

---

---

---

# SISTEMAS DE ADQUISICIÓN DE DATOS

## Introducción al amplificador operacional



Marcela Vallejo Valencia

---

---

---

# Contenido

<b>1. CONCEPTOS DE AMPLIFICADORES OPERACIONALES.....</b>	<b>3</b>
1.1 UNA INTRODUCCIÓN AL AMPLIFICADOR OPERACIONAL.....	3
1.1.1 Apariencia física, símbolo y terminales .....	4
1.1.2 ¿Qué hay al interior de ese circuito integrado que forma un amplificador operacional? .....	6
1.1.3 Modelo ideal del amplificador operacional .....	7
1.1.4 El amplificador en lazo abierto: su uso como comparador de señales .....	10
1.1.5 El amplificador operacional en realimentación negativa .....	12
1.1.6 El amplificador operacional en realimentación positiva:.....	15
1.2 UN ACERCAMIENTO AL FUNCIONAMIENTO REAL DEL AMPLIFICADOR .....	15
1.2.1 La impedancia de entrada .....	15
1.2.2 La ganancia.....	16
1.2.3 El voltaje de polarización y el voltaje de saturación .....	16
1.2.4 El ancho de banda .....	17
1.2.5 La velocidad de cambio de la salida (Slew rate) .....	19
1.2.6 La corriente de salida.....	20
1.2.7 Rechazo al modo común (CMRR).....	20
<b>2. AMPLIFICADORES INVERSORES Y NO INVERSORES Y SEGUIDORES DE VOLTAJE .....</b>	<b>21</b>
2.1 EL AMPLIFICADOR INVERSOR .....	21
2.2 EL AMPLIFICADOR NO INVERSOR.....	28
2.3 SEGUIDORES DE VOLTAJE .....	34
<b>3. COMPARADORES Y DETECTORES DE CRUCE .....</b>	<b>41</b>
DETECTOR DE CRUCE POR CERO.....	45
DETECTOR INVERSOR DE CRUCE POR CERO.....	47

## **1. CONCEPTOS DE AMPLIFICADORES OPERACIONALES**

En este capítulo se presentan algunos conceptos básicos del amplificador operacional. Para iniciar, se redefinirán algunos conceptos básicos en cuanto a su símbolo, apariencia física y terminales de conexión, luego se pasará a describir cómo funciona un amplificador operacional desde su modelo ideal. Para terminar, se tratarán algunas consideraciones de su uso práctico y se verá el tipo de funcionamiento que pueden tener según el tipo de realimentación con el que se conecte (lazo abierto, realimentación positiva y negativa).

En capítulos posteriores se el uso del amplificador operacional en varias aplicaciones para el acondicionamiento de señales.

### **1.1 Una introducción al amplificador operacional**

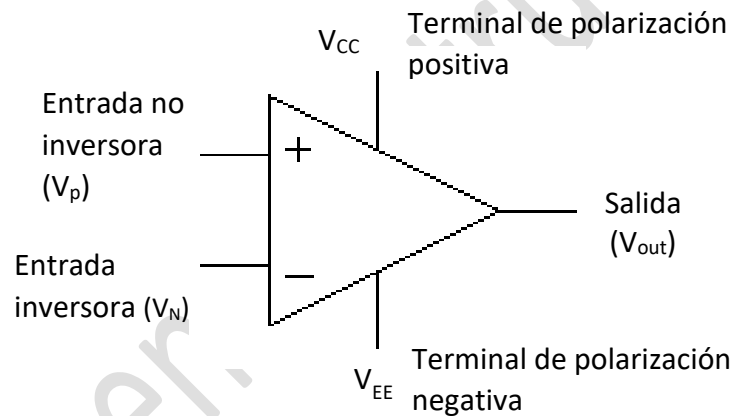
Podemos definir a los amplificadores operacionales como circuitos integrados que forman amplificadores electrónicos diferenciales de alta ganancia. Puede que para muchos estudiantes esta definición no sea del todo clara o deje muchos interrogantes acerca de su funcionamiento, pero en las siguientes secciones iremos aclarando poco a poco en qué consiste exactamente un amplificador operacional y cuáles son algunos de sus usos más importantes de tal manera que al final de este capítulo esta definición esté mucho más clara.

En cuanto a su uso, por el momento podemos decir que los amplificadores operacionales son de gran utilidad puesto que, según la forma en la que se conecten, pueden cumplir diversas funciones las cuales, en general, consisten en realizar operaciones entre señales (de allí su nombre). Por ejemplo, un amplificador operacional puede usarse para amplificar una señal (multiplicarla por una constante), sumar o restar dos señales, realizar una derivación o una integración de la señal o comparar dos niveles de voltaje, entre otras operaciones.

Antes de empezar con la explicación acerca de cómo funcionan estos dispositivos, revisaremos su apariencia física, su símbolo circuital y algunas características básicas.

### 1.1.1 Apariencia física, símbolo y terminales

Los amplificadores operaciones son dispositivos de dos entradas y una salida. Las entradas suelen identificarse como la entrada inversora (identificada con un signo menos) y la entrada no inversora (identificada con un signo +). Además de estas tres terminales, los amplificadores operacionales tienen dos terminales adicionales, las cuales sirven para polarizar el circuito. Esto quiere decir que, sin importar la configuración que el amplificador use, siempre llevará un voltaje de polarización necesario para su funcionamiento; este voltaje puede ser sencillo (sólo voltaje positivo) o dual (voltaje positivo y negativo), según la referencia específica del amplificador operacional y su aplicación. El símbolo circuital del amplificador y sus terminales se pueden ver en la Figura 1-1.



*Figura 1-1 Símbolo y terminales del amplificador operacional*

Debe tenerse en cuenta que en muchos esquemas de circuitos es posible que sólo se muestren las terminales de entrada y salida del amplificador operacional, omitiendo las de polarización como se muestra en la Figura 1-2. Esto no quiere decir que en estos casos no se utilice la polarización, si no que se asume por defecto que estas terminales serán conectadas a la alimentación general del circuito que se está trabajando.

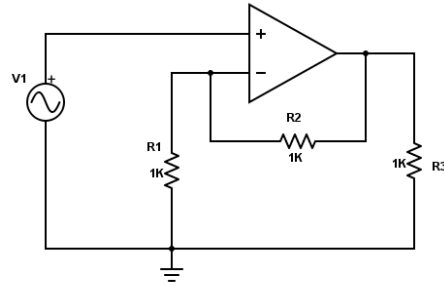


Figura 1-2 Ejemplo de esquema en el que no se ilustran las terminales de polarización

En cuanto a su apariencia física, los amplificadores operacionales son circuitos integrados y como tal pueden presentarse en varios encapsulados. La presentación más común y práctica para el uso en trabajos académicos es el encapsulado DIP (por su facilidad para usar en la protoboard), ya sea de 8 o 16 pines según sea la referencia. Sin embargo, se encuentran amplificadores operacionales en una amplia gama de presentaciones, ya sean encapsulados de montaje superficial (como el SOP) u otros (como el TO99).

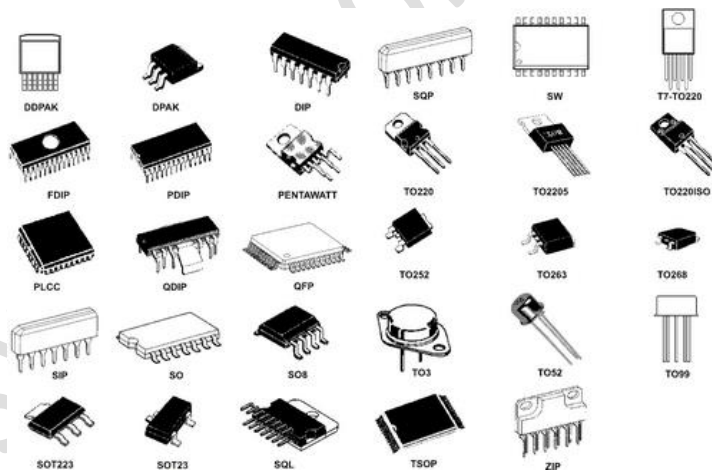


Figura 1-3. Encapsulados para amplificadores operacionales. (verificad derechos figura)

Existen muchas referencias de amplificador operacional y aunque todas ellas tienen un cierto modelo de comportamiento común, cada una puede tener una estructura interna diferente y características específicas de funcionamiento distintas. Por ejemplo, según la referencia específica es posible que un integrado contenga un amplificador operacional o varios en su interior. Más adelante hablaremos un poco acerca de algunas de las referencias

más populares de amplificadores operacionales de propósito general. Por el momento basta con saber que existen muchas referencias y que para conocer las características específicas de una referencia dada que deseemos utilizar será necesario consultar la hoja de datos (datasheet).

### 1.1.2 ¿Qué hay al interior de ese circuito integrado que forma un amplificador operacional?

El circuito específico que forma un amplificador operacional varía según la referencia, pero todos tienen un esquema de funcionamiento similar.

Para darnos una idea, vamos a ver el circuito interno del LM741, uno de los amplificadores operacionales más usados por estudiantes en sus prácticas de laboratorio. En la Figura 1-4 se puede ver que este circuito está compuesto por una serie de transistores que forman varias etapas cuyo objetivo final es el de amplificar la diferencia de potencial entre las terminales inversora y no inversora del dispositivo, esto quiere decir que no se amplifica ninguna de la entradas en particular si no la diferencia o resta entre ambas entradas.

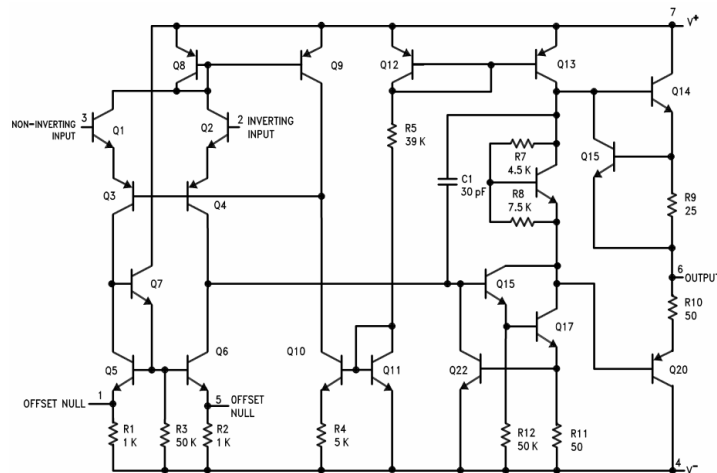


Figura 1-4. Circuito de un a amplificador LM741. Tomado de la hoja de datos del amplificador LM741 de la Texas Instruments.

No es el propósito de este texto hacer una explicación a profundidad del funcionamiento de este circuito específico y aquí se muestra sólo como ilustración para comprender cómo está compuesto un amplificador operacional.

Para entender el amplificador operacional, en esta guía estudiaremos su modelo ideal, que consiste en un esquema que representa el funcionamiento general de este dispositivo, permitiéndonos entender cómo funciona sin necesidad de analizar el circuito interno completo, sino usando una representación mucho más simple pero suficientemente aproximada al funcionamiento real para propósitos prácticos.

### 1.1.3 Modelo ideal del amplificador operacional

Para estudiar el funcionamiento del amplificador operacional podemos imaginarnos que en su interior, en lugar de todo el circuito que vimos anteriormente, tenemos un circuito como el que se ve en la Figura 1-5.

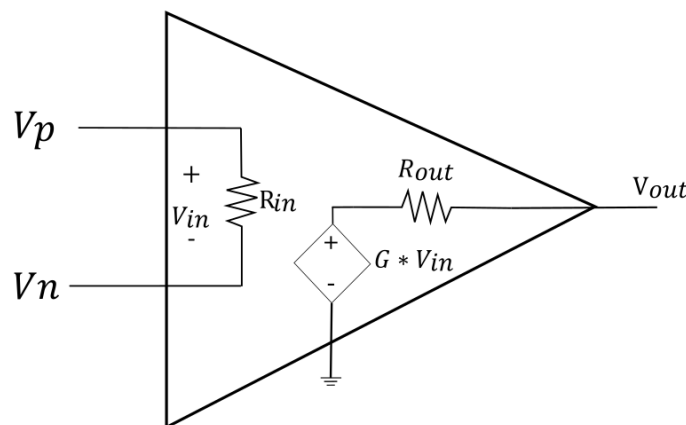


Figura 1-5. Modelo ideal del amplificador operacional

Lo que vemos en este modelo es que entre las entradas inversora y no inversora tenemos una resistencia de entrada  $R_{in}$ . Sobre esta resistencia de entrada tendremos un voltaje  $V_{in}$ . En la figura podemos ver que este voltaje de entrada es:

$$V_{in} = V_p - V_n \quad (1)$$

En la salida tendremos una fuente controlada con una ganancia  $G$  que depende de la diferencia entre los voltajes de las dos entradas ( $V_{in} = V_p - V_n$ ).

Entonces lo que tenemos en general es un amplificador diferencial que multiplica la entrada por una ganancia  $G$ .

En este modelo ideal el valor de la resistencia de entrada  $R_{in}$  tenderá al infinito (es decir, tenemos una impedancia de entrada muy, muy elevada). Dado que la resistencia de entrada ( $R_{in}$ ) es idealmente infinita, la corriente de entrada es cero. Eso quiere decir que la corriente que entra por las terminales  $v_p$  y  $v_n$  es cero.

En cuanto a la ganancia, en este modelo el valor de  $G$  también tiende al infinito (así que tenemos una ganancia muy, muy, elevada). La resistencia de salida  $R_{out}$  tiene un valor de cero.

Entonces, como la resistencia de salida es cero, se puede calcular el voltaje a la salida como:

$$V_{out} = G * V_{in} = G * (V_p - V_n) \quad (2)$$

Dado que la ganancia  $G$  es infinita, esto quiere decir que:

- Si  $v_p > v_n$  entonces  $v_{out} = +\infty$  (3)
- Si  $v_p < v_n$  entonces  $v_{out} = -\infty$  (4)

Vemos que el resultado se da sin importar cuál sea el valor exacto de  $v_p$  y  $v_n$ . Lo único que realmente cambiará la salida es cuál de los dos voltajes de entrada es más grande.

Evidentemente el valor infinito de la salida no es posible en un circuito real, y en lugar de ir a infinito o menos infinito el voltaje irá a un valor de voltaje alto o bajo que llamaremos



respectivamente voltaje de saturación positivo ( $+V_{sat}$ ) y voltaje de saturación negativo ( $-V_{sat}$ ). Entonces lo que realmente tendremos es:

- Si  $v_p > v_n$  entonces  $v_{out} = +V_{sat}$  (5)

- Si  $v_p < v_n$  entonces  $v_{out} = -V_{sat}$  (6)

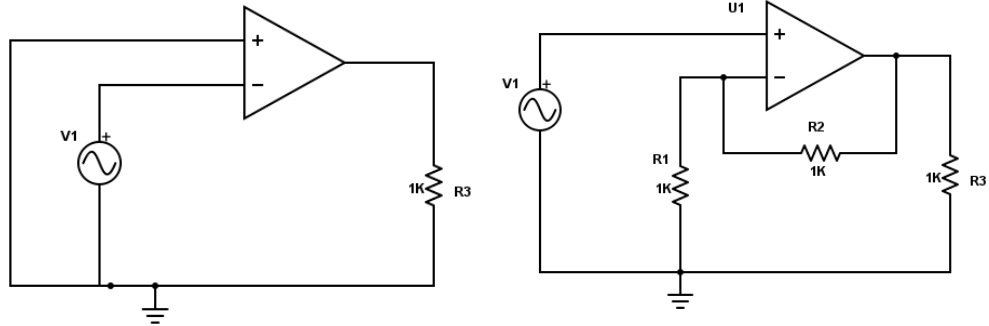
Más adelante (en la sección 1.2.3) hablaremos acerca de los valores que tienen estos voltajes de saturación.

Si analizamos el comportamiento que acabamos de describir, podemos decir que, al poner voltajes en las entradas del amplificador, este se comporta como un comparador de voltajes, donde podemos saber cuál de los dos voltajes ( $v_p$  o  $v_n$ ) es mayor según si la salida tiene signo positivo o negativo.

Este comportamiento que hemos visto hasta el momento asume que estamos trabajando en lazo abierto, es decir, que simplemente se han puesto dos voltajes en las entradas inversora y no inversora y que no existe ningún tipo de realimentación de la salida a alguna de las entradas del dispositivo. Si existe algún tipo de realimentación de la salida hacia la entrada en el amplificador, el funcionamiento cambiará de acuerdo a la configuración usada y tendremos usos diferentes como se describe a continuación.

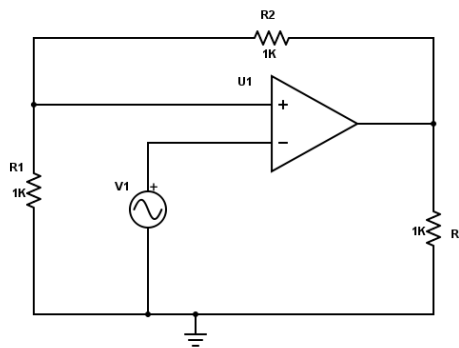
- Amplificador en lazo abierto: Se comportan como comparadores (Figura 1-6. Tipos de realimentación. .a) Circuito en lazo abierto. .b) Circuito con realimentación negativa. .c) Circuito con realimentación positiva Figura 1-6.a).
- Amplificador con realimentación negativa: Realizará algún tipo de operación sobre la señal o señales de entrada, tales como amplificación, suma, resta, etc. (Figura 1-6. Tipos de realimentación. .a) Circuito en lazo abierto. .b) Circuito con realimentación negativa. .c) Circuito con realimentación positiva Figura 1-6.b).
- Amplificador operacional en realimentación positiva: Se comportará como un comparador con histéresis (Figura 1-6. Tipos de realimentación. .a) Circuito en lazo

abierto. .b) Circuito con realimentación negativa. .c) Circuito con realimentación positiva Figura 1-6.c).



6.a

6.b



6.c

Figura 1-6. Tipos de realimentación. .a) Circuito en lazo abierto. .b) Circuito con realimentación negativa. .c) Circuito con realimentación positiva

En las siguientes subsecciones explicaremos brevemente las características de cada uno de estos casos que acabamos de mencionar

#### 1.1.4 El amplificador en lazo abierto: su uso como comparador de señales

Decimos que el amplificador operacional está en lazo abierto cuando no existe ningún lazo de realimentación de la salida a alguna de las entradas (inversora o no inversora). En la

Figura 1-7 se puede ver un ejemplo de un circuito sin realimentación. Como hemos explicado, en este caso el amplificador se comportará como un comparador de voltajes

Veremos un ejemplo para ilustrar el funcionamiento. En el circuito de la Figura 1-7 se puede ver un amplificador en lazo abierto que tiene una fuente de voltaje conectada a cada una de las entradas.

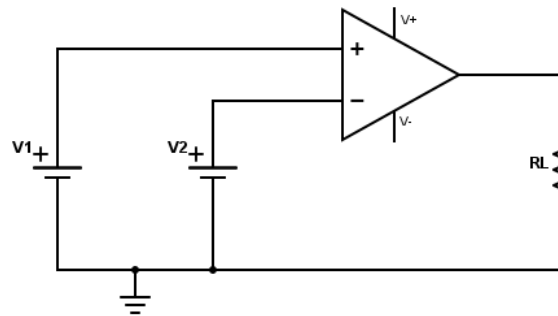


Figura 1-7. Circuito comparador de voltajes.

Para este circuito asumamos que el voltaje de polarización es de +10V para la parte positiva ( $V_{CC}$ ) y -10V para la parte negativa ( $V_{EE}$ ).

Analizando las ecuaciones (5) y (6), si  $V_1$  es un voltaje mayor que  $V_2$ , entonces la resta ( $V_1 - V_2$ ) será positiva y por lo tanto el voltaje de salida que caerá sobre la resistencia  $R_1$  será el voltaje de saturación positiva  $+V_{sat}$ . Algunos ejemplos numéricos de este caso pueden verse en la siguiente tabla:

<b>V1</b>	<b>V2</b>	<b>Vout</b>
5v	3v	$+V_{sat}$
0.1v	9v	$-V_{sat}$
1v	1.1v	$-V_{sat}$
110mv	100mv	$+V_{sat}$

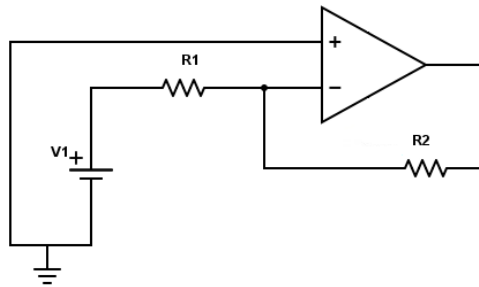
Tabla 1. Ejemplos numéricos para la salida del comparador si el voltaje en la entrada no inversora es mayor que en la entrada inversora.

Los comparadores se estudien con más detalle en el anexo 1.

### 1.1.5 El amplificador operacional en realimentación negativa

Decimos que el operacional está en esta configuración cuando hay un camino de realimentación entre la salida y la entrada inversora del amplificador, ya sea de forma directa o mediante un elemento como una resistencia, un capacitor, etc. En la Figura 1-8 se muestra un amplificador en realimentación negativa. El comportamiento exacto de este caso se explicará más adelante, pero por ahora podemos decir que el amplificador realizará algún tipo de operación en la señal, el cual puede ser una amplificación, suma, resta, integración, derivación, etc. La operación específica dependerá de la topología exacta del circuito

Cuando un amplificador operacional se encuentra en realimentación negativa, como en el caso de la Figura 1-8, esto quiere decir que existirá un camino de realimentación entre la salida y la entrada inversora.



*Figura 1-8. Ejemplo de un amplificador operacional con realimentación negativa*

En este caso, el amplificador operacional realizará algún tipo de operación con el voltaje de entrada, la cual dependerá de la configuración específica en la que se conecte.

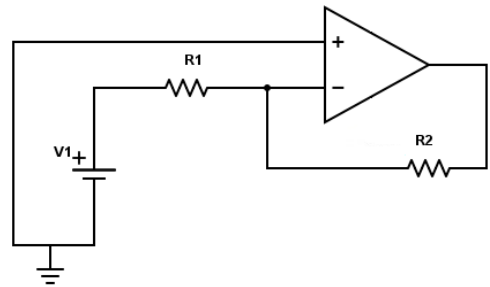
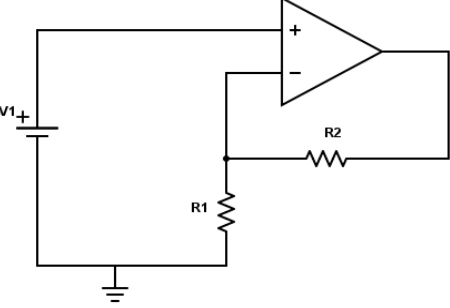
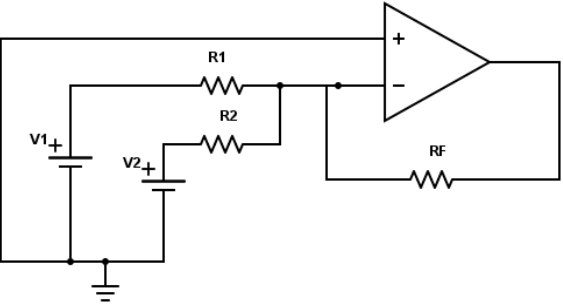
Para conocer cuál es el comportamiento específico de una determinada configuración, sólo tenemos que analizar el circuito teniendo en cuenta dos puntos fundamentales:

- Las corrientes de entrada al amplificador operacional son ambas iguales a cero.

- El voltaje en la entrada no inversora ( $V_p$ ) es igual al voltaje en la entrada no inversora ( $V_n$ ).

Y con estos puntos claros podemos proceder a analizar el circuito usando las leyes y técnicas básicas de análisis de circuitos eléctricos.

En la tabla siguiente se ven algunas de las configuraciones más utilizadas del amplificador operacional, junto con las ecuaciones que describen su comportamiento.

Configuración/ Ecuación	Diagrama
<p>Amplificador inversor</p> $V_{out} = -V_1 \frac{R_2}{R_1}$	
<p>Amplificador no inversor</p> $V_{out} = V_1 \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$	
<p>Sumador inversor</p> $V_{out} = -R_F \left( \frac{V_1}{R_2} + \frac{V_2}{R_2} \right)$	

<p>Sumador no inversor</p> $V_{out} = \left( \frac{V1 * R2 + V2 * R1}{R1 + R2} \right) \left( \frac{RF + RG}{RG} \right)$	
<p>Amplificador diferencial</p> $V_{out} = \frac{R2}{R1} (V1 - V2)$	
<p>Integrador</p> $V_{out} = -\frac{1}{RC} \int V1(t) dt$	
<p>Integrador</p> $V_{out} = -\frac{1}{RC} \frac{dV1(t)}{dt}$	

Tabla 2. Configuraciones típicas del amplificador operacional en realimentación negativa.

Más adelante en el libro revisaremos con detalle algunas de estas configuraciones, tales como los amplificadores inversor y no inversor (capítulo 2 ) y el amplificador diferencial (capítulo **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** ), entre otros.

### 1.1.6 El amplificador operacional en realimentación positiva:

Decimos que un amplificador se encuentra en esta configuración cuando existe un camino de realimentación entre la salida y la entrada no inversora del amplificador. En Figura 1-9 se puede ver un ejemplo de esto.

En este caso el amplificador operacional se comportará como un comparador con histéresis, es decir como un comparador en el cual uno de los voltajes de comparación varía según si el voltaje de entrada al circuito va en aumento o en descenso. Este tipo de comparadores se explica en más detalle en el Anexo 1. Por el momento puede mencionarse que estos circuitos se utilizan como comparadores en ambientes ruidosos y como base de funcionamiento de algunos circuitos generadores de señales.

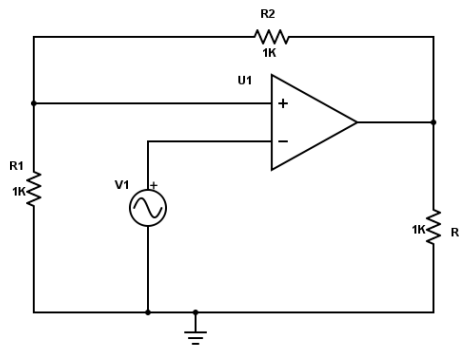


Figura 1-9. Ejemplo de un amplificador operacional con realimentación positiva.

## 1.2 Un acercamiento al funcionamiento real del amplificador

Si bien el modelo que se explica en la sección 1.1.3 es útil, es un modelo ideal que no representa de forma exacta lo que sucede en el amplificador. Vamos a ver algunos elementos para acercarnos más a su comportamiento real.

### 1.2.1 La impedancia de entrada

El modelo que hemos visto tienen una resistencia de valor infinito entre las terminales de entrada. Sin embargo, aunque la impedancia de entrada al amplificador operacional es muy

alta, evidentemente no es infinita y, por lo tanto, la corriente de entrada no es exactamente cero.

Si revisamos de nuevo la Figura 1-4, podemos ver que, para el caso específico del LM741, la impedancia de entrada tendrá que ver con la impedancia en la base de los transistores Q1 y Q2.

En general, el valor real de la impedancia de entrada depende de la construcción interna del amplificador; por ejemplo, para el LM741, la hoja de datos especifica una resistencia de entrada típica de  $2M\Omega$  y una corriente de entrada típica de unos  $80nA$ ; el LM741 tiene una corriente típica de entrada de unos  $45nA$ ; mientras que otros amplificadores específicamente diseñados para tener muy baja corriente de entrada (como el AD549) tienen corrientes del orden de los  $fA$  (es decir del orden de  $10^{-15}$ ). Para muchas aplicaciones estas corrientes de entrada pueden considerarse despreciables.

En general, se tendrá una impedancia de entrada del orden de  $10^6 \Omega$  para amplificadores contruidos con transistores bipolares de  $10^{12}$  para amplificadores con transistores FET.

### **1.2.2 La ganancia**

La ganancia en lazo abierto del amplificador operacional ( $G$ ), es infinita para el modelo ideal. Sin embargo, es evidente que es imposible tener una ganancia infinita. Realmente este valor es un número bastante elevado que suele estar en el rango de  $10^5$  o  $10^6$ , dependiendo de la referencia específica de amplificador.

También debe tenerse en cuenta que generalmente esta ganancia depende de la frecuencia, y disminuye a medida que la frecuencia de las señales aumenta. Generalmente las hojas de datos de los dispositivos muestran una gráfica de respuesta de ganancia en lazo abierto vs frecuencia. Esto debe tenerse muy en cuenta la trabajar con circuitos que manejen altas frecuencias.

### **1.2.3 El voltaje de polarización y el voltaje de saturación**

Es importante notar que en este modelo ideal no se tiene en cuenta el voltaje de polarización, pero este es muy importante, puesto que es indispensable para el correcto



funcionamiento del amplificador y porque este va a limitar el máximo y mínimo voltaje a la salida del amplificador.

Por ejemplo, para el modelo ideal habíamos planteado en las ecuaciones (3) y (4) que:

- Si  $v_p > v_n$  entonces  $v_{out} = +\infty$
- Si  $v_p < v_n$  entonces  $v_{out} = -\infty$

Sin embargo, en un circuito real no tendremos un voltaje infinito. En realidad, el voltaje de salida está limitado por el voltaje de polarización ( $V_{CC}$  y  $V_{EE}$ ), de tal manera que el máximo voltaje de salida será un voltaje  $+v_{sat}$  que está por debajo del voltaje de polarización positivo (el valor exacto depende del circuito y la referencia específica de amplificador) y el mínimo valor posible será un voltaje  $-v_{sat}$  que está por encima del voltaje de polarización negativo (el valor exacto depende de la referencia específica de amplificador y del fabricante). A estos voltajes  $+v_{sat}$  y  $-v_{sat}$  se les llama voltajes de saturación, positivo y negativo.

Esta diferencia entre el voltaje de polarización y el voltaje de saturación puede implicar inconvenientes, especialmente en sistemas que usan voltajes de polarización pequeños (como dispositivos portátiles que usen batería), dado que hacen que se disminuya el rango dinámico de la salida del amplificador.

En respuesta a esto algunos amplificadores operacionales ofrecen un funcionamiento “rail-to-rail”, es decir, prometen una salida que puede oscilar entre los extremos el voltaje de polarización.

#### **1.2.4 El ancho de banda**

Hemos visto que el amplificador operacional tiene una ganancia muy elevada. Sin embargo, esta ganancia empieza a decrecer a medida que la frecuencia de la señal de entrada aumenta. Por lo general, la hoja de datos de un amplificador operacional provee una gráfica que indica este comportamiento, como la que se ve en la que es tomada de la hoja de datos del amplificador operacional LM324.

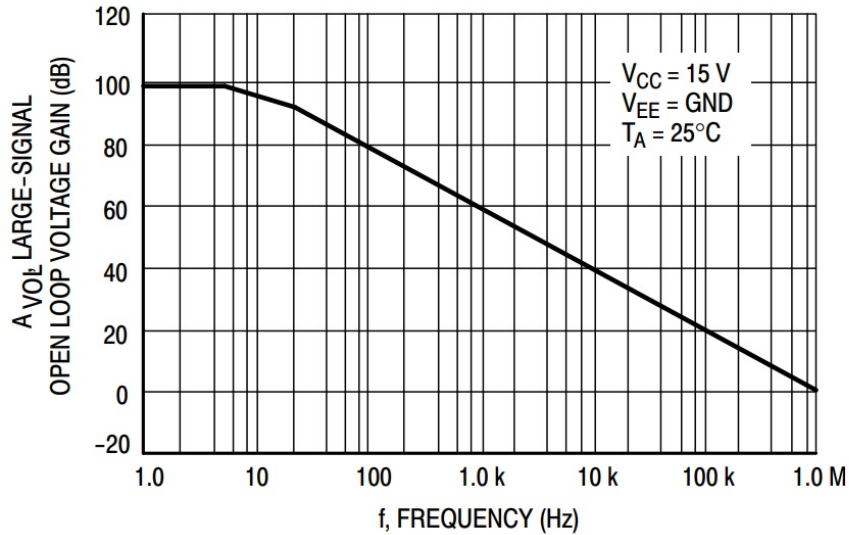


Figura 1-10. Ancho de banda en lazo abierto. Fuente: Hoja de datos del amplificador operacional LM324 de ON semiconductors.

<https://www.onsemi.com/pub/Collateral/LM324-D.PDF>.

Vemos que, de hecho, la frecuencia de corte o frecuencia de -3dB está en sólo unos pocos Hertz.

Para analizar el ancho de banda realimentación negativa, basta con tomar esta gráfica y compararla con la ganancia de lazo cerrado. Por ejemplo, en la Figura 1-11 se ve como se compararía la respuesta en lazo abierto (azul) con la respuesta en lazo cerrado (rojo) para una ganancia de uno 10dB.

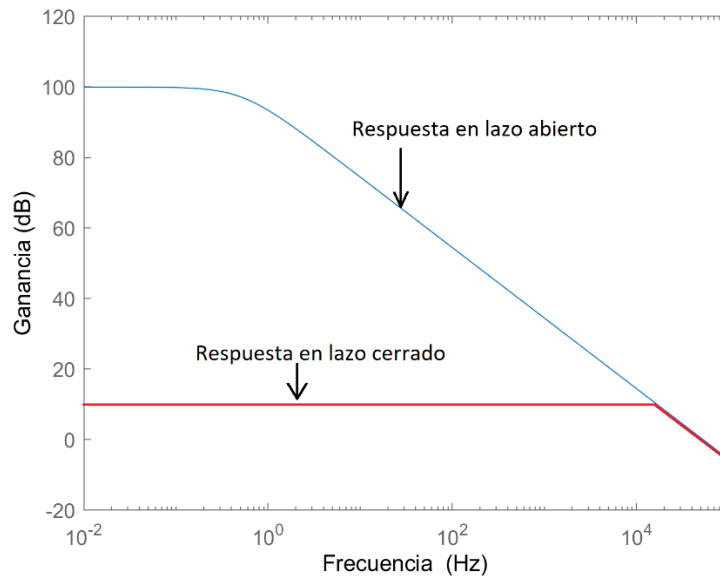


Figura 1-11. Ancho de banda en realimentación negativa.

Un ejemplo de los que en la práctica lo que va a suceder con esto es que cuando diseñemos un amplificador usando amplificadores operaciones con una ganancia dada, este va a funcionar según lo esperado hasta una determinada frecuencia de corte. Si la frecuencia de la señal de entrada supera esta frecuencia de corte, la ganancia del amplificador va a empezar a decrecer, haciendo que la señal de salida sea cada vez más pequeña, alejándose del resultado ideal esperado.

### 1.2.5 La velocidad de cambio de la salida (*Slew rate*)

Generalmente los amplificadores operacionales son incapaces de seguir variaciones muy rápidas de la señal de entrada, puesto que la salida tiene un límite de tasa de cambio o máxima velocidad de variación en el voltaje de salida, el cual se conoce como *slew rate*. En la Figura 1-12 se ilustra como ante una entrada de pulso cuadrado la salida tomaría un tiempo en hacer el cambio debido a esta máxima tasa de cambio que resultaría en una pendiente de subida y una pendiente de bajada que cambiarían la forma del pulso.

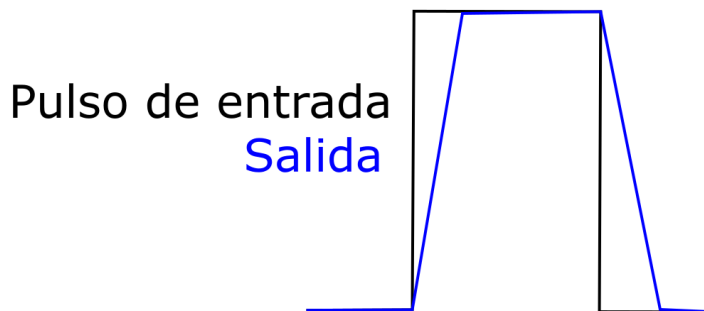


Figura 1-12. *Slew rate*

Estas velocidades de cambio dependen de la referencia específica utilizada y pueden ser significativos dependiendo de la aplicación. Por ejemplo, el LM741 tiene un *slew rate* del orden de  $0.5\text{V}/\mu\text{s}$  al ser usado como seguidor de voltaje, al igual que el LM741. La figura Figura 1-13 muestra cómo se ilustra esto en la hoja de datos del amplificado LM324 de Texas Instruments.

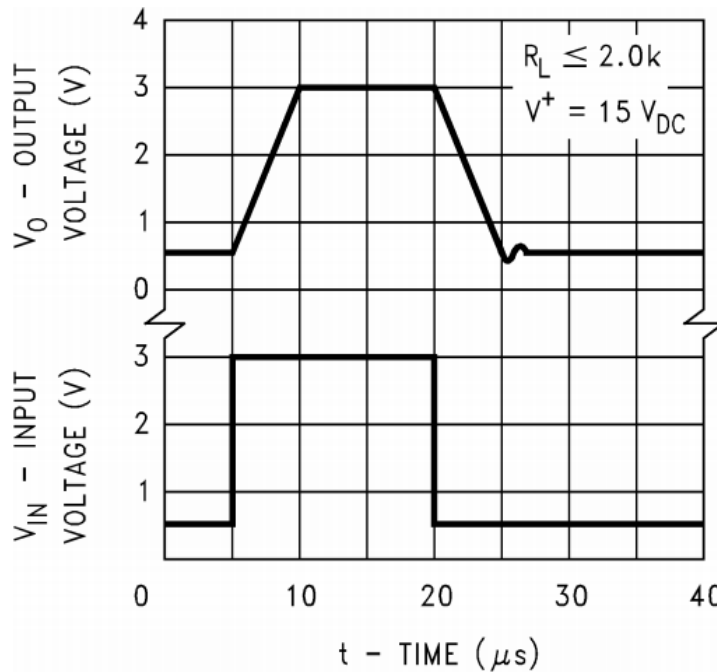


Figura 1-13. Pulsos de entrada y salida a un seguidor de voltaje para un LM324. Tomado de la hoja de datos del amplificador LM324 de la Texas Instruments.

### 1.2.6 La corriente de salida

Los amplificadores operacionales tienen un límite de corriente que puede proporcionar a una carga, el cual depende tanto de la referencia del amplificador como del circuito externo al que está conectados, pero no es una corriente muy elevada y suele estar alrededor de los 10mA.

Es importante tener en cuenta esta máxima capacidad a la hora de elegir un amplificador operacional específico para un diseño. En la hoja de datos de dispositivo generalmente encontraremos la corriente de salida de corto circuito, que es del orden de los 25mA para el amplificador operacional LM41 y de los 40mA para el LM324.

### 1.2.7 Rechazo al modo común (CMRR)

De forma muy general podemos decir que el rechazo de modo común (Common-mode rejection ratio - CMRR), es una medida de que tan bueno es el amplificador operacional para ignorar voltajes que son comunes a sus dos entradas y amplificar sólo los voltajes diferenciales. Este parámetro lo veremos más en detalle más adelante en el curso, cuando hablemos de amplificadores diferenciales y de instrumentación.

## 2. AMPLIFICADORES INVERSORES Y NO INVERSORES Y SEGUIDORES DE VOLTAJE

Uno de los usos más frecuentes de los amplificadores operacionales, es la ampliación de señales de voltaje. A continuación, se muestran las configuraciones más usadas y, mediante algunos ejemplos de aplicación, se describen algunas características, particularidades y limitaciones de estos circuitos.

### 2.1 El amplificador inversor

Para analizar estos circuitos debemos recordar lo visto en la sección 1.1.5, donde los elementos a tener en cuenta son los siguientes:

- Las corrientes de las entradas inversora y no inversora del amplificador operacional son iguales a cero.
- El voltaje en la entrada inversora será igual al voltaje en la entrada no inversora.

Con esto en mente, podemos analizar una configuración llamada amplificador inversor, que se muestra en la Figura 2-1. En este caso vemos que la entrada no inversora del amplificador está conectada a tierra, lo cual quiere decir que el voltaje en la entrada inversora también es igual a cero.

Teniendo esto en cuenta podríamos hacer una ecuación de nodo como se ve en la Figura 2-1. En el nodo n1 puede hacerse una ecuación con la ley de corrientes de Kirchhoff en la que corrientes que entran al nodo deben ser iguales a las corrientes que salen

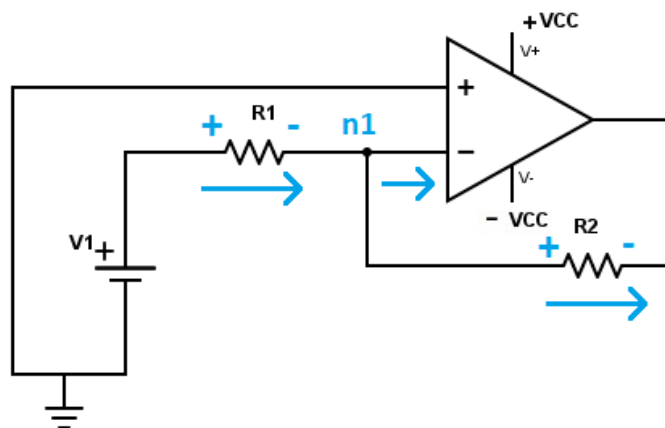


Figura 2-1. Análisis de configuración de amplificador inversor.

De este modo tenemos que

$$\frac{V_1 - 0}{R_1} = 0 + \frac{0 - V_{out}}{R_2}$$

Despejando el voltaje de salida de esta ecuación nos queda que:

$$V_{out} = -V_1 \left( \frac{R_2}{R_1} \right)$$

Es decir, el voltaje de salida será igual al voltaje de entrada multiplicado por una ganancia negativa, donde la ganancia depende de las resistencias del circuito. Por este motivo se le llama a esta configuración del amplificador operacional **amplificador inversor**.

Veamos ahora dos ejemplos básicos del efecto que esta configuración tiene en un voltaje o en una señal.

- **Ejemplo 2.1**

Para el circuito de calcule el voltaje y la corriente sobre la resistencia RL.

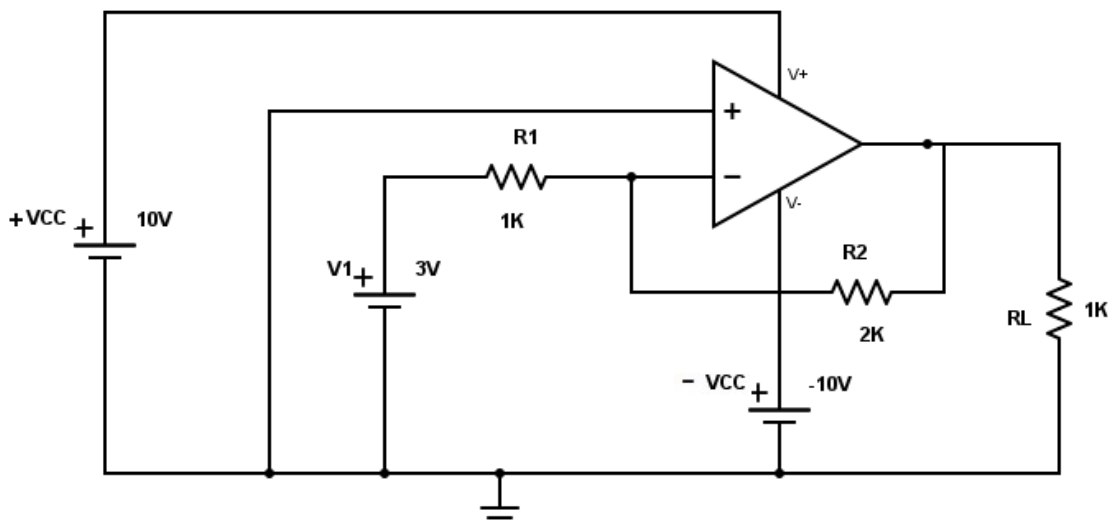


Figura 2-2. Ejemplo 2.1.

Del análisis que hicimos anteriormente sabemos que:

$$V_{out} = -V_1 \left( \frac{R_2}{R_1} \right) = -V_1 \left( \frac{2k}{1k} \right) = -V_1 * 2 = -3 * 2 = -6V$$

La corriente sobre la resistencia  $R_L$  será de:

$$i = \frac{V_{out}}{R_L} = \frac{-6V}{1k\Omega} = -6mA$$

Veamos el resultado de la simulación con PartSim en la Figura 2-3

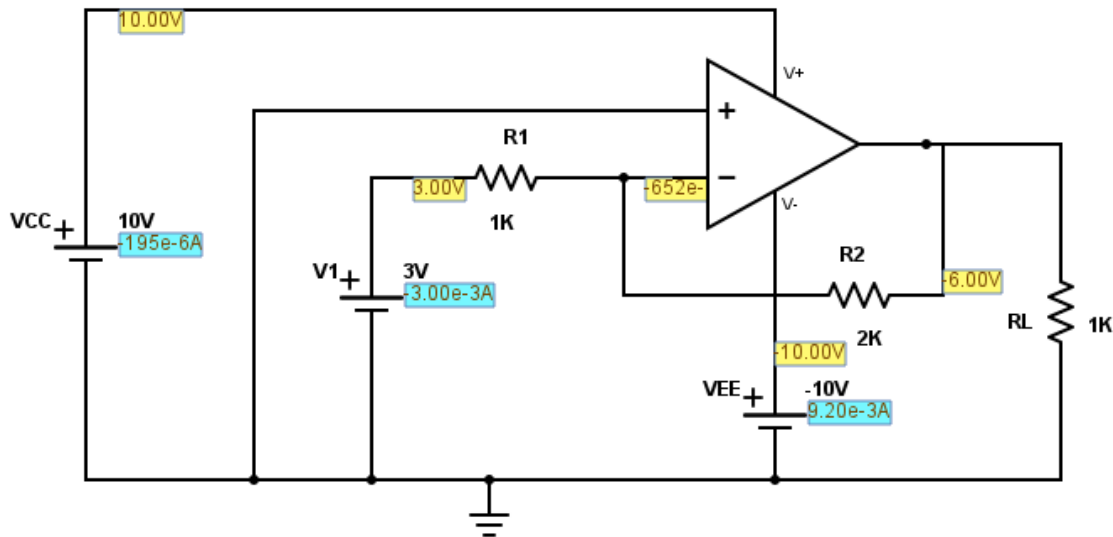


Figura 2-3. Simulación ejemplo 2.1.

De este ejemplo sencillo podemos ver algunos elementos importantes:

- Observe que el valor del voltaje de salida en ningún momento depende de  $R_L$ . Esto será cierto en general: el voltaje de salida del amplificador operacional no depende de la carga.
- Sin embargo, es importante resaltar que lo que sí depende de la carga (en este caso  $R_L$ ) es la corriente de salida.

- Note también que, aunque las corrientes de entrada al amplificador operacional son cero, esto no quiere decir que la corriente de salida del amplificador operacional sea cero.
- Note que a través de la resistencia R2 puede circular corriente desde la fuente de señal hacia la salida. Esto quiere decir que, a pesar de que el amplificador operacional tiene una alta impedancia de entrada, la configuración de amplificador inversor en conjunto no presenta esta característica.
- Es importante recalcar que la ganancia del amplificador no depende de los valores específicos de R1 y R2, si no de la relación entre ambas resistencias. Esto implica que, por ejemplo, se obtiene el mismo resultado de voltaje a la salida con R1=1kΩ y R2=2kΩ que con R1=100Ω y R2=200Ω. Sin embargo, debe notarse que lo que si variará será la corriente que circula por estas resistencias, y en este sentido las resistencias de valores bajos implicarán corrientes y consumos de potencia más elevados. Por este motivo es importante considerar valores de resistencias que no lleven a consumos de potencia altos innecesarios.
- Veamos que el voltaje de salida tampoco depende del voltaje de polarización, pero si debe recordarse que este establece el valor máximo y mínimo a la salida del amplificador operacional (voltajes de saturación). Para entender esto mejor veamos el siguiente ejemplo.

### Ejemplo 2.2

Para el mismo circuito del ejemplo anterior, cambie el voltaje de entrada de 3V por un voltaje de 6V y calcule de nuevo el voltaje y la corriente sobre la resistencia RL.

Similar al caso anterior, tenemos que

$$V_{out} = -V_1 \left( \frac{R_2}{R_1} \right) = -V_1 \left( \frac{2k}{1k} \right) = -6 * 2 = -12V$$



$$i = \frac{V_{out}}{R_L} = \frac{-12V}{1k\Omega} = -12mA$$

Sin embargo, debemos tener en cuenta que el amplificador operacional del ejemplo se ha polarizado con un voltaje de  $\pm 10V$ , esto quiere decir que su voltaje de saturación negativa estará alrededor de  $-9V$  y por lo tanto será imposible que la salida alcance los  $-12V$  que indica la ecuación. Entonces para este ejemplo la salida del amplificador operacional será

$$V_{out} \approx -9V$$

$$i \approx -9mA$$

Cuando esto sucede, se dice que el amplificador operacional está operando en saturación.

Veamos la simulación en la Figura 2-4, donde podemos visualizar que el amplificador se ha saturado en  $-9.52V$ .

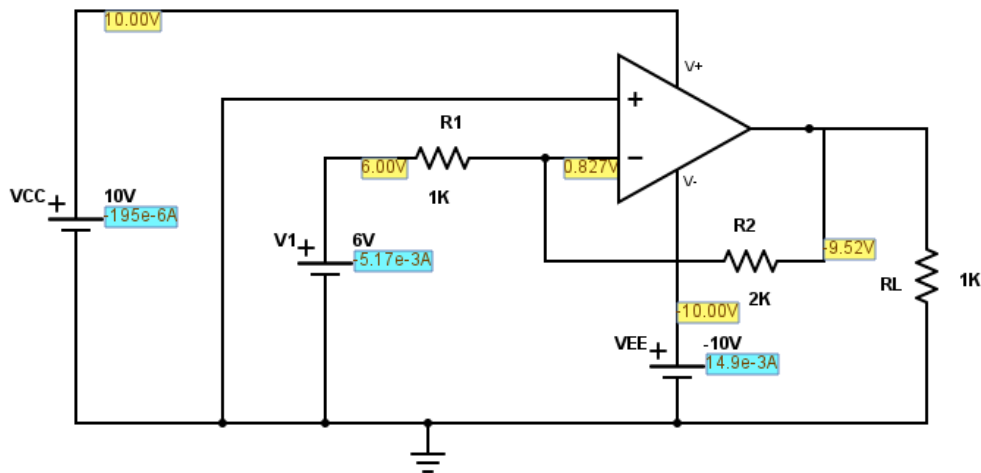


Figura 2-4. Simulación ejemplo 2.2.

- **Ejemplo 2.3**

Suponga que en el mismo circuito del ejemplo 1 cambiamos el voltaje de entrada V1 por un voltaje senoidal de 1V de amplitud, como se muestra en la figura siguiente.

Calcule el voltaje y la corriente sobre la resistencia RL.

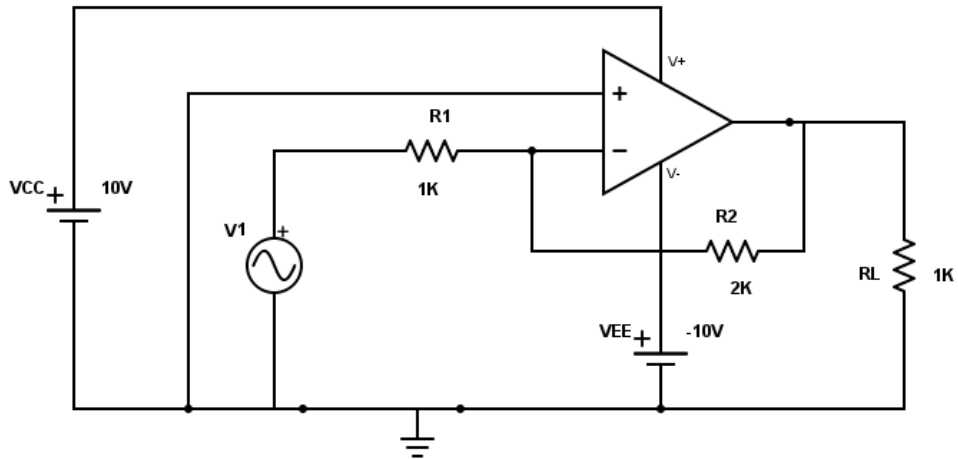


Figura 2-5. Circuito y voltaje de entrada para el ejemplo 2.3.

Según lo que ya hemos visto  $V_{out} = -V1 * 2$ . Dado que V1 es una onda senoidal ( $V1 = \sin(\omega t)$ ), la salida Vout también será una onda senoidal pero con una amplitud el doble de la original y con signo invertido ( $Vout = -2\sin(\omega t)$ ). En la Figura 2-6 se ve en azul el voltaje de entrada V1 y en negro la salida.

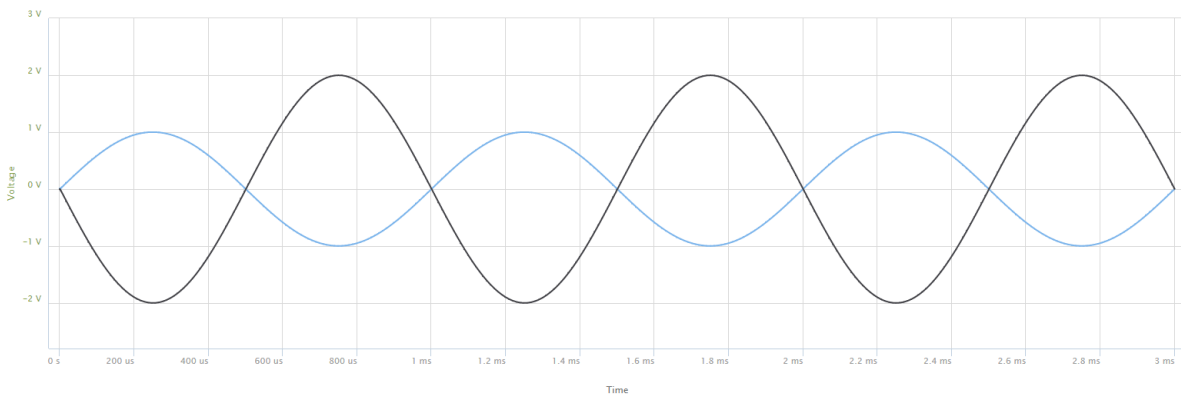


Figura 2-6. Voltajes de entrada y salida ejemplo 2.3.

En cuanto a la corriente, teniendo en cuenta que

$$i = \frac{V_{out}}{R_L} = \frac{-V1 * 2}{1k\Omega}$$

Entonces la corriente tendrá una forma de onda senoidal similar a la del voltaje de salida, pero su amplitud estará dada en mili amperios de la siguiente manera.

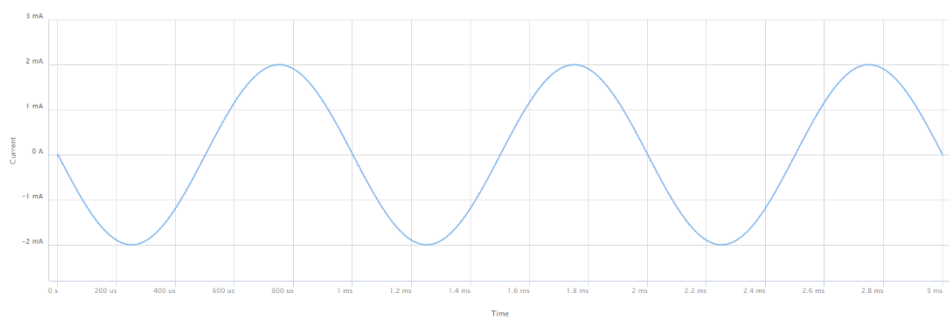


Figura 2-7. Corriente en RL para el circuito del ejemplo 2.3.

Ahora visualicemos el problema de saturación con este tipo de ondas

- **Ejemplo 2.4**

Supongamos el mismo caso del ejemplo anterior, pero cambiemos la amplitud de la señal de entrada a 6V, de tal forma que es  $V_1=6\sin(\omega t)$ . En este caso tendríamos una señal de salida igual a  $-12\sin(\omega t)$ . Este ejemplo no se ha simulado usando PartSim. En lugar de esto se muestran los resultados teóricos de la salida.

En este caso tendríamos que la salida estaría dada como se muestra en la Figura 2-8. Puede observarse que la salida sigue la forma senoidal esperada, pero al llegar al voltaje de saturación la curva “se corta” debido a la imposibilidad de que el voltaje de salida suba de este valor.

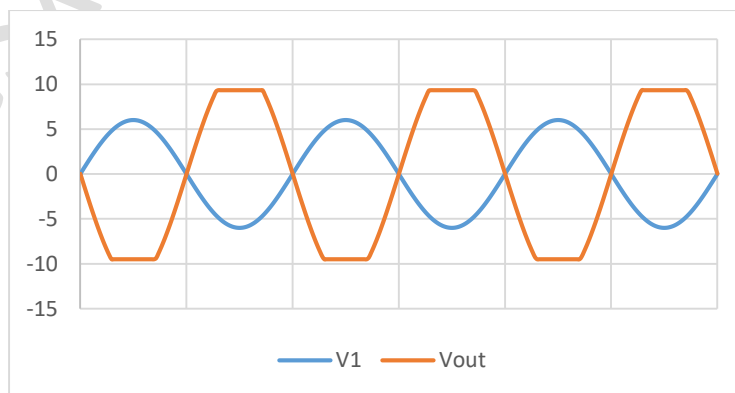


Figura 2-8. Voltaje de salida con saturación 2.4.

## 2.2 El amplificador no inversor

Una configuración muy utilizada es el amplificador inversor que se ve en la Figura 2-9.

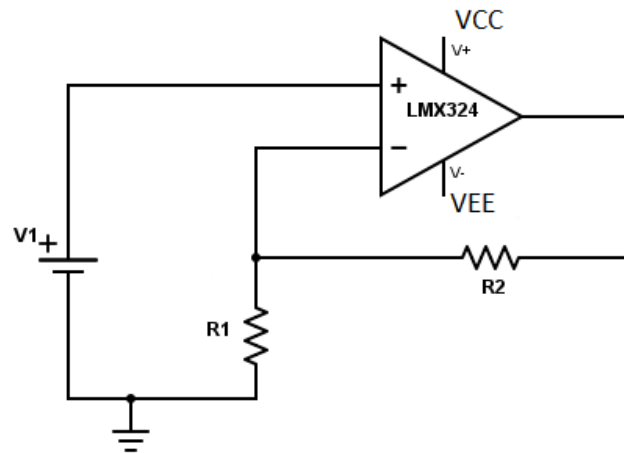


Figura 2-9. Amplificador no inversor.

Para analizar este circuito se puede proceder de igual que en el caso anterior.

Veamos algunos casos específicos, de amplificadores operacionales de propósito general y de uso común. Como se ve en la puede hacerse una ecuación de nodo, igualando las corrientes de las resistencias  $R_1$  y  $R_2$ .

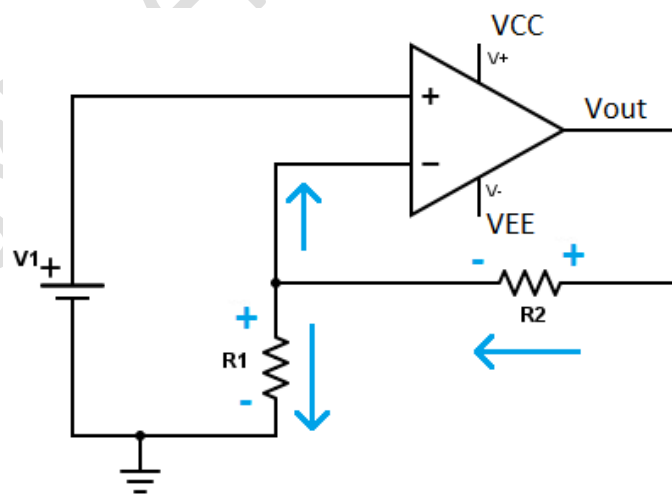


Figura 2-10. Corrientes en el amplificador no inversor

Así nos quedaría la siguiente expresión:

$$\frac{V_{out} - V1}{R_2} = 0 + \frac{V1}{R_1}$$

Despejando el voltaje de salida de esta ecuación nos queda que:

$$V_{out} = V1 \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$

Es decir, el voltaje de salida será igual al voltaje de entrada multiplicado por una ganancia que depende de las resistencias del circuito. En este caso, la ganancia siempre es mayor o igual que 1.

Veamos un par de ejemplos para entender mejor este circuito.

- **Ejemplo 2.5**

Para el circuito de la Figura 2-11 calcule el voltaje y la corriente sobre la resistencia RL.

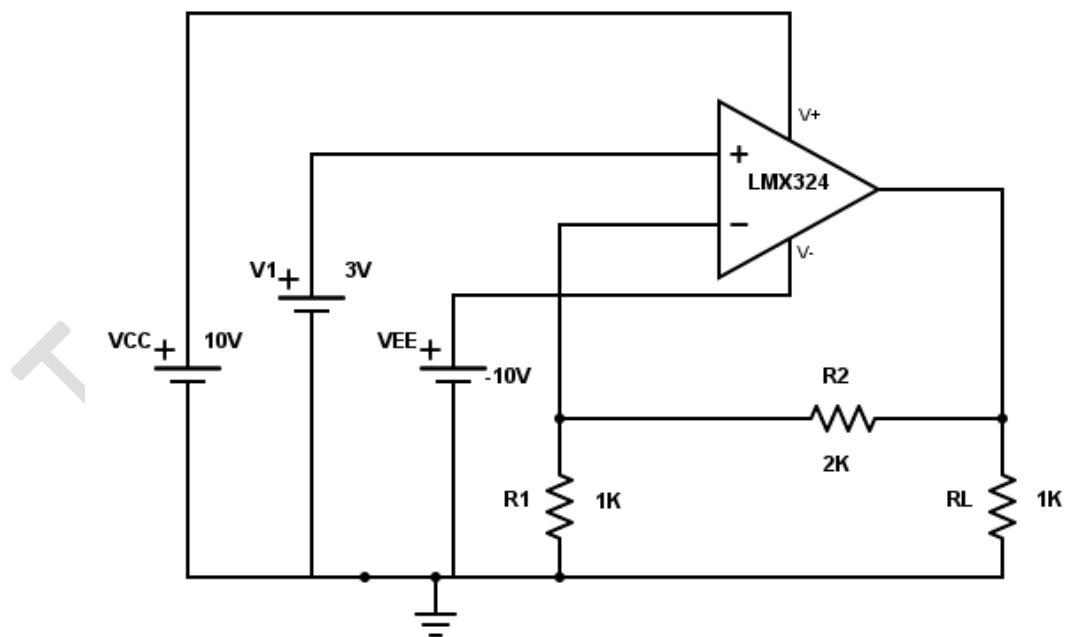


Figura 2-11. Ejemplo 2.5.

Del análisis que hicimos anteriormente sabemos que:

$$V_{out} = V1 \left( 1 + \frac{R2}{R1} \right) = V1 \left( 1 + \frac{2k}{1k} \right) = V1 * 3 = 3v * 3 = 9V$$

La corriente sobre la resistencia RL será de:

$$i = \frac{V_{out}}{R_L} = \frac{9V}{1k\Omega} = 9mA$$

Veamos el resultado de la simulación con PartSim en la Figura 2-12.

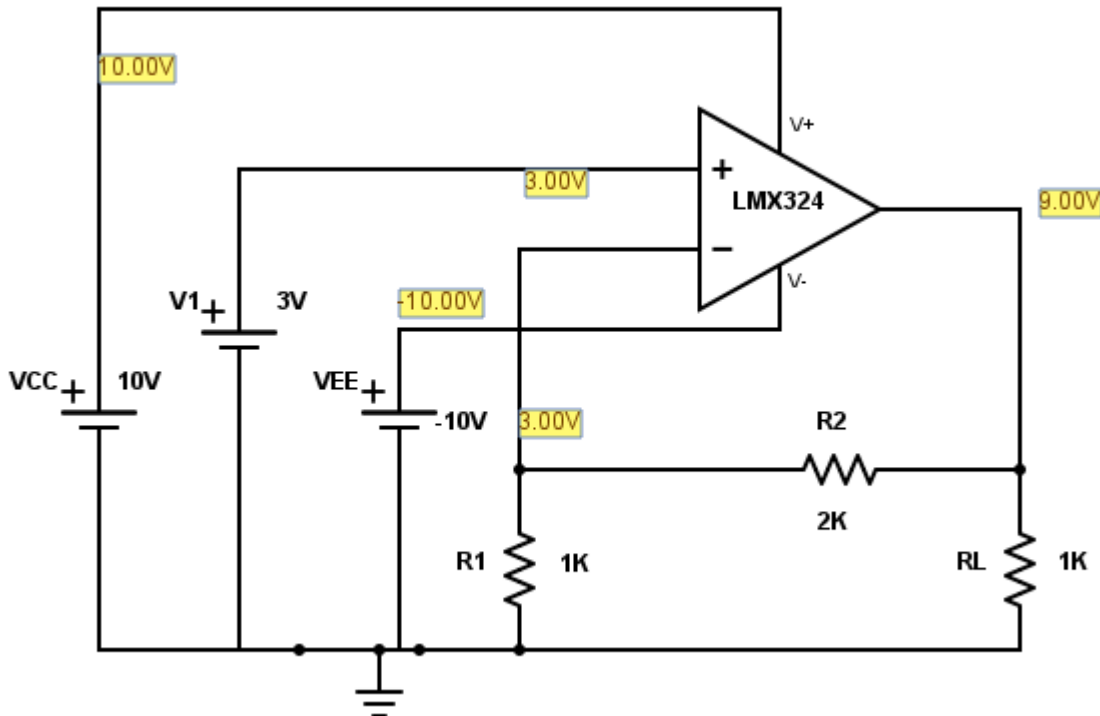


Figura 2-12. Simulación ejemplo 2.5.

De este ejemplo podemos ver algunos elementos:

- Al igual que para el caso que vimos del amplificador inversor, vemos que el valor del voltaje de salida no depende de RL, aunque si depende la corriente de salida.

- Al igual que en el amplificador inversor, aunque las corrientes de entrada al amplificador operacional son cero, esto no quiere decir que la corriente de salida del amplificador operacional sea cero.
- Dado que el voltaje a amplificar no está conectado con la resistencia de realimentación, esta configuración si presenta una alta impedancia de entrada, lo cual quiere decir que este circuito no “pide” corriente a la fuente de señal y por lo tanto no representa una carga en cuanto a corriente para ella.
- De nuevo al igual que en el caso anterior, la ganancia del amplificador no depende de los valores específicos de R1 y R2, si no de la relación entre ambas resistencias.
- Igualmente, los voltajes de salida estarán limitados por la saturación del amplificador, como veremos en el siguiente ejemplo.

- **Ejemplo 2.6**

Para el mismo circuito del ejemplo anterior, cambie el voltaje de entrada de 3V por un voltaje de 6V y calcule de nuevo el voltaje y la corriente sobre la resistencia RL.

Similar al caso anterior, tenemos que

$$V_{out} = V1 \left( 1 + \frac{R2}{R1} \right) = V1 \left( 1 + \frac{2k}{1k} \right) = 6 * 3 = 18V$$

$$i = \frac{V_{out}}{RL} = \frac{18V}{1k\Omega} = 18mA$$

Sin embargo, debemos tener en cuenta que el amplificador operacional del ejemplo se ha polarizado con un voltaje de  $\pm 10V$ , esto quiere decir que su voltaje de saturación positiva estará alrededor de 9V y por lo tanto será imposible que la salida alcance los 18 que indica la ecuación. Entonces para este ejemplo la salida del amplificador operacional será

$$V_{out} \approx 9V$$

$$i \approx 9mA$$

Veamos la simulación en la Figura 2-13, donde podemos comprobar que el amplificador se ha saturado en 9.33V

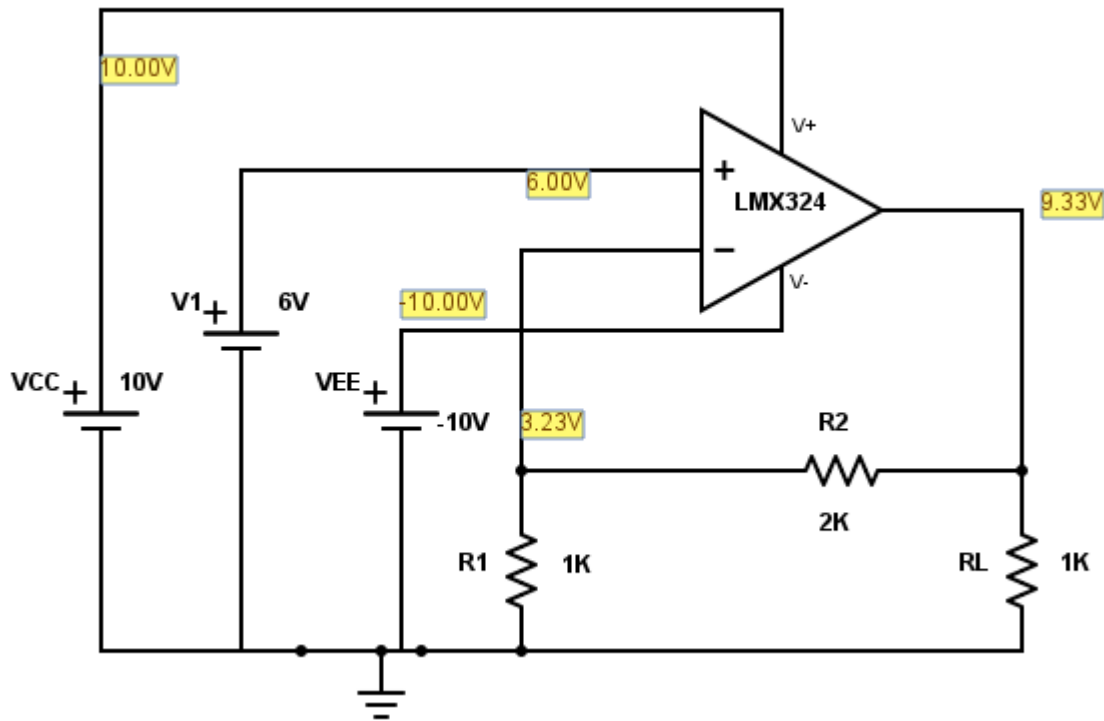


Figura 2-13. Simulación ejemplo 2.6.

- **Ejemplo 2.7**

Suponga que en el mismo circuito del ejemplo 4 cambiamos el voltaje de entrada V1 por un voltaje senoidal de 1V de amplitud, como se muestra en la figura siguiente. Calcule el voltaje y la corriente sobre la resistencia RL.



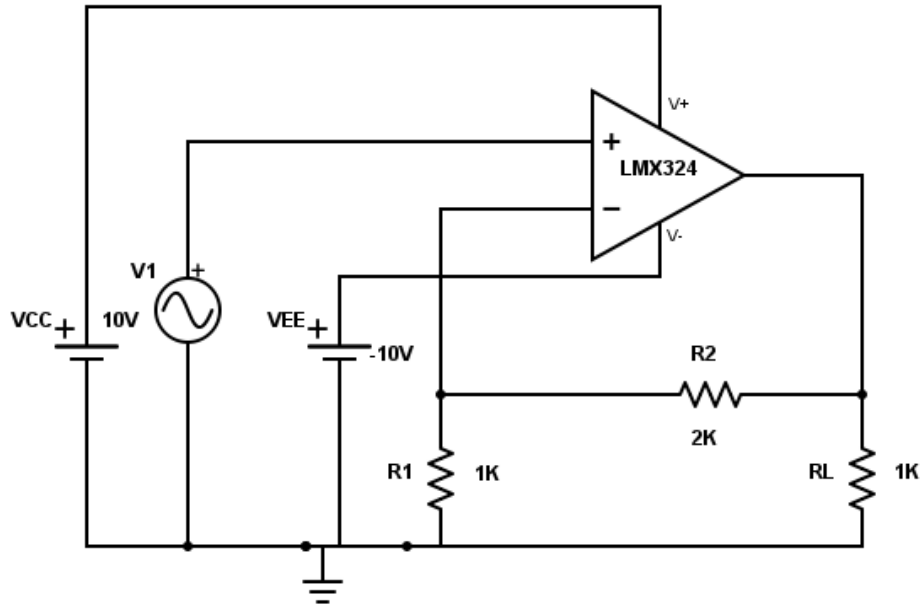


Figura 2-14. Circuito y voltaje de entrada para el ejemplo 2.7.

Según lo que ya hemos visto  $V_{out} = V1 * 3$ . Dado que V1 es una onda senoidal ( $V1 = \sin(\omega t)$ ), la salida  $V_{out}$  también será una onda senoidal pero con una amplitud el doble de la original y con signo invertido ( $V_{out} = 3\sin(\omega t)$ ). En la Figura 2-15 **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se ve en azul el voltaje de entrada V1 y en negro la salida.

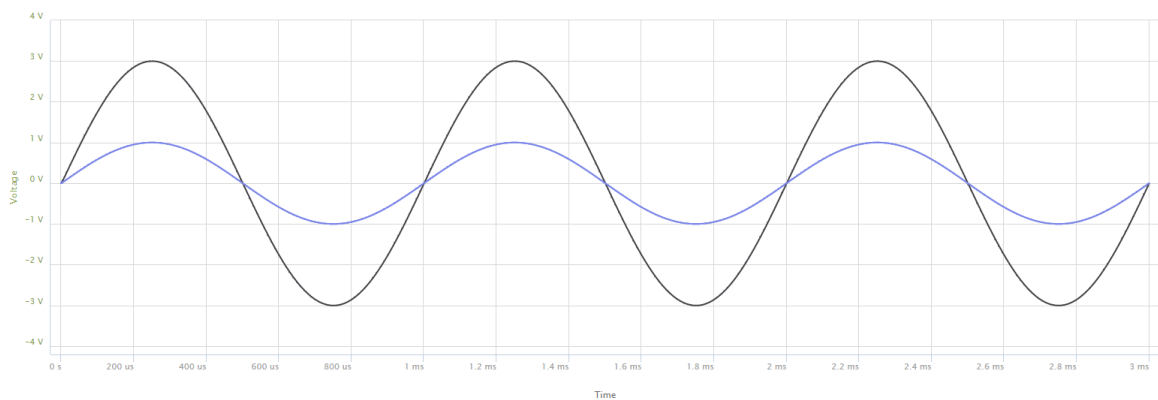


Figura 2-15. Voltajes de entrada y salida ejemplo 2.7.

En cuanto a la corriente, teniendo en cuenta que

$$i = \frac{V_{out}}{RL} = \frac{V1 * 3}{1k\Omega}$$

Entonces la corriente tendrá una forma de onda senoidal similar a la del voltaje de salida, pero su amplitud estará dada en mili amperios de la siguiente manera.

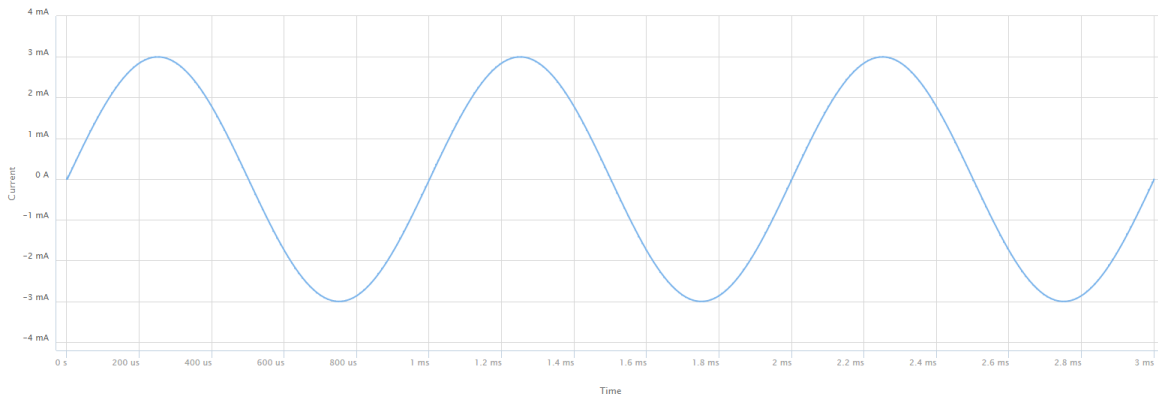


Figura 2-16. Corriente en RL para el circuito del ejemplo 2.7.

### 2.3 Seguidores de voltaje

El circuito de la Figura 2-17 se conoce comúnmente como seguidor de voltaje o amplificador de ganancia unitaria.

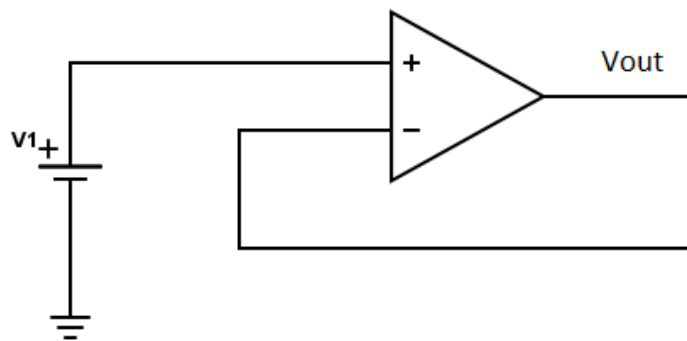


Figura 2-17. Seguidor de voltaje

Si analizamos este circuito podemos concluir que el voltaje de salida del circuito es igual al voltaje de entrada, de modo que:

$$V_{out}=V1$$

Entonces tenemos básicamente un amplificador cuya ganancia es igual a uno.

La pregunta que debemos contestar entonces es: ¿Cuál es la utilidad de un circuito en el cual la salida es exactamente igual a la entrada?

Obtendremos la respuesta si analizamos el circuito desde el punto de vista de la corriente, en el momento de conectar una carga a la salida como se ve en la Figura 2-18.

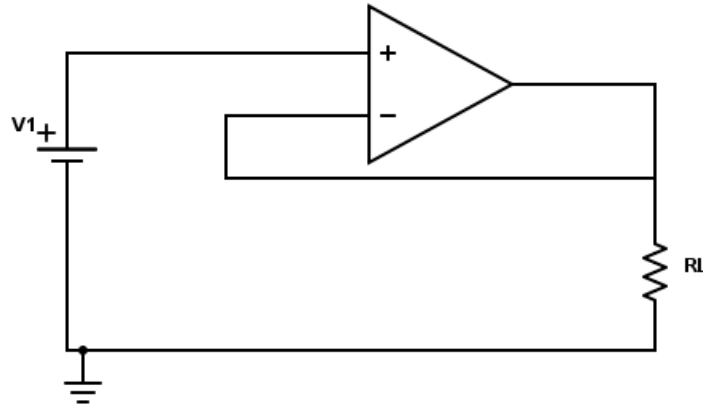


Figura 2-18. Seguidor de voltaje con carga

Ya hemos visto anteriormente que la impedancia de entrada del amplificador operacional es muy elevada, por lo cual las corrientes de entrada son casi nulas, por lo cual la corriente que sale de la fuente V1 será casi igual a cero. Sin embargo, a la salida si puede haber una corriente sobre la carga, así:

$$i = \frac{V1}{RL}$$

Esta corriente no va a provenir de la fuente V1, si no del amplificador operacional. Por este motivo decimos que un seguidor de voltaje es capaz de **eliminar el efecto de carga**.

Para comprender mejor la utilidad de esta configuración vemos el siguiente ejemplo.

- **Ejemplo 2.8**

Suponga que tiene un sensor resistivo, el cual ha decidido acondicionar mediante un divisor de tensión. En la Figura 2-19 RS representa el sensor resistivo y  $V_{out}$  será proporcional a la variación de RS, como se vio en, como  $V_{ou}=V1*RS/(R1+RS)$

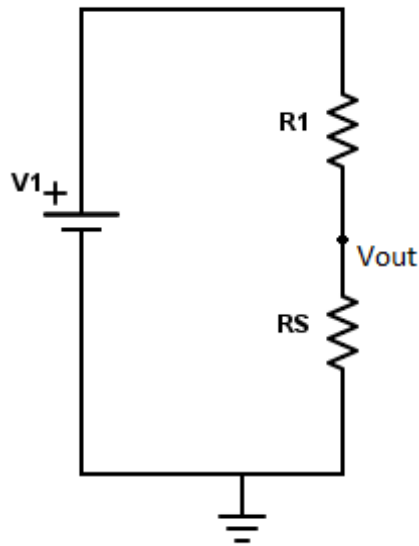


Figura 2-19. Ejemplo 7. Sensor resistivo con divisor de tensión.

Sin embargo, si se requiere que el voltaje de salida  $V_{out}$  vaya conectada una carga  $R_L$ , como se ve en la figura siguiente, entonces el flujo de corriente que va a la carga va a hacer que la corriente por  $R_1$  ya no sea igual a la corriente por  $R_S$ , alterando la ecuación anterior y cambiando el voltaje  $V_{out}$ .

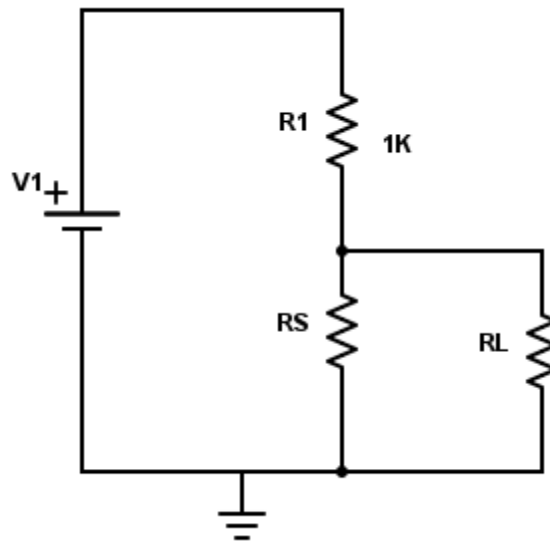


Figura 2-20. Ejemplo 7. Sensor resistivo con divisor de tensión y carga resistiva.

Dicho de otra manera, la corriente que la carga le “pide” al circuito de acondicionamiento va a alterar las relaciones de voltaje en el circuito original.

Una alternativa simple es el uso del seguidor de voltaje como se ve en la Figura 2-21.

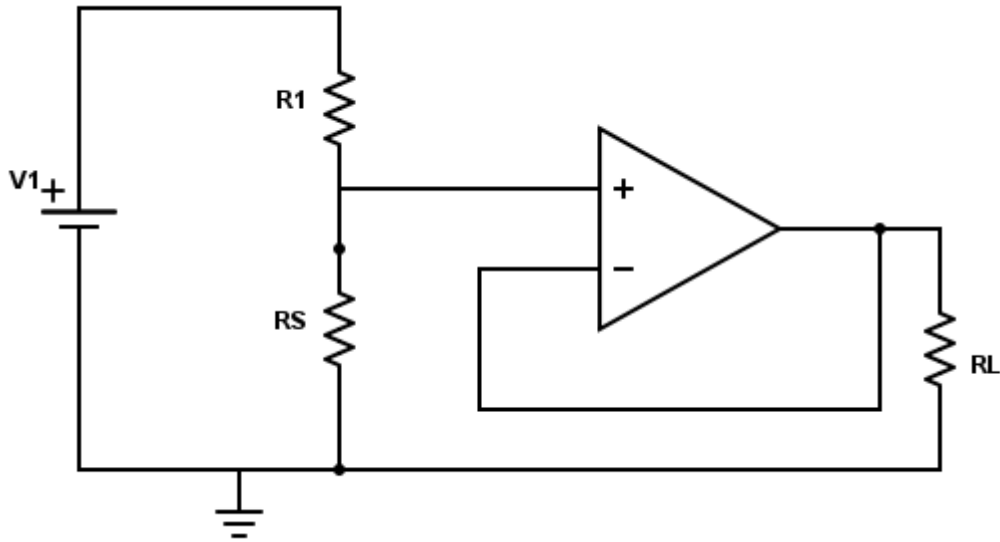


Figura 2-21. Ejemplo 2.8. Sensor resistivo con divisor de tensión, seguidor de voltaje y carga resistiva.

En este caso, el voltaje sobre la resistencia  $R_L$  será  $V_{out} = V_1 \cdot R_S / (R_1 + R_S)$ , y la corriente sobre la resistencia no será suministrada por el circuito divisor de tensión, si no por el amplificador operacional.

- **Ejemplo 2.9: Caso de aplicación**

Vamos a analizar un ejemplo de aplicación para la amplificación de señales.

Suponga que tiene un sensor de temperatura que le entrega un voltaje de  $5 \text{ mV}/^\circ\text{C}$  con el cual usted desea medir temperatura desde  $0^\circ\text{C}$  hasta los  $200^\circ\text{C}$ . El voltaje de este sensor será llevada a la entrada de un conversor análogo digital que recibe entre 0 y 5 voltios, para ser digitalizado.

Diseñe un circuito para el acondicionamiento de la señal de sensor. Use valores comerciales de resistencias.

Para resolver un problema como este debe tenerse iniciarse por identificar la configuración más adecuada para la aplicación requerida y luego tener en cuenta que algunos parámetros del circuito son elección del diseñador, mientras que otros deberán ser calculados. Igualmente es de aclarar que no existe una única solución correcta para

este tipo de ejercicios, dado que es posible que varios circuitos nos entreguen la solución correcta.

Vamos a desarrollar una posible solución paso por paso.

- Análisis del problema:

Si tenemos un sensor que entrega  $5\text{mV}/^\circ\text{C}$ , entonces para una temperatura entre  $0^\circ\text{C}$  y  $200^\circ\text{C}$  tendremos un voltaje entre  $0\text{V}$  y  $1\text{V}$ . Sin embargo, el conversor análogo digital a usar recibe entre  $0\text{V}$  y  $5\text{V}$ . Esto quiere decir que lo que requerimos es una amplificación del circuito (sin invertir signos).

- Elección de la configuración, la ganancia y la polarización:

Es claro que, dadas las características del circuito, es propicio usar un amplificador no inversor. Sin embargo, hay que prestar especial atención al elegir la ganancia y el voltaje de polarización.

Inicialmente, podemos pensar en utilizar una amplificación con una ganancia de 5, de tal manera que si tenemos que:

$$V_{out} = 5 * V_{sen}$$

Donde  $V_{sen}$  es el voltaje que entrega el sensor y que será la entrada del amplificador y  $V_{out}$  es el voltaje ya acondicionado que será la salida del amplificador no inversor.

De esta forma tendremos un voltaje  $V_{out}$  que estará entre  $0\text{V}$  y  $5\text{V}$  para una temperatura entre  $0^\circ\text{C}$  y  $200^\circ\text{C}$ .

Sin embargo, hay que analizar más en detalle este punto al considerar el voltaje de polarización. El voltaje de polarización suele ser un parámetro de diseño que elige el diseñador, generalmente según la disponibilidad de las fuentes de alimentación que habrá en el sistema. Si trabajamos con un conversor análogo digital de  $5\text{V}$ , podemos pensar que sería adecuado tener todo el sistema polarizado con  $5\text{V}$ . En cuanto a la polarización negativa, en este caso no requerimos voltajes negativos a la salida, y podemos pensar en

conectar la polarización negativa a tierra. Para esto debemos considerar usar una referencia amplificador operacional que permita esta conexión, tal como el lm324.

Si decidimos trabajar con esta polarización, debemos tener en cuenta que el voltaje máximo a la salida del amplificador será el voltaje de saturación positiva  $V_{sat}$ , que estará por debajo de los 5V, probablemente alrededor de los 5V. Esto quiere decir que cuando la salida avance un voltaje de saturación (4V aproximadamente, correspondiente a 160°C). Por lo tanto, realmente tendremos una medición efectiva sólo hasta esta temperatura.

Ante esta situación tenemos dos opciones:

- ✓ Trabajar con un voltaje de polarización mayor, para lograr un voltaje de saturación cercano a 5V.
- ✓ Disminuir la ganancia para trabajar en el rango de voltaje que permite la saturación.

Ambas opciones son viables, y generalmente la elección dependerá de la facilidad de elegir los voltajes de polarización. Para este ejemplo, elegiremos bajar la ganancia de tal forma que el voltaje máximo a 200°C sea 4V. Para esto requeriremos una ganancia de 4.

- Cálculo de los resistores:

Ya teniendo clara la configuración y la ganancia, pasaremos a calcular los elementos que forman el circuito.

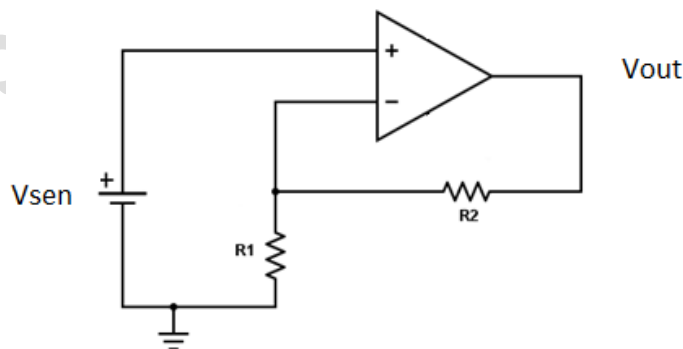


Figura 2-22. Ejemplo 2.9 Caso de aplicación.

Tendremos entonces que

$$V_{out} = V_{sen} \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) = V_{sen} * 4$$

Por lo tanto

$$\frac{R_2}{R_1} = 3$$

Podemos elegir cualquier valor para las resistencias, mientras su relación sea de 3. Para evitar corrientes elevadas elegiremos resistencias del orden de los kilo ohmios.

Ahora debemos encontrar un par de resistencia comerciales que tengan la relación deseada. Vemos algunas opciones.

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{6.8k}{2.2k} = 3.09$$

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{12k}{3.9k} = 3.076$$

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{15k}{5.1k} = 2.94$$

Muy probablemente para cada caso de diseño que tengamos no encontraremos una relación exacta. Además recuerde que las resistencias normalmente tienen tolerancias, lo cual también variará la ganancia. Podemos trabajar con aproximaciones, a menos de que requiramos una aplicación muy precisa y específica.

Para este caso elegiremos la última opción de tal modo que tendremos una ganancia de 2.94 (si no consideramos la tolerancia de los resistores). Tendremos entonces una salida entre 0 y 3.94V para una temperatura de 0°C a 200°C. El circuito total se ve en la Figura 2-23.



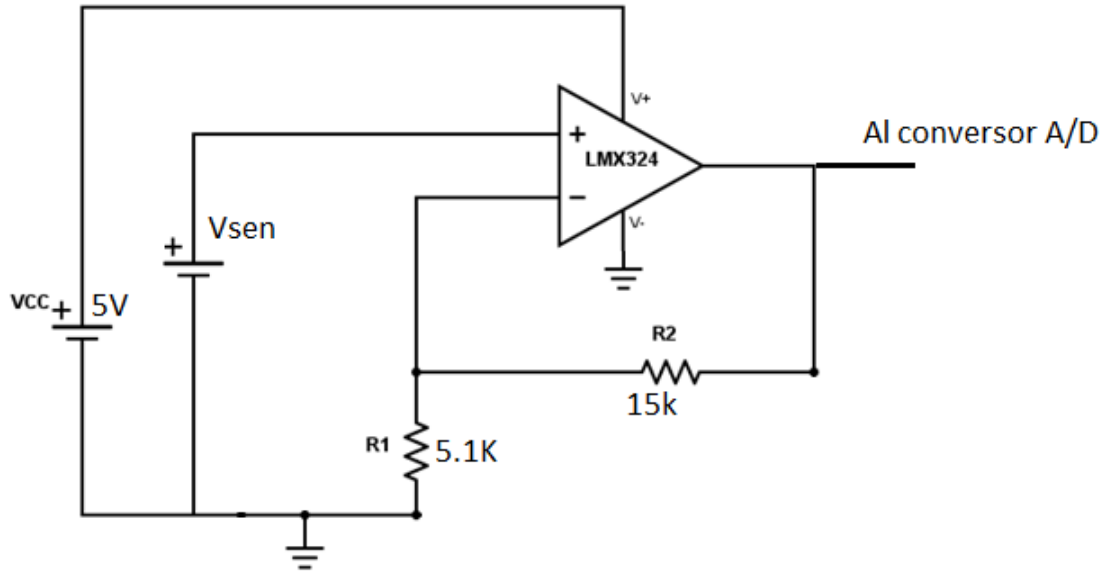


Figura 2-23. Ejemplo 4.9 Circuito completo

### 3. COMPARADORES Y DETECTORES DE CRUCE

Previamente, en la sección 1.1.4, se discutió como un amplificador operacional en lazo abierto actúa como un comparador de señales. En esta sección analizaremos con algo más de detalle los circuitos comparadores y sus aplicaciones como detectores de cruce.

En la Figura 3-1 vemos un comparador en su forma más básica.

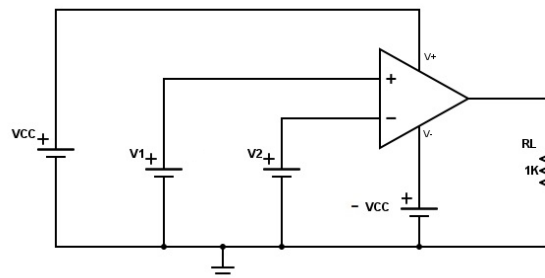


Figura 3-1. Comparador básico

Según lo que ya hemos analizado de este circuito, sabemos que el voltaje a la salida (el voltaje sobre la resistencia de carga  $R_L$ ) dependerá de los voltajes  $V_1$  y  $V_2$  de la siguiente forma: Si  $V_1 > V_2$ , entonces el voltaje de salida será el voltaje de saturación positiva  $+V_{sat}$ ; Si  $V_1 < V_2$ , entonces el voltaje de salida será el voltaje de saturación negativa  $-V_{sat}$ . Veamos la simulación en Partsim de este circuito para unos valores específicos de  $V_1$  y  $V_2$ .

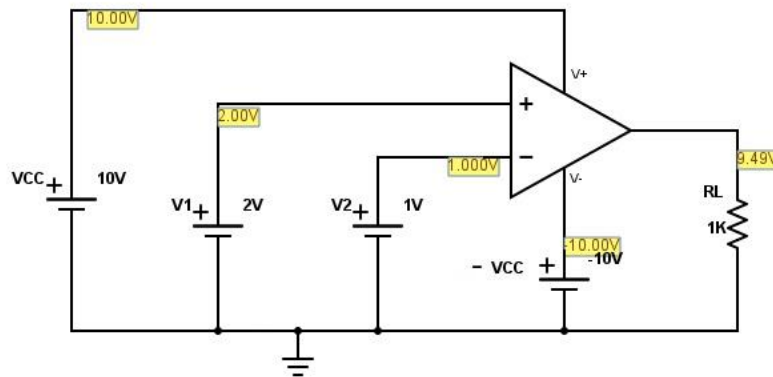


Figura 3-2. Simulación de comparador con el voltaje en la entrada no inversora mayor que en la inversora.

Podemos observar como al tener  $V_1 > V_2$  la salida es un voltaje alto de 9.49V. Este sería el valor del voltaje de saturación positiva ( $+V_{sat}=9.49V$ ).

Ahora pongamos el caso en el que  $V_1 < V_2$ . Y hagamos la simulación.

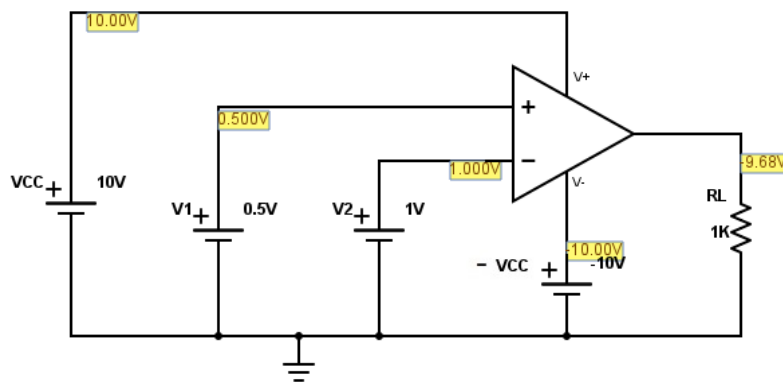


Figura 3-3. Simulación de comparador con el voltaje en la entrada no inversora menor que en la inversora.

Podemos observar que en este caso la salida baja a un valor negativo de -9.68V. Quiere decir que el voltaje de saturación negativo es  $-v_{sat} = -9.68$ , lo cual implica que  $+v_{sat}$  y  $-v_{sat}$  no necesariamente son iguales en magnitud.

En la siguiente tabla veremos los resultados de la simulación para diversos valores de V1 y V2.

V1	V2	Vout
1v	2v	-9.68V
0.5v	5v	-9.68V
0.01v	0.02v	-9.68V
0.02v	0.01v	9.49V
5v	1v	9.49V
8v	1v	9.49V

Lo que se observa en este cuadro es que no importa ni la magnitud de los voltajes independientes, ni la magnitud de la diferencia; lo único que determinará el valor del voltaje de salida es importa cuál de las dos entradas es más grande y el valor de los voltajes de polarización (del cual dependerá el voltaje de saturación).

Ahora analicemos que pasa en un comparador cuando las señales de entrada no son DC, si no señales variantes en el tiempo. Para esto, examinemos el mismo circuito del caso anterior pero reemplacemos la fuente que está conectada en la entrada no inversora por una señal senoidal, como en la Figura 3-4. Suponga que la señales de entrada tienen la forma que se observa en la Figura 3-5 (una senoidal de 5V de amplitud y un voltaje DC de 1V).

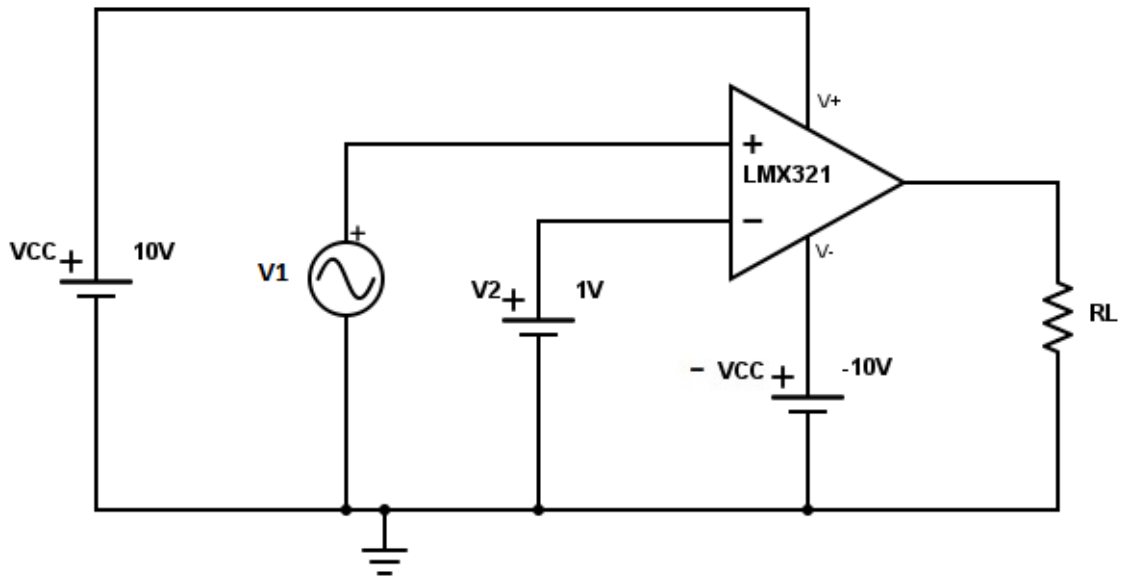


Figura 3-4. Comparador con señal senoidal en una entrada.

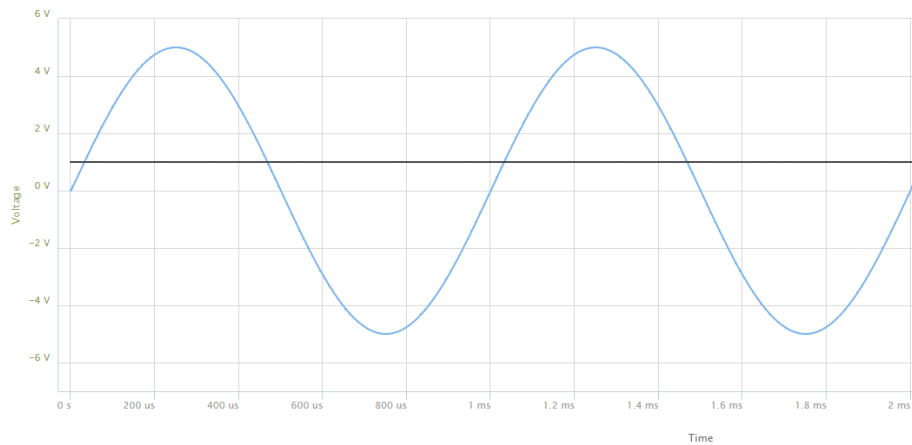


Figura 3-5. Señal de entrada para el circuito de la figura anterior

En este caso el comportamiento del circuito será el mismo que hemos visto anteriormente, sólo que en cada instante de tiempo el voltaje de la entrada no inversora cambia, y por lo tanto en cada instante deberemos analizar cuál de los dos voltajes de entrada es mayor, para conocer el valor de la salida.

Así, el voltaje de salida será un valor bajo ( $-V_{sat}=-9.68$ ) siempre que la señal senoidal tenga un valor menor a 1V, y tendrá un valor alto ( $+V_{sat}=9.49$ ) siempre que la señal senoidal sea mayor a 1V. En la Figura 3-6 se puede ver la gráfica de las dos entradas (V1:señal senoidal en azul, V2: voltaje 1V DC en negro) y la salida (Vout:verde).

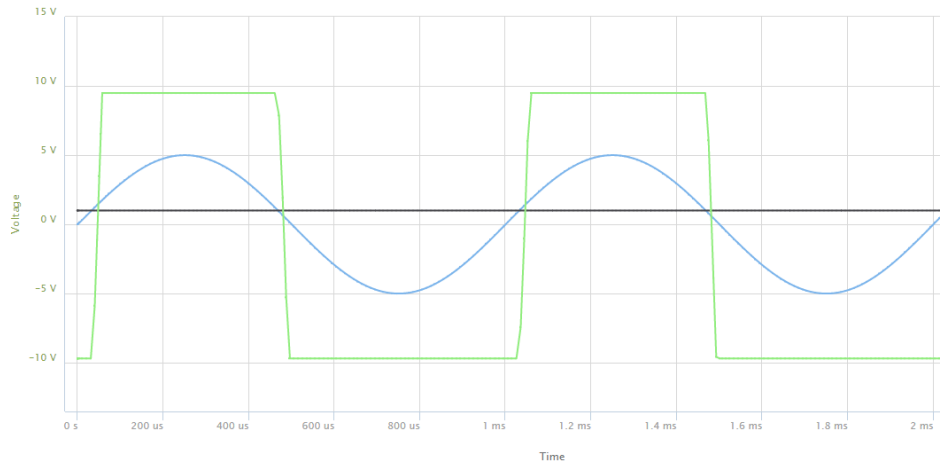


Figura 3-6. Entradas y salidas del circuito comparador de la figura 8.

Observe que la señal no cambia instantáneamente de  $-V_{sat}$  a  $+V_{sat}$  y viceversa. El tiempo de subida y bajada de la señal estará determinado por la estructura interna del amplificador operacional (su referencia y fabricante). De este modo, habrá un pequeño desfase entre el momento en que la señal senoidal supera el voltaje de 1V y el momento en el que la salida alcanza el nivel alto (igualmente para la bajada).

### Detector de cruce por cero

El circuito de la Figura 3-7 se conoce normalmente como un detector de cruce por cero. El objetivo de este circuito es tener una salida en la cual un flanco de subida o bajada permite conocer el momento en el cual una señal de entrada cruza el nivel de tierra (0V). Este tipo de circuitos suele utilizarse en voltajes AC, cuando se requiere un circuito que, de alguna forma, requiere sincronizarse con el voltaje AC.

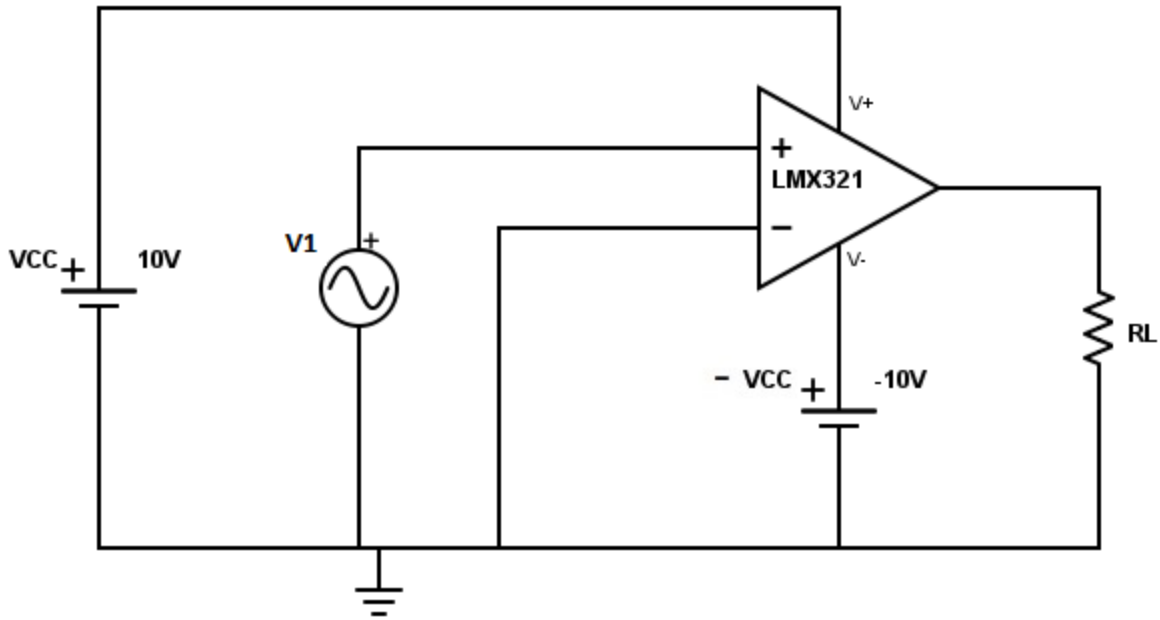


Figura 3-7. Detector de cruce por cero

En este ejemplo específico, los voltajes de polarización son  $\pm 10\text{V}$  y el voltaje de entrada V1 es una señal senoidal de 5V de amplitud. En la Figura 3-8 se ve el voltaje de entrada V1 en negro y el voltaje de salida Vout en negro.

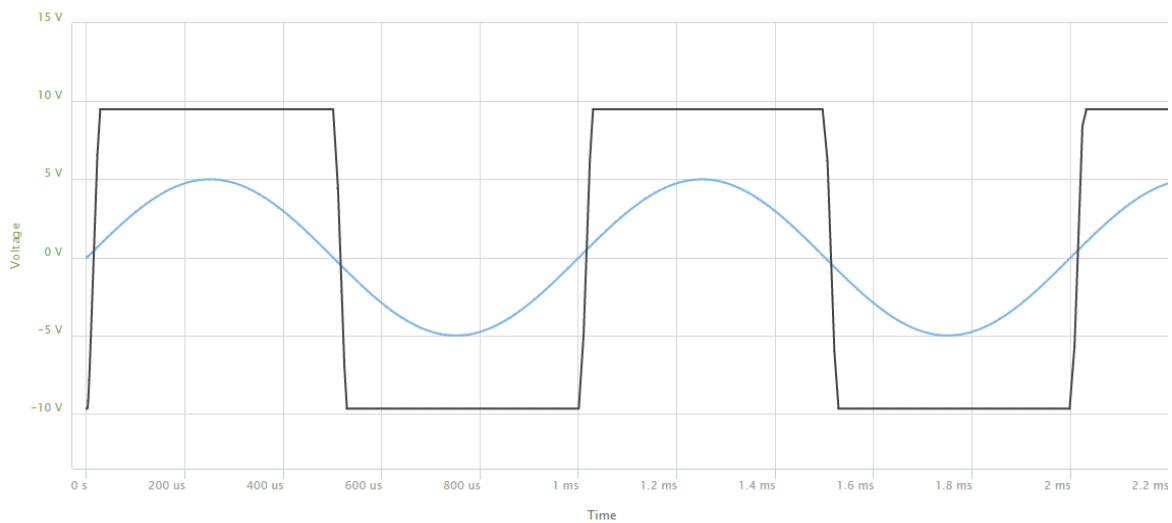


Figura 3-8. Entrada y salida del detector de cruce por cero

De esta forma, cada que la señal de entrada cruce por cero habrá un flanco de subida o de bajada en la señal de salida, dependiendo de si la señal de entrada cruza hacia arriba o hacia abajo.

## Detector inversor de cruce por cero

De manera similar al circuito anterior, se puede realizar un detector inversor de cruce por cero, utilizando el circuito de Figura 3-9.

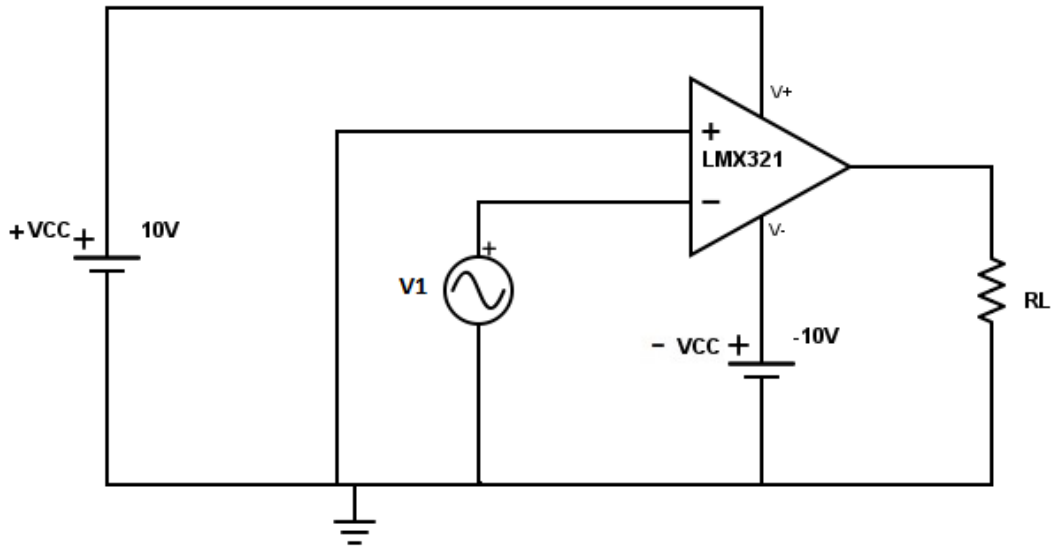


Figura 3-9. Detector inversor de cruce por cero

Como se ven la Figura 3-10, en este caso la salida tiene un flanco de subida cuando la señal de entrada cruza el cero hacia abajo y un flanco de bajada cuando el cruce por cero es hacia arriba.

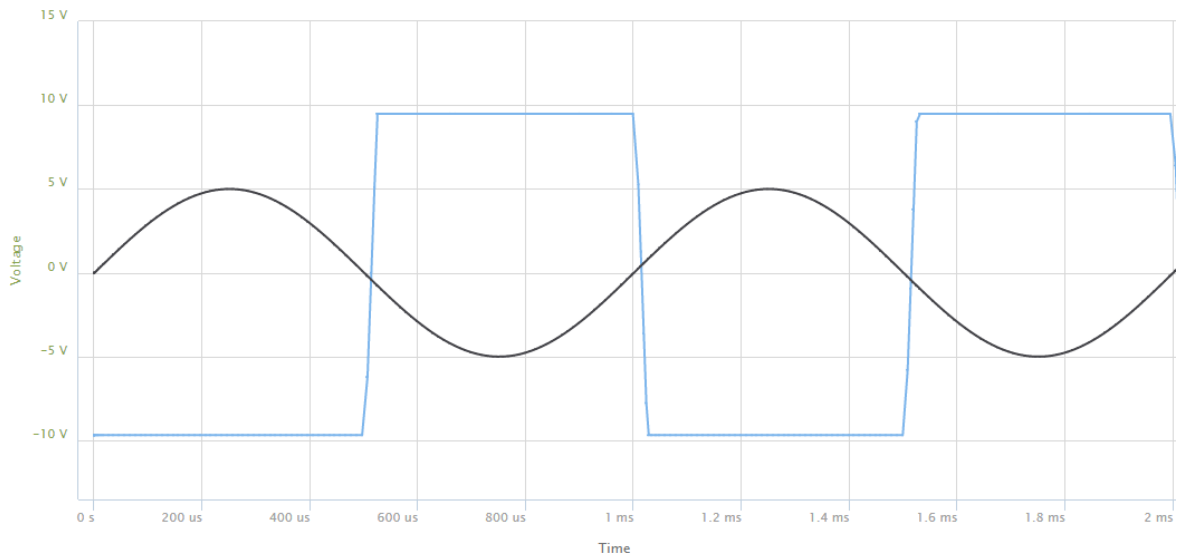


Figura 3-10. Entrada y salida del detector inversor de cruce por cero