

AMPLIFICADORES INVERSORES Y NO INVERSORES

INTRODUCCIÓN

En este tema, se utiliza el amplificador operacional en una de sus más importantes aplicaciones: la fabricación de un amplificador. Un *amplificador* es un circuito que recibe una señal en su entrada y produce una versión más grande sin distorsión de la señal recibida en su salida. Todos los circuitos de este capítulo tienen una característica en común: una resistencia externa de alimentación se conecta entre la terminal de salida y la terminal de entrada (-). Este tipo de circuito se conoce como *circuito de retroalimentación negativa*.

Con la retroalimentación negativa se obtienen muchas ventajas, todas basadas en el hecho de que el desempeño del circuito ya no depende de la ganancia de lazo abierto del amplificador operacional, A_{OL} . Al agregar la resistencia de retroalimentación se forma un circuito de la salida a la entrada (-). El circuito resultante tiene ahora una *ganancia de lazo cerrado* o *ganancia de amplificador*, A_{CL} que es independiente de A_{OL} . (Siempre que A_{OL} sea mucho mayor que A_{CL} .)

Como se mostrará, la ganancia de lazo cerrado, A_{CL} , depende sólo de las resistencias externas. Para obtener mejores resultados deben emplearse resistencias de 1 % de tolerancia, con lo cual el valor de A_{CL} quedará dentro del mismo rango. Obsérvese que las resistencias externas adicionales no modifican la ganancia de lazo abierto A_{OL} , ésta sigue variando de un amplificador operacional a otro. De modo que el hecho de añadir retroalimentación negativa permitirá hacer caso omiso de los cambios en A_{OL} siempre que éste sea grande.

AMPLIFICADOR INVERSOR

Introducción El circuito de la figura 8 es uno de los amplificadores operacionales más utilizados. Se trata de un amplificador cuya ganancia en lazo cerrado desde E_i a V_o está definida por R_f y R_i . Puede amplificar señales de ca o cd. Para entender su funcionamiento se parte de las dos premisas realistas de simplificación que se propusieron anteriormente.

1. El voltaje E_d entre las entradas (+) y (-) es esencialmente 0, cuando V_o no está en saturación.
2. La corriente requerida por las terminales de entrada (+) o (-) es despreciable.

Voltaje positivo aplicado a la entrada inversora

En la figura 8 se aplica un voltaje positivo E_i por medio de la resistencia de entrada R_i a la entrada (-) del amplificador operacional. Se da retroalimentación negativa mediante la resistencia R_f . El voltaje entre las entradas (+) y (-) es casi igual a 0 V. Por lo tanto, la terminal de entrada (-) también está a 0 V, de modo que el potencial de tierra está en la entrada (-). Por esta razón se dice que la entrada (-) es una tierra *virtual*.

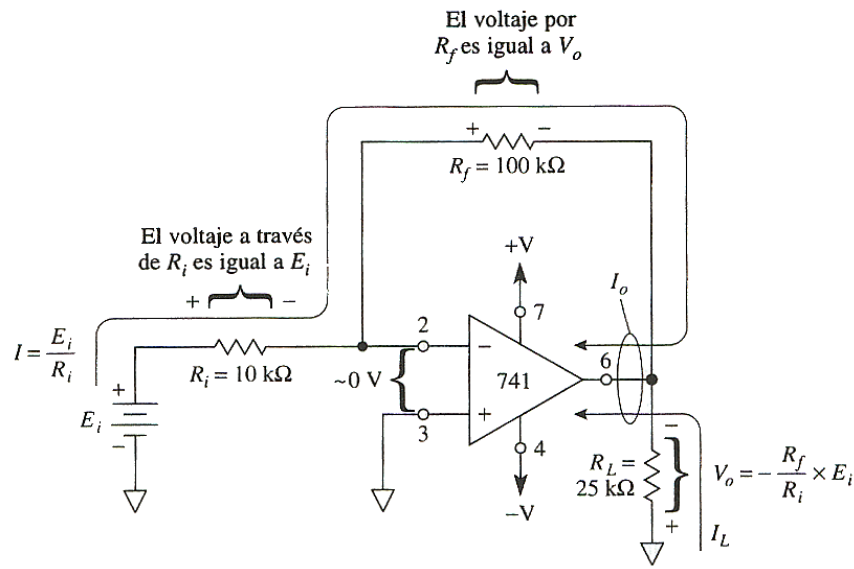


FIGURA 8 Voltaje positivo aplicado a la entrada (-) de un amplificador inversor. R_i convierte este voltaje en corriente, I ; R_f convierte otra vez I en una versión amplificada de E_i .

Ya que en un extremo de R_i está a E_i y el otro a 0 V, la caída de voltaje por R_i es E_i . La corriente I a través de R_i se determina por medio de la ley de Ohm:

$$I = \frac{E_i}{R_i}$$

Toda la corriente de entrada I fluye por R_i , ya que una cantidad despreciable es utilizada por la terminal de entrada (-). Observe que la corriente que pasa por R_f está definida por R_i y por E_i , no por R_f , V_o o el amplificador operacional.

La caída de voltaje a través de R_f es sencillamente $I (R_f)$. o

$$V_{R_f} = (I)(R_f) = \frac{E_i}{R_i} R_f$$

Como se muestra en la figura 8, un extremo de R_f y uno de la carga R_L están conectados. El voltaje de este punto a tierra es V_o . Los otros extremos de R_f y R_L están conectados a potencial tierra. Por lo tanto V_o es igual a V_{R_f} (el voltaje a través de R_f). Para obtener la polaridad de V_o observe que el extremo izquierdo de R_f está a potencial tierra. La dirección de la corriente establecida por E_i obliga a que el extremo derecho de R_f se vuelva negativo. Por lo tanto, V_o es negativo cuando E_i es positivo. Ahora, igualando V_o con V_{R_f} y agregando un signo negativo para indicar que V_o se convierte en negativo cuando E_i se hace positivo se tiene lo siguiente:

$$V_o = -E_i \frac{R_f}{R_i}$$

Ahora, al tomar en cuenta la definición de que la ganancia en lazo cerrado del amplificador es A_{CL} la ecuación anterior se transforma en lo siguiente:

$$A_{CL} = \frac{V_o}{V_i} = \frac{-R_f}{R_i}$$

El signo menos en la ecuación anterior muestra que la polaridad de la salida V_o está invertida con respecto a E_i . Por esta razón, el circuito de la figura 8 se denomina *amplificador inversor*.

Voltaje negativo aplicado a la entrada inversora

En la figura 9, se muestra un voltaje negativo, E_i , aplicado a través de R_i a la entrada inversora. Todos los principios y las ecuaciones anteriores se siguen utilizando. La única diferencia entre las figuras 8 y 9 es la dirección de las corrientes. Inviertiendo la polaridad del voltaje de entrada, E_i , se invierte la dirección de todas las corrientes y las polaridades de voltaje. Ahora la salida del amplificador se hará positiva cuando E_i se vuelva negativo.

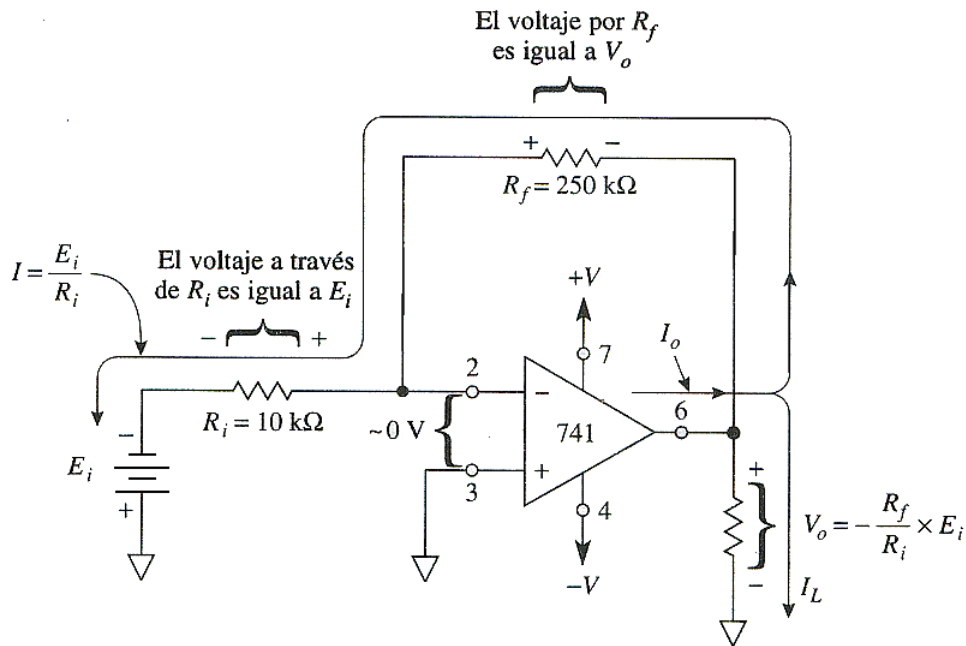
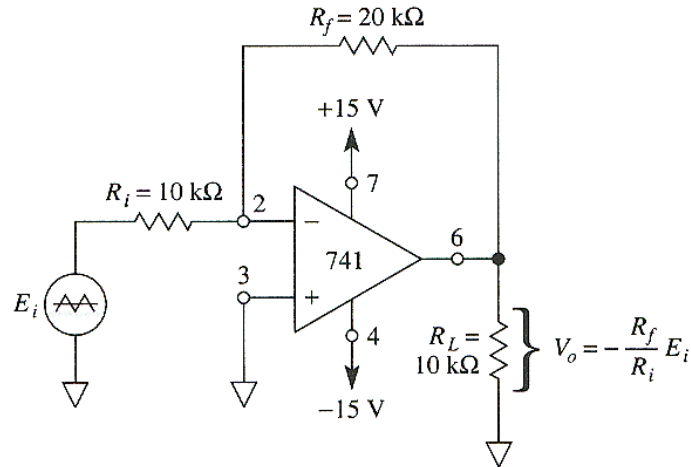


FIGURA 9 Voltaje negativo aplicado a la entrada (-) de un amplificador inversor.

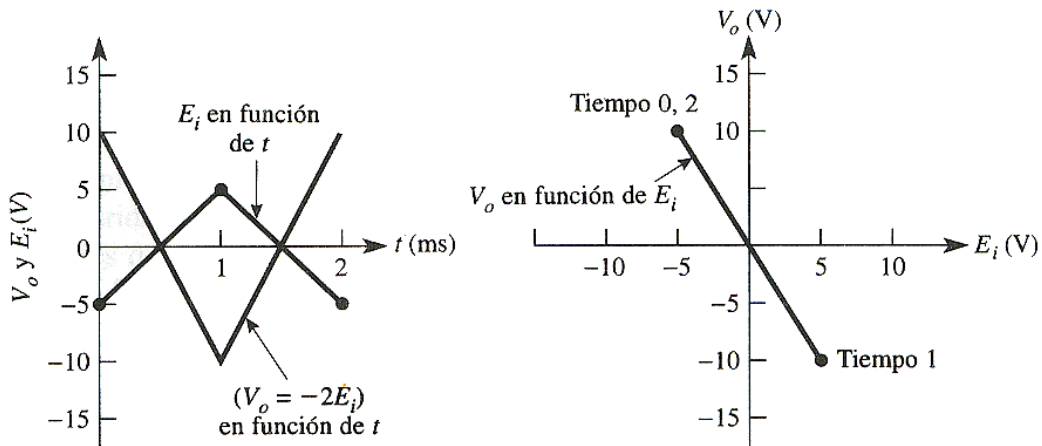
Voltaje aplicado a la entrada inversora

En la figura 10 se muestra una señal de ca de voltaje E_i aplicada a la entrada inversora a través de R_i . Para el medio ciclo positivo, las polaridades del voltaje y las direcciones de

corrientes son las mismas que en la figura 8. Para el medio ciclo negativo, el voltaje, las polaridades y las direcciones de corriente son las mismas que en la figura 9. La forma de onda de la salida es la negativa (o 180° fuera de fase) de la onda de entrada, como se muestra en la figura 10(b). Esto es, cuando E_i es positivo, V_o es negativo, y viceversa. Las ecuaciones deducidas en la sección anterior son aplicables a la figura 10 para voltajes de ca.



(a) La entrada ca en E_i se amplifica por -2 .



(b) Pantalla en el osciloscopio de E_i en función de t y de V_o en función de t .

(c) Pantalla en el osciloscopio de V_o en función de E_i .

FIGURA 10 El circuito amplificador inversor en el caso (a) tiene una señal de entrada de ca y una ganancia de -2 . Las gráficas en función del tiempo se muestran en (b) y la característica de entrada-salida se muestra en (c). Observe que la pendiente de V_o en función de E_i en (c) corresponde a la ganancia en circuito cerrado A_{CL} .

Sumador inversor

En el circuito de la figura 11, V_o es igual a la suma de los voltajes de entrada con la polaridad invertida. Expresado en forma matemática;

$$V_o = -(E_1 + E_2 + E_3)$$

La operación del circuito se explica Con sólo observar que el punto de suma S y la entrada (-) están a potencial de tierra. La corriente I_1 se establece mediante E_1 y R_i la corriente I_2 por E_2 y R e I_3 por E_3 y R . Expresado en forma matemática;

$$I_1 = \frac{E_1}{R}, \quad I_2 = \frac{E_2}{R}, \quad I_3 = \frac{E_3}{R}$$

Dado que la entrada (-) tiene una corriente mínima, I_1 , I_2 , e I_3 fluyen por R_f . Es decir, la suma de las corrientes de entrada fluye a través de R_f y produce una caída de voltaje V_o .

$$V_o = -(I_1 + I_2 + I_3)R_f$$

Sustituyendo las corrientes por las expresiones dadas para corriente y reemplazando por R , se obtiene la ecuación;

$$V_o = -\left(\frac{E_1}{R} + \frac{E_2}{R} + \frac{E_3}{R}\right)R = -(E_1 + E_2 + E_3)$$

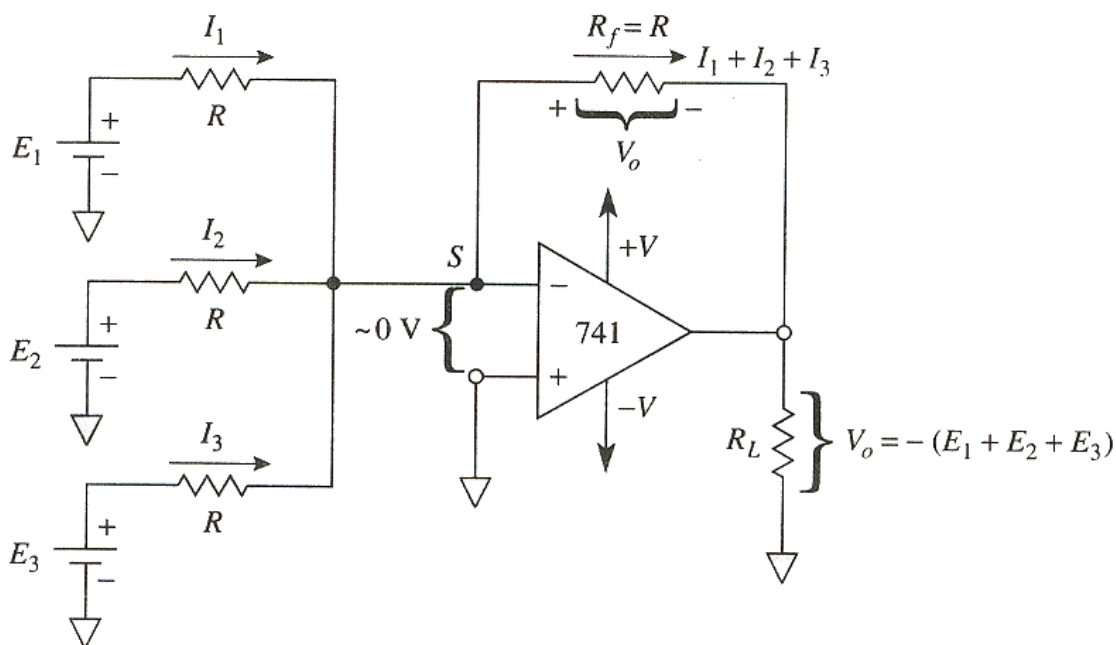


FIGURA 11 Sumador inversor, $R = 10 \text{ k}\Omega$.

SEGUIDOR DE VOLTAJE

Introducción. El circuito de la figura 12 se denomina *seguidor de voltaje*; pero también se conoce como *seguidor de fuente*, *amplificador de ganancia unitaria*, *aislador (búfer)* o

amplificador de aislamiento. El voltaje de entrada, E_i , se aplica directamente a la entrada (+). Ya que el voltaje entre las terminales (+) y (-) del amplificador operacional puede considerarse 0:

$$V_o = E_i$$

Observe que el voltaje de salida iguala al voltaje de entrada, tanto en magnitud como en signo. Por lo tanto, como el nombre del circuito lo indica, el voltaje de salida *sigue* al voltaje de entrada o de fuente. La ganancia del voltaje es 1 (o la unidad), como se puede ver en:

$$A_{CL} = \frac{V_o}{E_i} = 1$$

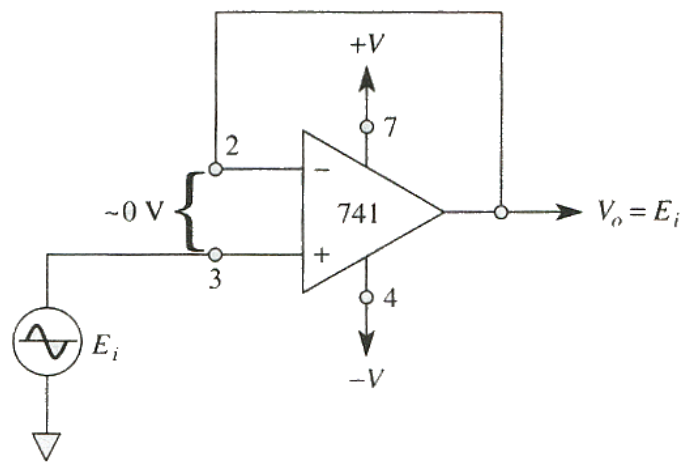


FIGURA 12 Seguidor de voltaje.

En qué se emplea el seguidor de voltaje

Con frecuencia surge una pregunta: ¿Por qué preocuparse por usar un amplificador con una ganancia de 1? La respuesta podrá entenderse mejor si se compara al seguidor de voltaje con un amplificador inversor. En este ejemplo, el interés principal no está en la polaridad de la ganancia de voltaje, sino en el efecto de carga en la entrada.

El seguidor de voltaje se utiliza debido a que su resistencia de entrada es alta (varios megaohms). Por lo tanto, extrae una corriente despreciable de la fuente de señal. Por ejemplo, en la figura 13(a) la fuente de señal tiene, en circuito abierto, un voltaje, E_{gen} de 1.0 V. La resistencia interna del generador es de 90 k Ω . Dado que, por la terminal de entrada del amplificador operacional fluye una corriente insignificante, la caída de voltaje a través de R_{int} es de 0 v. El voltaje E_i de la fuente de alimentación es el voltaje de entrada al amplificador y es igual a E_{gen} . Así:

$$V_o = E_i = E_{gen}$$

Ahora, consideraremos la misma fuente de señal conectada con un amplificador inversor cuya ganancia es -1 (ver la figura 13(b)). Como se indicó anteriormente, la resistencia de

entrada aun amplificador inversor es R_i . Esto provoca que el voltaje del generador, E_{gen} se divide entre R_{int} y R_i . Aplicando la ley de división de voltaje, se encuentra el voltaje terminal del generador E_i .

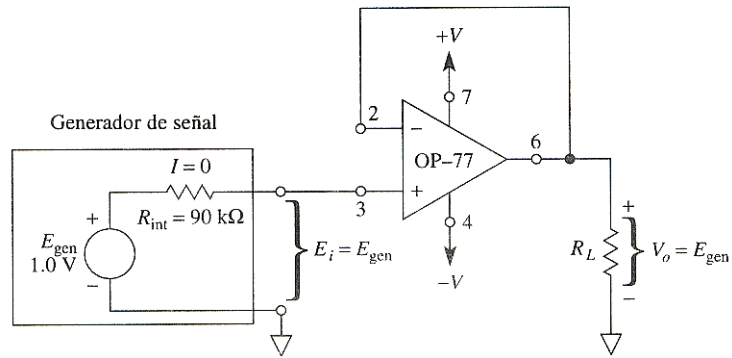
$$E_i = \left(\frac{R_i}{R_{int} + R_i} \right) E_{gen} = \left(\frac{10k\Omega}{10k\Omega + 90k\Omega} \right) 1.0V = 0.1V$$

Por lo tanto, este 0.1 V es lo que se convierte en voltaje de entrada del amplificador inversor. Si el amplificador inversor tiene una ganancia de sólo -1, el voltaje de salida V_o es -0.1 V.

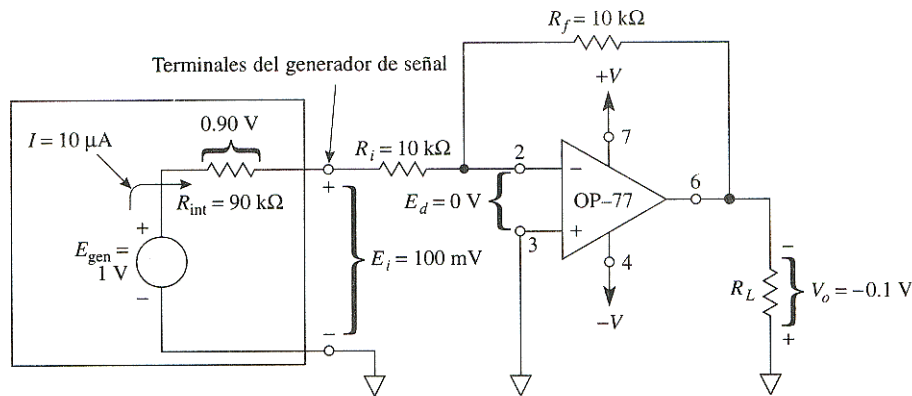
En conclusión, si una fuente de alta impedancia se conecta con un amplificador inversor, la ganancia de voltaje V_o respecto a E_{gen} no está dada por R_f y R_i . La ganancia real debe incluir R_{int} de la siguiente manera:

$$\frac{V_o}{E_{gen}} = - \frac{R_f}{R_i + R_{int}} = - \frac{10k\Omega}{100k\Omega} = -0.1$$

Si es necesario amplificar e invertir una señal de un circuito de alta impedancia y no se quiere tomar corriente de la señal, primero *aísle* la fuente con un seguidor de voltaje. Luego alimente la salida del seguidor aun inversor. Ahora se analizará un circuito que amplifica y aísla, pero *no* invierte una fuente de señal: el amplificador no inversor.



(a) Básicamente no se toma corriente de E_{gen} . La terminal de salida del amplificador operacional puede proporcionar hasta 5 mA manteniendo un voltaje constante a E_{gen} .



(b) E_{gen} se divide entre su propia resistencia interna y la resistencia de entrada del amplificador.

FIGURA 13 Comparación del efecto de carga entre amplificadores inversores y no inversores en una fuente de alta resistencia.

EL AMPLIFICADOR NO INVERSOR

Análisis del circuito

En la figura 14 se representa un amplificador no inversor, lo que significa que el voltaje de salida, V_o tiene la misma polaridad que el voltaje de entrada, E_i . La resistencia de entrada del amplificador inversor es R_i pero la resistencia de entrada del amplificador no inversor es muy grande, por lo general excede a 100 MΩ. Dado que prácticamente el voltaje que hay entre las conexiones (+) y (-) del amplificador operacional es 0, ambas están Conectadas al mismo potencial E_i . Por lo tanto, E_i aparece a través de R_i , lo cual provoca que la corriente I fluya como lo indica la ecuación:

$$I = \frac{E_i}{R_i}$$

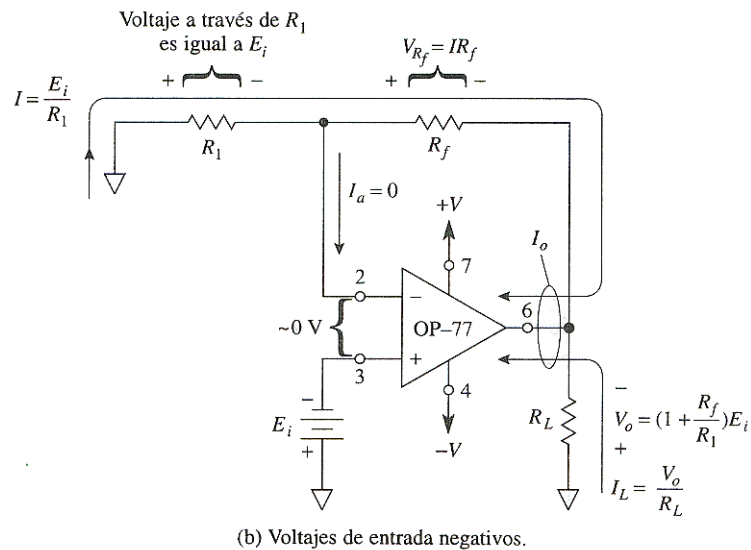
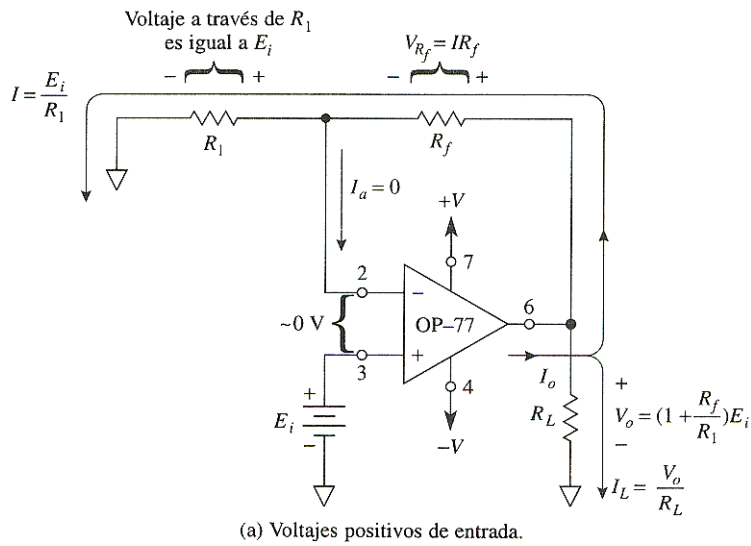


FIGURA 14 Polaridades de voltaje y dirección de las corrientes de amplificadores no inversores.

La dirección de I depende de la polaridad de E_i . Compare la figura 14(a) y (b). La corriente de entrada en la terminal (-) del amplificador operacional es mínima. Por lo tanto, I fluye por R_1 y la caída de voltaje a través de R_f se representa por V_{R_f} y se expresa de la siguiente manera:

$$V_{R_f} = I(R_f) = \frac{R_f}{R_1}$$

El voltaje de salida V_o se encuentra mediante la suma de la caída de voltaje a través de R_1 , la cual es E_i , al voltaje por R_f , el cual es V_{R_f} :

$$V_o = E_i + \frac{R_f}{R_1} E_i$$

o bien:

$$V_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) E_i$$

La ganancia de voltaje, será lo siguiente:

$$A_{CL} = \frac{V_o}{E_i} = 1 + \frac{R_f}{R_1} = \frac{R_f + R_1}{R_1}$$

La ecuación anterior muestra que la ganancia de voltaje de un amplificador no inversor siempre es mayor que 1.

La corriente de carga I_L está dada por V_o/R_L y, por lo tanto, depende sólo de V_o y de R_L

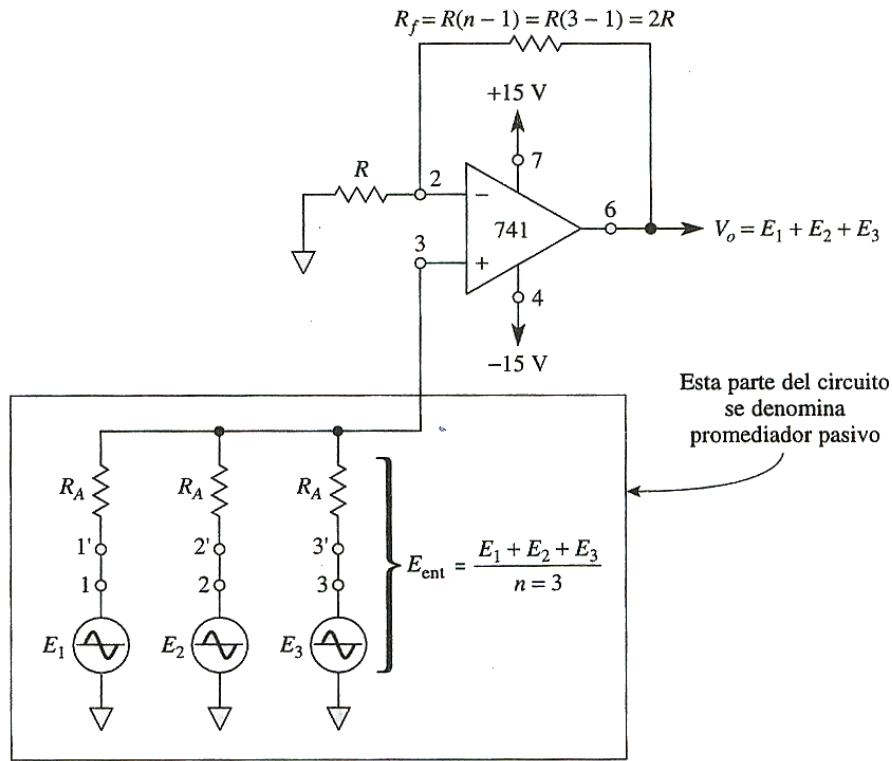
SUMADOR NO INVERSOR

Para construir un sumador inversor de tres entradas se utiliza un promediador pasivo y un amplificador no inversor, tal como se muestra en la figura 15(a). El circuito del promediador pasivo consta de tres resistencias iguales R_A y los tres voltajes que deben sumarse. La salida del promediador pasivo es E_{ent} en donde E_{ent} es el promedio de E_1 , E_2 y E_3 , es decir, $E_{ent} = (E_1 + E_2 + E_3)/3$. Se conecta un seguidor de voltaje a E_{ent} en caso de ser necesario un promediador no inversor.

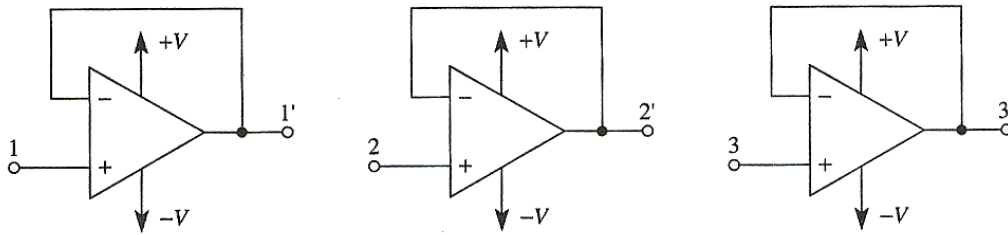
La salida V_o se obtiene de la amplificación de E_{ent} con una ganancia que es igual a la cantidad de entradas n . En la figura 15(a), $n = 3$. Para diseñar el amplificador se escoge un valor adecuado para la resistencia R . Ahora se encuentra R_f a partir de:

$$R_f = R(n-1).$$

Como se muestra en la figura 15(a), el valor de R_f deberá ser $R_f = 10 \text{ k}\Omega (3-1) = 20 \text{ k}\Omega$. Si E_1 , E_2 y E_3 no son fuentes de voltaje ideales, lo que sí serían una batería o la salida del un amplificador operacional, agregue los seguidores de voltaje.



(a) Sumador no inversor.



(b) Si E_1 , E_2 y E_3 no son fuentes de voltaje ideales, basta con aislar cada una de ellas con un seguidor de voltaje.

FIGURA 15 Todas las resistencias de una cantidad de entradas n de un sumador no inversor son iguales, excepto la de realimentación; $R_f = R(n-1)$.

El restador

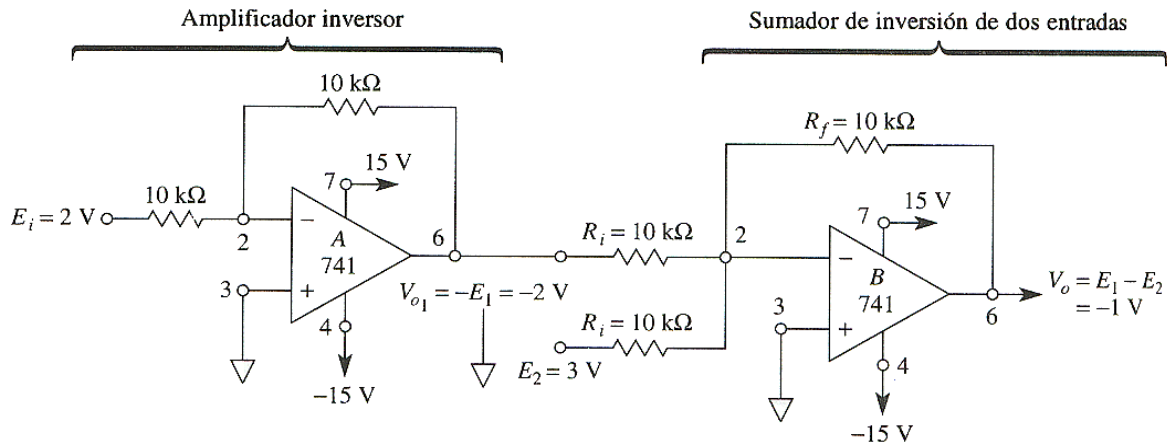
Al circuito que toma la diferencia entre dos señales se le denomina *substractor* [véase la figura 16(a)]. Para construirlo se conecta un amplificador inversor a un promediador inversor de dos entradas. Al analizar este circuito observe que E_1 se transmite a través del amplificador A con una ganancia de -1 y aparece como $V_{o1} = -E_1$. Después, el canal superior del amplificador operacional B invierte V_{o1} (multiplicado por -1). Por lo tanto, el

amplificador A invierte una vez E_1 y después lo hace otra vez el amplificador B para que de esta manera aparezca V_o como E_1 .

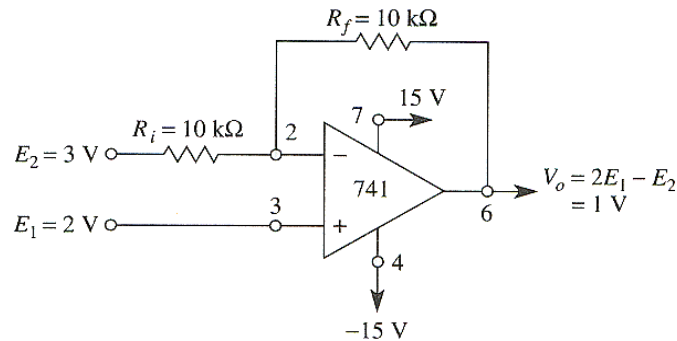
La parte inferior del amplificador operacional B invierte a E_2 y lleva a V_o a $-E_2$. Por lo tanto, V_o responde a la diferencia entre E_1 y E_2 , o

$$V_o = E_1 - E_2$$

Como se muestra en la figura 16(a), si $E_1 = 2\text{ V}$ y $E_2 = 3\text{ V}$, $V_o = 2 - 3 = -1\text{ V}$. Si el valor de R_f es mayor que el de R_i , el restador tendrá ganancia.



(a) Amplificador y sumador de inversión de dos entradas. $V_o = E_1 - E_2$.



(b) Ambas entradas del amplificador son empleadas en la elaboración de un amplificador que calcule la diferencia entre $2E_1$ y E_2 .

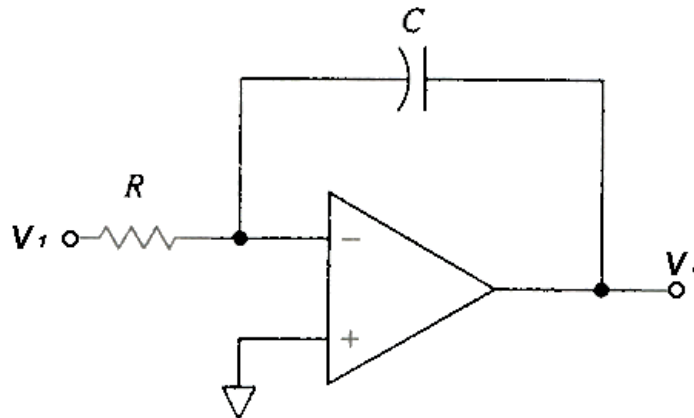
FIGURA 16 Dos ejemplos de amplificadores diferenciales son el substractor de (a) y la utilización del amplificador operacional tanto como amplificador inversor como no inversor en (b).

Integrador

Hasta aquí los componentes de entrada y retroalimentación han sido resistores. Si la componente de retroalimentación utilizada es un capacitor, como en la siguiente figura el circuito resultante será un integrador. El circuito equivalente de tierra virtual muestra que

una expresión entre los voltajes de entrada y de salida puede deducirse a partir de la corriente I , que fluye de la entrada a la salida. Recuérdese que la tierra virtual significa que podemos considerar el voltaje en el punto de unión de R y X , como la conexión a tierra (puesto que $V_1 \approx 0$ V), pero que ninguna corriente circula hacia tierra en ese punto. La impedancia capacitiva puede expresarse como

$$X_c = 1/j\omega C$$



Integrador.

$$I = \frac{V_1}{R} = -\frac{V_o}{X_c}$$

$$V_o = -\left(\frac{1}{\omega RC}\right)V_1$$

En el dominio del tiempo tenemos que:

$$V_o(t) = -\frac{1}{RC} \int V_1(t) dt$$

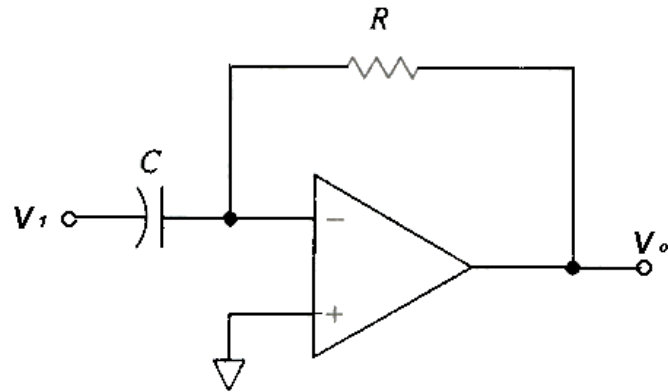
La ecuación muestra que la salida es la integral de la entrada, con una inversión y un multiplicador de escala de $1/RC$. La capacidad para integrar una señal determinada posibilita a la computadora analógica para resolver ecuaciones diferentes y, en consecuencia, permite simular una amplia variedad de circuitos eléctricos análogos a los sistemas físicos en su operación.

Diferenciador

Un circuito diferenciador se ilustra en la siguiente figura. Mientras que no aparece tan útil como los circuitos descritos anteriormente, el diferenciador proporciona una operación útil, usando los criterios de los circuitos anteriores obtendremos la siguiente relación

resultante para el circuito:

$$V_o(t) = -RC \frac{dV_1(t)}{dt}$$



Diferenciador.