

TEMA 8

EL AMPLIFICADOR OPERACIONAL

Fuente : Ciencias Místicas www.cienciasmisticas.com.ar

En los capítulos anteriores hemos presentado componentes electrónicos discretos, que habitualmente se fabrican y encapsulan en unidades separadas, aptas para ser incorporadas en la fabricación de circuitos. Ahora es el momento para avanzar un paso más, e introducir el concepto de *circuito integrado*. Un circuito integrado se diferencia de los circuitos convencionales en que todos sus componentes se fabrican en el mismo bloque de silicio. Con ello se consiguen múltiples ventajas:

- Reducción de tamaño
- Mayor fiabilidad, pues se eliminan todos los problemas asociados con la interconexión de los componentes
- Menor coste, si el número de circuitos fabricados es elevado

A la hora del diseño, también ofrece ventajas el uso de los circuitos integrados, puesto que estos se comportan como *bloques* con un comportamiento definido. De esta forma, en muchas ocasiones no es necesario analizar el esquema completo del integrado para predecir su funcionamiento en el circuito.

En este capítulo presentamos uno de los circuitos integrados más empleados: el amplificador operacional. Su nombre se debe a que empezaron a emplearse en áreas de computación e instrumentación. Los primeros amplificadores operacionales estaban fabricados con componentes discretos (válvulas, después transistores y resistencias) y su coste era desorbitado. A mediados de la década de los 60 comenzó la producción de operacionales integrados. Pese a que sus características eran pobres (comparándolos con los de hoy en día), y su coste relativamente elevado, este hecho supuso el comienzo de una nueva era en el diseño electrónico. Los diseñadores comenzaron a incorporar operacionales en sus circuitos. La demanda de nuevos y mejores dispositivos fue atendida por los fabricantes de componentes electrónicos, y en unos pocos años se estableció una amplia gama de operacionales de alta calidad y bajo costo.

Una de los factores que más ha contribuido al éxito de los amplificadores operacionales es su versatilidad. Se trata de un circuito de propósito general que puede emplearse en multitud de aplicaciones. Por si fuera poco, los modelos necesarios para analizar su comportamiento son muy sencillos, y en la gran mayoría de los casos, puede asumirse un comportamiento ideal.

Será precisamente este comportamiento ideal el primer punto que se tratará en el siguiente apartado. Posteriormente se explicarán los diversos modos de operación, para finalizar el tema con unos sencillos circuitos de aplicación.

8.1 EL AMPLIFICADOR OPERACIONAL IDEAL

Tal y como acabamos de exponer, el componente electrónico conocido como *amplificador operacional* es realmente un circuito complejo formado por muchos transistores y otros componentes en un solo circuito integrado. El esquema funcional de un amplificador operacional puede verse en la Figura 8.1.

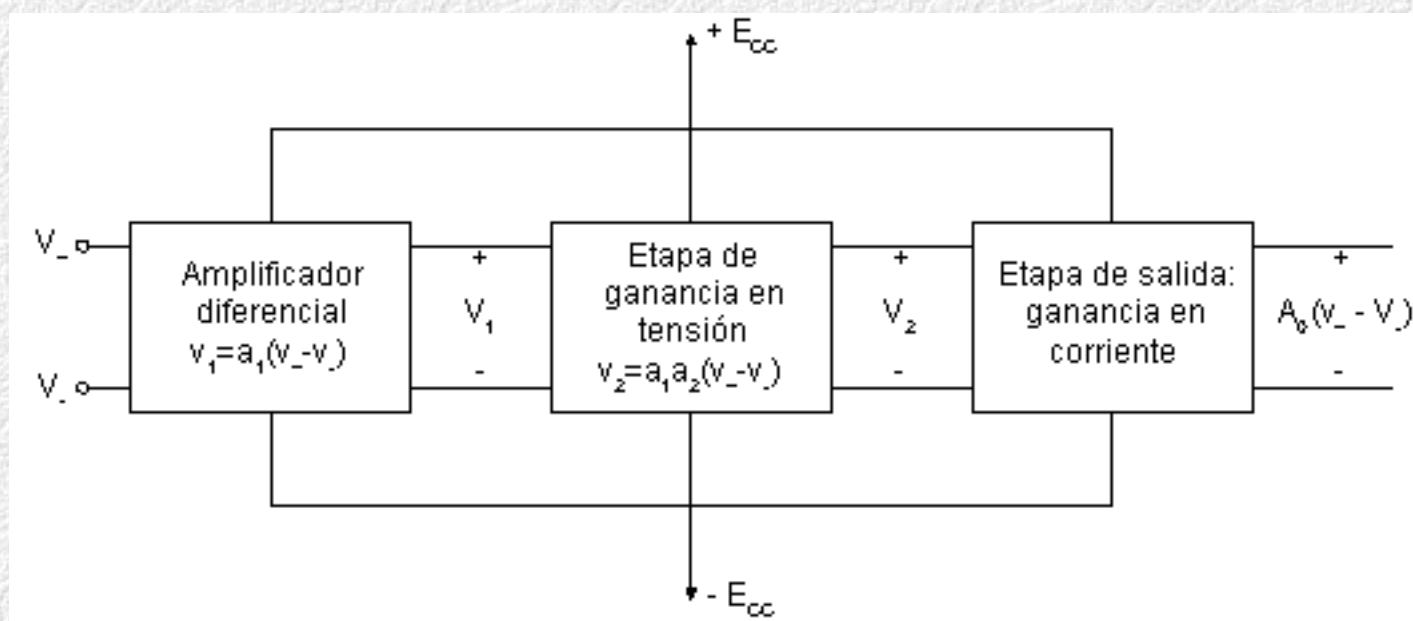


Figura 8.1: Esquema funcional del amplificador operacional

El amplificador operacional tiene dos entradas. En la primera etapa se amplifica levemente la diferencia de las mismas. Esto se suele expresar también diciendo que se amplifica el *modo diferencial* de las señales, mientras que el *modo común* se rechaza. Posteriormente se pasa a segunda etapa de ganancia intermedia, en la que se amplifica nuevamente el modo diferencial filtrado por la primera. La ganancia total es muy elevada, típicamente del orden de 10^5 . Finalmente, en la última etapa no se amplifica la tensión, sino que se posibilita el suministrar fuertes intensidades.

Para que este dispositivo pueda funcionar es obvio que necesitará una fuente de alimentación que polarice sus transistores internos. Habitualmente se emplean dos fuentes de alimentación, una positiva y otra negativa. De este modo se permite que la salida sea de uno u otro signo. Evidentemente, la tensión de salida nunca podrá superar los límites que marquen las alimentaciones. No olvidemos que el operacional está formado por componentes no generadores.

Una vez realizada esta presentación, hay que aclarar que en la mayoría de los casos, es posible conocer el comportamiento de un circuito en el que se inserta un operacional sin tener en cuenta su estructura interna. Para

ello vamos a definir, como siempre, un componente ideal que nos permita una primera aproximación. Y también como es habitual, los cálculos rigurosos necesitarán de modelos más complejos, para los que sí es necesario estudiarlo más profundamente.

El símbolo del amplificador operacional es el que se muestra en la Figura 8.2, junto con el equivalente circuital ideal.

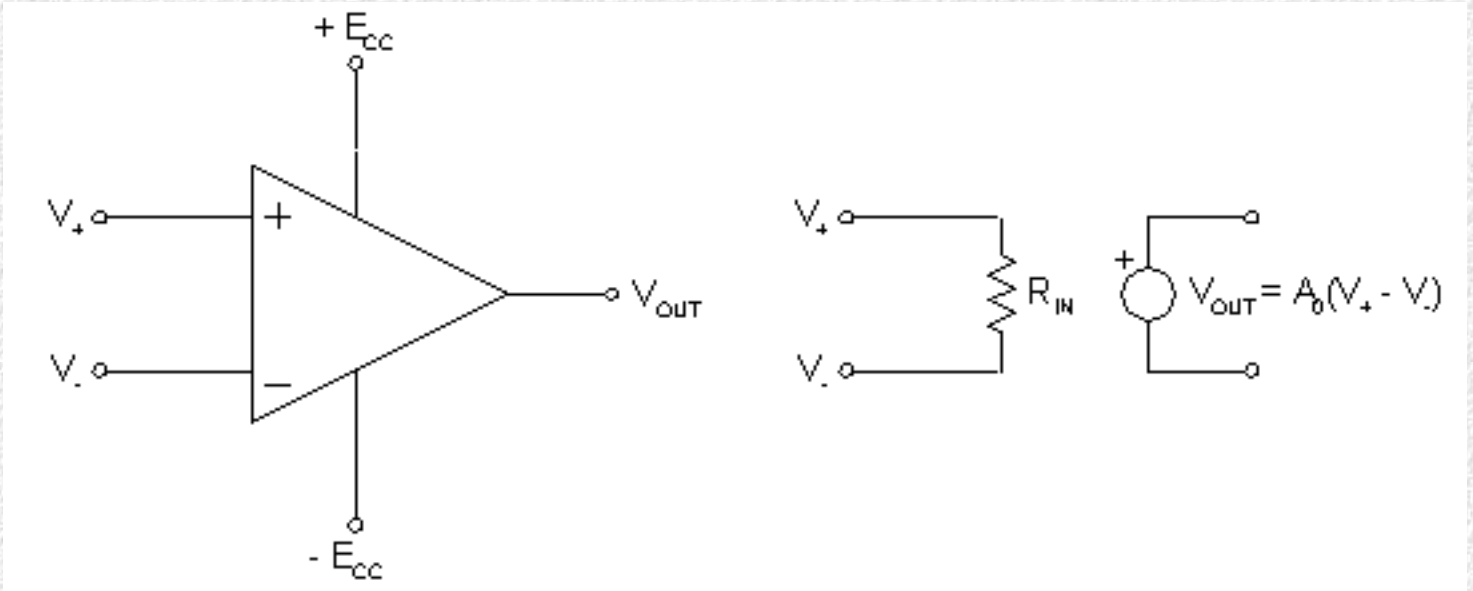


Figura 8.2: Representación del amplificador operacional ideal

El operacional tiene cinco terminales:

- Entrada no inversora (V_+)
- Entrada inversora (V_-)
- Alimentación positiva (E_{CC})
- Alimentación negativa ($-E_{CC}$)
- Salida (V_{OUT})

A la hora de resolver circuitos se suelen omitir las alimentaciones, ya que como se verá, no afectan al funcionamiento. La representación circuital está formada por una resistencia de entrada, que une los dos terminales, y un generador de tensión de salida. La tensión de salida es proporcional a la diferencia de las entradas.

Las características más relevantes del amplificador operacional son:

- **Resistencia de entrada muy elevada:** A menudo es mayor que 1 M.
- **Ganancia muy elevada:** Mayor que 10^5 .

Las consecuencias que se derivan de estas características son:

- La corriente de entrada es nula: Al ser la resistencia de entrada tan elevada, la corriente que circula por los terminales inversor y no inversor puede despreciarse.
- La ganancia puede considerarse infinita.

Con estas dos aproximaciones puede abordarse ya el análisis de algunos circuitos sencillos.

8.2 FUNCIONAMIENTO EN LAZO ABIERTO

La Figura 8.3 muestra un esquema en el que el operacional funciona en lazo abierto, es decir, la entrada es independiente de la salida.

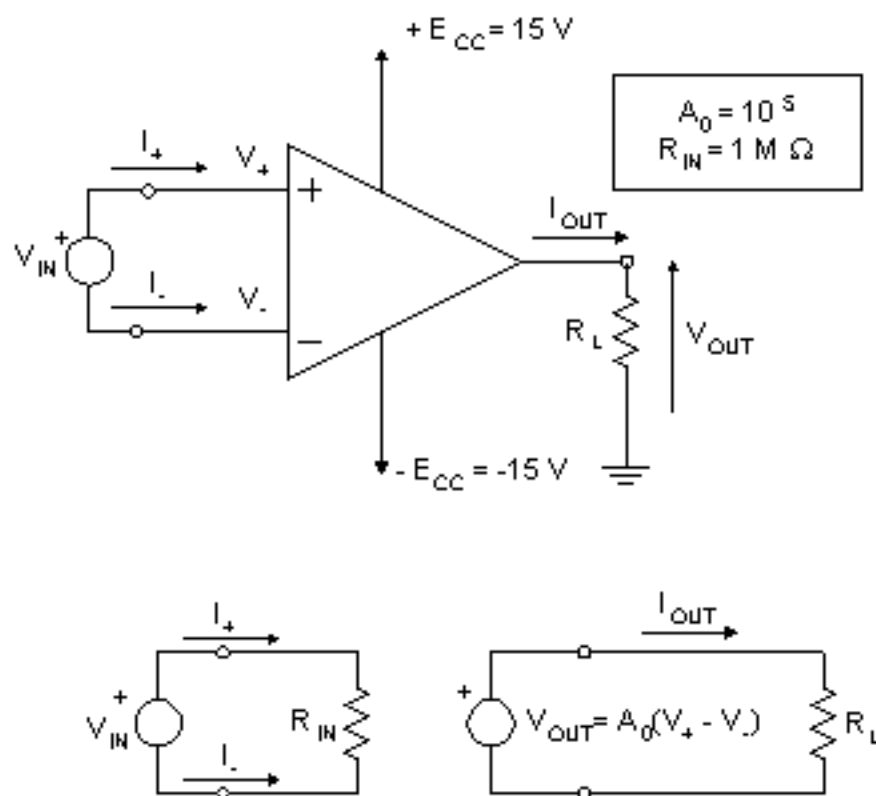


Figura 8.3: Funcionamiento en lazo abierto

En el sencillísimo circuito de la figura, es muy fácil determinar las corrientes y tensiones:

$$I_+ = -I_- = \frac{V_{IN}}{R_{IN}} = V_{IN} 10^{-6}$$

$$V_{OUT} = A_0 V_{IN} = V_{IN} 10^5$$

$$I_{OUT} = \frac{V_{OUT}}{R_L}$$

Hagamos unos números: Si $V_{IN} = 15 \text{ V} \Rightarrow I_+ = 15 \cdot 10^{-6} \text{ A}$; $V_{OUT} = 1,5 \text{ V}$. La corriente de entrada es despreciable. Ningún aparato de medida convencional sería capaz de detectarla. Por lo tanto, a partir de ahora vamos a aceptar siempre que:

$$I_+ = I_- = 0$$

La tensión de salida es proporcional a la de entrada. Si $V_{IN} = 100 \text{ V} \Rightarrow V_{OUT} = 10 \text{ V}$. ¿Qué sucedería si V_{IN} vale 200 V?. Según la fórmula obtenida, V_{OUT} sería de 20 V, pero no olvidemos que la alimentación es de 15 V, es decir, **la salida no puede superar los 15 V**. A partir de 150 V en la entrada, por mucho que aumentemos la tensión no obtendremos más de 15 V en la salida: **el amplificador se satura**. En la figura 10.4 se representa la curva $V_{IN} - V_{OUT}$ de este ejemplo.

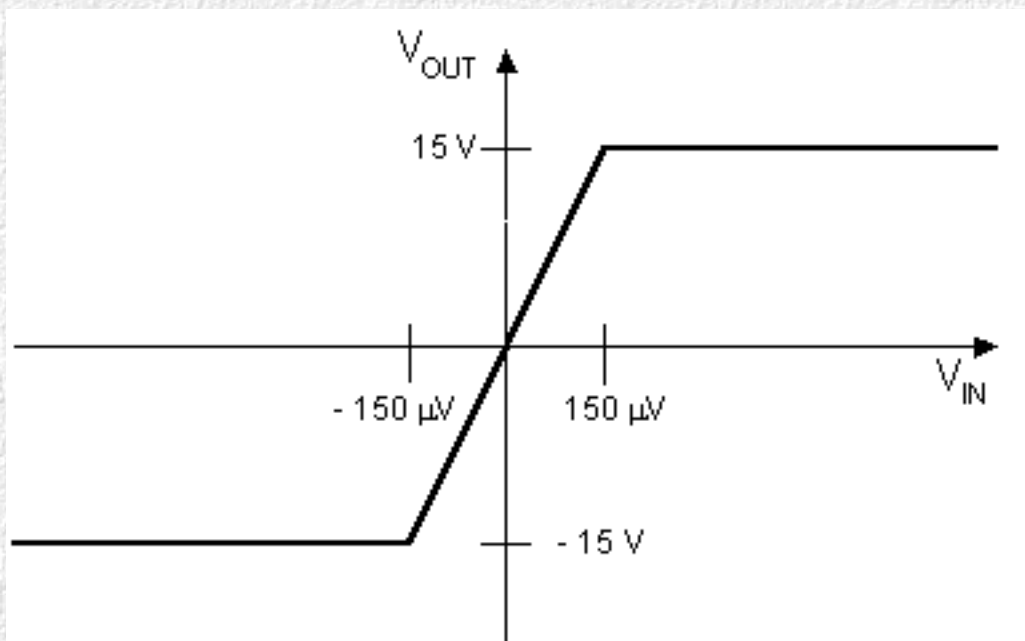


Figura 8.4: Curva $V_{OUT} - V_{IN}$ en lazo abierto

El funcionamiento como amplificador en lazo abierto presenta varios inconvenientes:

- El intervalo de tensiones que pueden amplificarse es muy pequeño (en el ejemplo 150 V). El amplificador se satura con gran facilidad.
- La tensión de salida depende directamente de la ganancia del operacional. Este parámetro tiene fuertes dispersiones de unos componentes a otros.

Por estos motivos, nunca se emplea este esquema cuando se quieren amplificar señales mediante operacionales. En la práctica cualquier señal provoca la saturación. Esto sí se emplea en los comparadores, como se explicará más adelante.

8.3 LA REALIMENTACION

El concepto de *realimentación* implica que la entrada del amplificador operacional no es independiente de la salida. Parte de la señal de salida se aplica a la entrada, con lo que se puede controlar la ganancia. Para comprender mejor este concepto veamos un sencillo ejemplo: El seguidor de tensión (Figura 8.5).

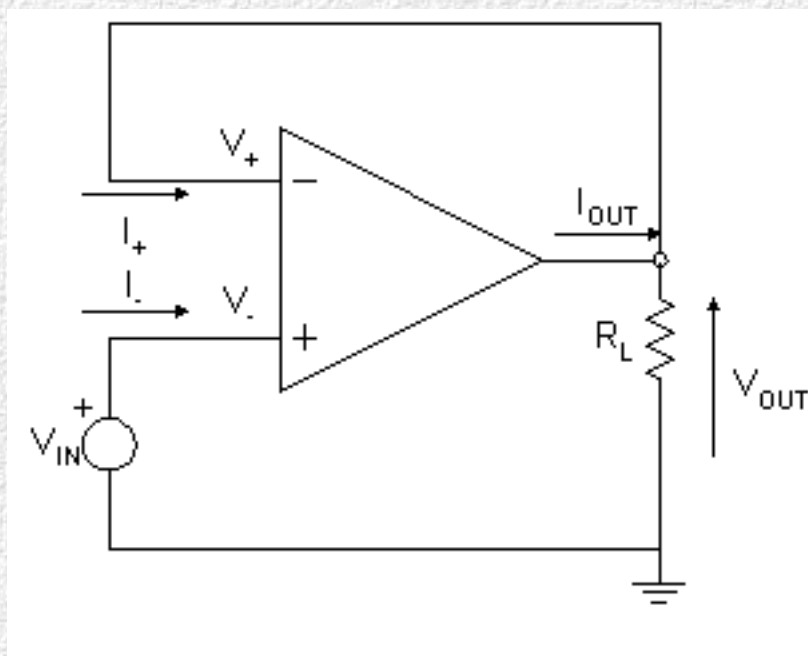


Figura 8.5: Seguidor de tensión

El análisis del circuito permite plantear las siguientes ecuaciones:

$$V_- = V_{IN}$$

$$V_+ = V_{OUT}$$

Además podemos añadir las ecuaciones características del operacional:

$$I_+ = I_- = 0$$

$$V_{OUT} = A_0(V_+ - V_-)$$

Sustituyendo:

$$V_{OUT} = A_0(V_{OUT} - V_{IN}) \Rightarrow V_{OUT} = V_{IN} \frac{A_0}{A_0 - 1}$$

Si $A_0 = 100.000$, $\Rightarrow V_{OUT} = 1,00001 V_{IN}$. Evidentemente, podemos y **debemos** olvidarnos del 5° decimal:

$$V_{OUT} = V_{IN}$$

Además, de este ejemplo podemos sacar una interesante conclusión: al aplicar la realimentación:

$$e_+ = e_-$$

Este resultado, que ha sido obtenido en un caso particular, **es general**, y surge de considerar la ganancia infinita. Siempre que se aplica la realimentación puede admitirse dicha aproximación. Podríamos haber llegado a la misma conclusión razonando de la siguiente manera: la tensión de salida debe estar comprendida entre los límites de la alimentación (15 V, por ejemplo). Si esto es así, la diferencia entre las entradas puede ser, como mucho, la alimentación entre la ganancia (15/10000). Este valor suficientemente pequeño como para poder despreciarse frente al resto de magnitudes del circuito.

Un último apunte sobre la realimentación: en la Figura 8.5 se puede apreciarse que la realimentación se aplica a la entrada inversora (-) (realimentación degenerativa). Esta es una condición necesaria para que el circuito funcione correctamente en la práctica. Si se aplica una realimentación regenerativa (+) el amplificador operacional se saturará inmediatamente. El razonamiento es muy simple: supongamos que en los cables de realimentación se capta una interferencia del exterior. Si la realimentación es regenerativa, esta interferencia aparecerá como un aumento de la tensión de salida. El aumento de la tensión de salida provoca un aumento de la entrada, que vuelve a provocar un aumento de la salida.... no hay ningún recurso que atenúe la perturbación, y se llegará a la saturación.

8.4 MODELOS DEL AMPLIFICADOR OPERACIONAL IDEAL

Para atacar un problema con operacionales, lo primero que hay que identificar es el modo en que está trabajando:

- Lazo abierto
- Realimentación degenerativa
- Realimentación regenerativa

Los modelos para cada caso son:

- **Lazo abierto:** $I_+ = I_- = 0$; $V_{OUT} = A_0 (V_+ - V_-)$ En la práctica, si $V_+ > V$ el operacional estará saturado a la tensión $+E_{CC}$. En caso contrario, la tensión de salida será $-E_{CC}$.
- **Realimentación degenerativa:** $I_+ = I_- = 0$; $e_+ = e_- (A_0)$
- **Realimentación regenerativa:** $I_+ = I_- = 0$; operacional saturado

8.5 CIRCUITOS DE APLICACION BASICOS

He aquí tres de los circuitos básicos más populares. En los dos primeros el operacional funciona con

realimentación negativa. En el tercero se aprovecha la elevada ganancia en lazo abierto.

8.5.1 AMPLIFICADOR NO INVERSOR

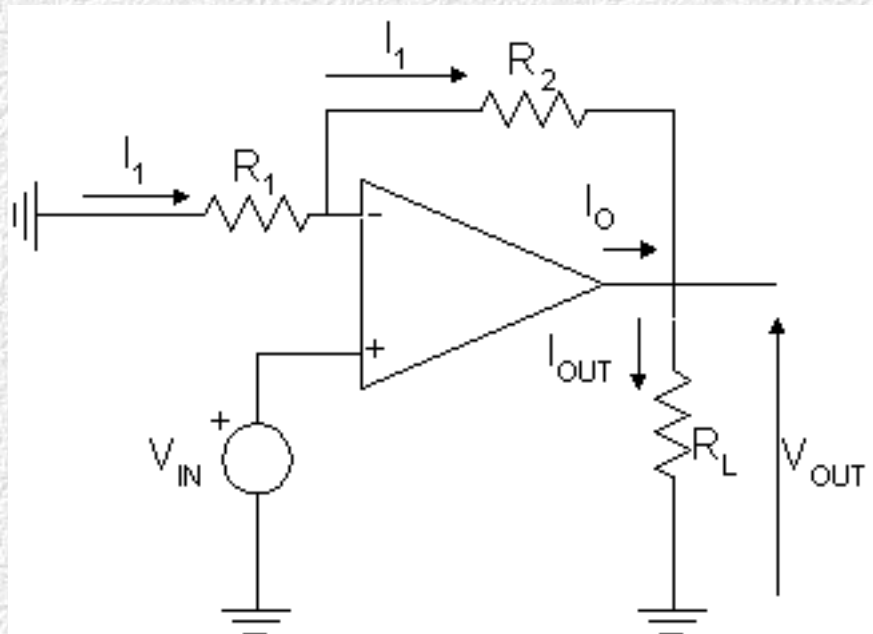


Figura 8.6: Amplificador no inversor

Ecuaciones del operacional (realimentación negativa):

$$I_+ = I_- = 0$$

$$e_+ = e_-$$

Ecuaciones del circuito:

$$e_+ = V_{IN}$$

$$e_- = -R_1 I_1 \Rightarrow I_1 = -\frac{e_-}{R_1} = -\frac{V_{IN}}{R_1}$$

$$V_{OUT} = -I_1(R_1 + R_2) = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)V_{IN} \implies \text{Ganancia} \quad A_V = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

$$I_{OUT} = \frac{V_{OUT}}{R_L} = \frac{1}{R_L} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)V_{IN}$$

$$I_O = I_{OUT} - I_1 = \frac{1}{R_L} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)V_{IN} + \frac{V_{IN}}{R_1}$$

Como características más llamativas cabe destacar:

- Ganancia del circuito independiente de la del operacional.
- Ganancia fijada por el cociente de dos resistencias.
- Resistencia de entrada infinita.
- La entrada y la salida son del mismo signo (no inversor)

8.5.2 AMPLIFICADOR INVERSOR

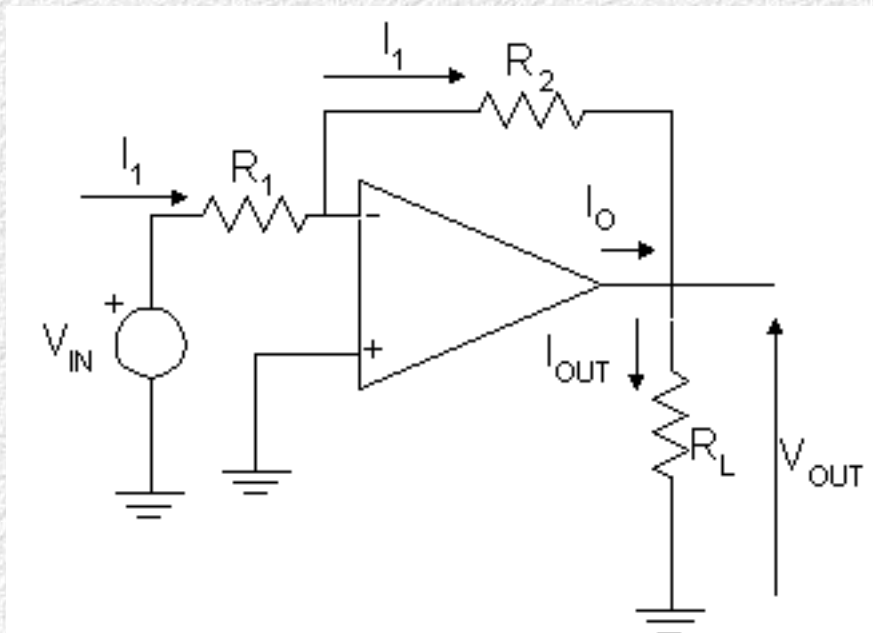


Figura 8.7: Amplificador no inversor

Ecuaciones del operacional (realimentación negativa):

$$I_+ = I_- = 0$$

$$e_+ = e_-$$

Ecuaciones del circuito:

$$e_+ = 0$$

$$e_- = V_{IN} - R_1 I_1 = 0 \Rightarrow I_1 = \frac{V_{IN}}{R_1}$$

$$V_{OUT} = -I_1 R_2 = -\frac{R_2}{R_1} V_{IN} \Rightarrow \text{Ganancia } A_v = -\frac{R_2}{R_1}$$

$$I_{OUT} = \frac{V_{OUT}}{R_L} = -\frac{1}{R_L} \frac{R_2}{R_1} V_{IN}$$

$$I_o = I_{OUT} - I_1 = \frac{1}{R_L} \frac{R_2}{R_1} V_{IN} + \frac{V_{IN}}{R_1}$$

Como características más llamativas cabe destacar:

- Ganancia del circuito independiente de la del operacional.
- Ganancia fijada por el cociente de dos resistencias.
- Resistencia de entrada R_1 .
- La entrada y la salida son de signo opuesto (inversor)

8.5.3 COMPARADOR

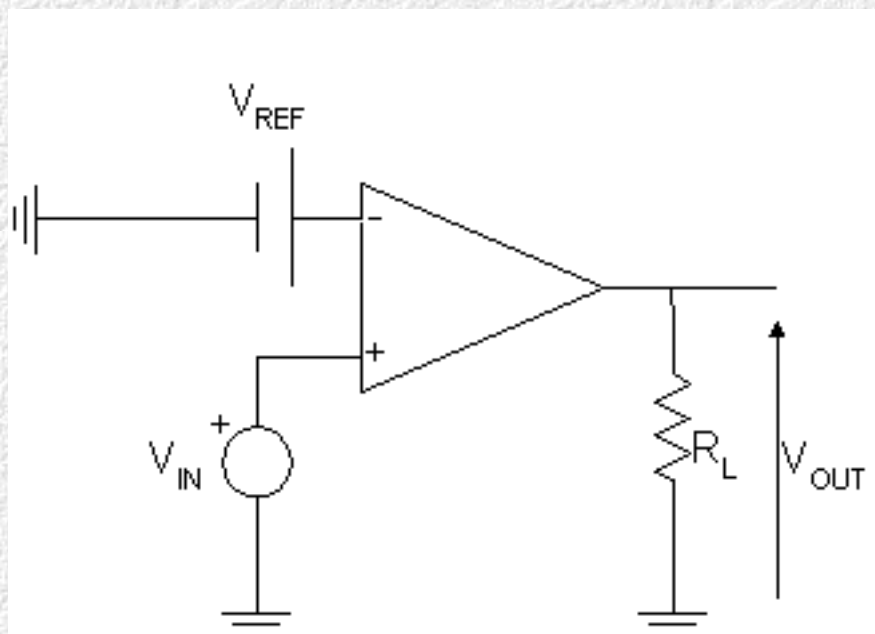


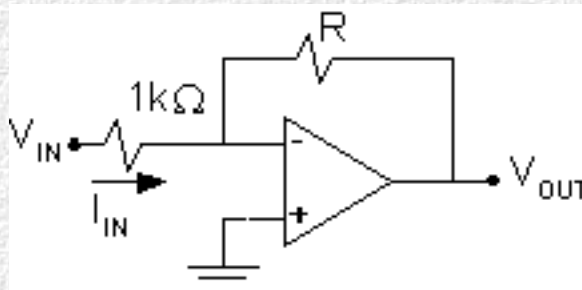
Figura 8.8: Circuito comparador con una referencia

Suponiendo que el operacional se alimenta a E_{CC} :

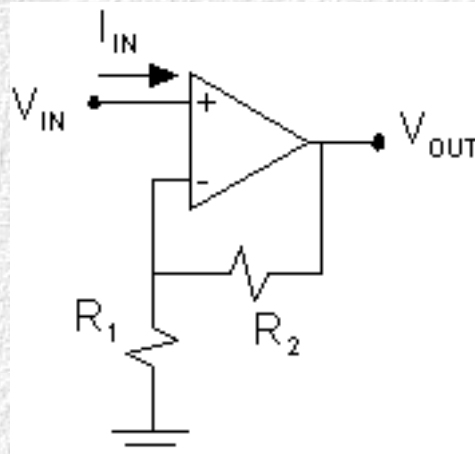
$$V_{IN} > V_{REF} \Rightarrow V_{OUT} = E_{CC}$$

$$V_{IN} < V_{REF} \Rightarrow V_{OUT} = -E_{CC}$$

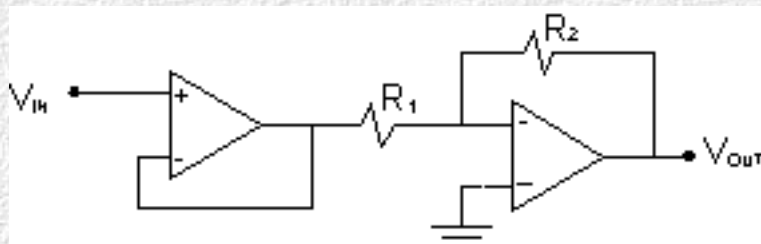
1. Calcular el valor de R para que la ganancia de tensión sea 10 ($A_V = V_{OUT}/V_{IN}$). ¿Cual es la Resistencia de entrada del circuito $R_{IN} = V_{IN}/I_{IN}$?



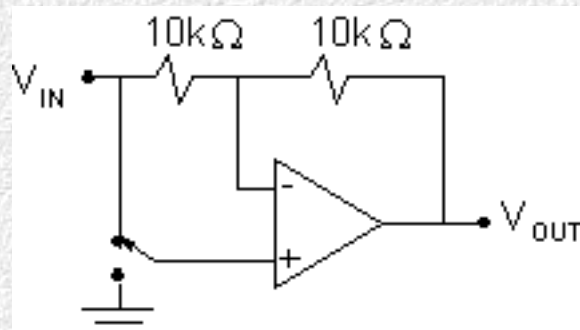
1. Hallar la relación entre V_{IN} y V_{OUT} en función de las resistencias R_1 y R_2 . Calcular la resistencia de entrada del circuito $R_{IN}=V_{IN}/I_{IN}$.



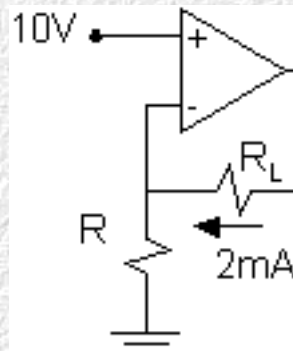
1. En el circuito de la figura identificar la función de cada uno de los amplificadores operacionales de la figura y calcular la relación entre la tensión de salida y la tensión de entrada.



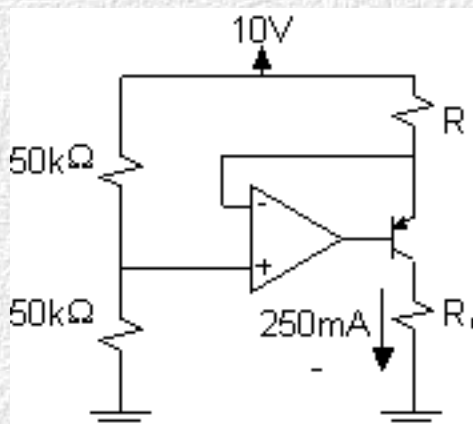
1. Analizar el funcionamiento del cuando se hace contacto entre la entrada no inversora del amplificador y la entrada V_{IN} del circuito. Realizar el mismo cálculo si se realiza el contacto entre la entrada no inversora y tierra.



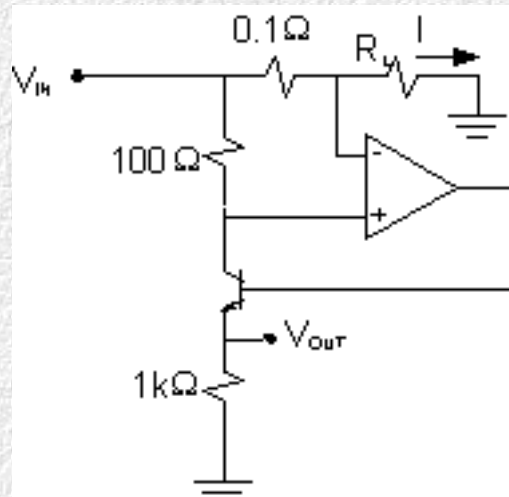
1. Se quiere diseñar una fuente de intensidad con un amplificador operacional. Para ello se considera el circuito de la figura. Calcular el valor de R si se quiere que a través de R_L pase una intensidad de 2 mA.



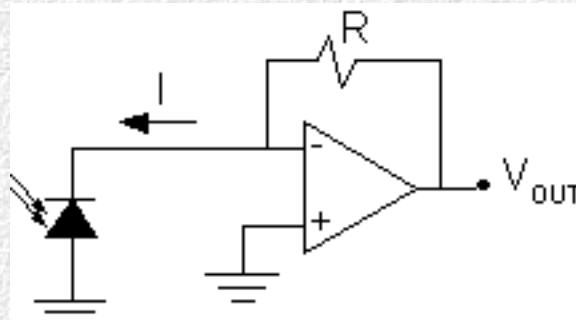
1. Es corriente utilizar el esquema de la figura para fuentes de intensidad cuando el valor de la corriente es relativamente alto. Ajustar el valor de R si se desea que circule por la carga R_L una corriente de 250 mA. Suponer la ganancia del transistor muy grande.



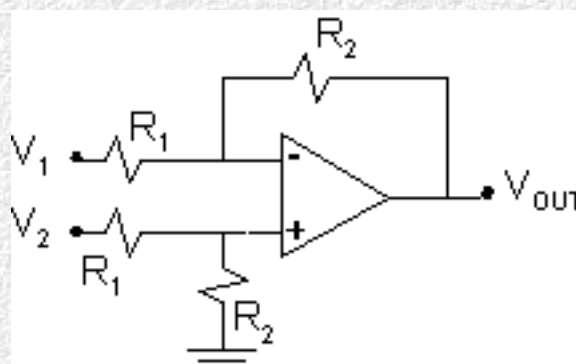
1. Se quiere monitorizar la intensidad que atraviesa cierta máquina eléctrica, representada mediante la carga R_L . Para ello se ha diseñado un circuito con un amplificador operacional tal y como aparece en la figura. Se pide:
 1. Obtener la tensión de salida V_{OUT} en función de la intensidad que atraviesa la máquina.
 2. ¿Si la tensión V_{OUT} del circuito son 3V, cual será la intensidad que consume la máquina?



1. Se pretende medir la cantidad de luz en el ambiente con un fotodiodo tal y como aparece en la figura. El fotodiodo tiene una sensibilidad luminosa de 2nA/lx . Se desea que la salida varíe entre 0 y 10V para cantidades de luz entre 0 y 4000 lx. Calcular el valor de R.

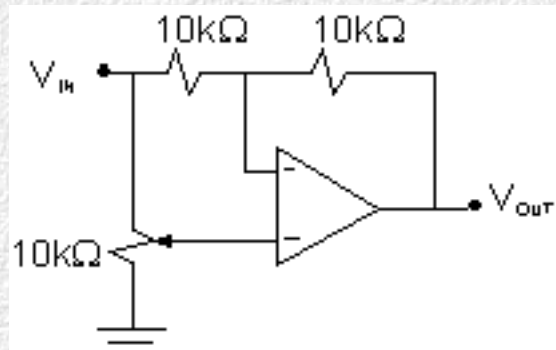


1. Obtener la expresión de la tensión de salida V_{OUT} en función de las tensiones de entrada V_1 y V_2 .



1. En el circuito de la figura, calcular la tensión de salida V_{OUT} en función de la tensión de entrada V_{IN} para los casos en que el potenciómetro haga contacto en:
 1. el extremo superior
 2. el extremo inferior

3. el punto medio

[| Retroceder |](#)