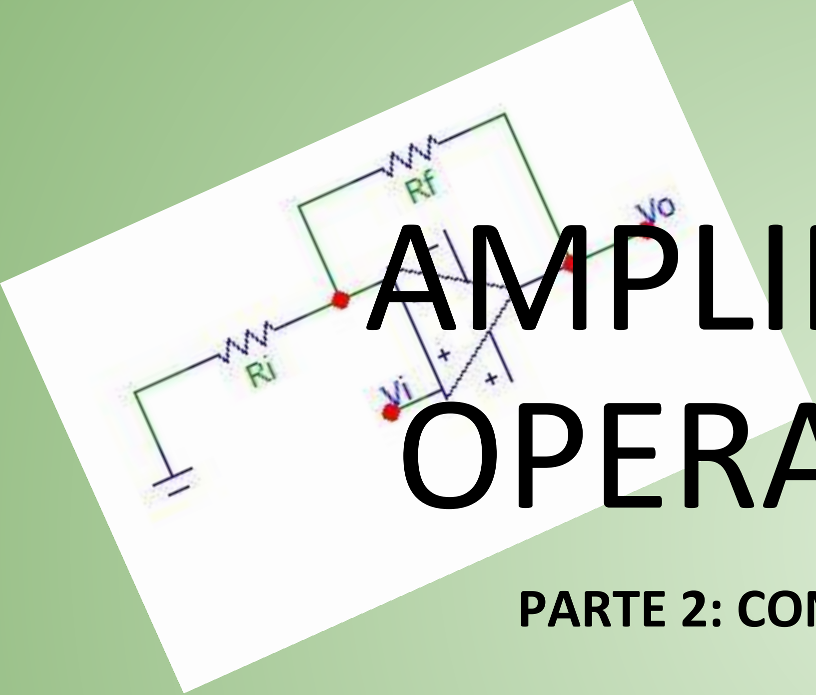
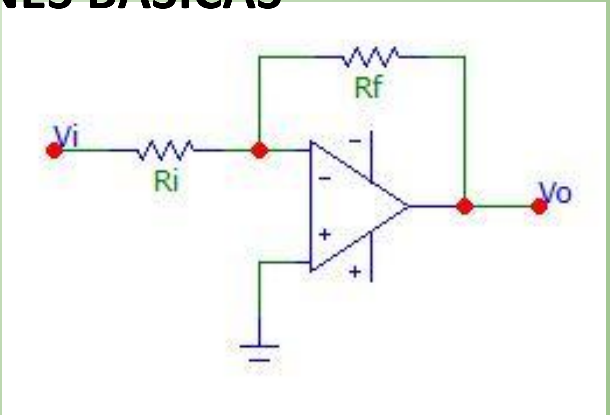


AMPLIFICADORES OPERACIONALES

PARTE 2: CONFIGURACIONES BÁSICAS

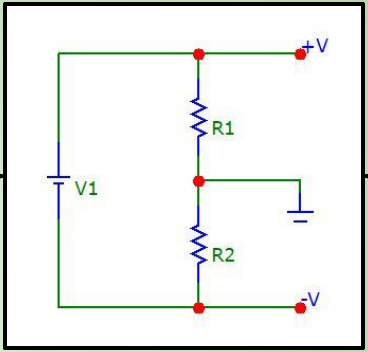


Prof. Ing. Sandro N. Amiel

Antes de analizar las distintas configuraciones debemos aprender cómo se alimentan los operacionales. Para que un Aop pueda entregar salidas negativas es necesario alimentarlo con tensión negativa con respecto a masa. Es decir que la masa en este caso NO es el negativo de la fuente.

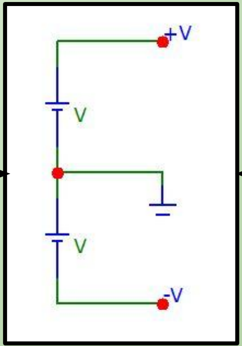
LA ALIMENTACIÓN PARA EL Aop SE PUEDE HACER ASÍ

FUENTE SIMPLE



Mediante un divisor de tensión se fija la masa en la mitad del valor de la fuente. Con respecto a esta masa obtenemos tensión positiva y negativa par el Aop.

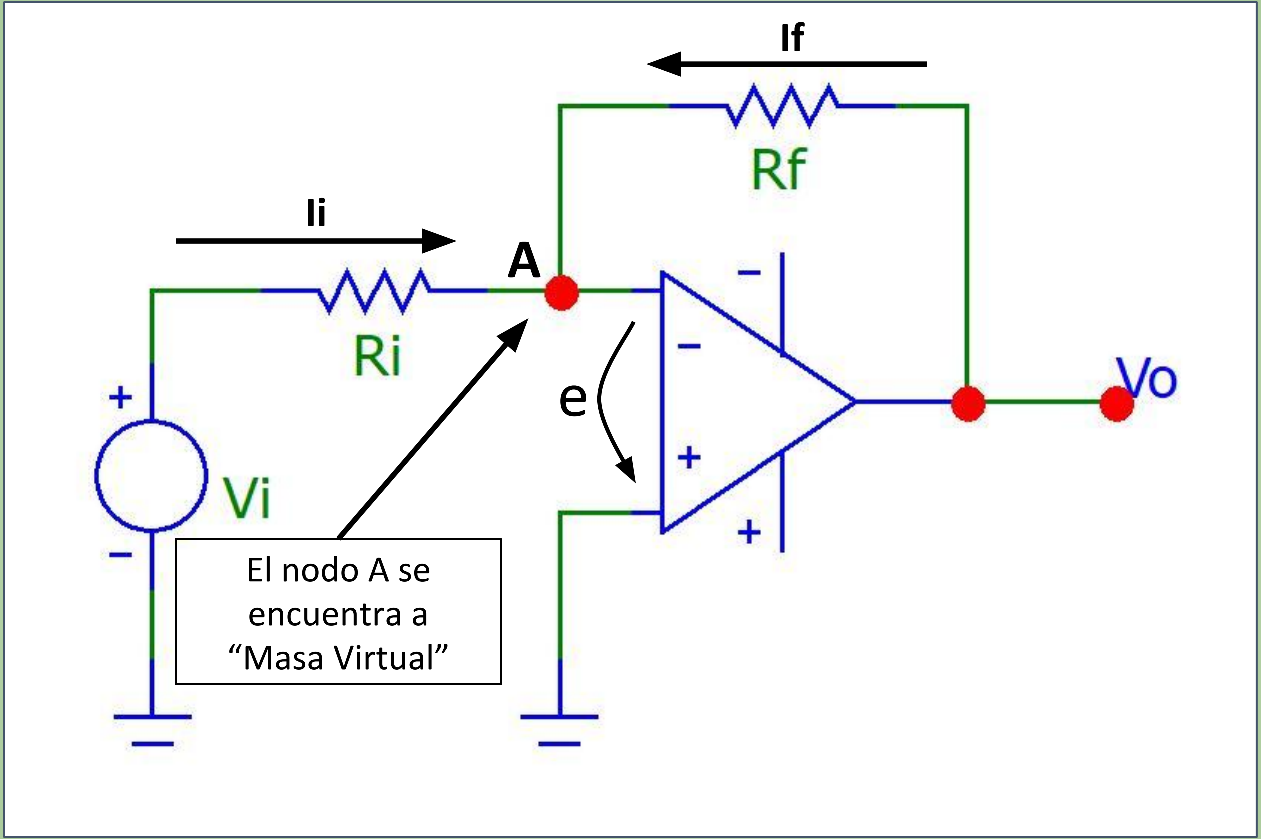
FUENTE DOBLE O “PARTIDA”



Directamente usando 2 fuentes iguales en serie y tomando el punto medio como masa. Pueden ser 2 baterías o una fuente con regulación positiva y negativa.

Prof. Ing. Sandro N. Amiel

AMPLIFICADOR INVERSOR



El Aop amplifica la diferencia entre las entradas, es decir lo que aparece en el circuito como “e”

La ganancia de lazo abierto del Aop se puede escribir entonces así:

$$\text{Aol} = \frac{Vo}{e}$$

Despejando e nos queda:

$$\text{e} = \frac{Vo}{Aol}$$

Para cualquier valor de Vo, si Aol$\rightarrow \infty$ entonces e$\rightarrow 0$

Esto significa que ambas entradas del operacional **siempre estarán prácticamente al mismo potencial.**

En el amplificador inversor, la entrada no inversora se encuentra conectada a masa. Entonces por lo anterior, la entrada inversora (nodo A) se encontrará **a potencial de masa sin estar físicamente conectada a masa.** Por eso se dice que se encuentra a **“Masa Virtual”**

Teniendo esto presente vamos a encontrar la expresión de la ganancia de esta configuración

Aplicando la 1° Ley de Kirchhoff en el nodo A:

$$If + Ii = 0$$

Porque ambas corrientes entran al nodo y ninguna sale. Entonces deberá ser:

$$If = -Ii \quad (1)$$

Por otro lado, si el nodo A está a masa virtual podemos aplicar la Ley de Ohm en cada resistor:

$$Ii = \frac{Vi}{Ri}$$

$$If = \frac{Vo}{Rf}$$

Reemplazando en la expresión (1) nos queda:

$$\frac{Vo}{Rf} = -\frac{Vi}{Ri}$$

Ahora despejamos Vo y obtenemos la expresión de la salida del amplificador inversor:

$$\boldsymbol{Vo = -\frac{Rf}{Ri} \times Vi}$$

De acá se ve que la ganancia de lazo cerrado es:

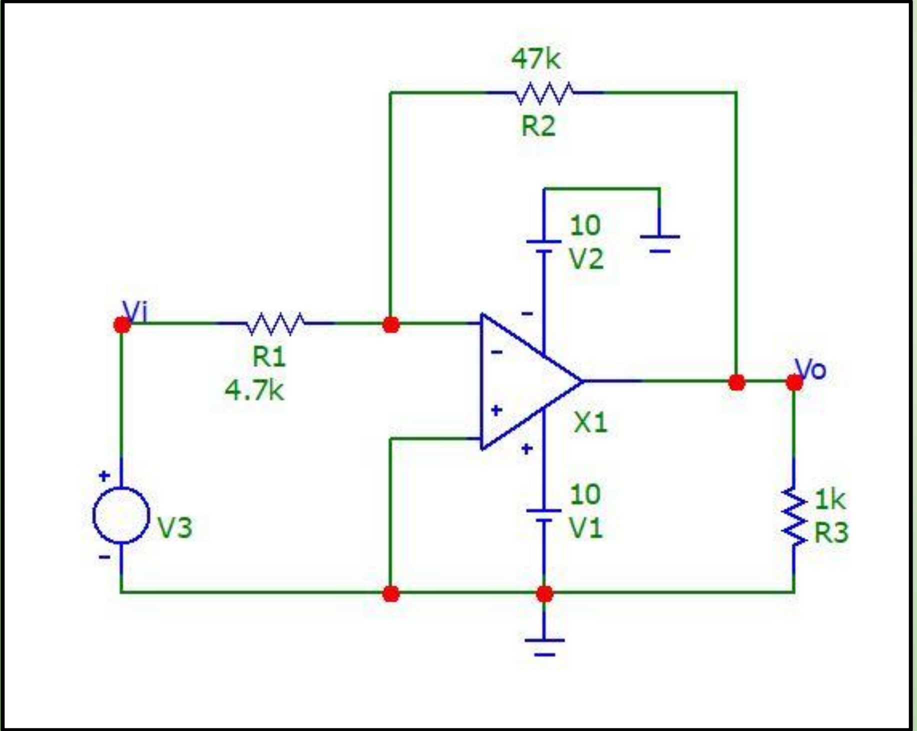
$$\boxed{\boldsymbol{Acl = \frac{Vo}{Vi} = -\frac{Rf}{Ri}}}$$

En estas expresiones podemos observar las siguientes cosas:

- La ganancia de lazo cerrado no depende del operacional sino solamente de los resistores de realimentación, tal como vimos en el desarrollo general de la realimentación (los resistores forman el bloque β).
- Las expresiones para analizar o calcular un amplificador son muy simples.
- El signo negativo de la ganancia indica la inversión de fase en la salida con respecto a la entrada (por eso se llama amplificador inversor)

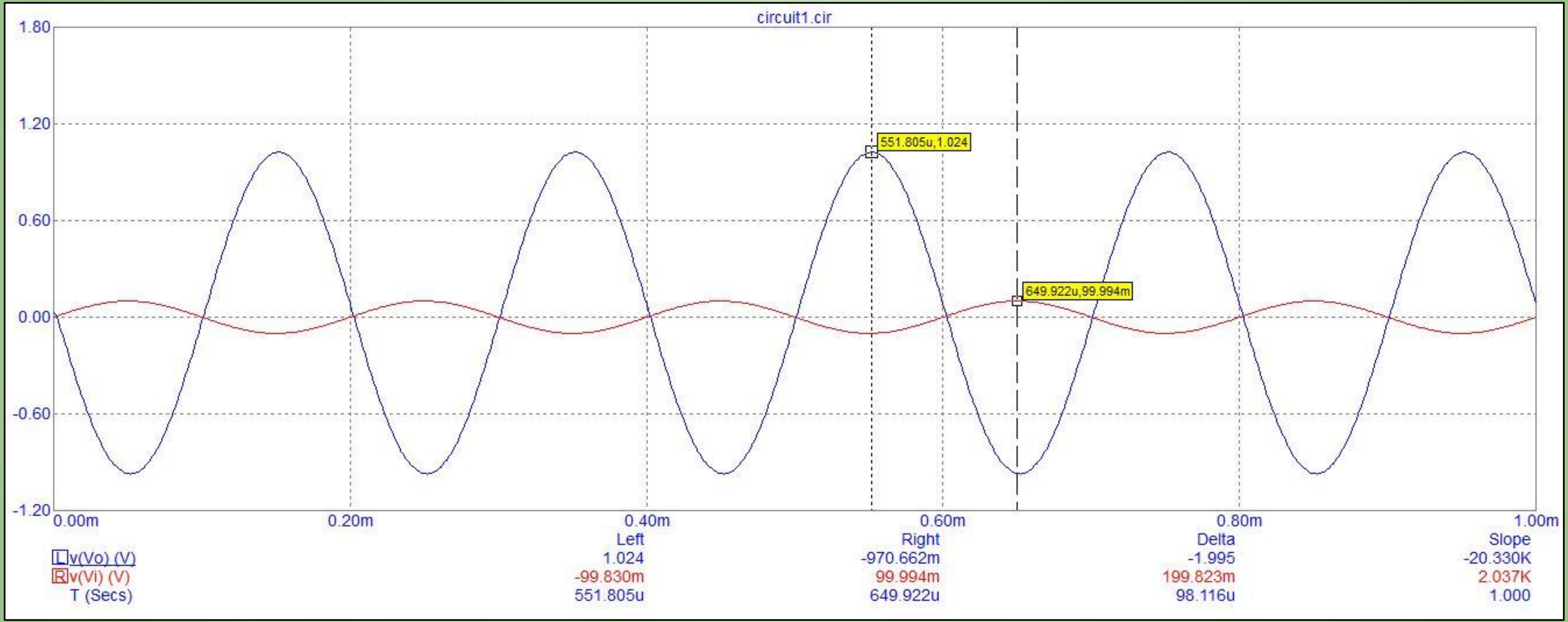
EJEMPLO: DISEÑAR Y SIMULAR UN AMPLIFICADOR INVERSOR DE GANANCIA 10

Observando la expresión de la ganancia vemos que basta con elegir dos resistores cuyo cociente sea 10. Existen restricciones en cuanto a los valores de resistencia que podemos utilizar. En forma general podemos tomar como regla no usar valores inferiores a 1kΩ ni superiores a 470kΩ. En algunas aplicaciones de señales muy débiles incluso se limita el máximo a 100kΩ para reducir problemas de ruido eléctrico.

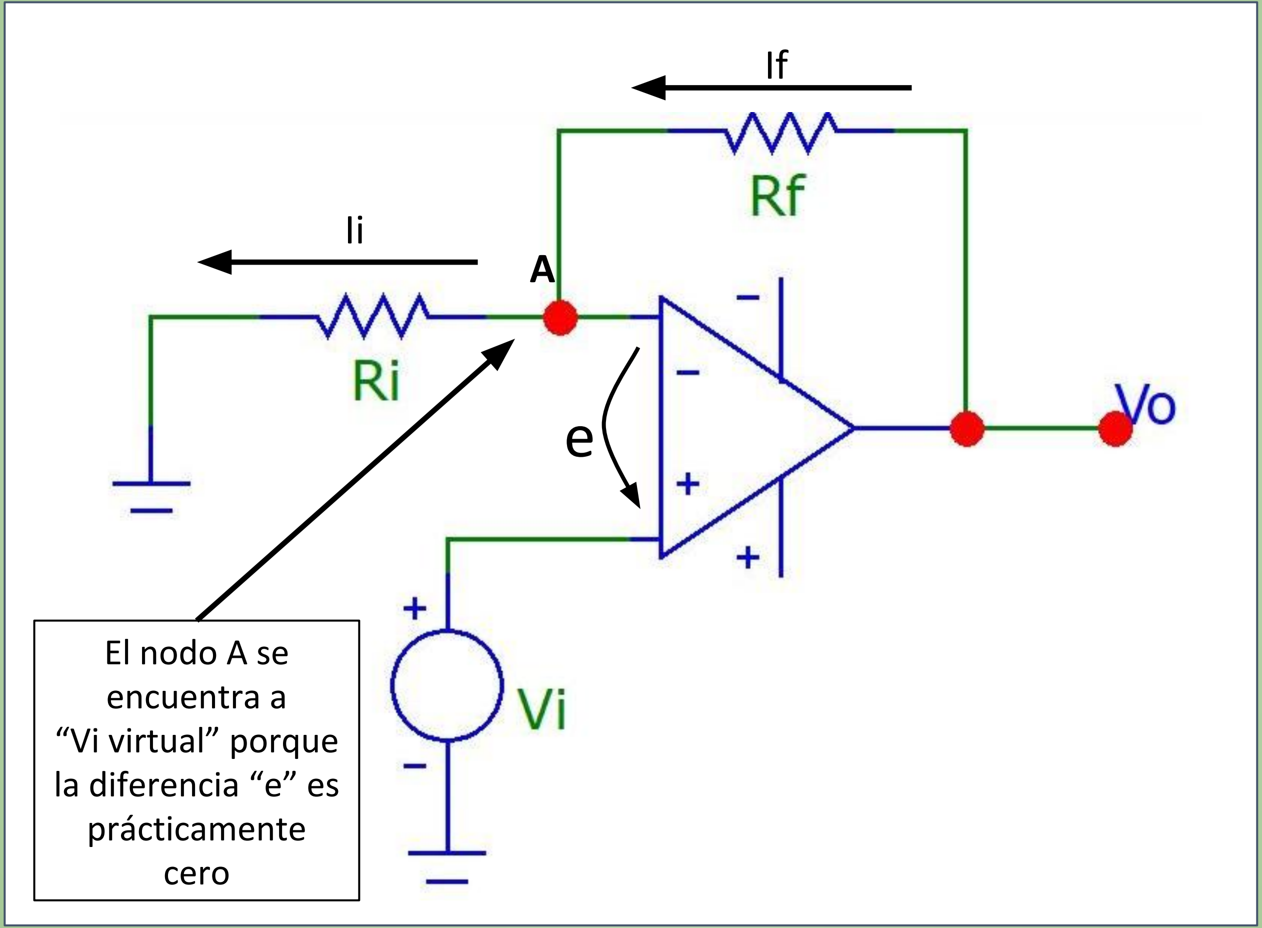


Observamos una Rf (R2) 10 veces mayor que Ri (R1), lo que nos da la ganancia de 10.
Prestar atención a la forma en la que implementamos la fuente partida, que es muy cómoda para realizar las simulaciones.
Aplicamos como señal de prueba una senoidal de 100mV/5KHz y una carga (R3) de 1kΩ.

Simulamos durante 1ms para ver 5 ciclos de la señal (5ciclos/5KHz = 1ms). Podemos observar con los cursores los valores de entrada y salida y la inversión de fase que provoca esta configuración.


circuit1.cir
1.80
1.20
0.60
0.00
-0.60
-1.20
0.00m
0.20m
0.40m
0.60m
0.80m
1.00m
551.805u,1.024
649.922u,99.994m
Left
Right
Delta
Slope
v(Vo) (V)
1.024
-970.662m
-1.995
-20.330K
v(Vi) (V)
-99.830m
99.994m
199.823m
2.037K
T (Secs)
551.805u
649.922u
98.116u
1.000

AMPLIFICADOR NO INVERSOR



Aplicando la 1° Ley de Kirchhoff en el nodo A:

$$If = Ii \quad (1)$$

Porque no hay corriente que entre o salga del Aop debido a su resistencia de entrada infinita.

Si el nodo A está a Vi virtual podemos aplicar la Ley de Ohm en cada resistor:

$$Ii = \frac{Vi}{Ri}$$

$$If = \frac{Vo - Vi}{Rf}$$

Reemplazando en la expresión (1) nos queda:

$$\frac{Vo - Vi}{Rf} = \frac{Vi}{Ri}$$

Ahora despejamos Vo y obtenemos la expresión de la salida del amplificador no inversor:

$$Vo - Vi = \frac{Rf}{Ri} \times Vi$$

$$Vo = Vi + \frac{Rf}{Ri} \times Vi = \left(\boldsymbol{1 + \frac{Rf}{Ri}}\right) \times \boldsymbol{Vi}$$

De acá se ve que la ganancia de lazo cerrado es:

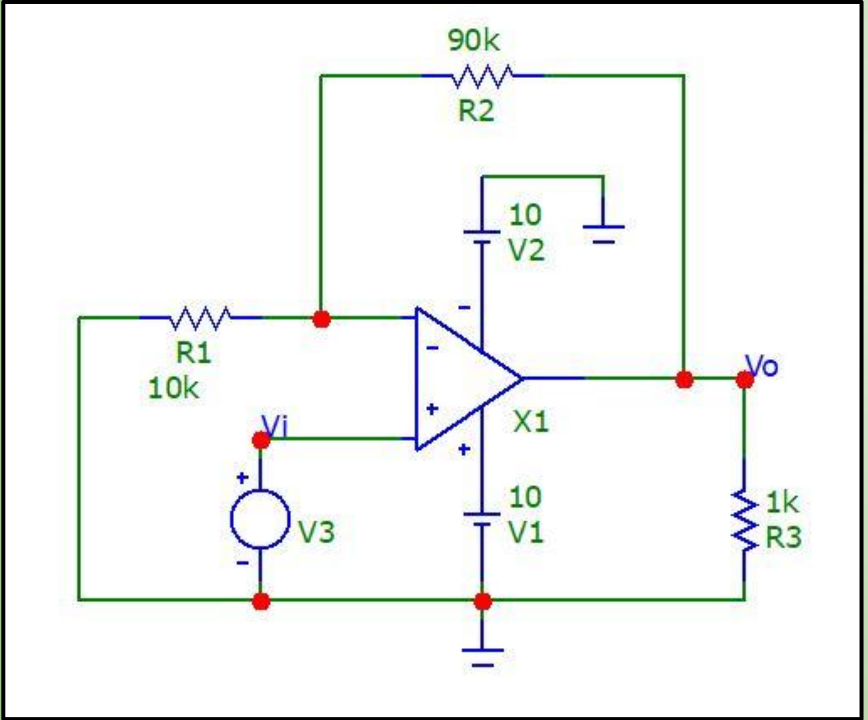
$$\boxed{\boldsymbol{Acl = \frac{Vo}{Vi} = \left(1 + \frac{Rf}{Ri}\right)}}$$

Observaciones:

- La realimentación sigue estando en la entrada inversora (tiene que ser negativa), cambia el lugar por el que ingresa la señal.
- La expresión de la ganancia contiene un 1, lo que indica que esta configuración siempre tendrá ganancia mayor o igual a 1, por lo que siempre amplifica (en inversor puede usarse para atenuar haciendo que su ganancia sea menor a 1).
- La ganancia es positiva, indicando que no hay inversión en la salida.

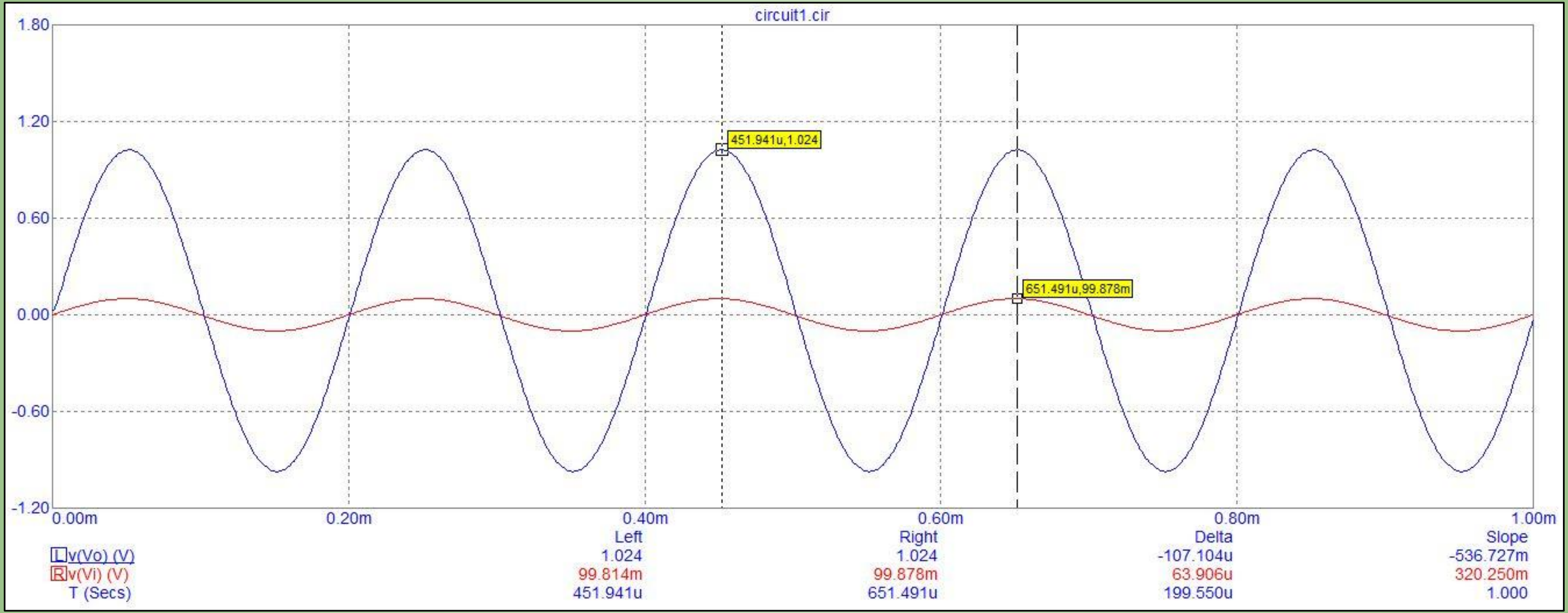
EJEMPLO: DISEÑAR Y SIMULAR UN AMPLIFICADOR **NO INVERSOR** DE GANANCIA 10

En este caso, si queremos una ganancia de 10, el cociente de las dos resistencias debe ser 9 ya que hay un 1 en la expresión sumando. Debemos buscar dentro del rango recomendado dos resistores cuyo cociente sea 9. Lo más probable es que no encontremos entre los valores comerciales. Las opciones si necesitamos un valor exacto de la ganancia son usar resistores al 1% de tolerancia, que tienen más valores comerciales, o colocar un preset y ajustar la ganancia al ponerlo en funcionamiento.



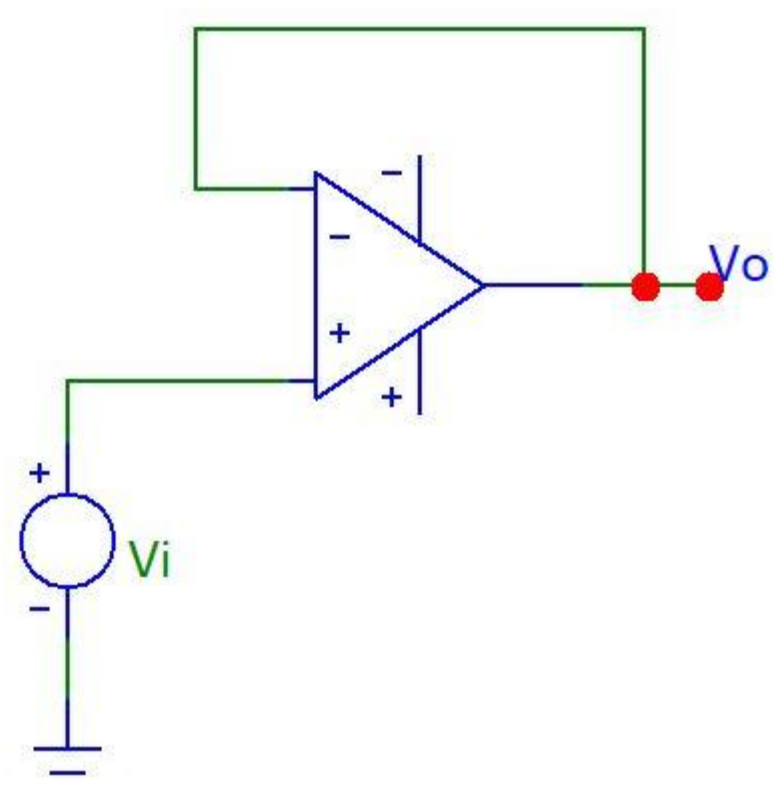
Es importante tener en cuenta que la realimentación debe ser negativa, por lo que la red de resistores debe estar conectada siempre a la entrada inversora. Usamos nuevamente una señal senoidal de prueba de 100mV/5KHz.

Simulamos durante 1ms para ver 5 ciclos de la señal (5ciclos/5KHz = 1ms). Podemos observar con los cursores los valores de entrada y salida. En este caso no hay inversión de fase en la salida.



Prof. Ing. Sandro N. Amiel

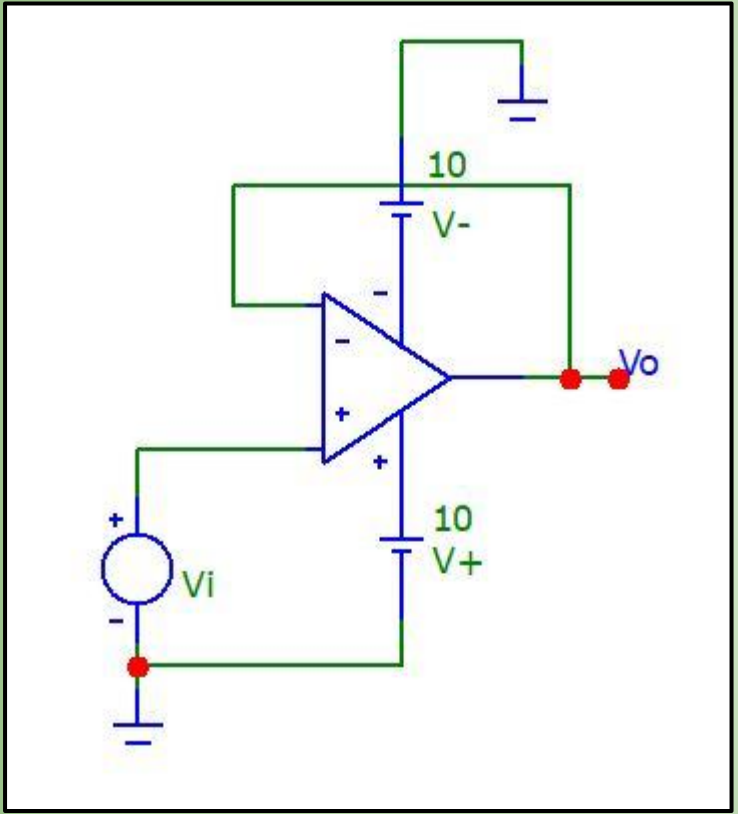
SEGUIDOR, SEPARADOR o “BUFFER”



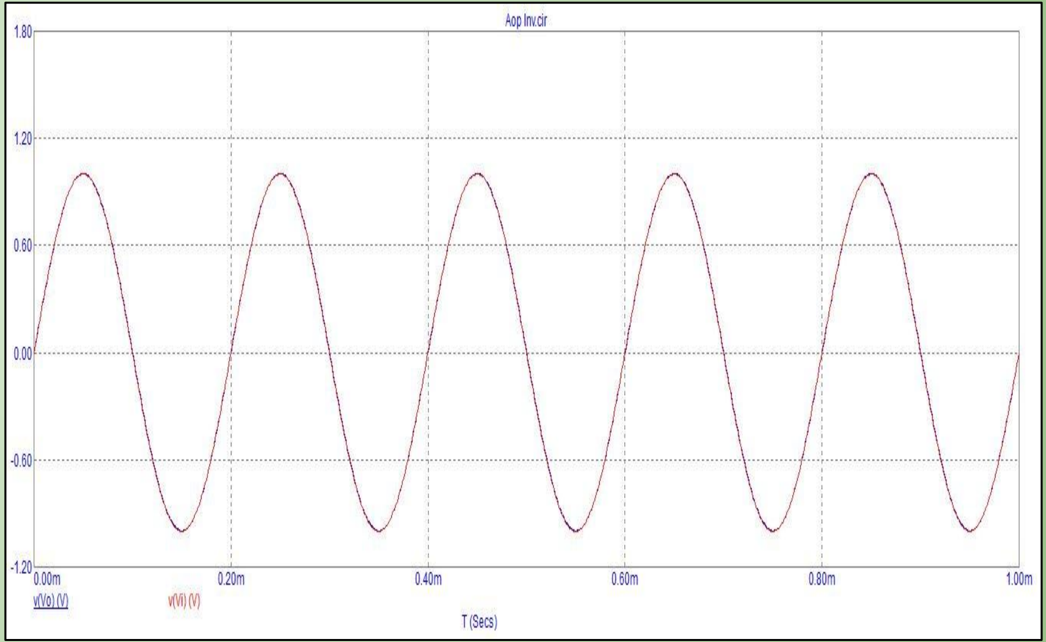
Esta configuración no amplifica tensión. Tiene realimentación unitaria.
Podemos ver que

$$\mathbf{Vo = Vi}$$

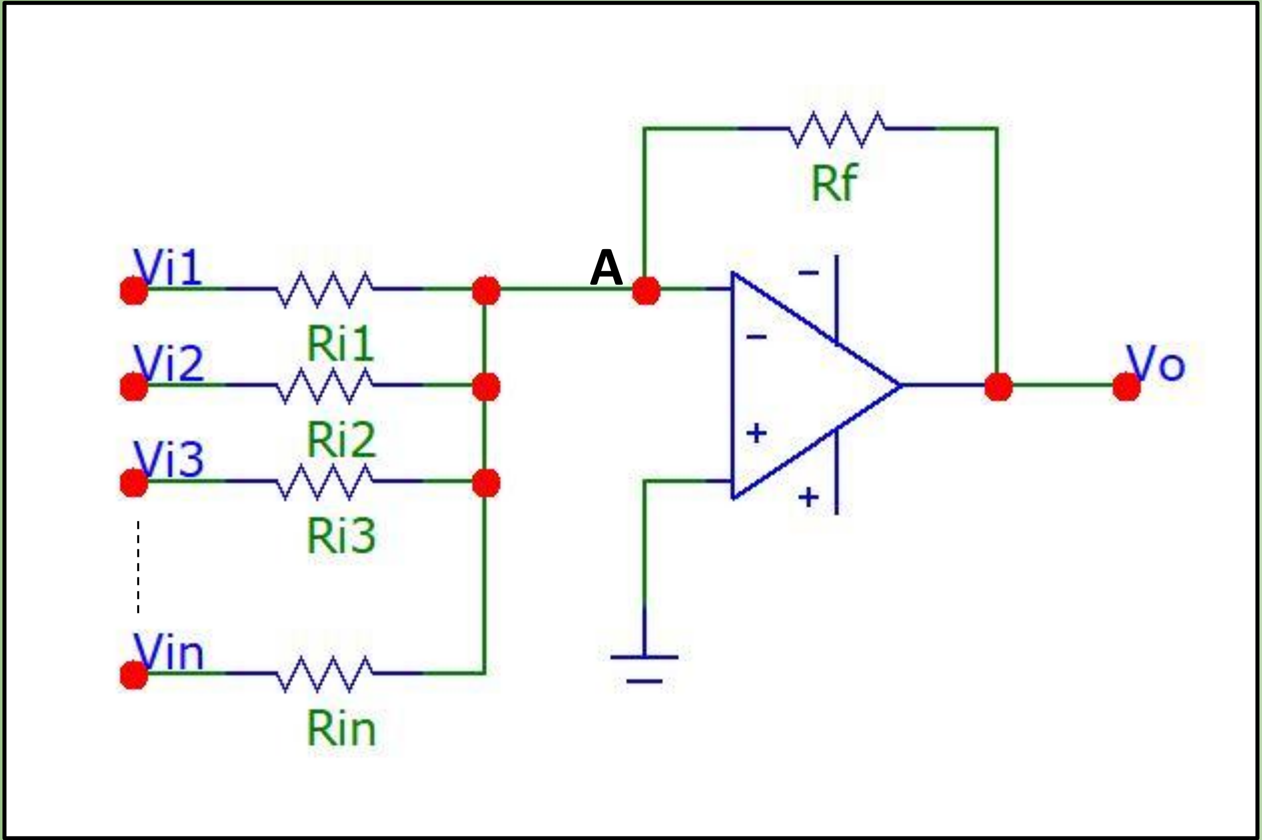
Tiene muy alta resistencia de entrada y muy baja resistencia de salida, por lo que se utiliza como primera etapa cuando la señal a amplificar es débil o con mucha resistencia (impedancia) interna.
Se lo llama “seguidor” porque la salida sigue a la entrada tanto en amplitud como en fase.
La salida entrega la misma señal pero con una resistencia interna muchísimo menor, por lo que el efecto que provoca esta configuración es similar al de reducir la resistencia interna de la fuente.
Como no toma corriente (o casi nada) por la entrada y puede entregar corriente en la salida, es como si mantuviera separada a la fuente del resto del amplificador. Por eso se lo llama “separador o buffer”.



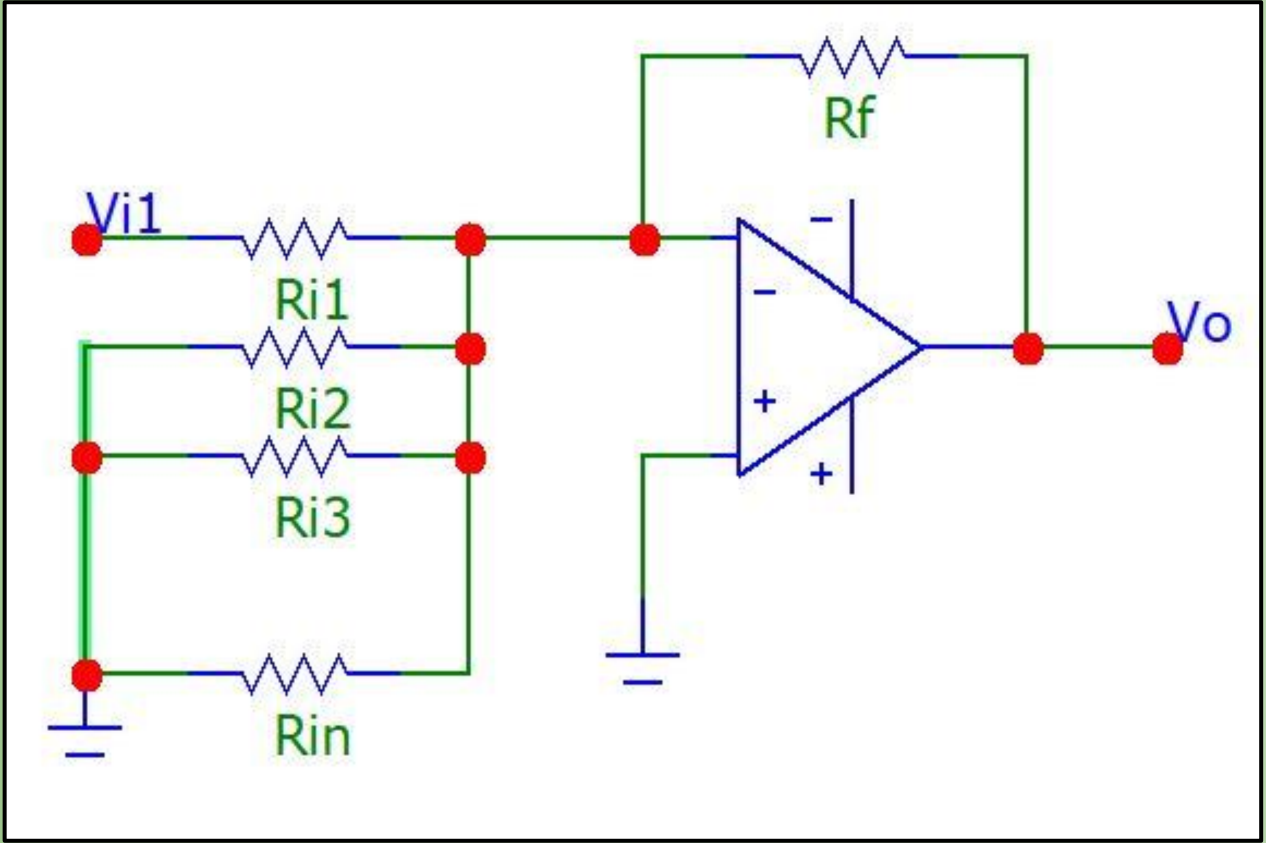
En esta simulación podemos apreciar cómo las señales de entrada y salida coinciden tanto en amplitud como en fase.



AMPLIFICADOR SUMADOR



Se trata de un circuito amplificador con tantas entradas como sea necesario que entrega en la salida la suma de todas las señales. Se puede configurar una ganancia distinta para cada entrada mediante la Ri correspondiente. Este esquema es la base con la cual se construyen por ejemplo las consolas de mezcla de sonido (mezclar es en este caso equivalente a sumar). Teniendo en cuenta que el punto "A" se encuentra a masa virtual y que se trata de un circuito con varias fuentes, podemos aplicar el teorema de superposición y considerar el efecto de cada entrada por separado.



Si dejamos Vi1 y cortocircuitamos el resto podremos observar que salvo Ri1 todas las resistencias se encuentran a masa en ambos extremos (recordar la masa virtual), por lo que no cumplen ninguna función y podemos eliminarlas. Al hacer esto vemos que nos queda un amplificador inversor. Lo mismo sucede con el resto de las entradas.

La salida parcial para cada una de las entradas teniendo en cuenta que se trata de configuraciones inversoras serían:

$$Vo_{Vi1} = -\frac{Rf}{Ri1} \times Vi1$$

$$Vo_{Vi2} = -\frac{Rf}{Ri2} \times Vi2$$

$$Vo_{Vi3} = -\frac{Rf}{Ri3} \times Vi3$$

Y así hasta la última entrada:

$$Vo_{Vin} = -\frac{Rf}{Rin} \times Vin$$

Donde n puede ser 4,5,...

La salida total es la suma o superposición de todos estos resultados parciales:

$$Vo = Vo_{Vi1} + Vo_{Vi2} + Vo_{Vi3} + \cdots + Vo_{Vin}$$

$$Vo = -\frac{Rf}{Ri1} \times Vi1 - \frac{Rf}{Ri2} \times Vi2 - \frac{Rf}{Ri3} \times Vi3 - \cdots - \frac{Rf}{Rin} \times Vin$$

Si sacamos como factor común (-Rf):

$$\boxed{\boldsymbol{Vo = -Rf\left(\frac{Vi1}{Ri1} + \frac{Vi2}{Ri2} + \frac{Vi3}{Ri3} + \cdots + \frac{Vin}{Rin}\right)}}$$

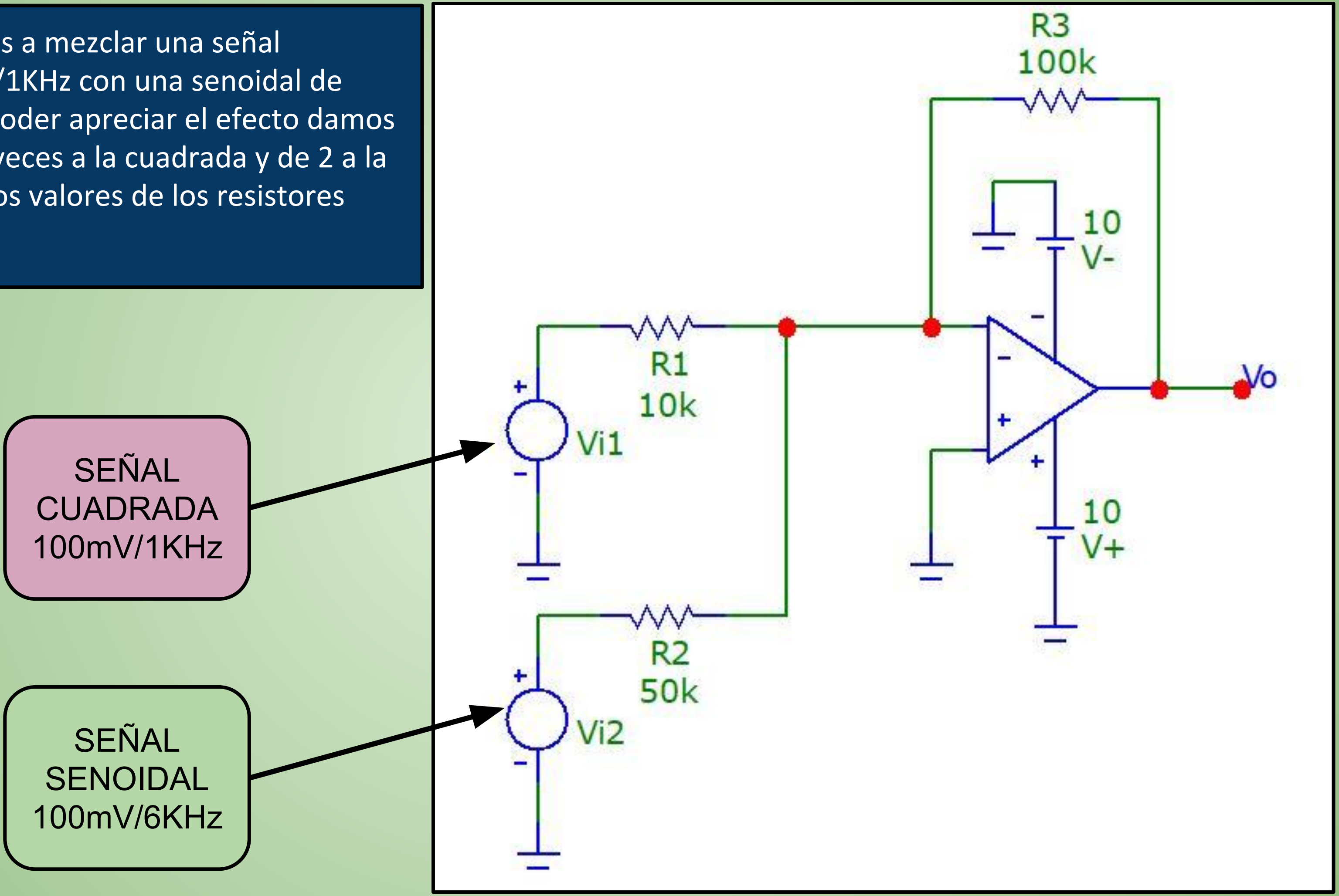
Acá podemos ver que la salida es la suma (invertida) de todas las entradas cada una con su propia ganancia que se ajusta con la Ri correspondiente. A esto se lo llama “suma ponderada” o “suma pesada” porque podemos ajustar el “peso” que cada entrada tendrá en la salida.

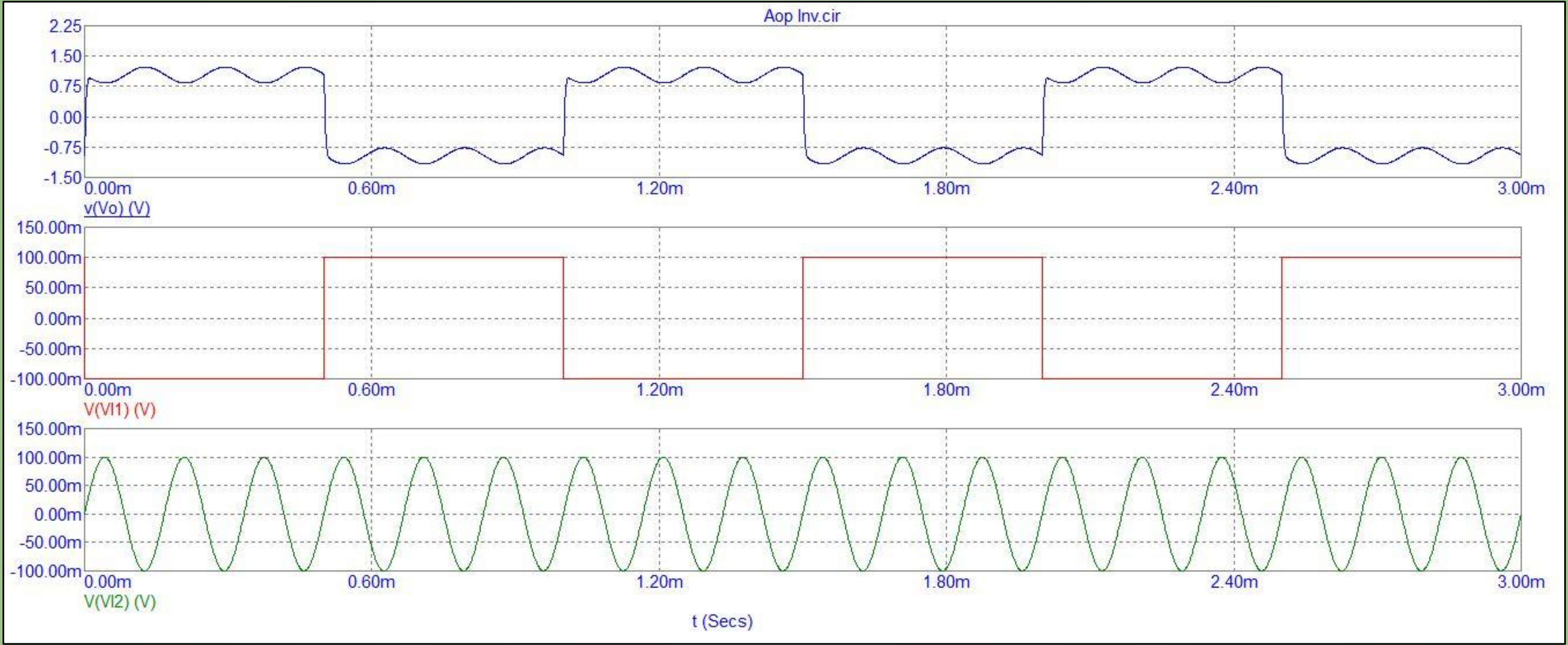
Si hacemos todas las Ri iguales, es decir la misma ganancia para todas las entradas, podemos sacarla fuera del paréntesis:

$$\boxed{\boldsymbol{Vo = -\frac{Rf}{Ri}(Vi1 + Vi2 + Vi3 + \cdots + Vin)}}$$

A esto se lo llama “suma pura”.

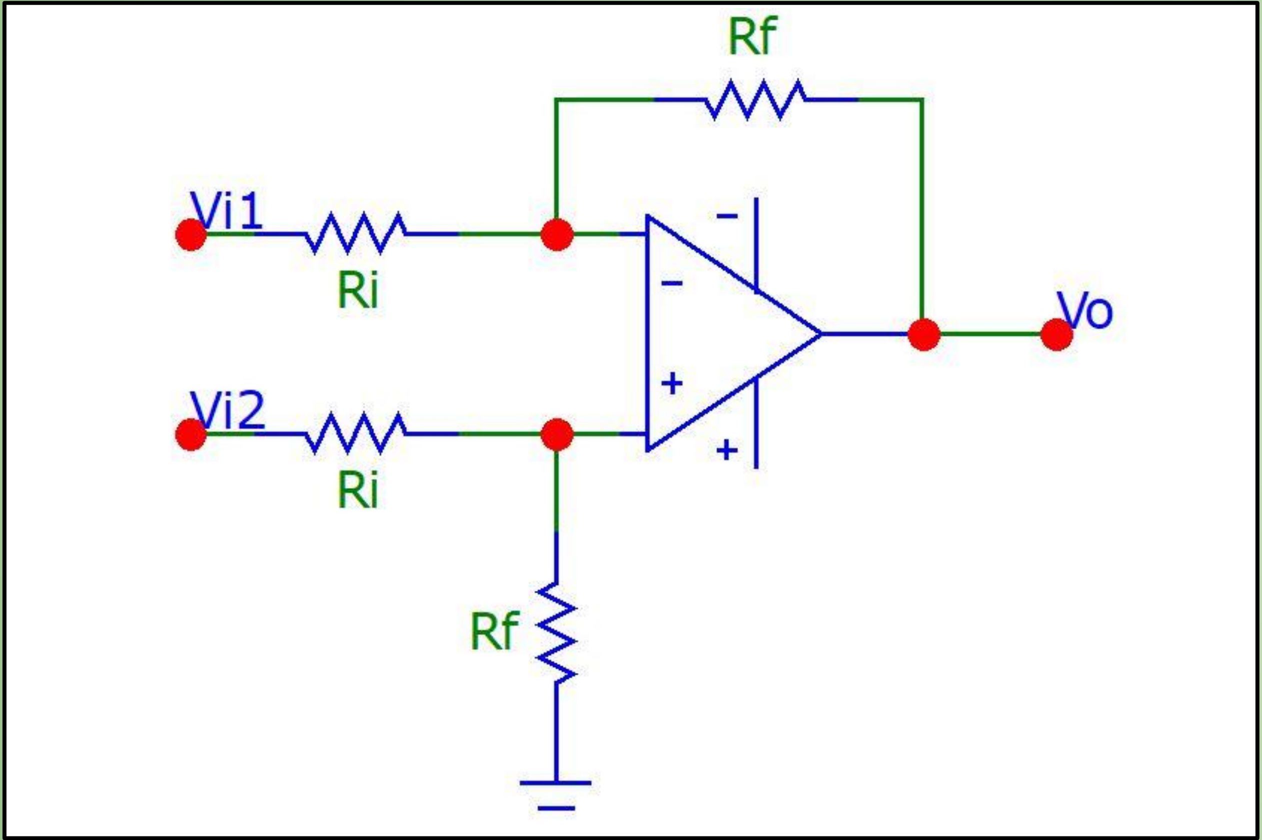
Como ejemplo vamos a mezclar una señal cuadrada de 100mV/1KHz con una senoidal de 100mV/6KHz. Para poder apreciar el efecto damos una ganancia de 10 veces a la cuadrada y de 2 a la senoidal ajustando los valores de los resistores correspondientes.



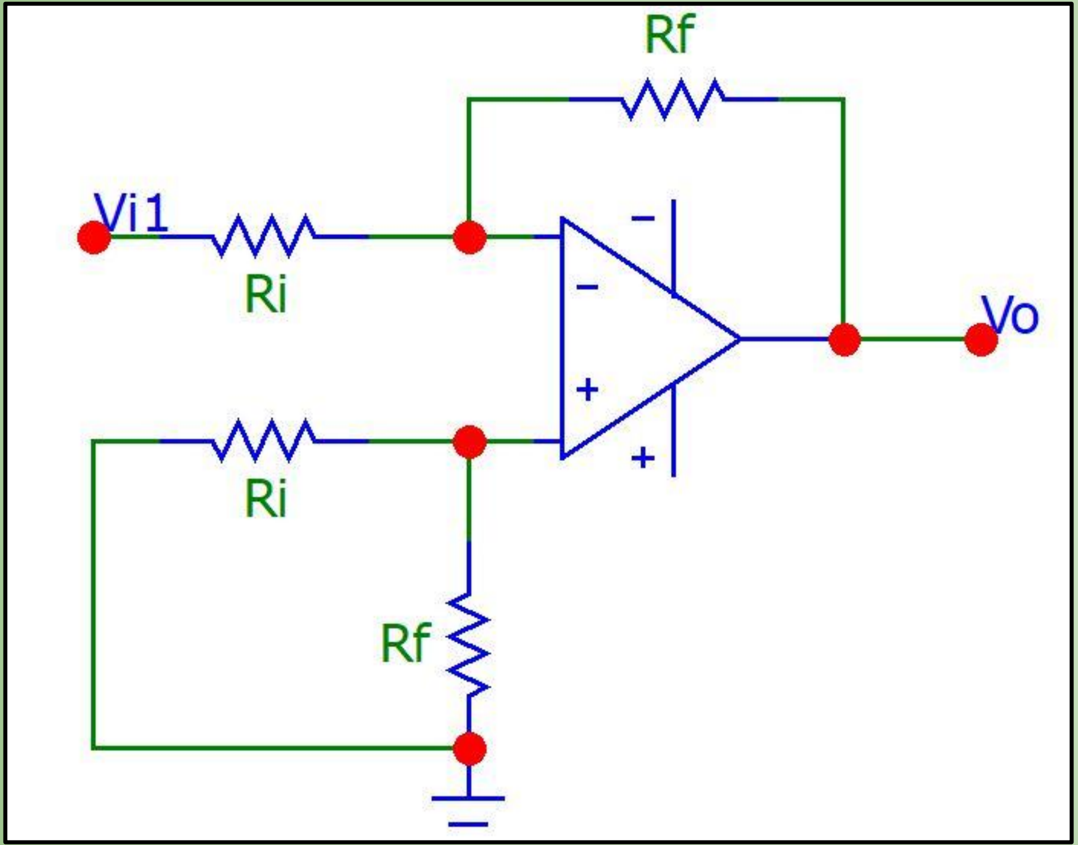


Podemos ver abajo las señales de entrada, ambas de 100mV de amplitud, y arriba la mezcla o suma de ambas. Dimos mayor peso a la cuadrada ajustando una ganancia más grande.
Observemos también que la salida está invertida respecto de las entradas, ya que el sumador es inversor.

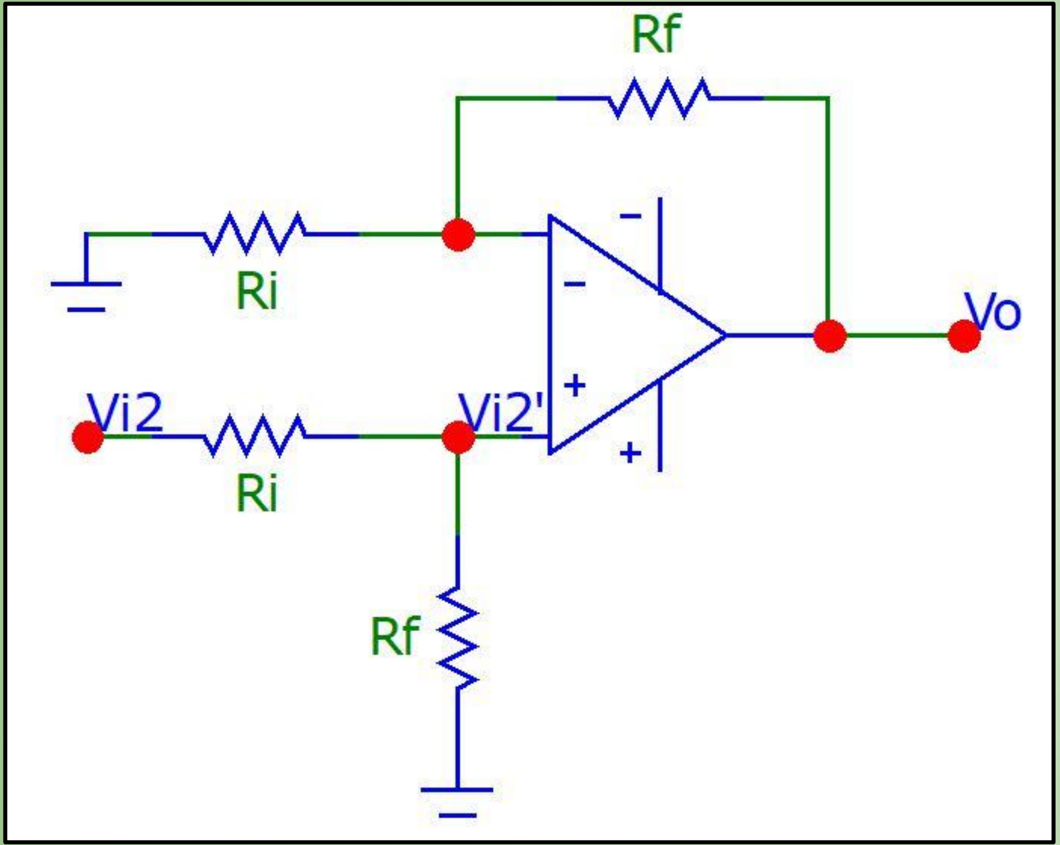
AMPLIFICADOR DIFERENCIAL



Esta configuración del Aop permite restar dos señales y entrega la diferencia en la salida con una ganancia definida por Rf y Ri.
Para que realice la diferencia en forma correcta es fundamental que se encuentre "equilibrado". Esto significa que las resistencias desde ambas entradas deben ser iguales.
Como se trata también de un circuito con varias fuentes lo analizamos aplicando el teorema de superposición tal como lo hicimos con el sumador.



Si dejamos Vi1 y cortocircuitamos Vi2 podremos observar que nos queda el paralelo de Rf y Ri en la entrada no inversora. Como trabajamos con el modelo ideal, no circula corriente por las entradas del Aop y no hay caída de tensión en este paralelo. Por eso podemos eliminarlo y nos queda una configuración inversora.



Ahora cortocircuitamos Vi1 y vemos una configuración no inversora. Pero en este caso la señal que ingresa no es Vi2 sino Vi2’, que es la salida del divisor de tensión que forman Rf y Ri

Entonces tenemos:

$$Vo_{Vi1} = -\frac{Rf}{Ri} \times Vi1$$

$$Vo_{Vi2} = \left(1 + \frac{Rf}{Ri}\right) \times Vi2'$$

Por ser un divisor de tensión, Vi2' se obtiene así:

$$Vi2' = \frac{Vi2 \times Rf}{Ri + Rf}$$

Reemplazamos Vi2' en la expresión anterior y nos queda:

$$Vo_{Vi2} = \left(1 + \frac{Rf}{Ri}\right) \times \frac{Vi2 \times Rf}{Ri + Rf}$$

Si ahora hacemos un denominador común dentro del paréntesis:

$$Vo_{Vi2} = \frac{(Ri + Rf)}{Ri} \times \frac{Vi2 \times Rf}{(Ri + Rf)}$$

Podemos ver que los paréntesis se cancelan. Entonces la expresión final nos queda (ordenando un poco):

$$Vo_{Vi2} = \frac{Rf}{Ri} \times Vi2$$

La salida total es la suma de las salidas parciales:

$$Vo = Vo_{Vi1} + Vo_{Vi2}$$

$$Vo = -\frac{Rf}{Ri} \times Vi1 + \frac{Rf}{Ri} \times Vi2$$

Sacamos $\frac{Rf}{Ri}$ como factor común, acomodamos la expresión y tenemos:

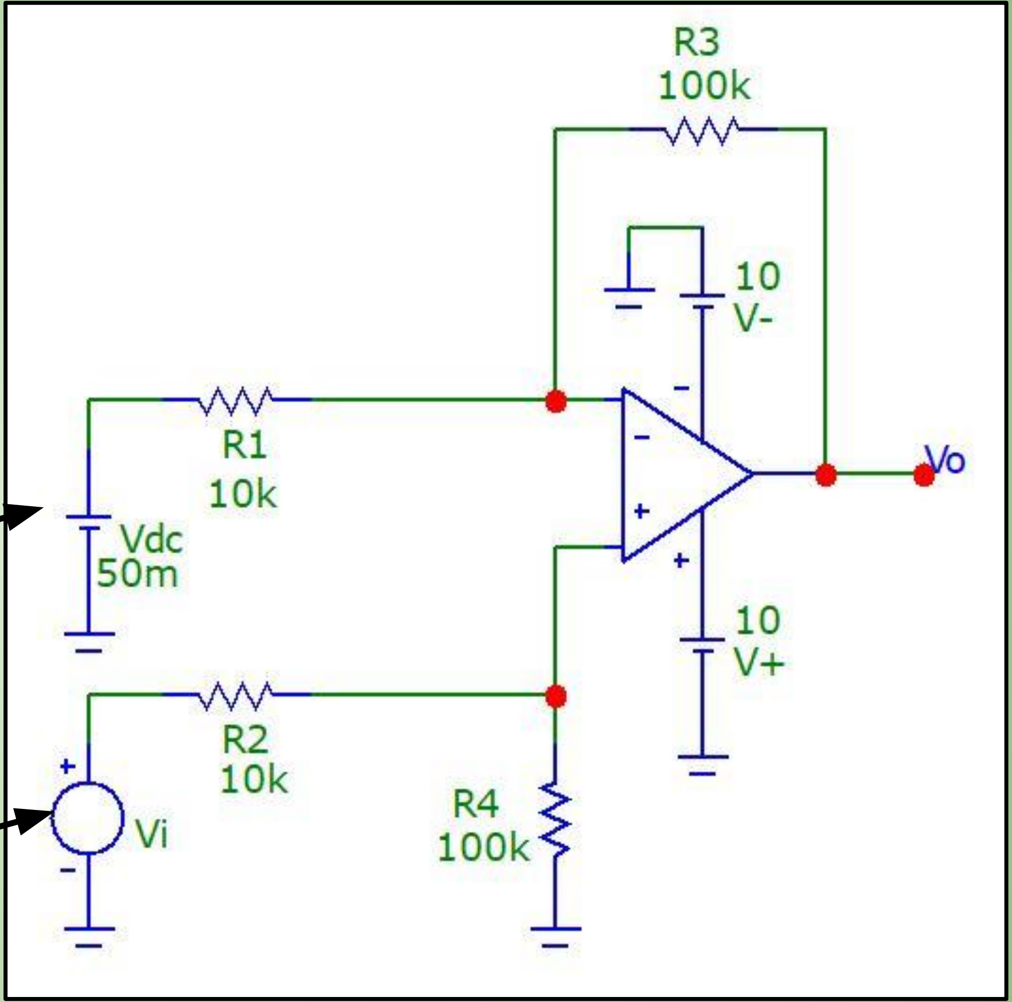
$$\boxed{\boldsymbol{Vo = \frac{Rf}{Ri}(Vi2 - Vi1)}}$$

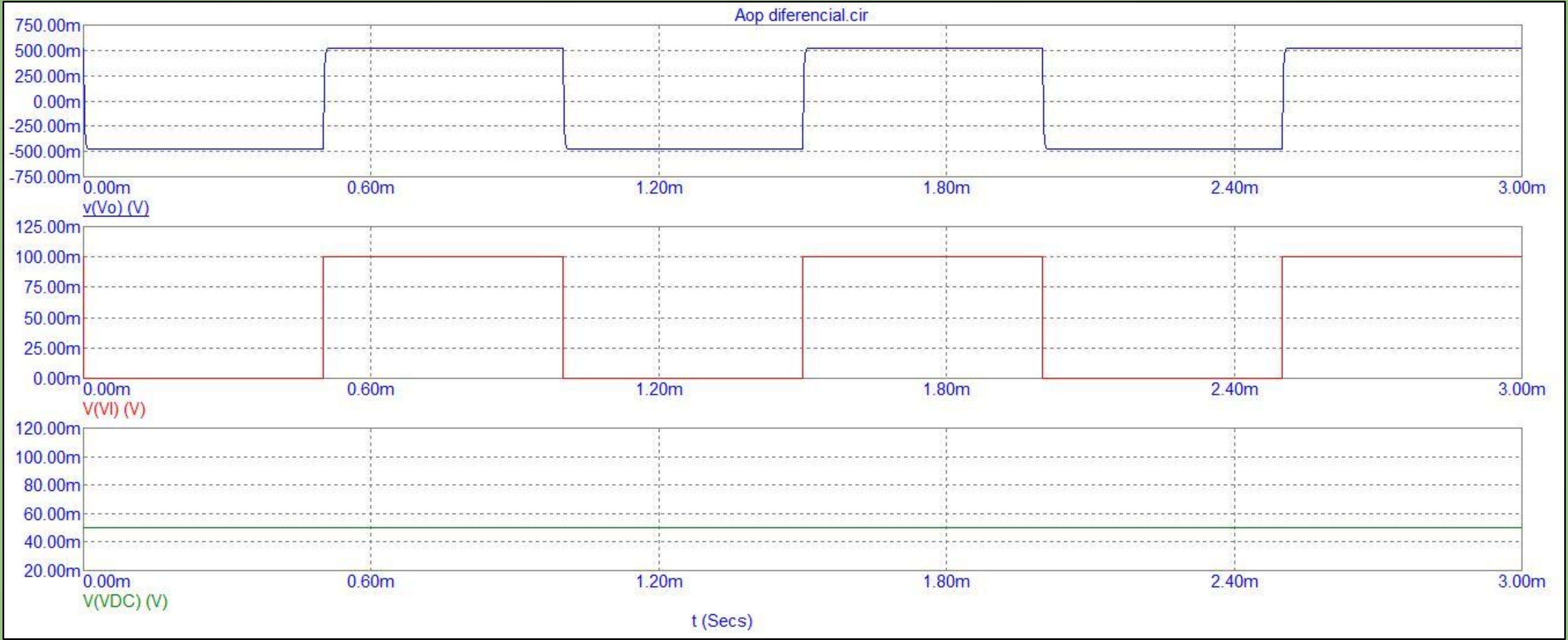
Podemos ver que la salida es la diferencia entre las entradas afectada por un factor de ganancia que depende de Rf y Ri.

Como ejemplo vamos a tomar una señal cuadrada positiva de 100mV/1KHz y le vamos a restar su nivel de continua para obtener una cuadrada alterna. Además la vamos a amplificar 10 veces

NIVEL DE CONTINUA 50mV

SEÑAL CUADRADA POSITIVA 100mV/1KHz





Podemos ver abajo las señales de entrada: la cuadrada positiva y el nivel de continua. Arriba tenemos la diferencia entre ambas y observamos cómo al restarle la continua obtenemos una señal cuadrada alterna, a la que también amplificamos 10 veces. No hay inversión de fase en esta configuración.