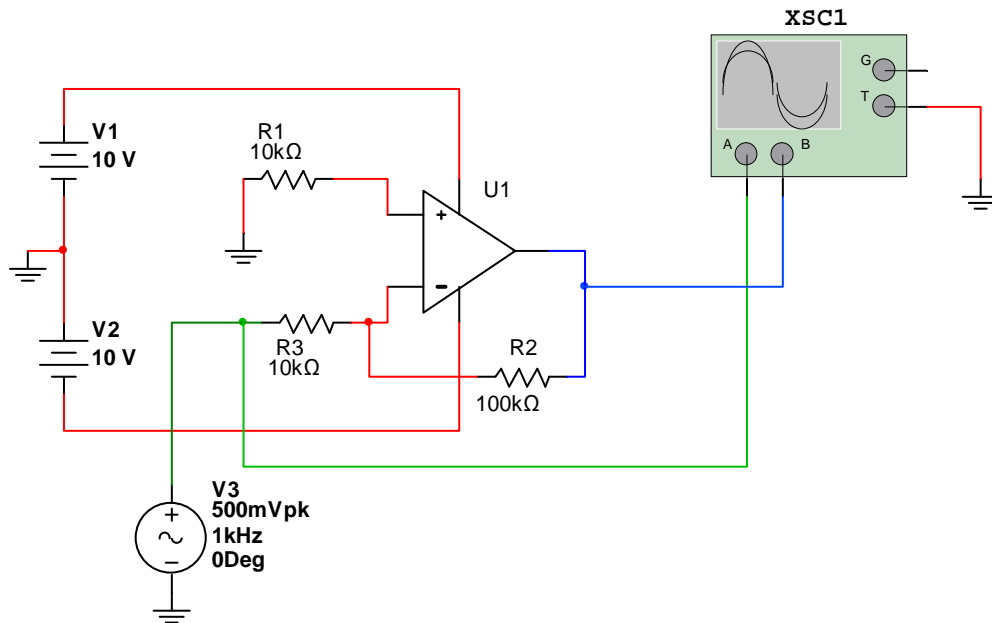
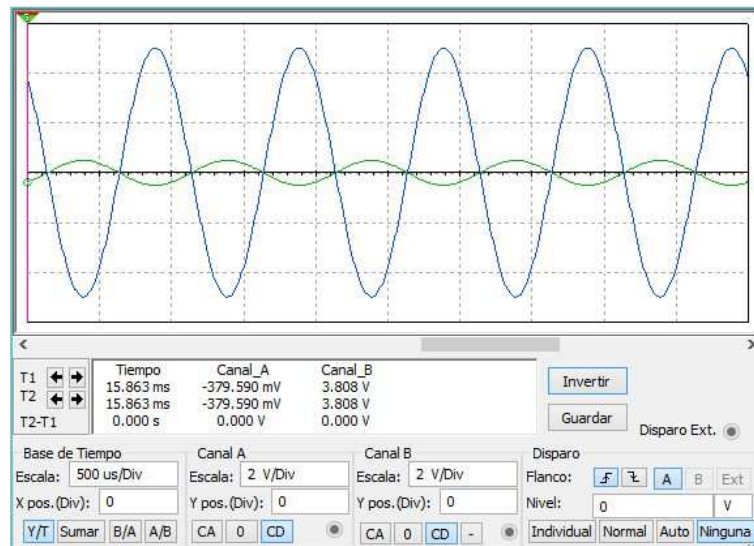
3/ Realizar el montaje del circuito -B-: *(Puede utilizarse el simulador).* Aplicar al terminal de entrada la señal de un generador senoidal (500 mVp / 1 kHz) y visualizar con el osciloscopio las señales de entrada y salida.

4/ Aumentar la amplitud de la señal de entrada y observar el efecto producido en la señal de salida.

5/ Volviendo la señal de entrada a su valor original (500 mVp / 1 kHz), cambiar el valor de la resistencia de realimentación (R_2), haciéndolo del siguiente modo:

- Resistencia de 50 kΩ.
- Resistencia de 200 kΩ.
- Resistencia infinita (sin realimentación).

Observar el efecto producido en la señal de salida.

**-B-**

6/ Completar las conclusiones.

Conclusiones.

Con el puente resistivo formado por R_2 y R_3 se limita la _____ del circuito. En ausencia de la resistencia de _____ (R_2), la ganancia es muy elevada y el amplificador llega a saturarse.

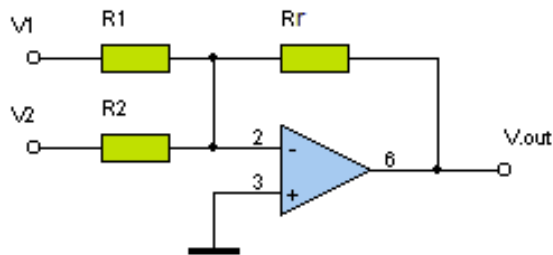
Al aplicar una señal a la entrada inversora, se observa que en la salida se obtiene dicha señal amplificada, sin embargo sale _____ 180° con respecto a la de entrada.

Si la señal de entrada es muy amplia ($>1V_p$), la señal de salida queda distorsionada por los _____ de las crestas (positivas y negativas). Esto se debe a que el amplificador se _____ al alcanzar la salida el valor de la alimentación ($\pm 10V$).

Este tipo de _____ también se ocasiona por un exceso de _____, fijada en este circuito por la relación de las resistencias _____ / _____.

Ejercicio -4-.

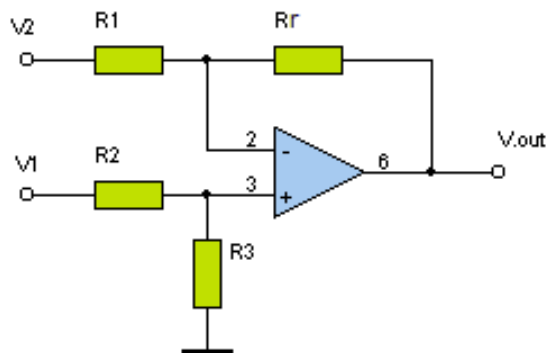
Tomando como referencia los circuitos “sumador inversor” y “restador”, si están alimentados con fuente simétrica de ($\pm 40\text{V}$), anotar en las tablas -1- y -2- los valores y signos correspondientes que se obtendrían en las salidas.



$U_{cc} = \pm 40 \text{ V}.$
 $R1 = R2 = 100 \Omega.$
 $Rr = 300 \Omega.$

Tabla -1- Sumador inversor		
V_1	V_2	V_{out}
0 V	+5 V	
+5 V	+5 V	
+5 v	-5 V	
+10 V	0 V	
+10 V	-5 V	

Cálculos.



$U_{cc} = \pm 40 \text{ V}.$
 $R1 = R2 = 100 \Omega.$
 $R3 = Rr = 300 \Omega.$

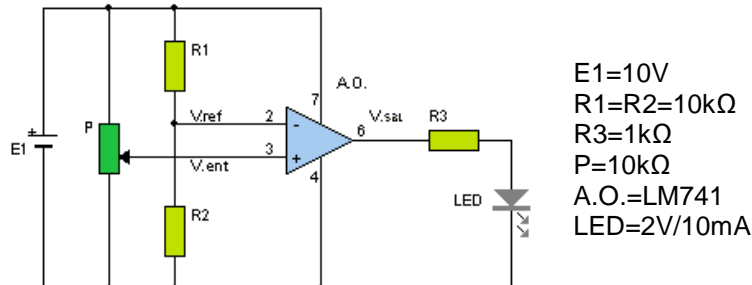
Tabla -2- Restador		
V_1	V_2	V_{out}
0 V	+5 V	
+5 V	+5 V	
+5 v	-5 V	
+10 V	0 V	
+10 V	-5 V	

Cálculos.

Ejercicio -5-

Dado el esquema del comparador no inversor y los componentes, realizar las siguientes operaciones.

- 1/ Determinar los valores teóricos pedidos en la tabla, considerando que la alimentación es de +10V.
- 2/ Realizar el montaje del circuito y comprobar el funcionamiento al accionar el potenciómetro.
- 3/ Medir las tensiones pedidas en la tabla, anotarlas y compararlas con los valores teóricos.

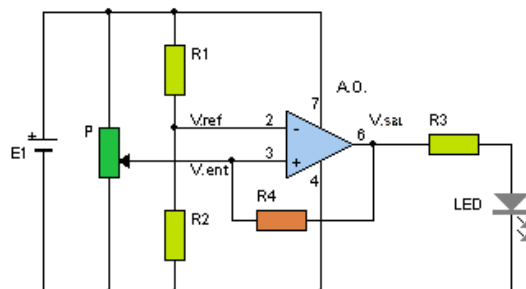


Comparador no inversor		Momento de encendido del LED		Momento de apagado del LED	
***	V_{ref} (2)	V_{ent} (3)	V_{sal} (6)	V_{ent} (3)	V_{sal} (6)
Teórico					
Medido					

Cálculos.

4/ Conectar una resistencia (R_4) de 4,7kΩ al terminal de salida (6) y al de entrada no inversora (3). Comprobar el funcionamiento al accionar el potenciómetro y observar el efecto producido.

5/. Medir la tensión de entrada (3) correspondiente a las transiciones de estado de la salida y anotarlas en la tabla.



	Momento de encendido del LED	Momento de apagado del LED
V_{ent} (3) medido		

Conclusiones.

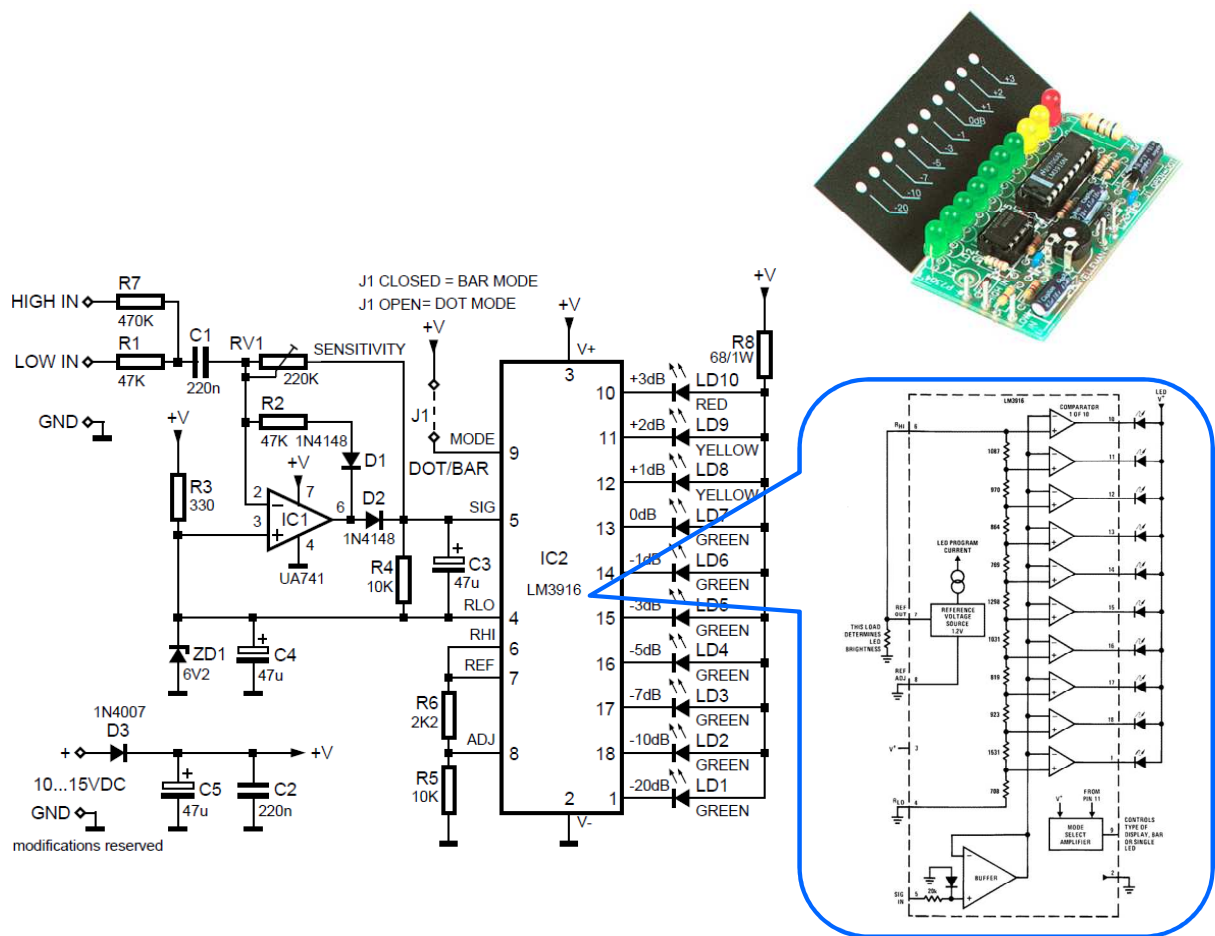
Con el comparador no inversor, la salida conmuta a nivel alto (LED _____) si la tensión de entrada (V_{ent}) es sutilmente _____ que la de referencia (V_{ref}). La conmutación a nivel bajo (LED apagado) se produce cuando la tensión de _____ es sutilmente _____ que la de _____. Esta sensibilidad se aprecia con un leve desplazamiento del cursor del potenciómetro por encima y por debajo de su posición intermedia.

Si se invierte la conexión de las entradas, esto es, la " V_{ref} " a la patilla _____ y la " V_{ent} " a la patilla _____, el circuito actuará conforme a un _____.

Al conectar una resistencia de realimentación al terminal no inversor se consigue un efecto de _____ o remanencia; esto es, que las transiciones del estado de la salida conmutan solo cuando la señal de entrada rebasa ciertos umbrales (alto y bajo) con respecto a la tensión de referencia, por lo tanto la conmutación ya no es tan crítica (0,1V). En este caso la histéresis conseguida con una resistencia de 4,7kΩ es de _____.

Ejercicio -6-.

Disponiendo del vúmetro (indicador de volumen) a 10 LEDs, razonar e interpretar su esquema y probar el funcionamiento con señales de audio.

**Especificaciones:**

El vúmetro es un instrumento que indicación de nivel de las señales eléctricas en equipos de audio, por ello también es conocido como “indicador del volumen”. Aunque tiene indicaciones en dB no es un sonómetro.

La calibración de este instrumento se hace en referencia a un nivel de 1 mW sobre 600 Ω , con lo que se pretende que el vúmetro indique el 100% o “0” decibelios (0 dB) cuando la tensión en la línea a la que se ha conectado sea 0,775 Vrms (voltios eficaces), conocida como tensión de referencia (V_0).

Con la indicación del vúmetro el usuario tiene constancia del nivel óptimo de la señal, evitando niveles superiores al 100% ($> 0 \text{ dB}_{\text{mW}}$) que ocasionan distorsión en los procesos de amplificación, grabación, etc.

Este instrumento también tiene aplicación como indicador en niveles de otras magnitudes como temperatura, presión, humedad, etc.

Datos técnicos:

- 10 LED formando barra de puntos de nivel, considerando que el 100% del nivel de señal corresponde 0 dB = 0,775 Vrms. Dichos puntos de nivel son:
(-20 dB, -10 dB, -7 dB, -5 dB, -3 dB, -1 dB, 0 dB, +1 dB, +2 dB, +3 dB).
- Rango de frecuencia: 20 Hz a 30 kHz.
- Entrada baja (LOW_IN) para 0 dB: margen de 150 mVrms a 6 Vrms (47 k Ω). Esta entrada es adecuada para la conexión a la línea de entrada auxiliar del amplificador.
- Entrada alta (HIGH_IN) para 0 dB: margen de 1,5 Vrms a 60 Vrms (470 k Ω). Esta entrada se puede conectar a una salida de altavoz del amplificador.
- Alimentación: 10 a 15 Vdc / 110 mA (consumo máximo).