

MEDICIÓN E INSTRUMENTACIÓN

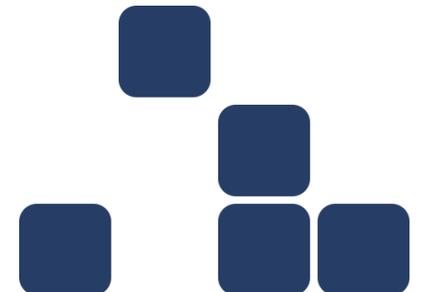
AMPLIFICACIÓN DE SEÑALES

Roberto Giovanni Ramírez-Chavarría

`RRamirezC@iingen.unam.mx`

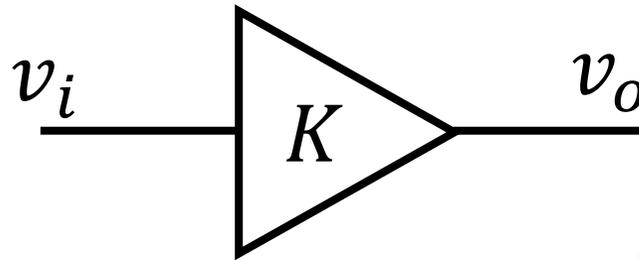
Facultad de Ingeniería, UNAM

Semestre 2020-2



Amplificación

- Multiplicar por un escalar a una señal de entrada
- Dar ganancia K a una señal de entrada



v_i : Señal de entrada

v_o : Señal de salida

K : Ganancia

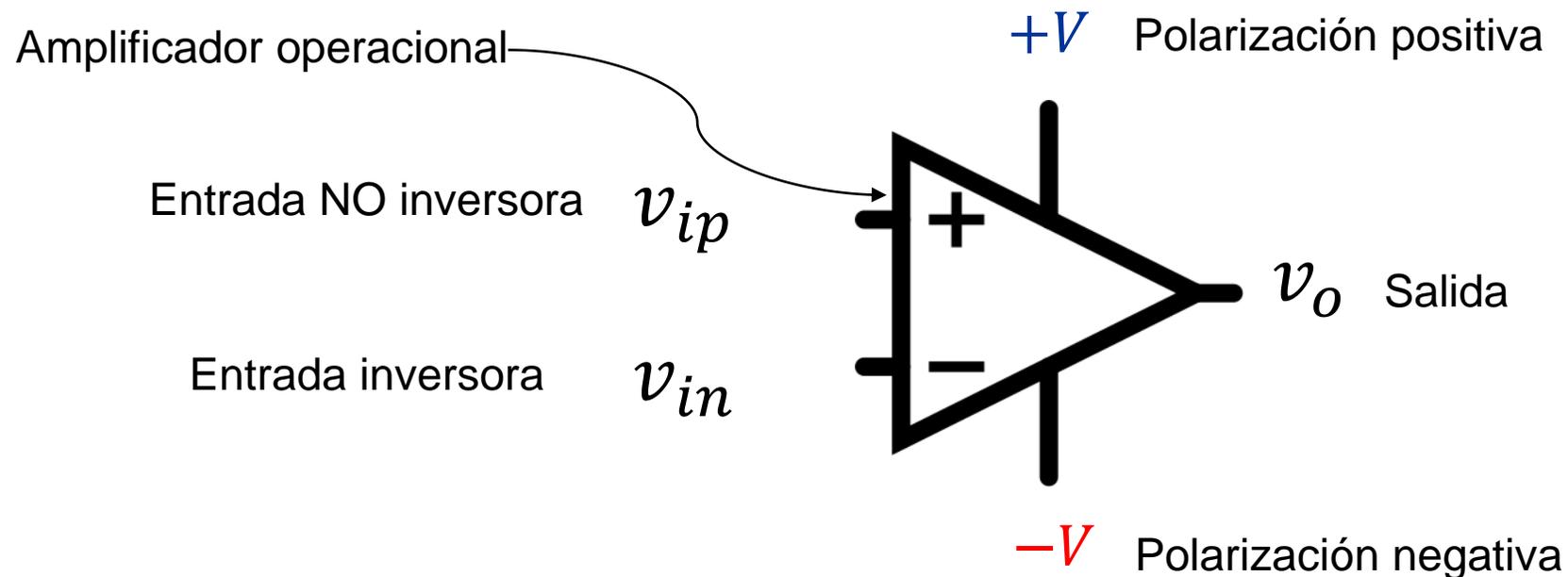
$$v_i = K \cdot v_o$$

Sí $K > 0 \rightarrow$ Amplificación

Sí $K < 0 \rightarrow$ Atenuación

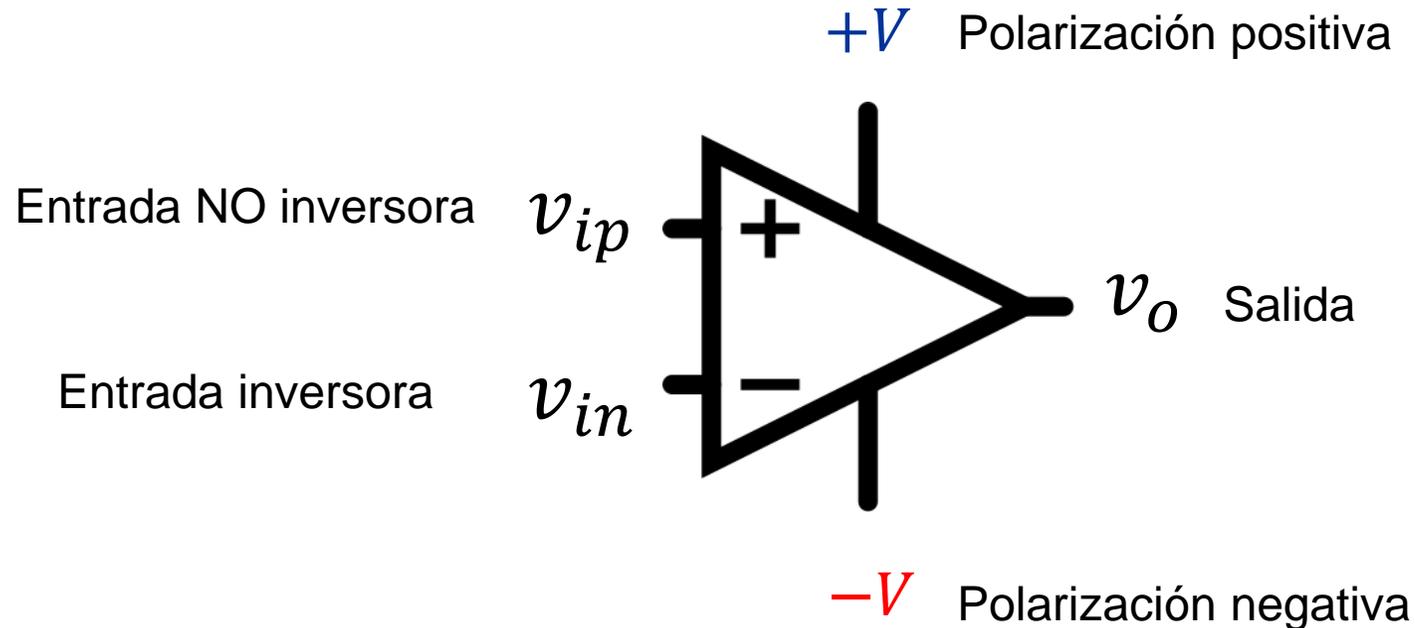
Amplificadores Operacionales

- Dispositivos electrónicos activos lineales
- Implementan electrónicamente operaciones matemáticas
- Forma práctica de amplificar señales de voltaje



Amplificadores Operacionales

- Símbolo y terminales de un amplificador operacional



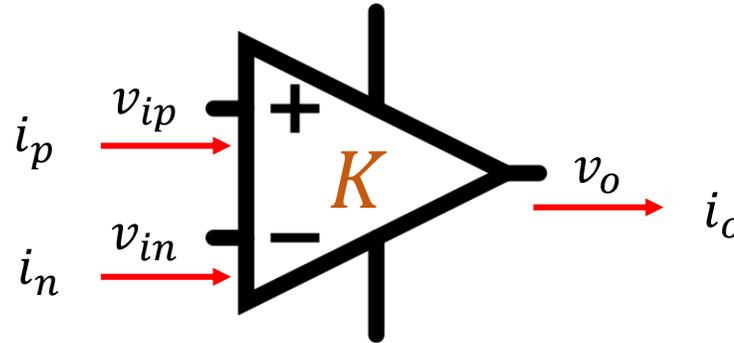
Los voltajes de polarización $+V$ y $-V$ alimentan al circuito para que funcione

Las señales en las entradas $v_i(+)$ y $v_i(-)$ son los que se desean amplificar

La salida v_o es una amplificación de las entradas $v_i(+)$ y $v_i(-)$

Amplificadores Operacionales

- Reglas de ORO para analizar un amplificador operacional



1. Por sus entradas NO fluye corriente (tienen una impedancia infinita de entrada):

$$i_p = i_n = 0 \text{ [A]}$$

2. Por su salida fluye corriente (tienen baja impedancia de salida):

$$i_o \neq 0 \text{ [A]}$$

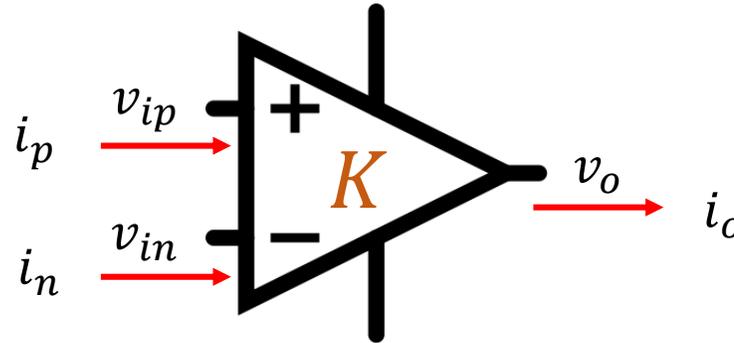
3. Tiene una ganancia (teóricamente) infinita: $K \rightarrow \infty$

4. Su voltaje diferencial es cero (resta de los voltajes de entrada)

$$v_{ip} - v_{in} = 0 \text{ [V]} \quad \rightarrow \quad v_{ip} = v_{in}$$

Amplificadores Operacionales

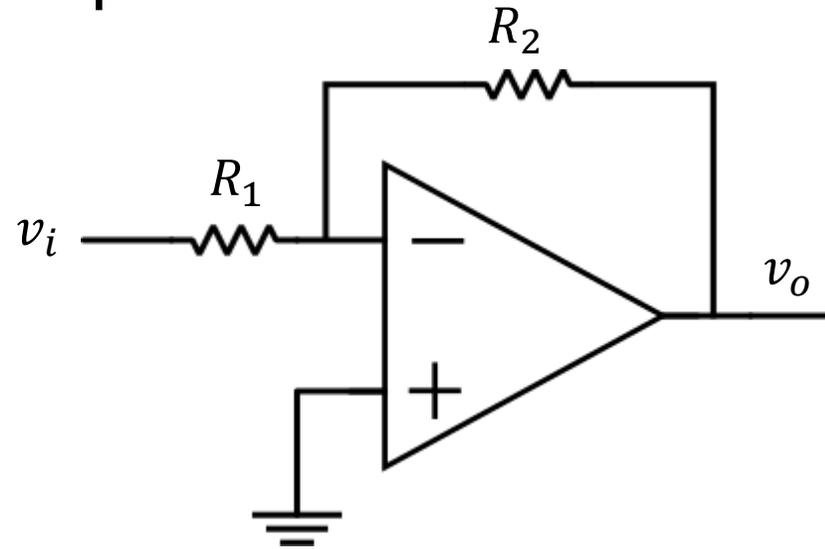
- Reglas de ORO para analizar un amplificador operacional



- Un amplificador operacional puede ser visto como un sistema de control con retroalimentación, i.e. la salida se conecta a la(s) entradas(s).
- La retroalimentación negativa (v_o conectada a v_{in}) da estabilidad al circuito.
 $i_o \neq 0 [A]$
- El ancho de banda teóricamente es muy grande.
- La ganancia está dada por dispositivos pasivos (resistores) conectados en sus entradas, y entra la salida y las entradas.

Amplificadores Operacionales

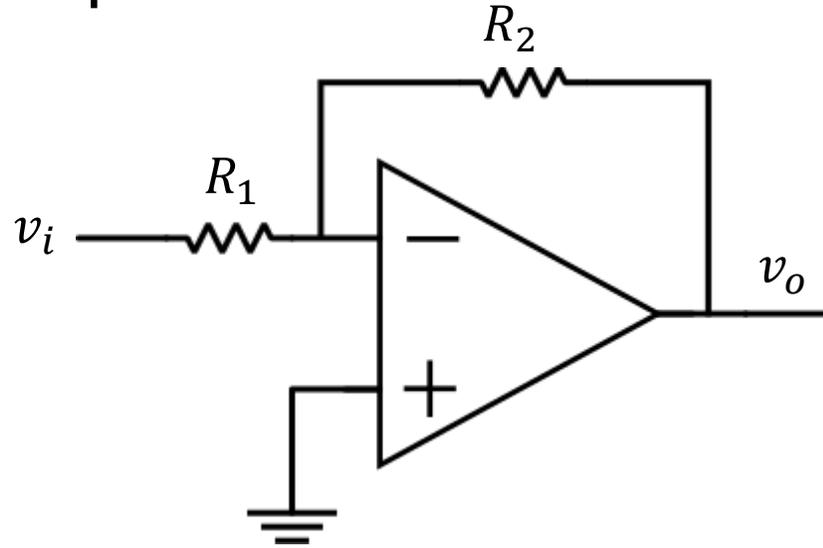
- Veamos un ejemplo



- ✓ Hay retroalimentación negativa (salida conectada a terminal inversora).
- ✓ La retroalimentación está dada a través de la resistencia R_2 .
- ✓ El voltaje de entrada en la terminal inversora es v_i .
- ✓ La terminal inversora tiene una resistencia de entrada R_1 .
- ✓ El voltaje de entrada en la terminal NO inversora es CERO (tierra).

Amplificadores Operacionales

- Veamos un ejemplo



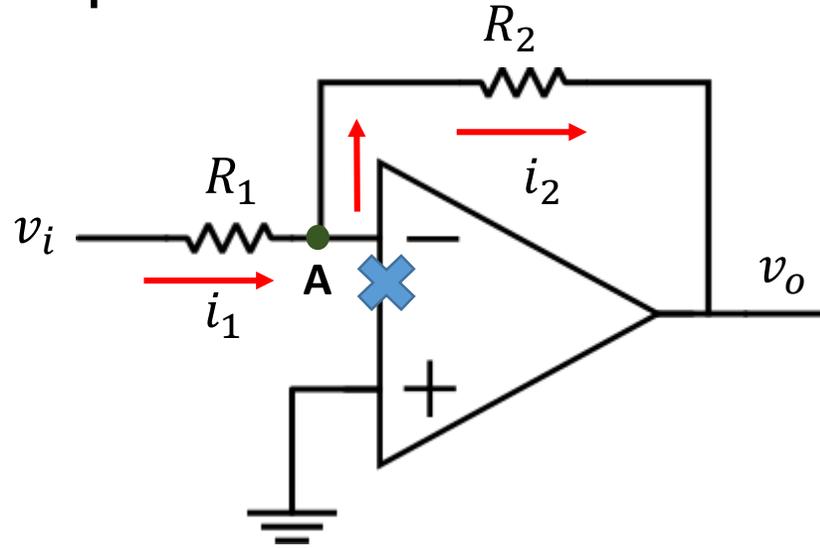
El objetivo es encontrar una expresión para v_o en función de v_i , R_1 y R_2

$$v_o := f(v_i, R_1, R_2)$$

empleando solamente leyes de Kirchoff y ley de Ohm.

Amplificadores Operacionales

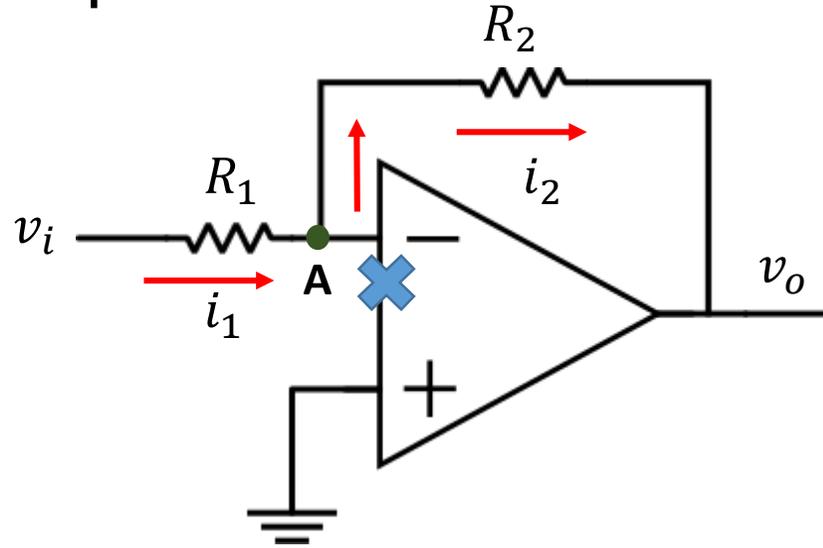
- Veamos un ejemplo



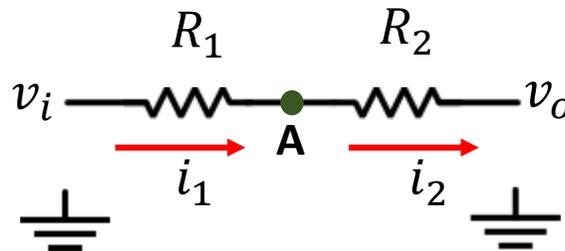
Paso 1: Por la entrada INVERSORA (-) no fluye corriente. En el nodo A, la corriente i_2 fluye por la resistencia R_2 .

Amplificadores Operacionales

- Veamos un ejemplo

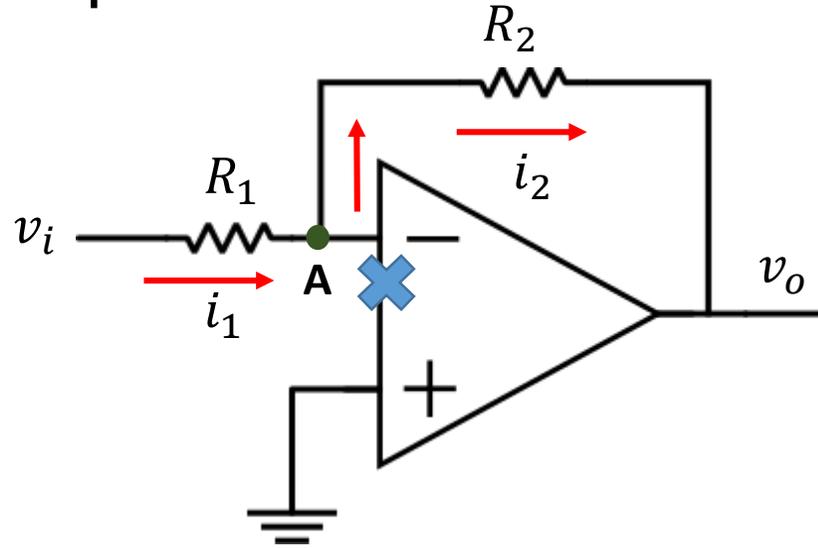


Paso 2: Así, podemos simplificar al circuito con la siguiente estructura

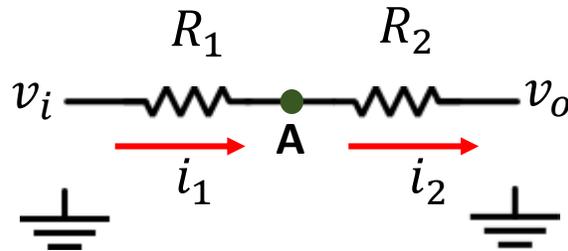


Amplificadores Operacionales

- Veamos un ejemplo



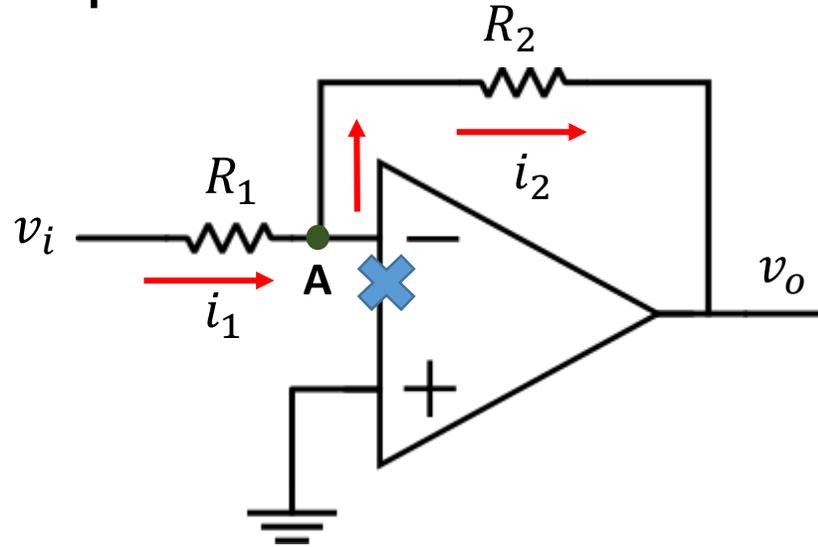
Paso 3: Aplicando ley de corrientes de Kirchoff en el nodo A



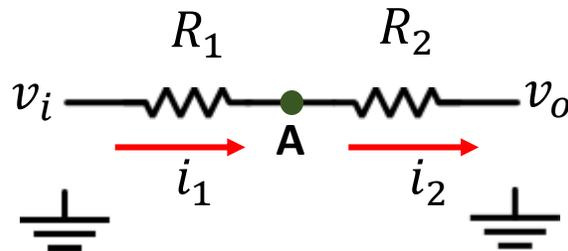
$$i_1 = i_2 \Rightarrow i_1 - i_2 = 0$$

Amplificadores Operacionales

- Veamos un ejemplo



Paso 4: Aplicando ley de ohm para las corrientes i_1 e i_2

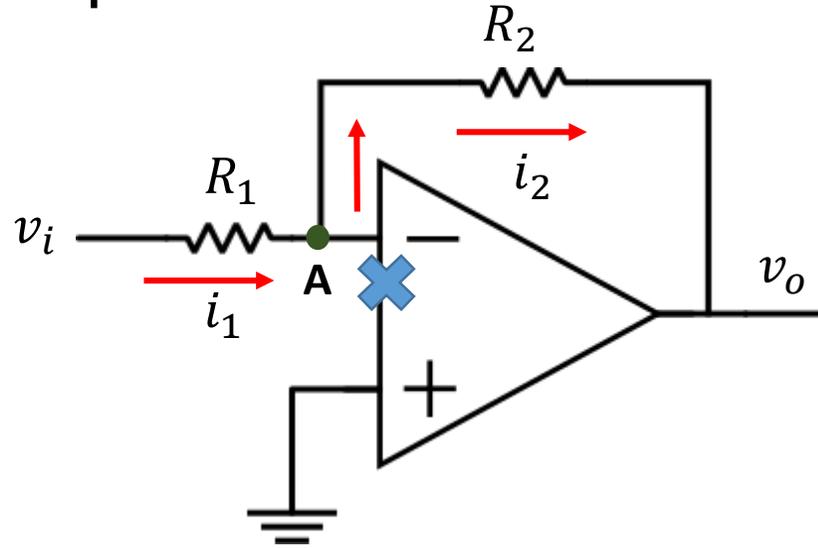


$$i_1 - i_2 = 0$$

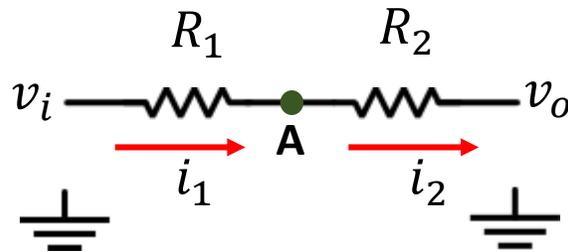
$$\frac{v_i}{R_1} - \frac{v_o}{R_2} = 0$$

Amplificadores Operacionales

- Veamos un ejemplo



Paso 5: Finalmente, despejamos a v_o

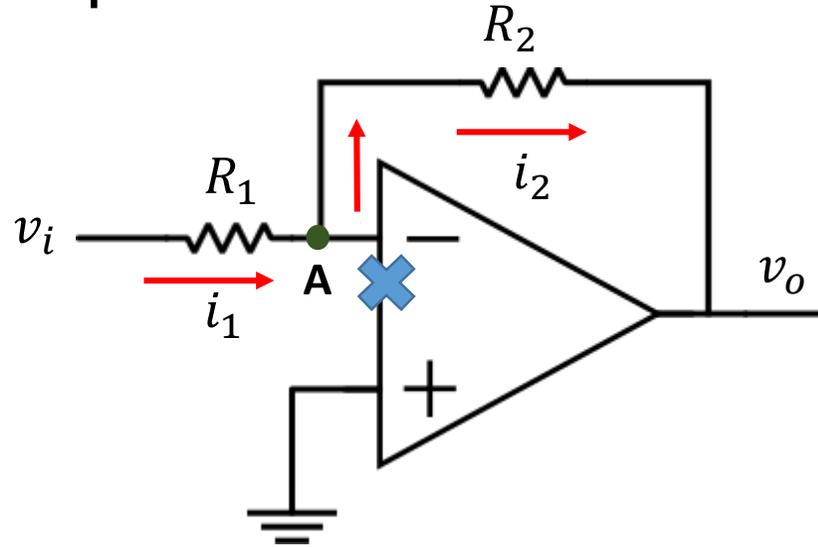


$$\frac{v_i}{R_1} - \frac{v_o}{R_2} = 0$$

$$v_o = - \left(\frac{R_2}{R_1} \right) \cdot v_i$$

Amplificadores Operacionales

- Veamos un ejemplo



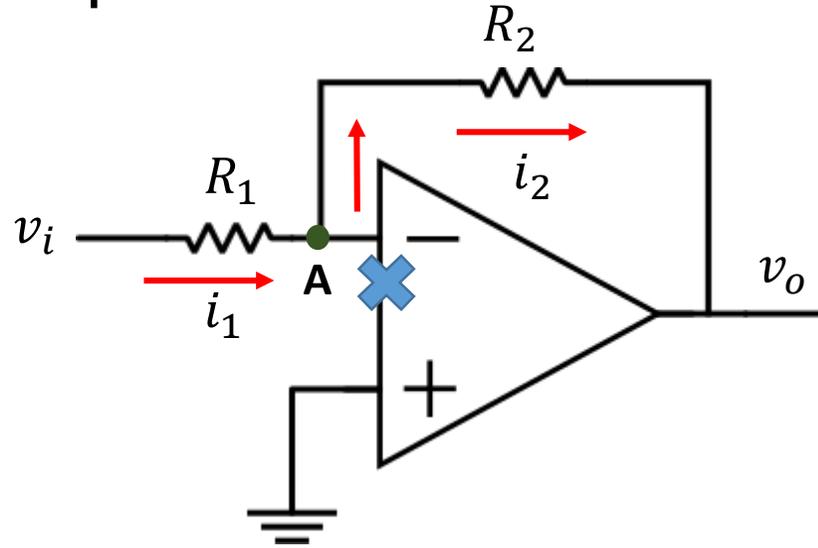
Hemos llegado al objetivo, una función $v_o := f(v_i, R_1, R_2)$

$$v_o = -\left(\frac{R_2}{R_1}\right) \cdot v_i$$

El voltaje de salida es igual al voltaje de entrada multiplicado por un escalar

Amplificadores Operacionales

- Veamos un ejemplo



$$v_o = - \left(\frac{R_2}{R_1} \right) \cdot v_i$$

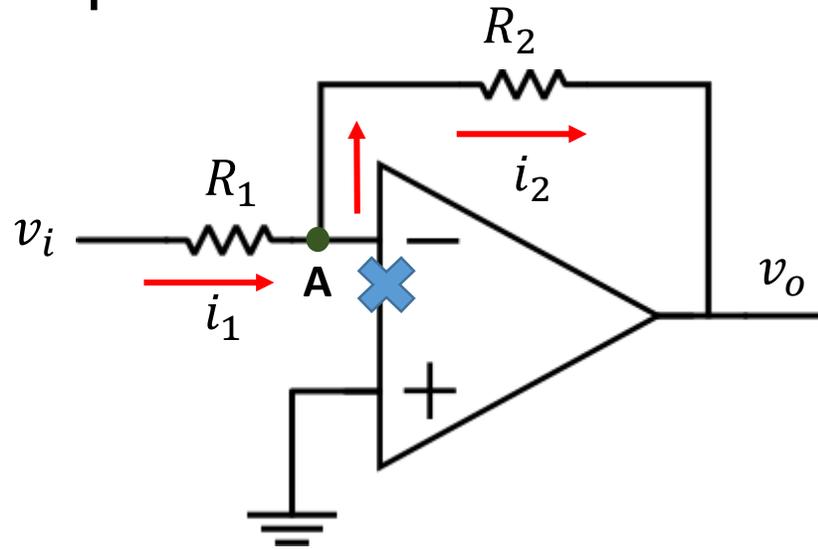
El voltaje de salida es igual al voltaje de entrada multiplicado por un escalar K

$$\frac{R_2}{R_1} = K : \text{Es la ganancia del amplificador}$$

El signo $-$, indica que el amplificador INVIERTE la salida

Amplificadores Operacionales

- Veamos un ejemplo



Amplificador Inversor

$$v_o = - \left(\frac{R_2}{R_1} \right) \cdot v_i$$

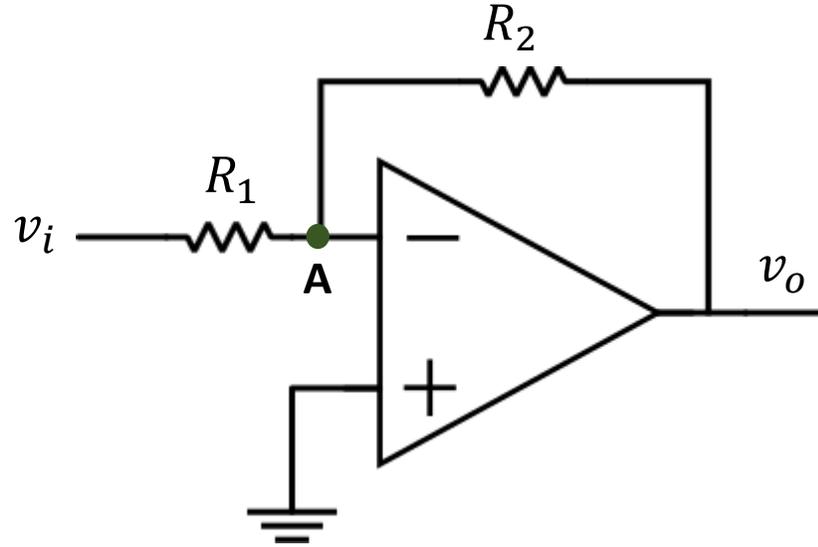
El voltaje de salida es igual al voltaje de entrada multiplicado por un escalar K

$$\frac{R_2}{R_1} = K : \text{Es la ganancia del amplificador}$$

El signo $-$, indica que el amplificador INVIERTE la salida

Amplificadores Operacionales

- Ejercicios Amplificador Inversor



1. Calcular el valor de R_2 y R_1 para que el amplificador tenga una ganancia de 20?

Solución:

Sabemos que la ganancia es $K = 20 = \left(\frac{R_2}{R_1}\right)$, una ecuación con dos incógnitas (las resistencias):

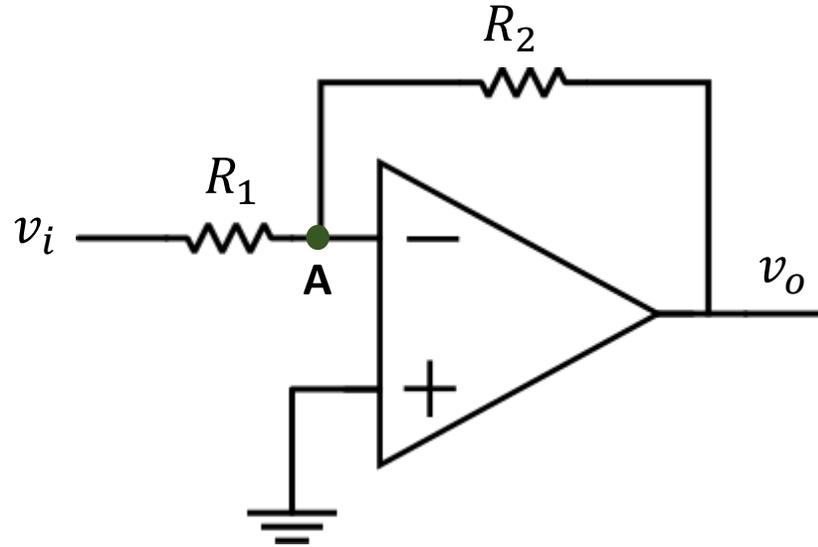
Proponemos el valor de R_2 . Por ejemplo $R_2 = 2000\Omega$

Despejamos a R_1 y calculamos $\rightarrow R_1 = \left(\frac{R_2}{K}\right) = \left(\frac{2000\Omega}{20}\right) = 100\Omega$

* Recuerda que el signo no es relevante para el ganancia, solo indica que la señal se invierte 180°

Amplificadores Operacionales

- Ejercicios Amplificador Inversor



2. Calcular el valor de la ganancia de un amplificador inversor para que el voltaje de salida se $v_o = -5$ [V] sí el voltaje de entrada $v_i = 49.2$ [mV] ?

Solución:

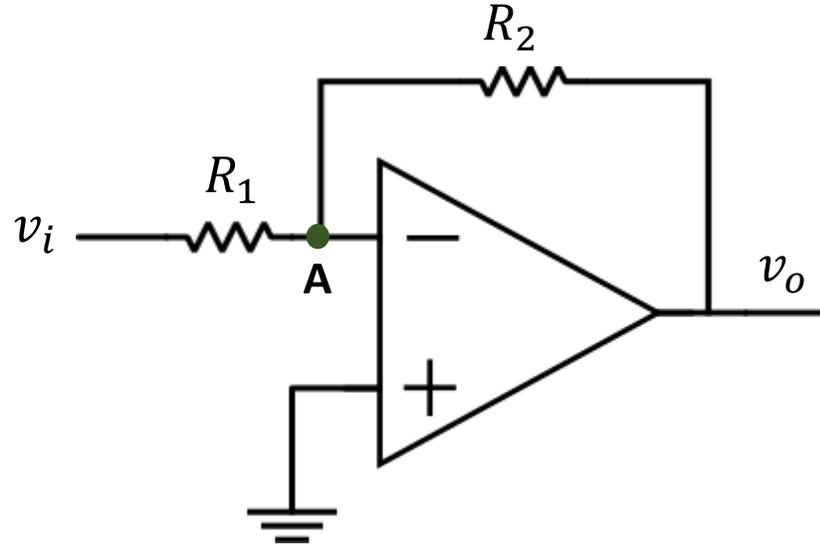
Sabemos que la ecuación de un ampl. No inversor es $v_o = -\left(\frac{R_2}{R_1}\right) v_i = -K v_i$.

Escribimos en forma de relación salida/entrada $\frac{v_o}{v_i} = -K$. Recuerda que podemos omitir el signo para el calculo.

Calculamos $\rightarrow K = \frac{5[V]}{49.2 \times 10^{-3}[V]} = 101.6 \approx 102$

Amplificadores Operacionales

- Ejercicios Amplificador Inversor



3. Para el ejercicio anterior calcule los valores de las resistencias para obtener la ganancia.

Solución:

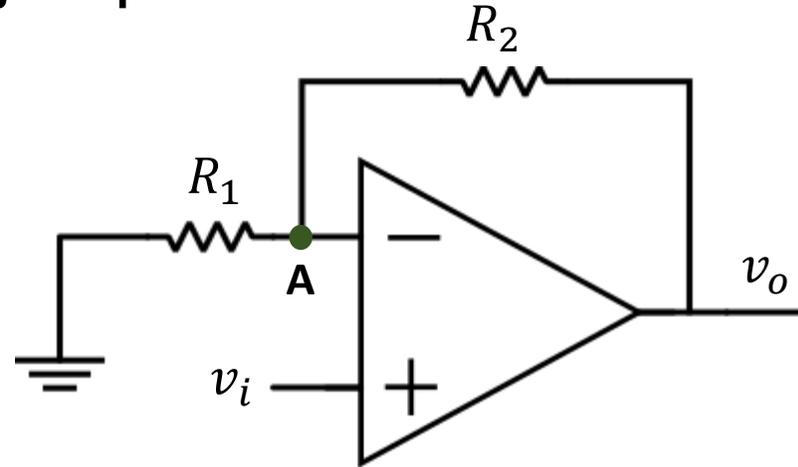
Ayuda: Proponer valor de una resistencia y despejar la otra.

Un tip muy importante es que debemos tratar que los valores de las resistencias no sean pequeños.

Se sugiere que sean mayor de cien ohms pero menores de mega ohms

Amplificadores Operacionales

- Veamos otro ejemplo

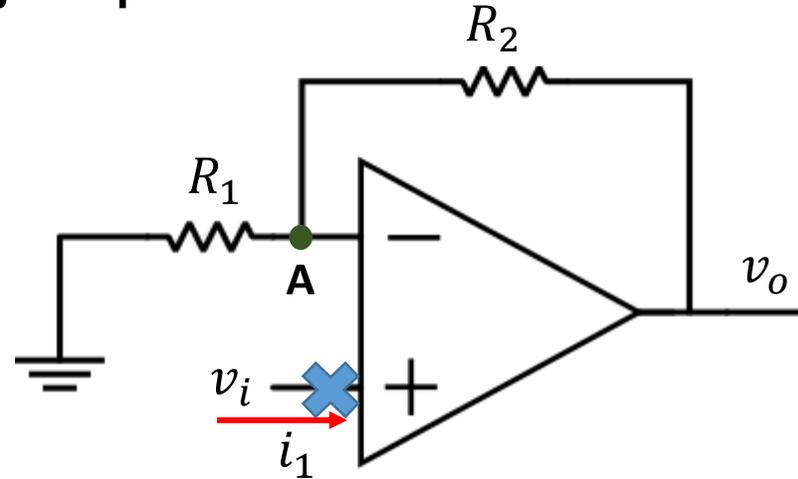


- ✓ Hay retroalimentación negativa (salida conectada a terminal inversora).
- ✓ La retroalimentación está dada a través de la resistencia R_2 .
- ✓ El voltaje de entrada en la terminal inversora es CERO (tierra).
- ✓ La terminal inversora tiene una resistencia de entrada R_1 .
- ✓ El voltaje de entrada en la terminal NO inversora es v_i .

El objetivo es encontrar una expresión para v_o en función de v_i , R_1 y R_2

Amplificadores Operacionales

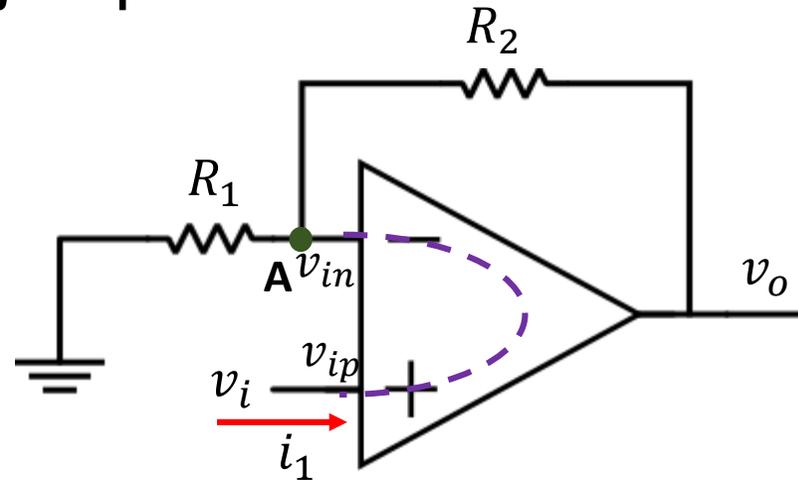
- Veamos otro ejemplo



Paso 1: Por la entrada NO INVERSORA (+) no fluye corriente.
PERO... sabemos que el voltaje en ambas entradas es igual

Amplificadores Operacionales

- Veamos otro ejemplo



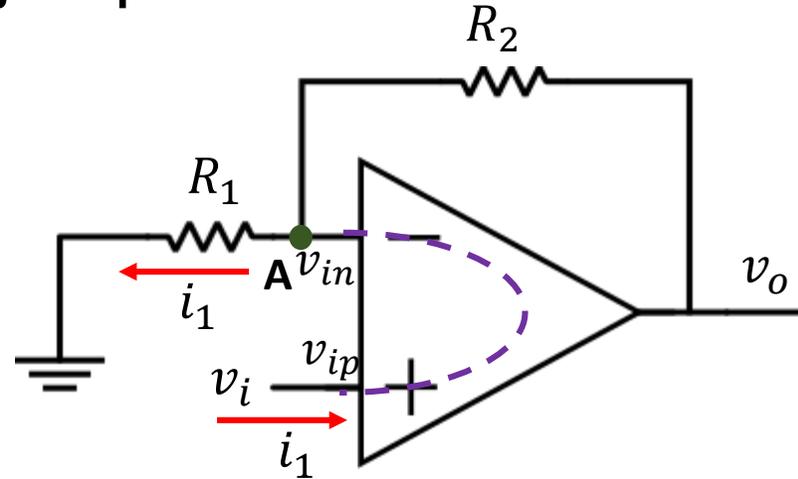
Paso 1: Por la entrada NO INVERSORA (+) no fluye corriente.
PERO... sabemos que el voltaje en ambas entradas es igual

$$v_i = v_{ip} = v_{in}$$

Las entradas están conectadas internamente entre sí (línea punteada morada)

Amplificadores Operacionales

- Veamos otro ejemplo

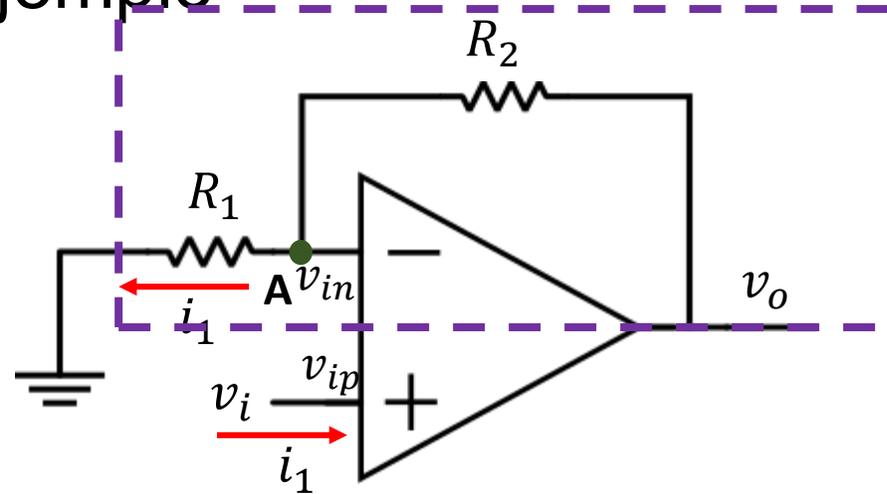


Paso 2: La corriente que fluye por la resistencia R_1 es i_1

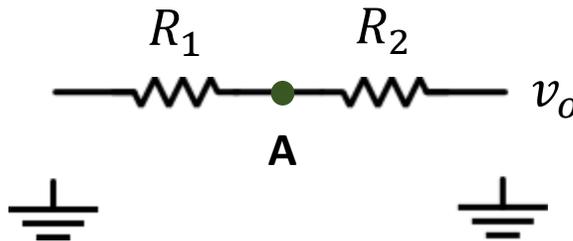
$$i_1 = \frac{v_i}{R_1}$$

Amplificadores Operacionales

- Veamos otro ejemplo

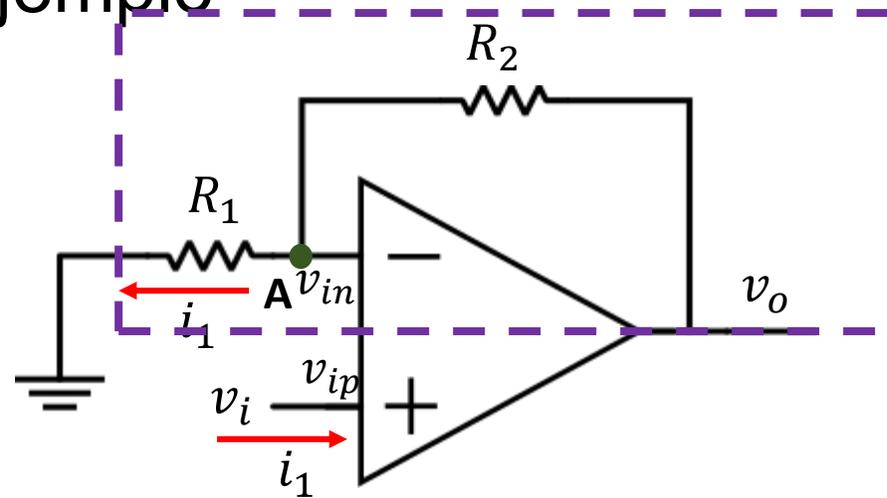


Paso 3: En la retrolalimentación hay un circuito formado por una fuente v_o , y los resistores R_2 y R_1 conectados en serie

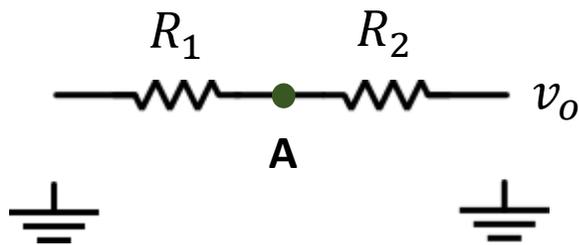


Amplificadores Operacionales

- Veamos otro ejemplo



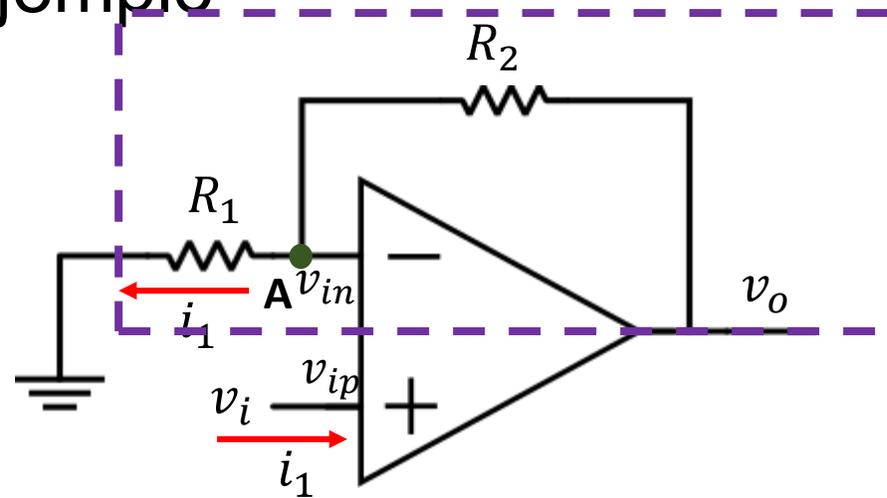
Paso 4: Con el circuito anterior podemos calcular un divisor de voltaje en el nodo A



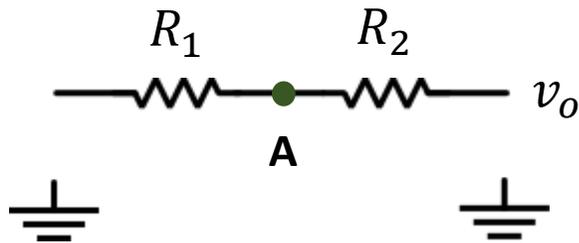
$$v_A = v_o \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right)$$

Amplificadores Operacionales

- Veamos otro ejemplo



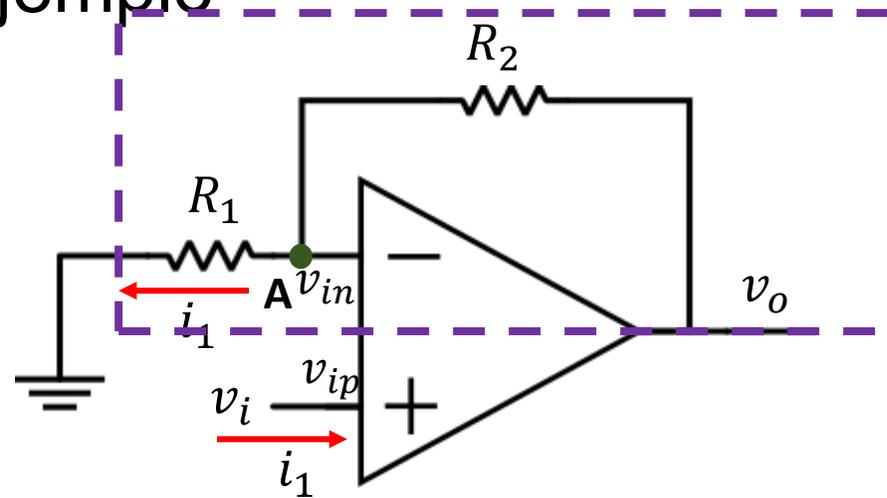
Paso 5: Pero sabemos que sí $v_i = v_{ip} = v_{in}$, entonces $v_A = v_i$ y sustituimos en la ecuación anterior



$$v_i = v_o \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right)$$

Amplificadores Operacionales

- Veamos otro ejemplo



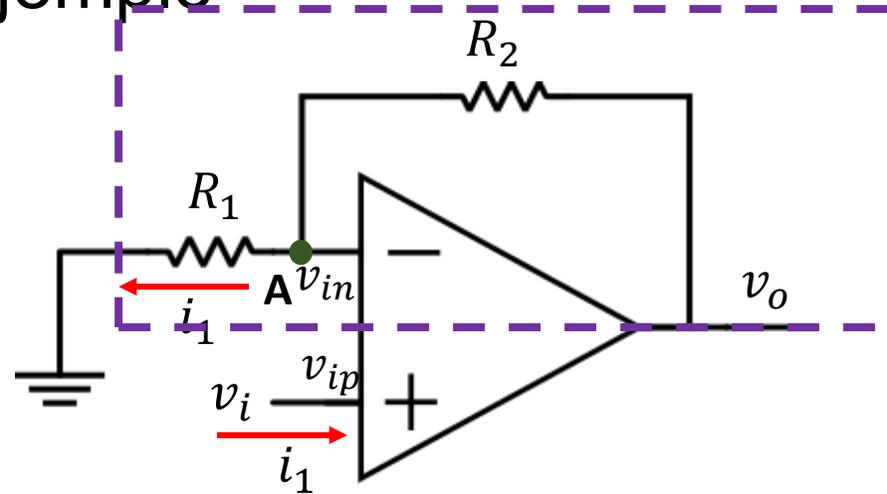
Paso 6: Despejamos a v_o y simplificamos

$$v_o = v_i \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right)$$

$$v_o = v_i \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$

Amplificadores Operacionales

- Veamos otro ejemplo



$$v_o = v_i \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$

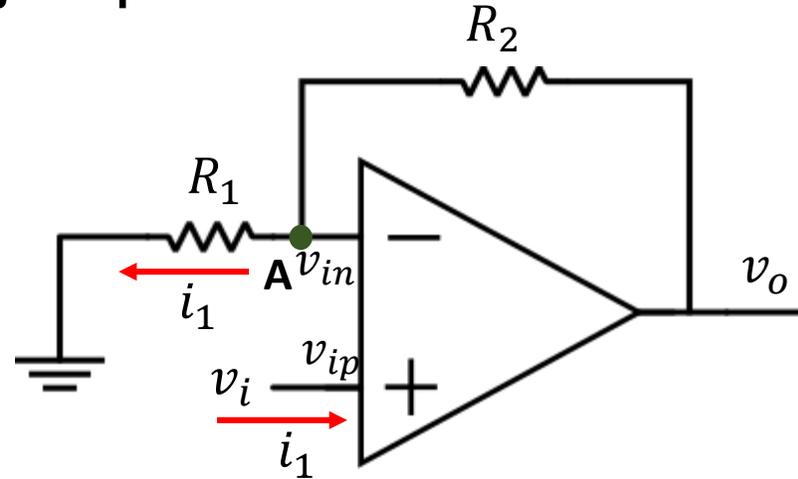
El voltaje de salida es igual al voltaje de entrada multiplicado por un escalar K

$$1 + \frac{R_2}{R_1} = K : \text{Es la ganancia del amplificador}$$

Al no haber signo negativo, indica que el amplificador **NO** INVIERTE la salida

Amplificadores Operacionales

- Veamos otro ejemplo



Amplificador **NO**
Inversor

$$v_o = v_i \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$

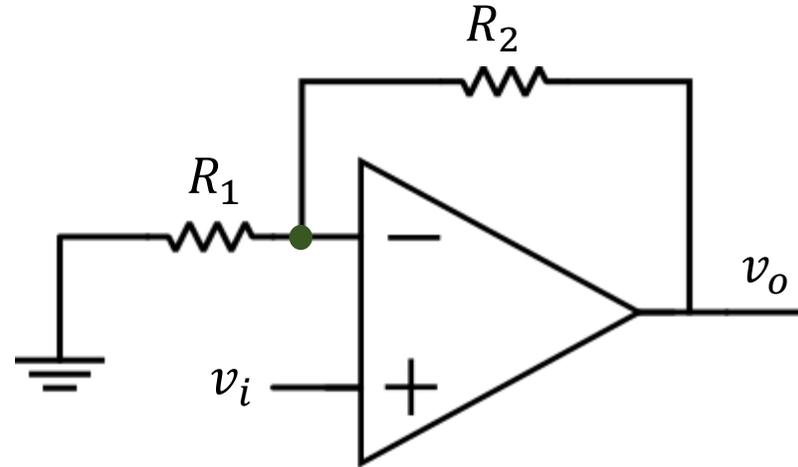
El voltaje de salida es igual al voltaje de entrada multiplicado por un escalar K

$$1 + \frac{R_2}{R_1} = K : \text{Es la ganancia del amplificador}$$

Al no haber signo negativo, indica que el amplificador **NO** INVIERTE la salida

Amplificadores Operacionales

- Ejercicios Amplificador NO inversor



1. Calcular el valor de R_2 y R_1 para que el amplificador tenga una ganancia de 150?

Solución:

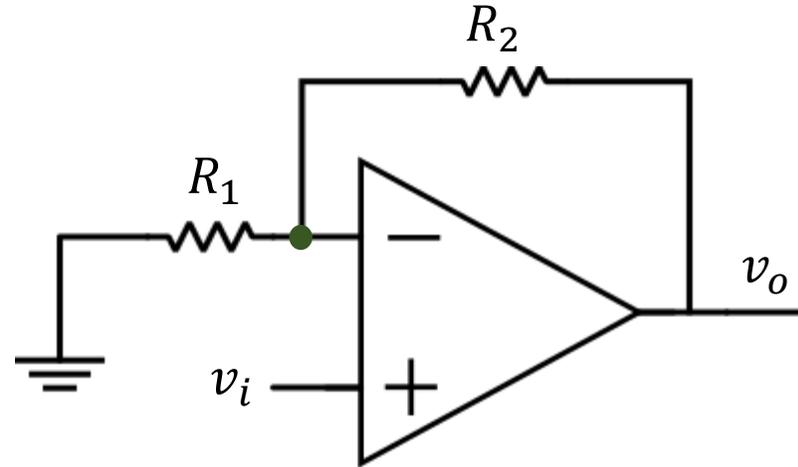
Sabemos que la ganancia es $K = 150 = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$, una ecuación con dos incógnitas (las resistencias):

Proponemos el valor de R_2 . Por ejemplo $R_2 = 15000\Omega$

Despejamos a R_1 y calculamos $\rightarrow R_1 = \left(\frac{R_2}{K-1}\right) = \left(\frac{15000\Omega}{149}\right) = 100.6\Omega \approx 100\Omega$

Amplificadores Operacionales

- Ejercicios Amplificador NO inversor



2. Calcular el voltaje de salida v_o y la ganancia, si el voltaje de entrada es $v_i = 1$ [V] y las resistencias $R_1 = 1$ k Ω , $R_2 = 3.3$ k Ω

Solución:

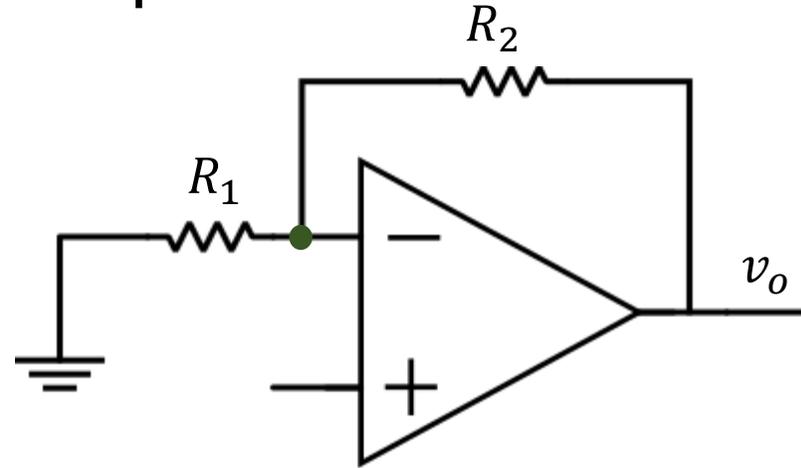
Sabemos que la ganancia es $K = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$, entonces $K = \left(1 + \frac{3.3 \text{ k}\Omega}{1 \text{ k}\Omega}\right) = 4.3$

Calculamos el voltaje de salida $v_o = K v_i = 4.3 (1 \text{ [V]}) = 4.3 \text{ [V]}$

El voltaje de salida es 4.3 veces mas grande que el voltaje de entrada !

Amplificadores Operacionales

- Modificación al amplificador no inversor



$$v_o = v_i \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$

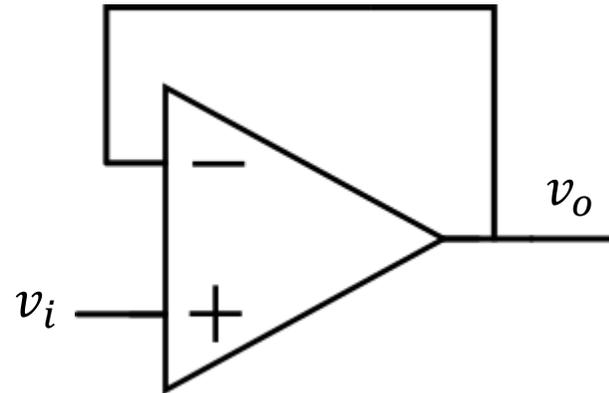
¿Qué pasa con un amplificador no inversor si la resistencia R_2 se hace muy pequeña que se pueda aproximar a cero?

$$v_o = v_i \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \xrightarrow{0} v_o = v_i$$

Amplificadores Operacionales

- Modificación al amplificador no inversor

Si R_2 es cero, entonces podemos quitar la resistencia R_1 , y tenemos la siguiente configuración



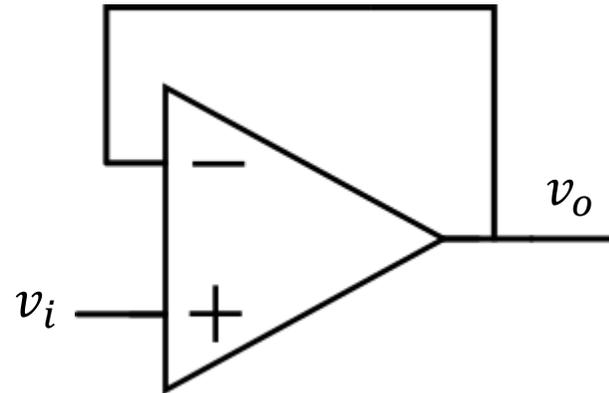
$$v_o = v_i$$

El voltaje de salida es **IDÉNTICO** al voltaje de entrada (no hay amplificación ni señal invertida)

Amplificadores Operacionales

- Modificación al amplificador no inversor

Si R_2 es cero, entonces podemos quitar la resistencia R_1 , y tenemos la siguiente configuración



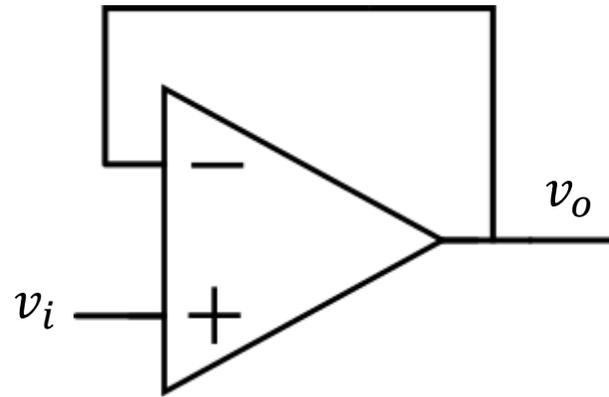
Seguidor de voltaje

$$v_o = v_i$$

El voltaje de salida es IDÉNTICO al voltaje de entrada (no hay amplificación ni señal invertida)

Amplificadores Operacionales

- Modificación al amplificador no inversor



Seguidor de voltaje

$$v_o = v_i$$

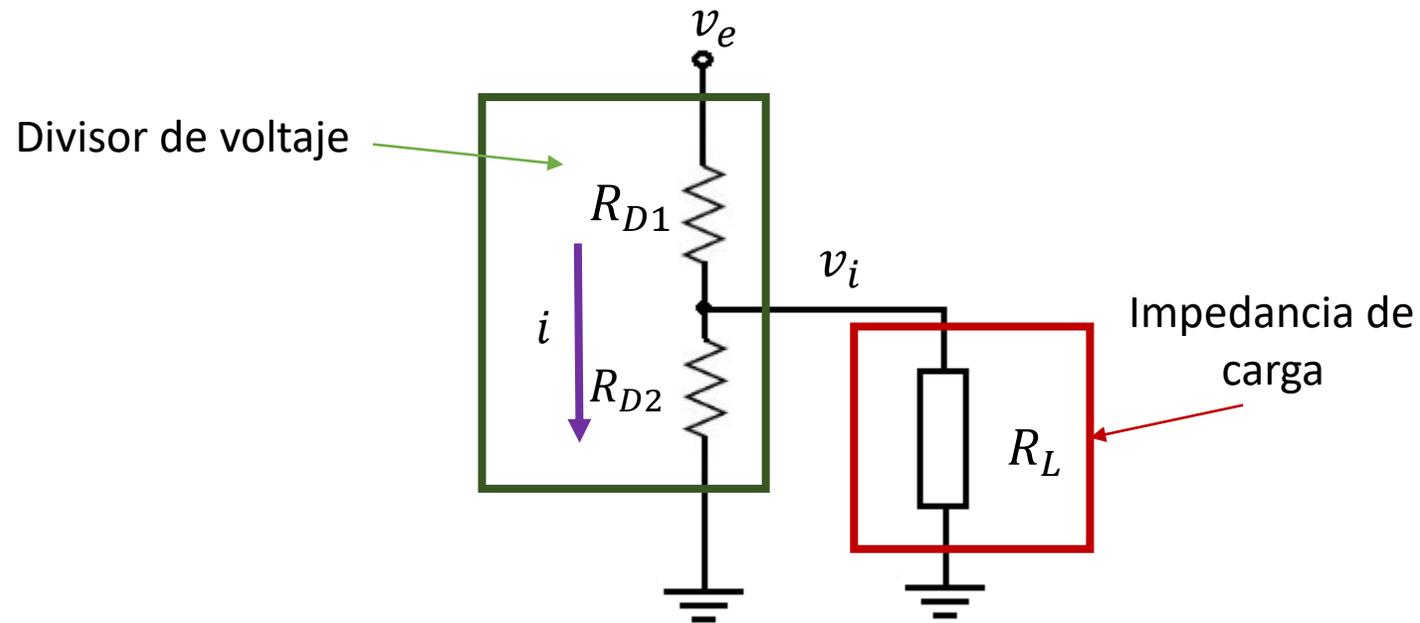
Aunque su funcionamiento parece trivial, su aplicación es enorme

- ✓ Acoplamiento de impedancias
- ✓ Limita la corriente ya que por el amplificador no fluye

Amplificadores Operacionales

- ¿Cuándo usar un Seguidor de voltaje?

Considere un circuito divisor de voltaje conformado por R_{D1} y R_{D2} cuyo objetivo es disminuir el voltaje v_e . La salida del divisor v_i será aplicada a una impedancia de carga R_L .

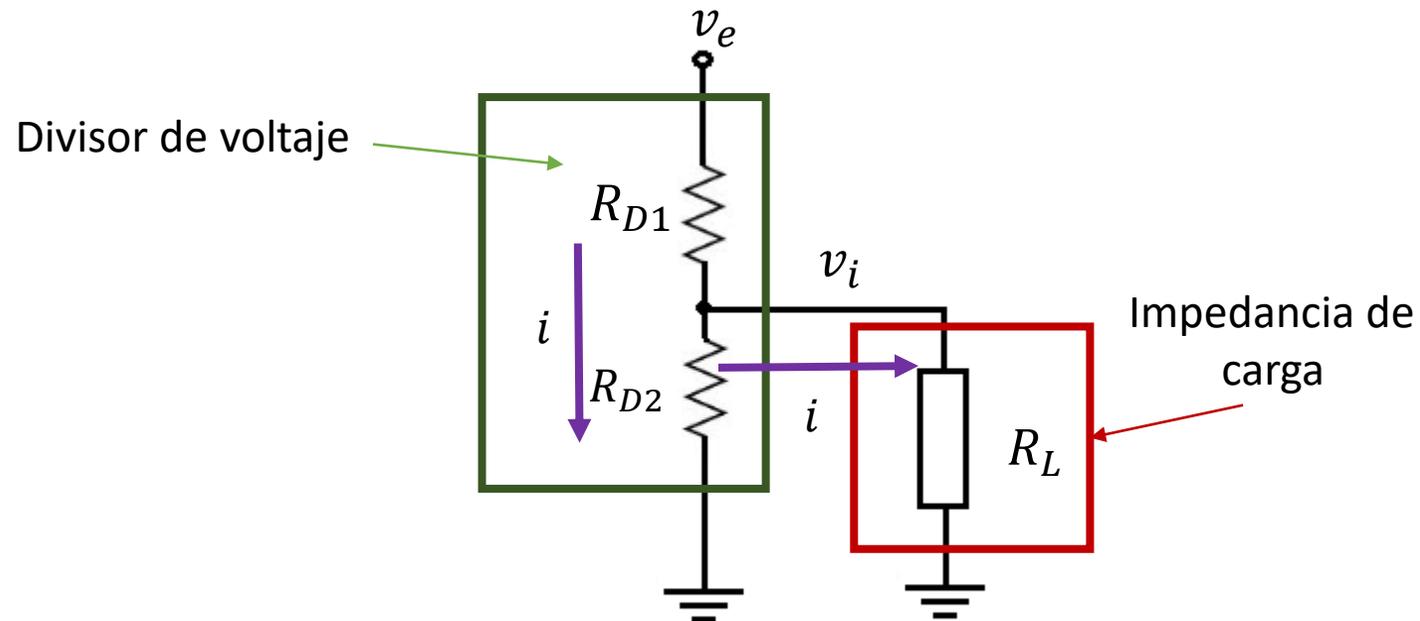


Idealmente, una corriente i fluye solo por las resistencias R_{D1} y R_{D2}

Amplificadores Operacionales

- ¿Cuándo usar un Seguidor de voltaje?

Considere un circuito divisor de voltaje conformado por R_{D1} y R_{D2} cuyo objetivo es disminuir el voltaje v_e . La salida del divisor v_i será aplicada a una impedancia de carga R_L .



OBSERVA QUE v_i alimenta a la carga. PERO.... R_L está formando un circuito en paralelo con R_{D2} !
Entonces la corriente i también se irá hacia la carga R_L

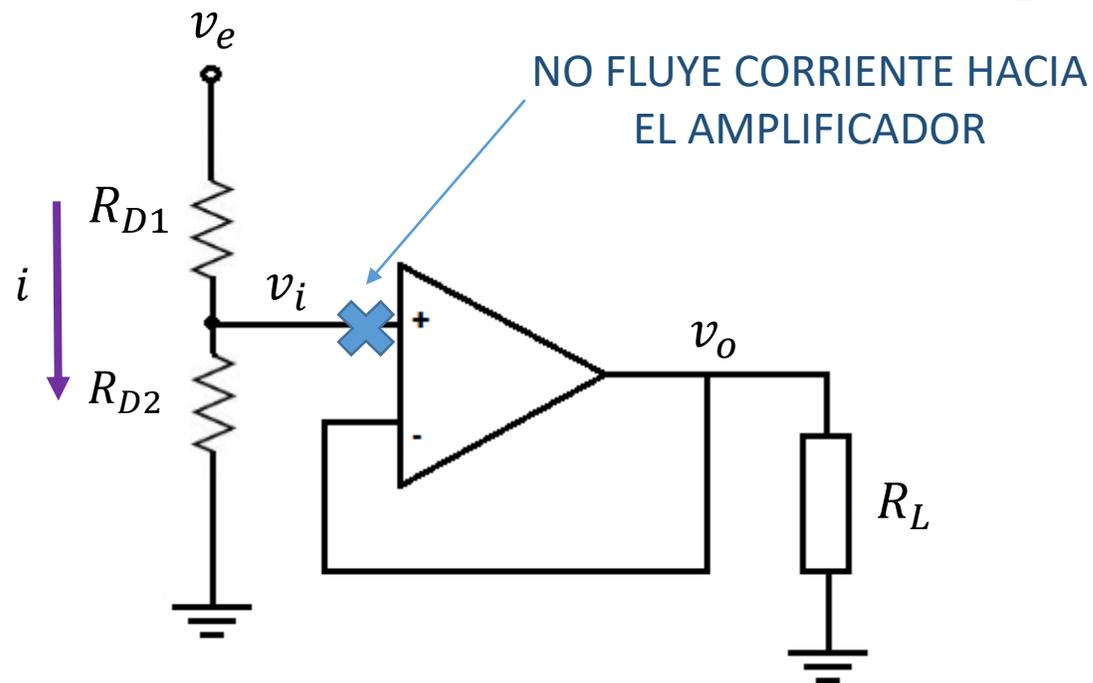
ESTE FENÓMENO SE CONOCE COMO DESACOPLAMIENTO DE IMPEDANCIAS

Amplificadores Operacionales

- ¿Cuándo usar un Seguidor de voltaje?

Considere un circuito divisor de voltaje conformado por R_{D1} y R_{D2} cuyo objetivo es disminuir el voltaje v_e . La salida del divisor v_i será aplicada a una impedancia de carga R_L .

La solución es colocar un seguidor de voltaje entre la impedancia de carga R_L y R_{D2}



El amplificador operacional evita que la corriente fluya hacia R_L !! Como una barrera virtual

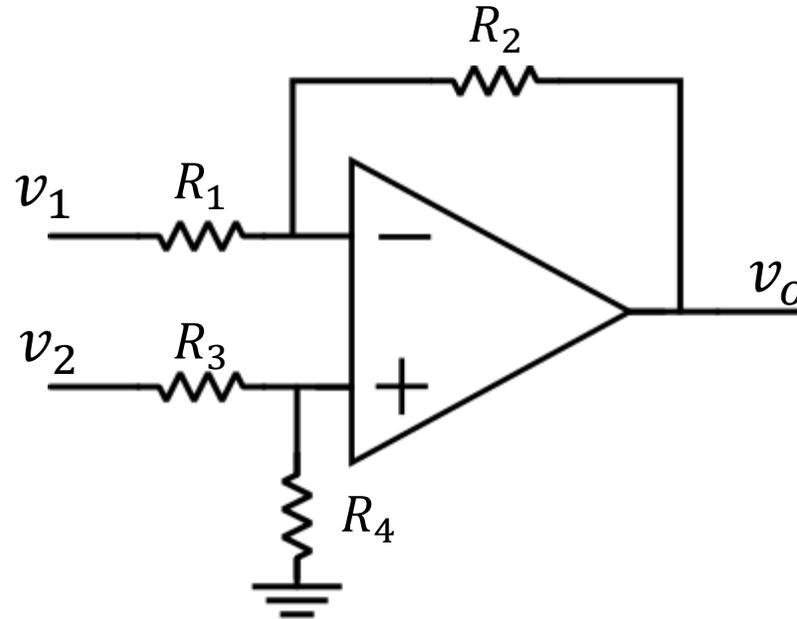


Amplificadores Operacionales

MÁS CONFIGURACIONES ÚTILES EN INSTRUMENTACIÓN

Amplificadores Operacionales

- Amplificador diferencial

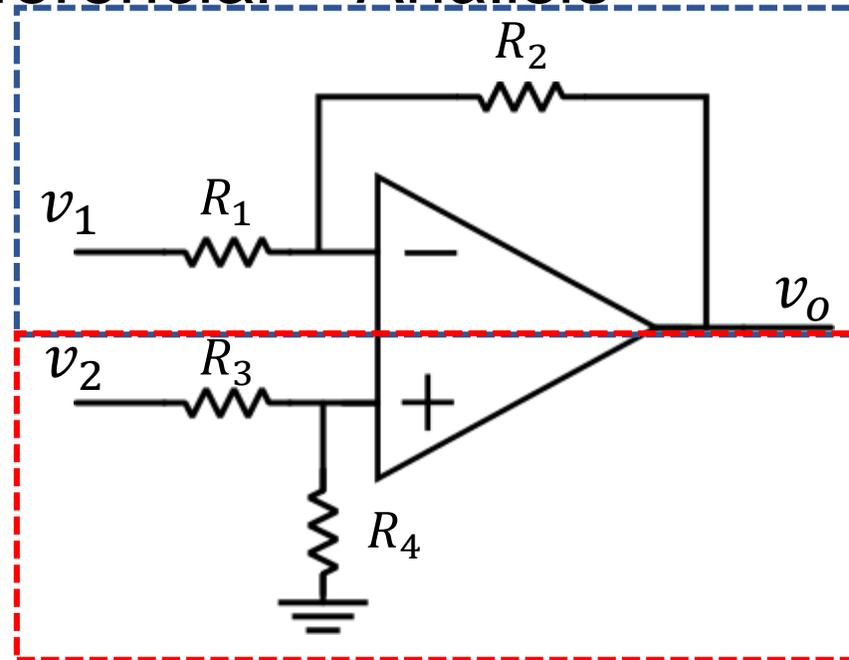


- ✓ Las dos entradas, inversora y no inversora, tienen señales de entrada v_1 y v_2
- ✓ Se llama diferencia por que la salida v_o será función de la resta $v_2 - v_1$
- ✓ Además, la resta estará amplificada por una ganancia K

Amplificadores Operacionales

- Amplificador diferencial - Análisis

✓ Se analiza con el principio de SUPERPOSICIÓN



Paso 1: Identificamos los subcircuitos del amplificador, uno por cada entrada

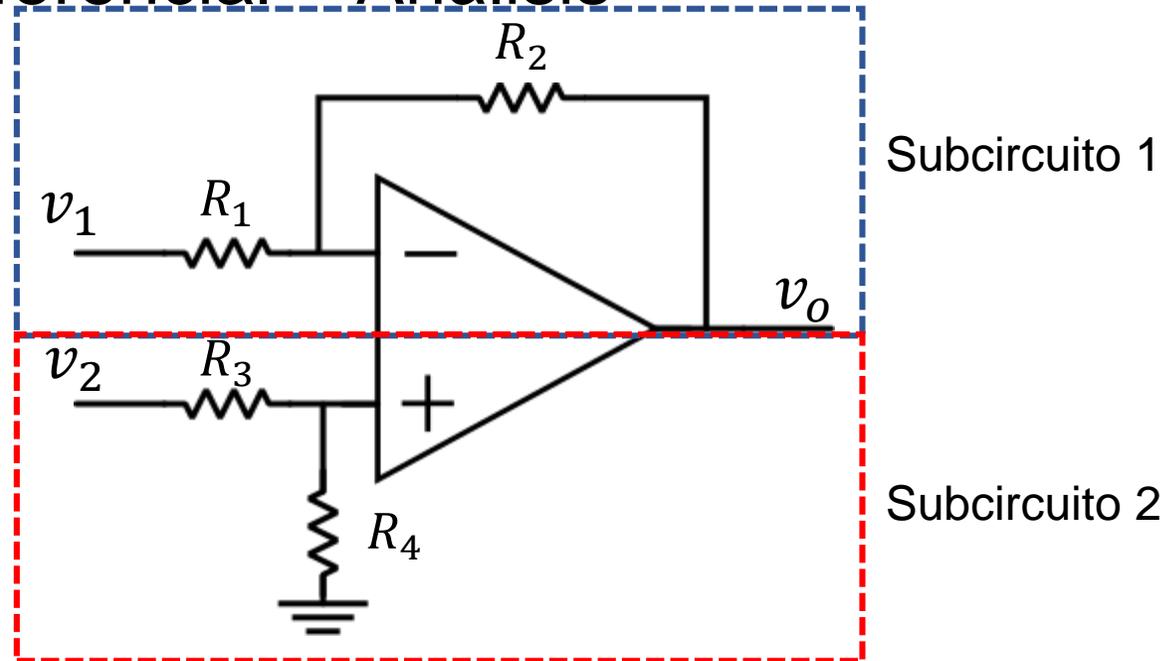
- Subcircuito 1 (en azul)
- Subcircuito 2 (en rojo)

* Literalmente, dividimos en 2 al amplificador y analizamos cada circuito por separado

Amplificadores Operacionales

- Amplificador diferencial - Análisis

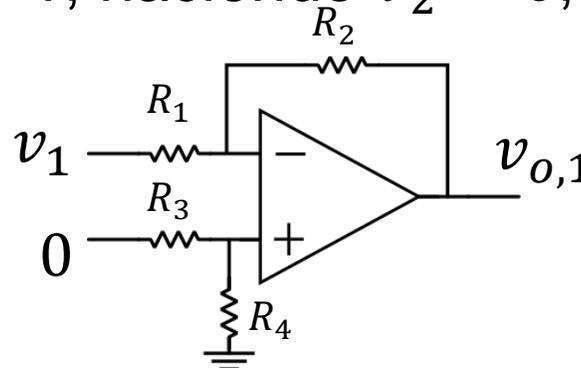
✓ Se analiza con el principio de SUPERPOSICIÓN



Paso 2: Analizamos el subcircuito 1, haciendo $v_2 = 0$, resulta en un amplificador inversor

* R_3 y R_4 se descartan

*Renombramos la salida como $v_{o,1}$

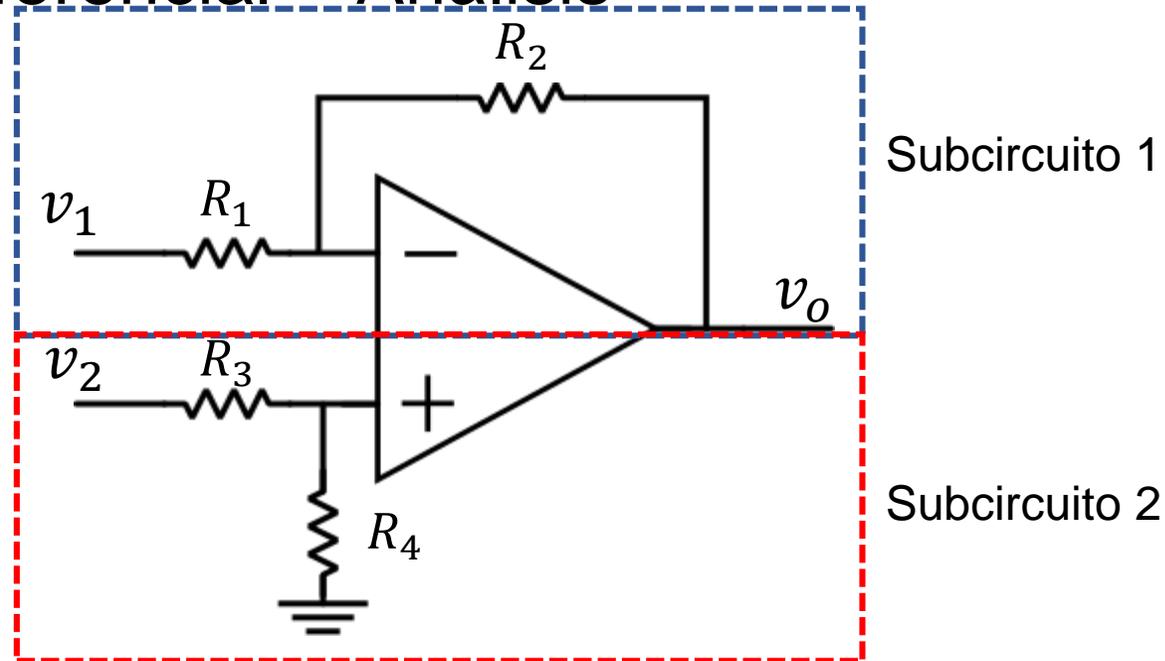


$$v_{o,1} = - \left(\frac{R_2}{R_1} \right) \cdot v_1$$

Amplificadores Operacionales

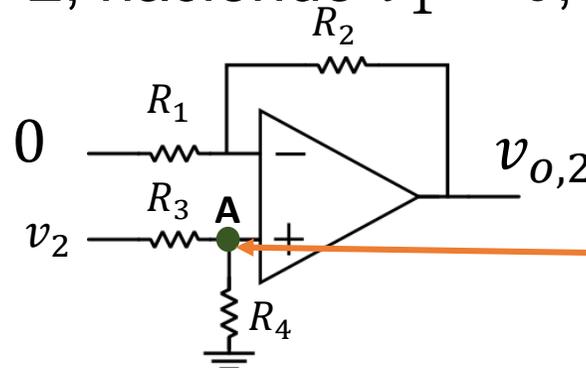
- Amplificador diferencial - Análisis

✓ Se analiza con el principio de SUPERPOSICIÓN



Paso 3: Analizamos el subcircuito 2, haciendo $v_1 = 0$, resulta en un amplificador NO inversor

*Renombramos la salida como $v_{o,2}$

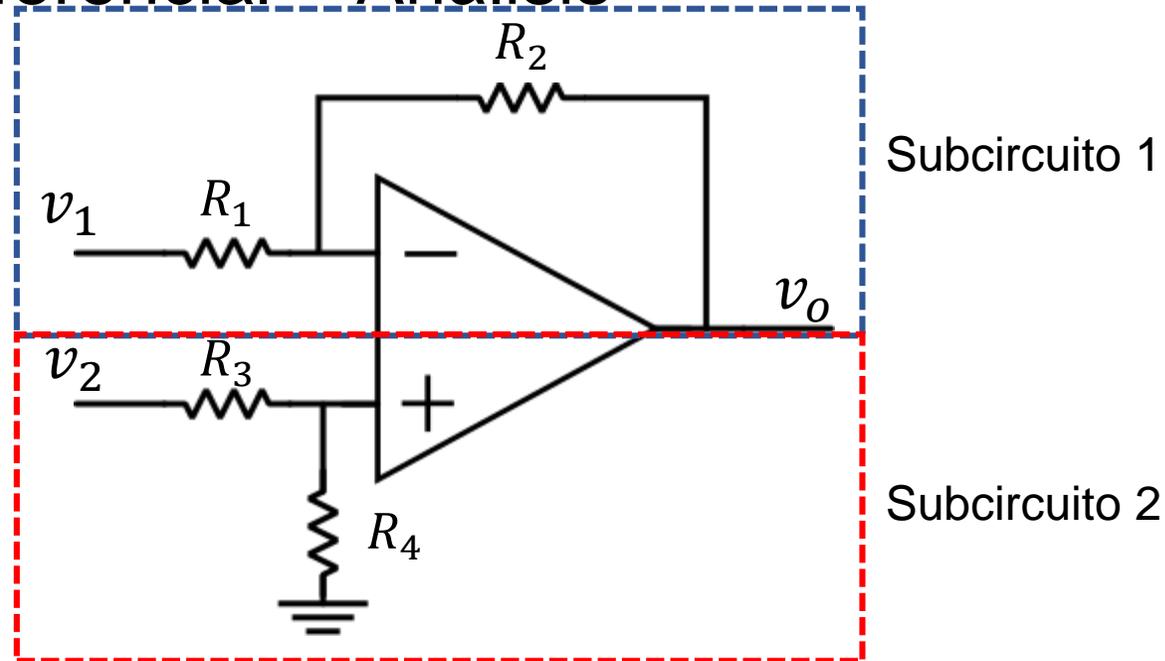


***Vemos que el voltaje de entrada v_2 no entra directo a la terminal, pasa por un divisor de voltaje entre R_3 y R_4**

Amplificadores Operacionales

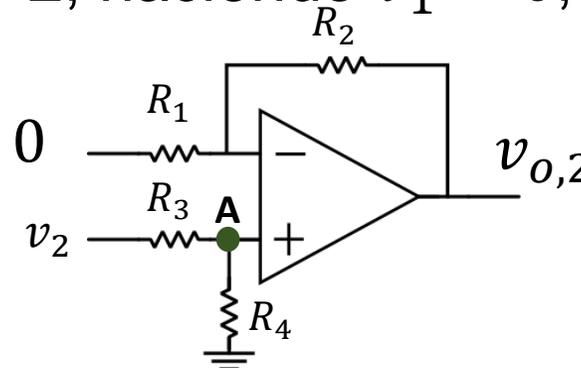
- Amplificador diferencial - Análisis

✓ Se analiza con el principio de SUPERPOSICIÓN



Paso 3: Analizamos el subcircuito 2, haciendo $v_1 = 0$, resulta en un amplificador NO inversor

*Renombramos la salida como $v_{o,2}$



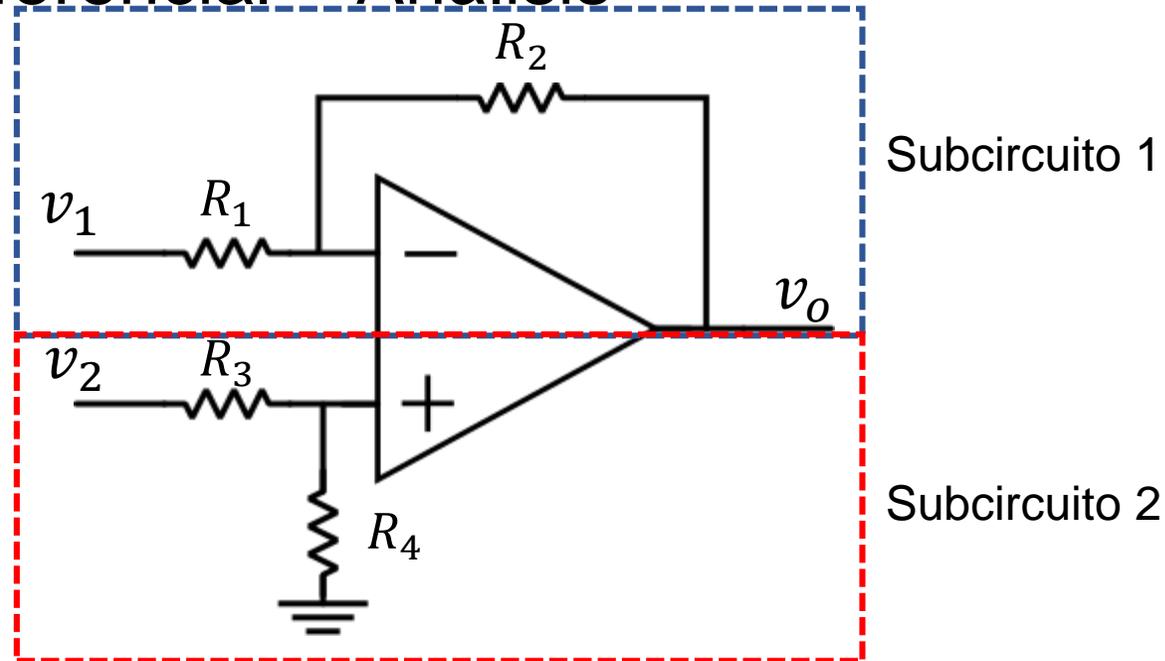
Calculamos el divisor en el punto A

$$v_A = v_2 \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4} \right)$$

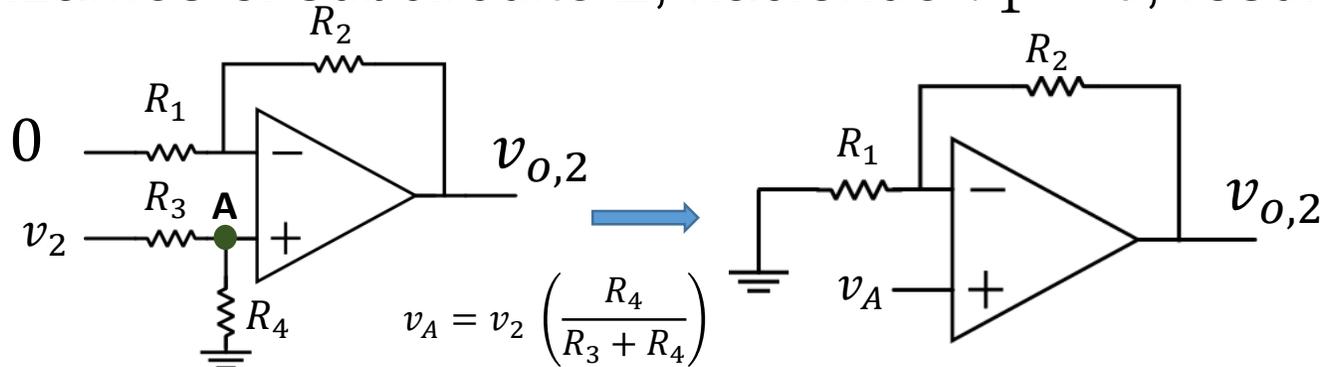
Amplificadores Operacionales

- Amplificador diferencial - Análisis

✓ Se analiza con el principio de SUPERPOSICIÓN



Paso 3: Analizamos el subcircuito 2, haciendo $v_1 = 0$, resulta en un amplificador NO inversor



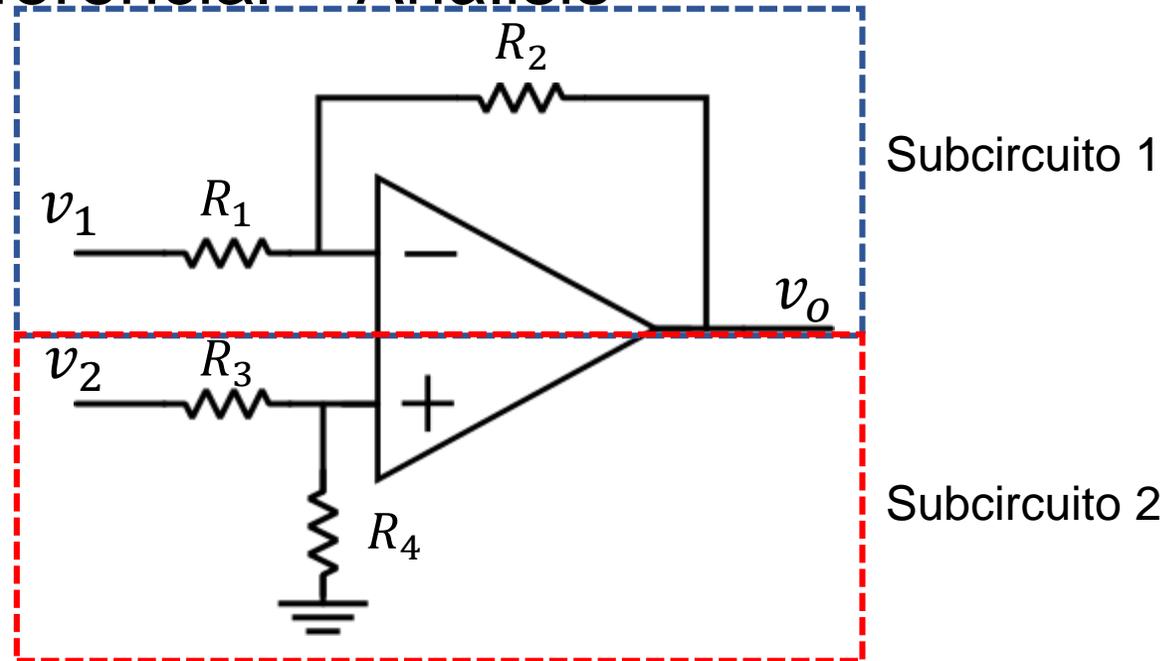
Calculamos la salida $v_{0,2}$ con la entrada v_A

$$v_{0,2} = v_A \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$

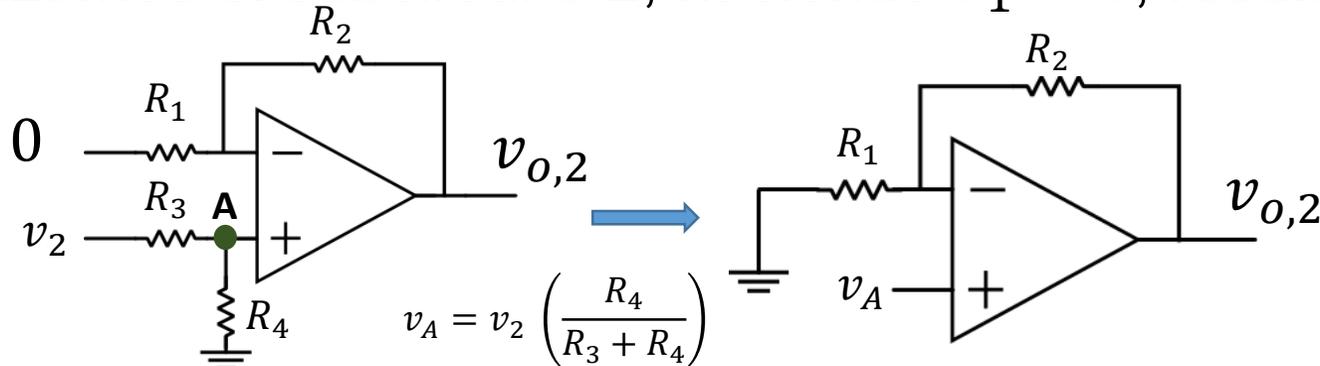
Amplificadores Operacionales

- Amplificador diferencial - Análisis

✓ Se analiza con el principio de SUPERPOSICIÓN



Paso 3: Analizamos el subcircuito 2, haciendo $v_1 = 0$, resulta en un amplificador NO inversor



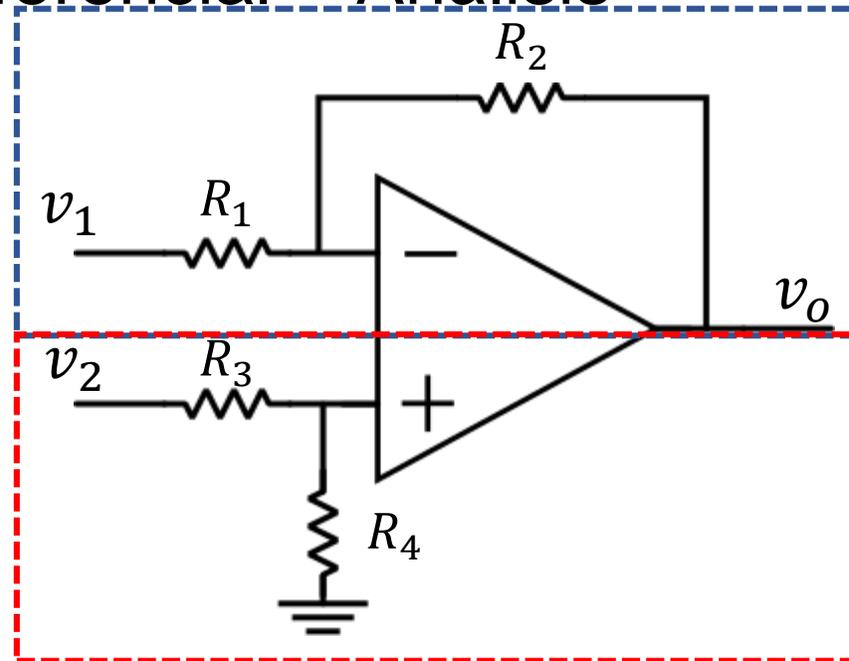
Sustituimos $v_A = v_2 \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4} \right)$

$$v_{0,2} = v_2 \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$

Amplificadores Operacionales

- Amplificador diferencial - Análisis

✓ Se analiza con el principio de SUPERPOSICIÓN



Subcircuito 1

$$v_{o,1} = -\left(\frac{R_2}{R_1}\right) \cdot v_1$$

Subcircuito 2

$$v_{o,2} = v_2 \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4}\right) \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

Paso 4: Sumamos los resultados de los dos subcircuitos $v_{o,2}$ y $v_{o,1}$ para obtener v_o

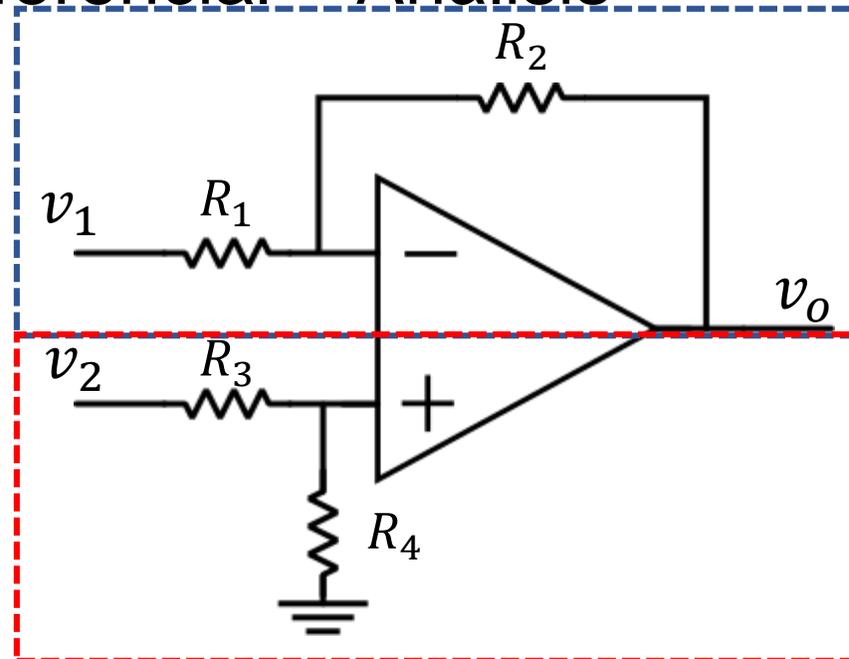
$$v_o = v_{o,2} + v_{o,1}$$

$$v_o = v_2 \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4}\right) \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) + -\left(\frac{R_2}{R_1}\right) \cdot v_1$$

Amplificadores Operacionales

- Amplificador diferencial - Análisis

✓ Se analiza con el principio de SUPERPOSICIÓN



Subcircuito 1

$$v_{o,1} = -\left(\frac{R_2}{R_1}\right) \cdot v_1$$

Subcircuito 2

$$v_{o,2} = v_2 \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4}\right) \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

Paso 4: Sumamos los resultados de los dos subcircuitos $v_{o,2}$ y $v_{o,1}$ para obtener v_o

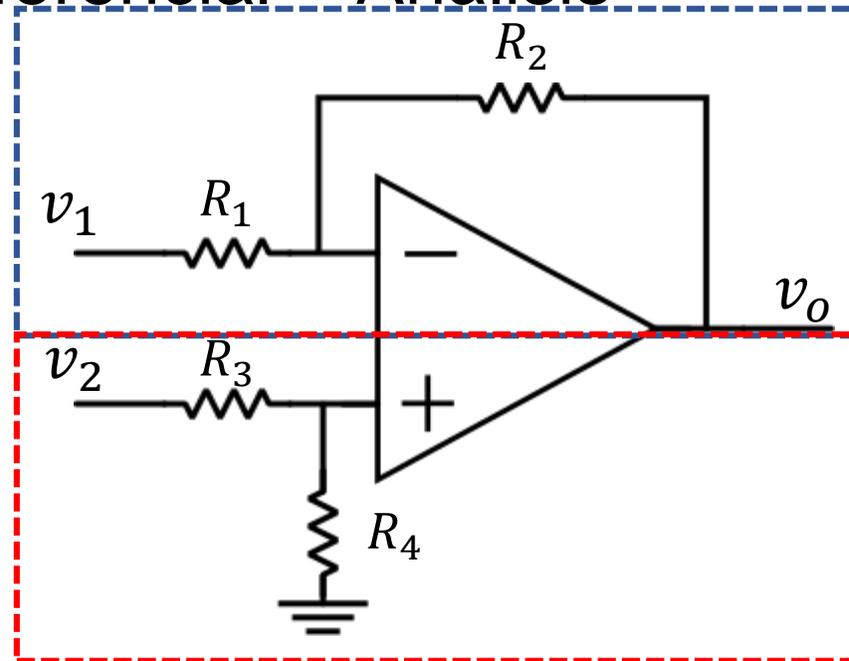
*Simplificamos

$$v_o = v_2 \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4}\right) \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) - \left(\frac{R_2}{R_1}\right) \cdot v_1$$

Amplificadores Operacionales

- Amplificador diferencial - Análisis

✓ Se analiza con el principio de SUPERPOSICIÓN



Subcircuito 1

$$v_{o,1} = -\left(\frac{R_2}{R_1}\right) \cdot v_1$$

Subcircuito 2

$$v_{o,2} = v_2 \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4}\right) \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

Paso 5: En la práctica debemos hacer que $R_1 = R_3$ y $R_2 = R_4$, entonces

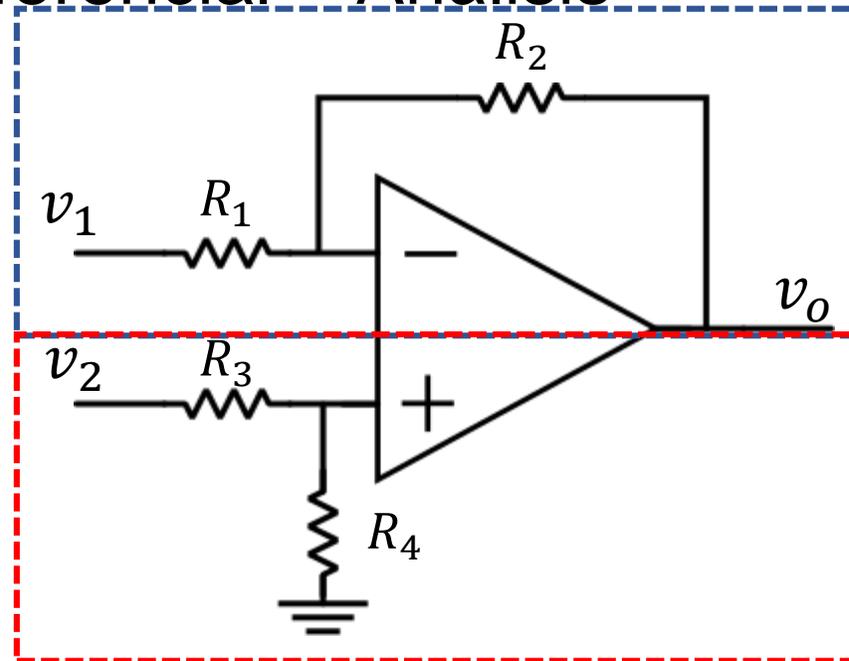
$$v_o = v_2 \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4}\right) \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) - \left(\frac{R_4}{R_3}\right) \cdot v_1$$

$$v_o = v_2 \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4}\right) \left(\frac{R_3 + R_4}{R_3}\right) - \left(\frac{R_4}{R_3}\right) \cdot v_1$$

Amplificadores Operacionales

- Amplificador diferencial - Análisis

✓ Se analiza con el principio de SUPERPOSICIÓN



Subcircuito 1

$$v_{o,1} = -\left(\frac{R_2}{R_1}\right) \cdot v_1$$

Subcircuito 2

$$v_{o,2} = v_2 \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4}\right) \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

Paso 5: En la práctica debemos hacer que $R_1 = R_3$ y $R_2 = R_4$, entonces Simplificamos

$$v_o = v_2 \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4}\right) \left(\frac{R_3 + R_4}{R_3}\right) - \left(\frac{R_4}{R_3}\right) \cdot v_1$$

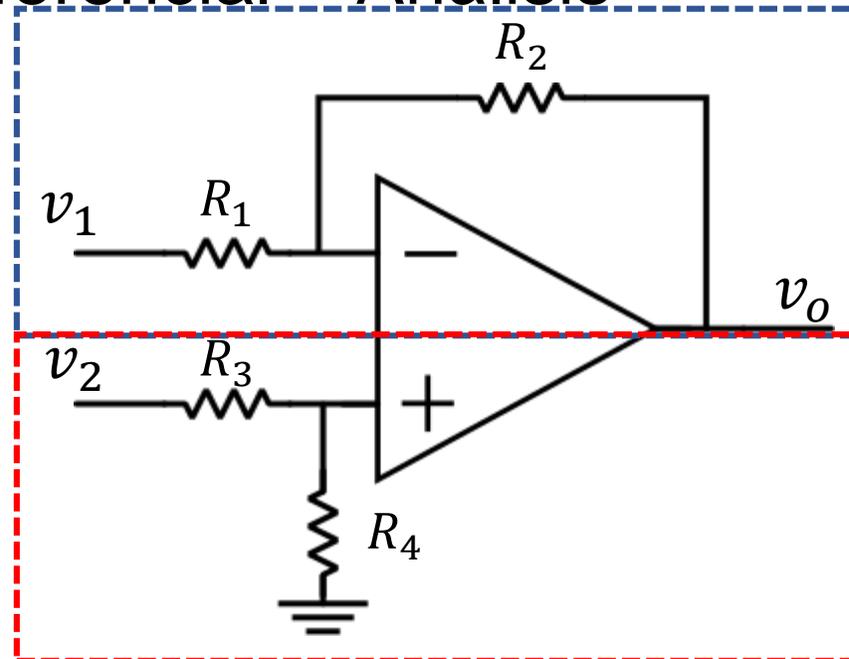
Factorizamos

$$v_o = \left(\frac{R_4}{R_3}\right) \cdot (v_2 - v_1)$$

Amplificadores Operacionales

- Amplificador diferencial - Análisis

✓ Se analiza con el principio de SUPERPOSICIÓN



Subcircuito 1

$$v_{o,1} = -\left(\frac{R_2}{R_1}\right) \cdot v_1$$

Subcircuito 2

$$v_{o,2} = v_2 \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4}\right) \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

$$v_o = \left(\frac{R_4}{R_3}\right) \cdot (v_2 - v_1)$$

El voltaje de salida es igual a la diferencia de los voltajes de entrada multiplicada por un escalar

$$\frac{R_4}{R_3} = K : \text{Es la ganancia del amplificador}$$

Al no haber signo negativo, indica que el amplificador **NO** INVIERTE la salida