

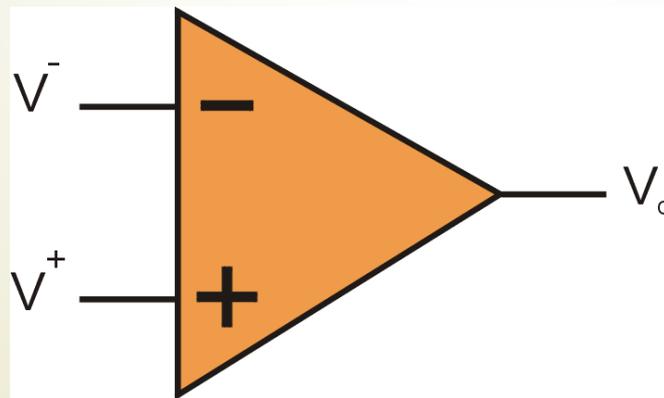
# Electrónica

Curso 2023

Amplificadores Operacionales

# El amplificador operacional

El Amplificador Operacional (AOP) es un amplificador de gran ganancia, utilizado para realizar operaciones lineales y no lineales sin más que cambiar los elementos externos tales como resistencias, condensadores, diodos, etc.



Como dijimos tiene una gran ganancia a lazo abierto, pero que trabaja con una ganancia pequeña a lazo cerrado (comparada con la ganancia a lazo abierto).

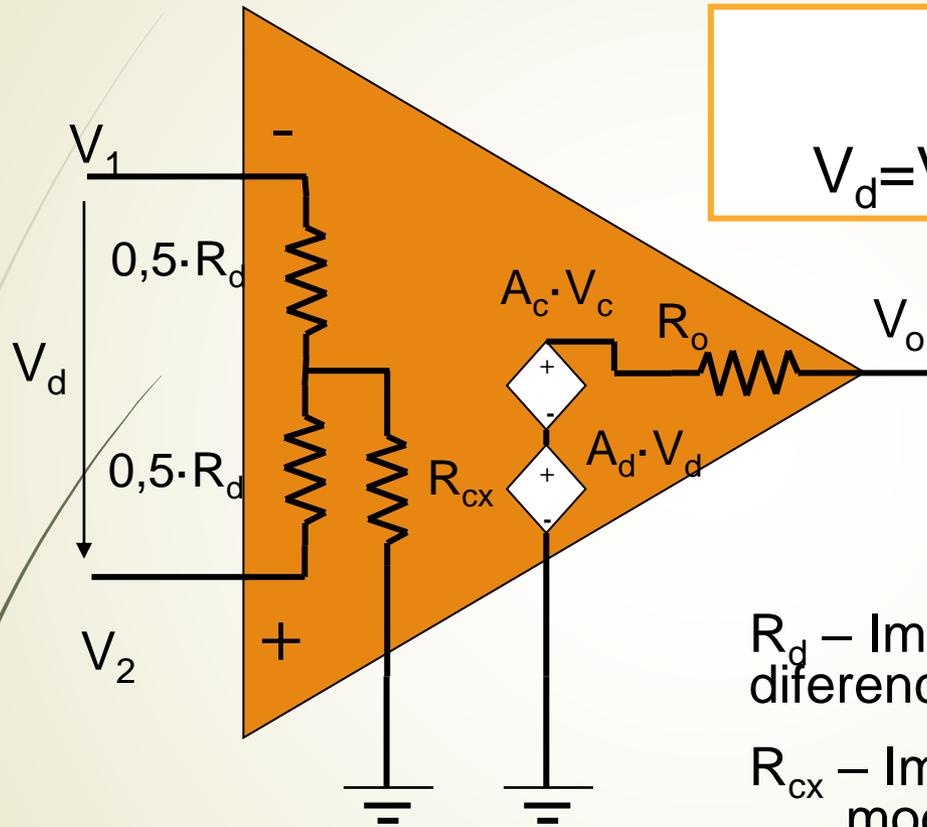
# Amplificador Operacional ideal

- ▶ Ganancia infinita
- ▶ Ancho de banda infinito
- ▶ Impedancia de entrada infinita
- ▶ Corriente de salida infinita
- ▶ Impedancia de salida nula
- ▶ Corriente de entrada cero
- ▶ Tensión de “offset” de entrada cero
- ▶ Amplificador diferencial (rechazo de modo común infinito)

# Simplificaciones

- ▶ Corriente hacia el terminal de entrada deberá seguir otro camino. No puede entrar al amplificador debido a su impedancia de entrada infinita.
- ▶ Para obtener una tensión de salida no se requiere diferencia de potencial entre los terminales de entrada, por ser la ganancia infinita.
- ▶ Los efectos debido a la frecuencia y la  $R$  de carga pueden despreciarse.

# Circuito equivalente real



$$V_o = A_d \cdot V_d + A_c \cdot V_c$$

$$V_d = V_2 - V_1 \text{ y } V_c = (V_1 + V_2) / 2$$

$R_d$  – Impedancia de entrada diferencial

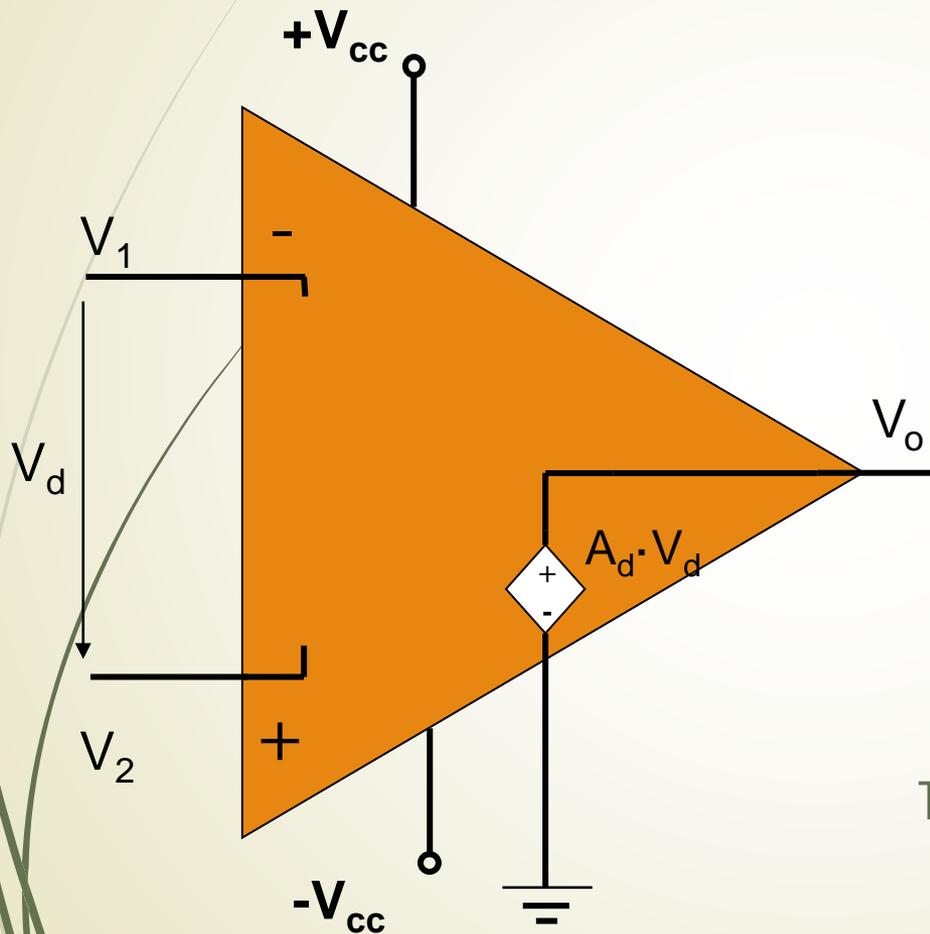
$R_{cx}$  – Impedancia de entrada de modo común

$R_o$  – Impedancia de salida

$A_d$  – Ganancia diferencial

$A_c$  – Ganancia de modo común

# Circuito equivalente ideal (lineal)



$R_d$  – Infinita

$R_{cx}$  – Infinita

$R_o$  – Nula

$A_d$  – Infinita

$A_c$  – nula

$$V_o = A_d \cdot V_d$$

$$V_d = V_2 - V_1$$

Tensión de salida  $V_o$  acotada

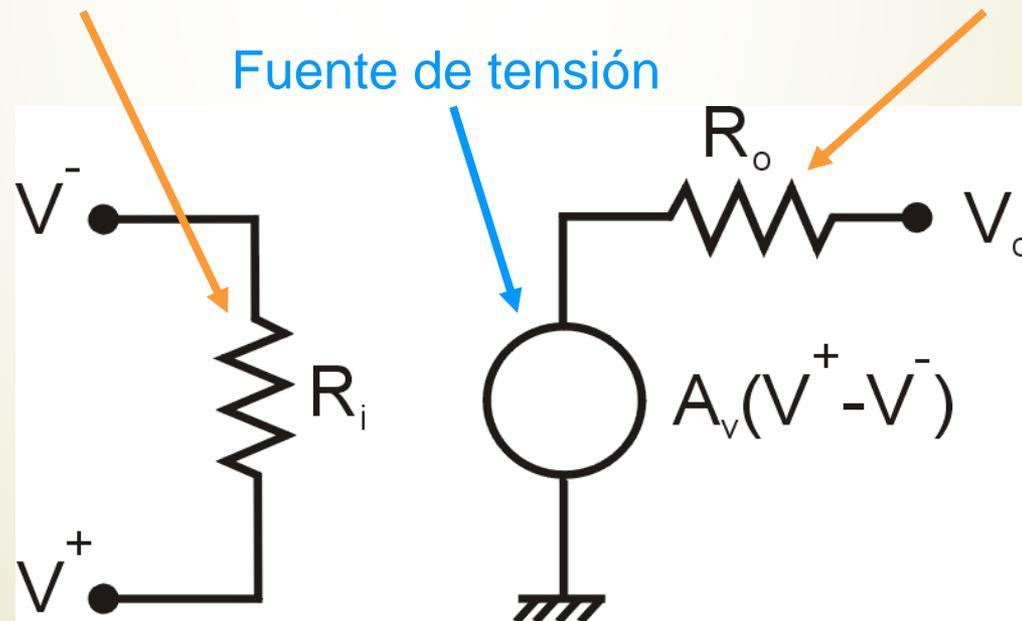
$$-V_{cc} \leq V_o \leq +V_{cc}$$

## Amplificador operacional lineal (con $R_i$ y $R_o$ )

Cuando el comportamiento del AO es lineal, se puede sustituir por el siguiente modelo lineal:

Resistencia de entrada

Resistencia de salida



# Análisis de circuitos con AO

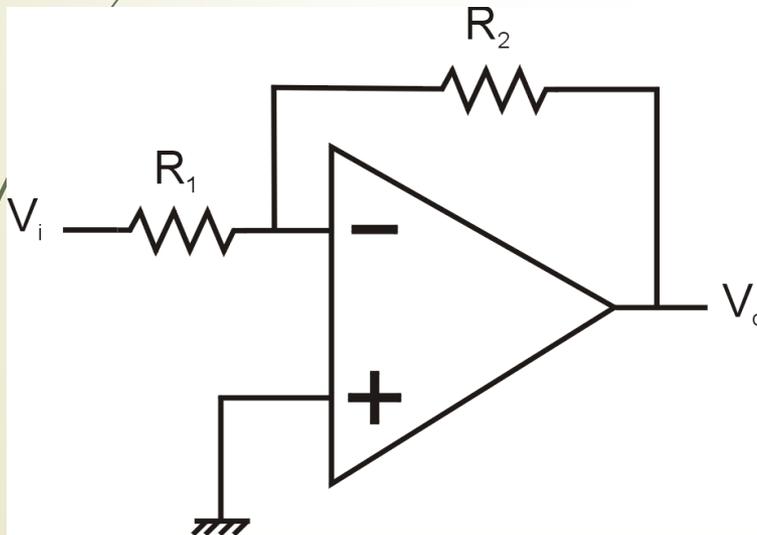
- El AO se representa por un triángulo, con dos entradas y una salida.
- En general omitimos los terminales de alimentación (obviamente necesarios).
- Si la tensión en el terminal negativo cambia, la salida cambia en sentido contrario. Este terminal se llama inversor.
- Si la tensión en el terminal positivo cambia, la salida cambia en el mismo sentido. Este terminal se llama no inversor.

# Realimentación

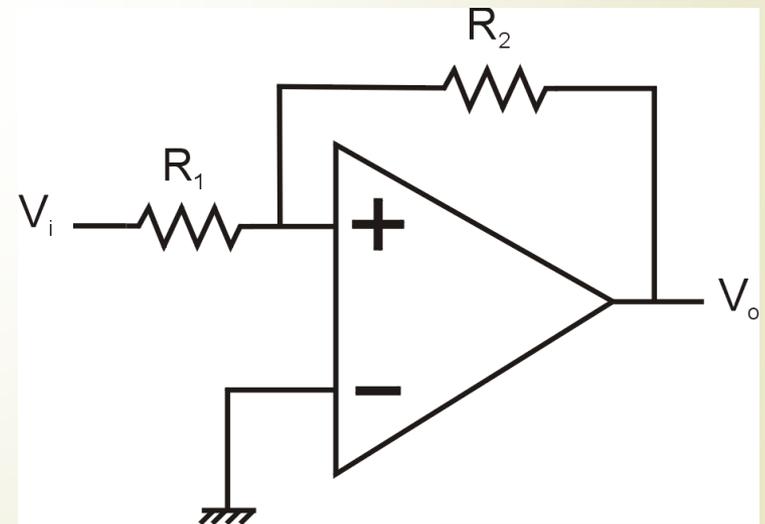
Se establece una conexión entre la entrada y la salida.

Hay dos tipos de realimentación:

Negativa



Positiva



# Realimentación positiva:

$$V_o \downarrow \Rightarrow V^+ \downarrow \Rightarrow (V^+ - V^-) \downarrow \Rightarrow V_o \downarrow \quad V_o \text{ se limita a } -V_{cc}$$

Si  $V_o$  decrece,  $V^+$  también decrece y la diferencia ( $V^+ - V^-$ ) también decrece y  $V_o$  vuelve a decrecer y así siguiendo hasta llegar a  $-V_{cc}$  (alimentación).

$$V_o \uparrow \Rightarrow V^+ \uparrow \Rightarrow (V^+ - V^-) \uparrow \Rightarrow V_o \uparrow \quad V_o \text{ se limita a } +V_{cc}$$

Si  $V_o$  crece,  $V^+$  también crece y la diferencia ( $V^+ - V^-$ ) también crece y  $V_o$  vuelve a crecer y así siguiendo hasta llegar a  $+V_{cc}$  (alimentación).

# Realimentación negativa:

$$V_o \downarrow \Rightarrow V^- \downarrow \Rightarrow (V^+ - V^-) \uparrow \Rightarrow V_o \uparrow \quad \text{equilibrio } V^- = V^+$$

Si  $V_o$  decrece,  $V^-$  también decrece y la diferencia  $(V^+ - V^-)$  crece y  $V_o$  crece o sea en sentido contrario a la variación original.

$$V_o \uparrow \Rightarrow V^- \uparrow \Rightarrow (V^+ - V^-) \downarrow \Rightarrow V_o \downarrow \quad \text{equilibrio } V^- = V^+$$

Si  $V_o$  crece,  $V^-$  también crece y la diferencia  $(V^+ - V^-)$  decrece y  $V_o$  decrece o sea en sentido contrario a la variación original.

# Aplicaciones típicas

## Circuitos Amplificadores de Señal:

- ✓ Amplificador Inversor
- ✓ Amplificador No Inversor

## Circuitos Operadores de Señales

- ✓ Sumador
- ✓ Derivador
- ✓ Integrador
- ✓ Comparador

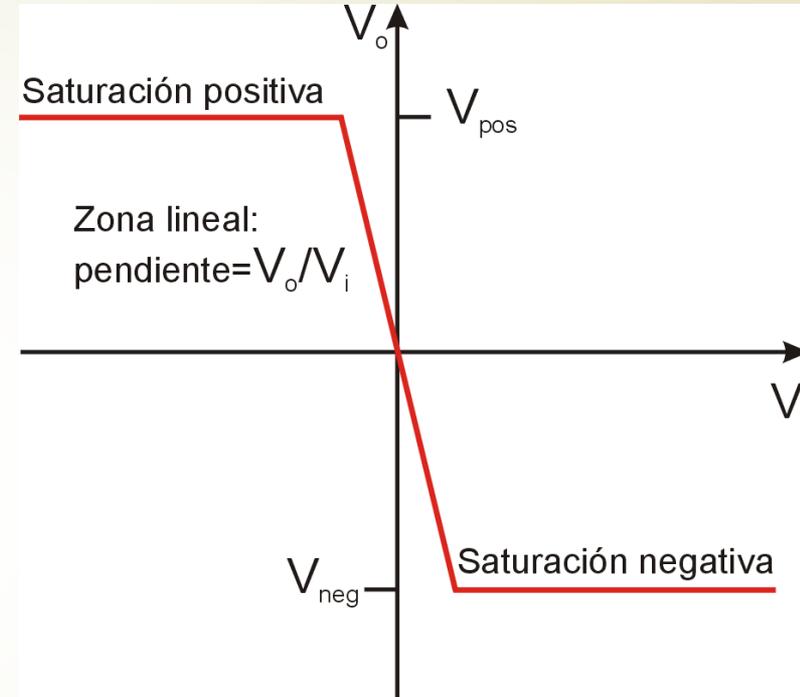
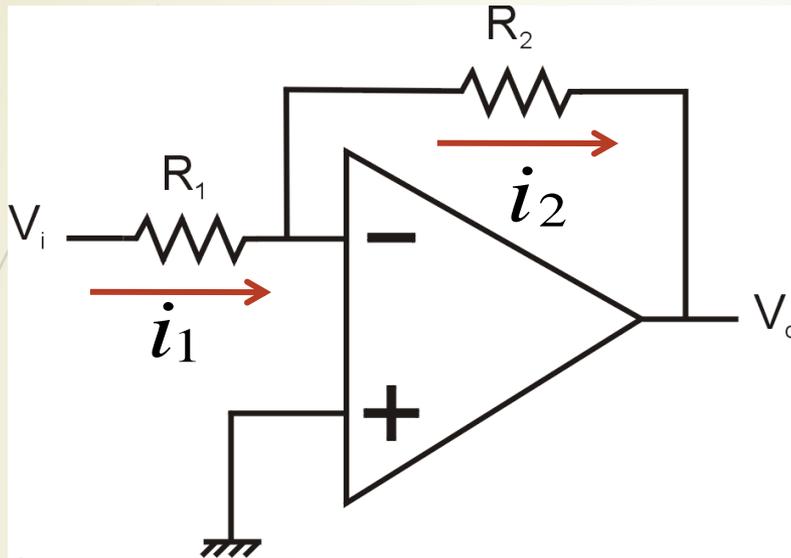
## Circuitos Convertidores de Señales

- ✓ Convertidores D/A
- ✓ Convertidores A/D

## Circuitos Filtros Activos

- ✓ Filtro Paso Bajo
- ✓ Filtro Paso Alto
- ✓ Filtro Paso Banda
- ✓ Filtro Banda Eliminada

# Configuración inversora



$$i_1 = \frac{V_i}{R_1} \quad i_2 = -\frac{V_o}{R_2} \quad i_1 = i_2$$

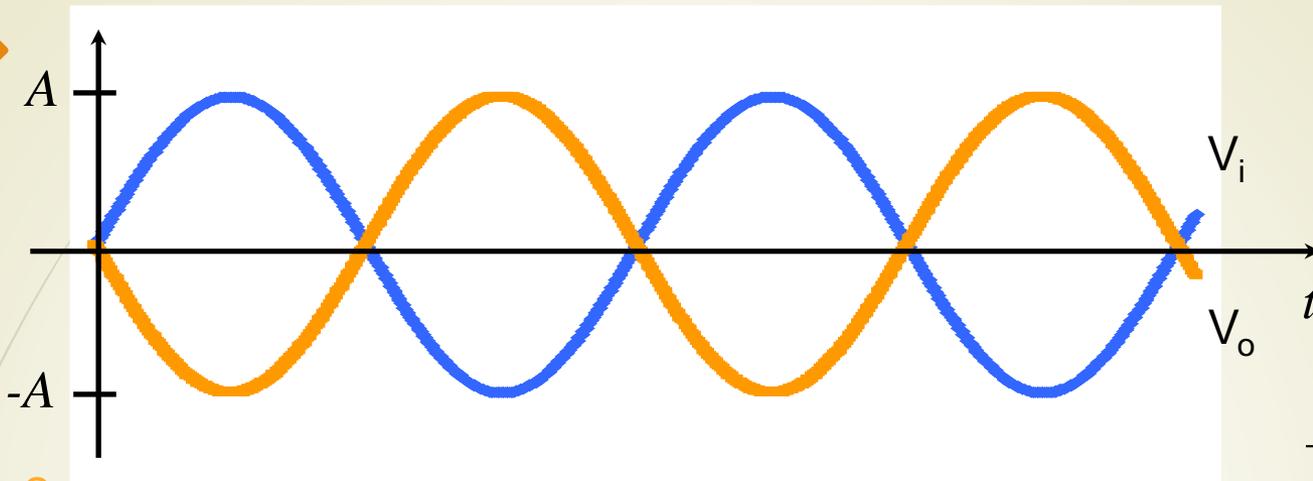
$$\frac{V_i}{R_1} = -\frac{V_o}{R_2} \Rightarrow \frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_2}{R_1}$$



- El amplificador inversor permite introducir el concepto de tierra virtual.
- Como consecuencia de la ganancia infinita la tensión necesaria para producir una salida es cero.
- Como el terminal + está a tierra, entonces el terminal – podemos suponer que también.
- Es decir aunque la entrada – no está a tierra, “virtualmente” se mantiene a potencial de tierra para la realimentación negativa.
- La corriente  $i_1$  no entra al AO por tener resistencia de entrada infinita y circula por  $R_2$ .

### Ejemplo 1:

15



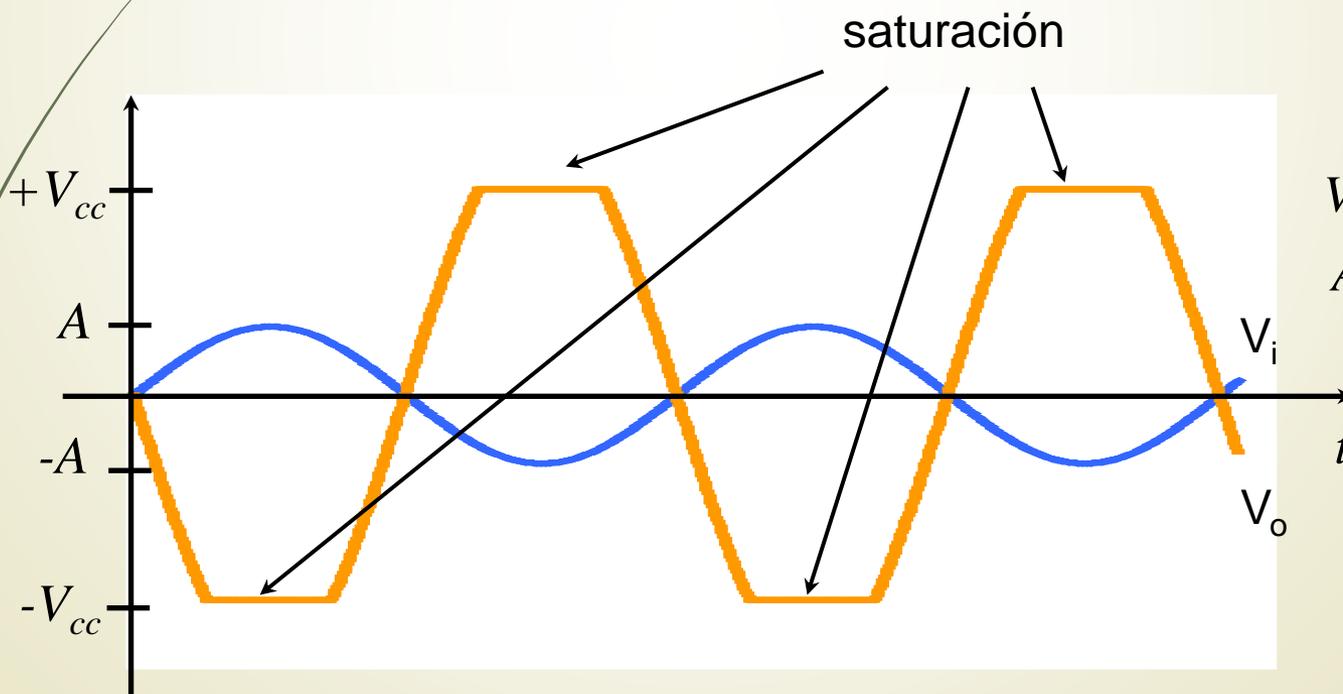
$$V_i = A \text{sen}(\omega t)$$

$$A = 4 \text{ V}$$

$$R_1 = R_2$$

$$+V_{cc} = +15 \text{ V}$$

### Ejemplo 2:



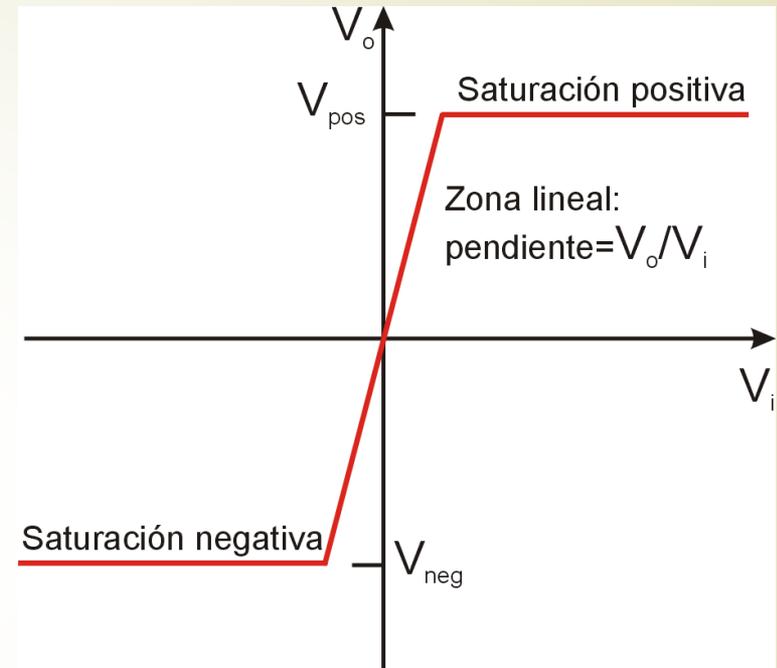
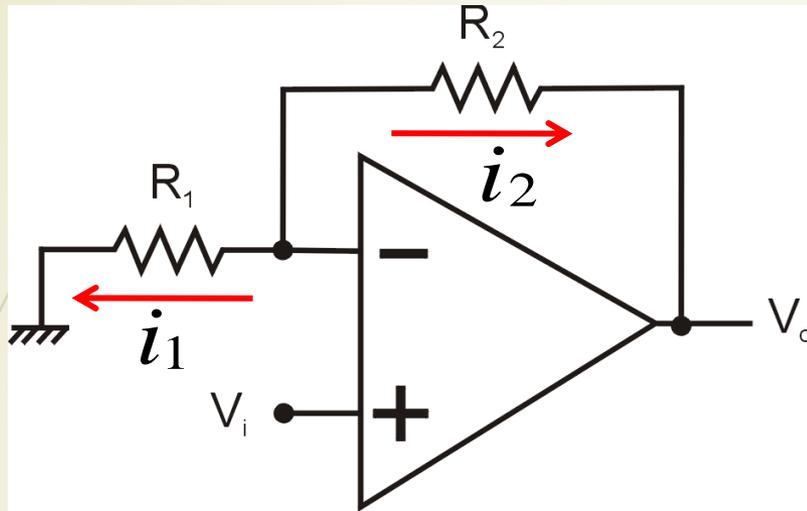
$$V_i = A \text{sen}(\omega t)$$

$$A = 4 \text{ V}$$

$$R_2 = 5R_1$$

# Configuración no inversora

16



$$i_1 = \frac{V_i}{R_1} \quad i_2 = \frac{V_i - V_o}{R_2} \quad i_1 = -i_2$$

$$\frac{V_i}{R_1} = -\frac{V_i - V_o}{R_2} \Rightarrow \frac{V_i}{R_1} + \frac{V_i}{R_2} = \frac{V_o}{R_2}$$

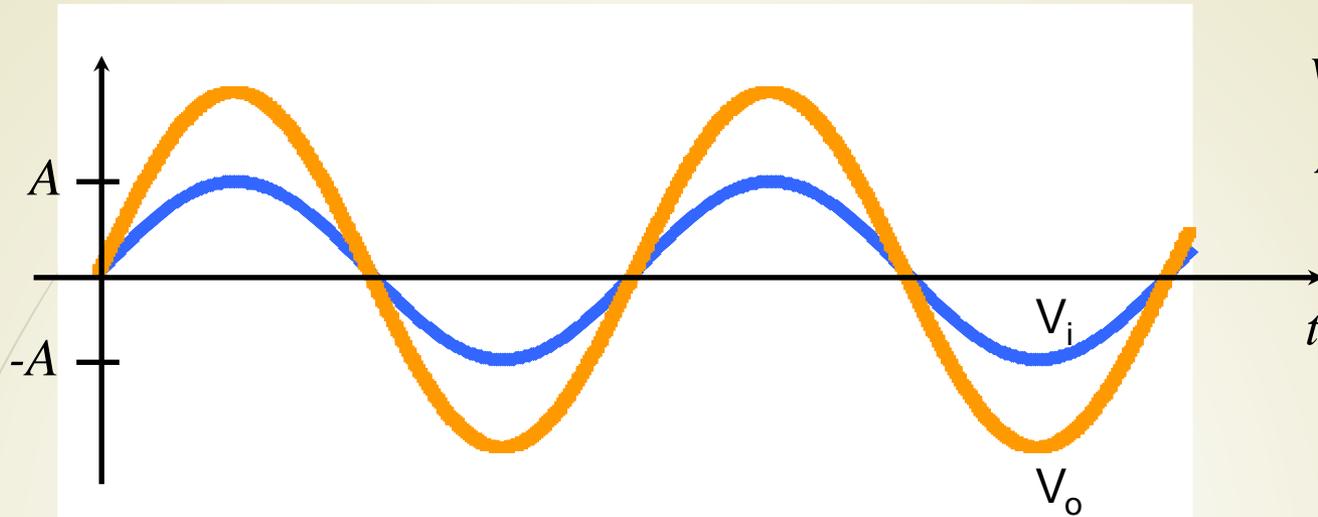
$$V_i \left( \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} \right) = \frac{V_o}{R_2} \Rightarrow \frac{V_o}{V_i} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Función de transferencia:

$$\frac{V_o}{V_i} = \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \leftarrow$$

- ✓ Para el amplificador no inversor, la ganancia puede determinarse suponiendo que los dos terminales de entrada están al mismo potencial.
- ✓ Acá tampoco entra corriente al amplificador.
- ✓ Observar: la ganancia es positiva.

## Ejemplo 1:

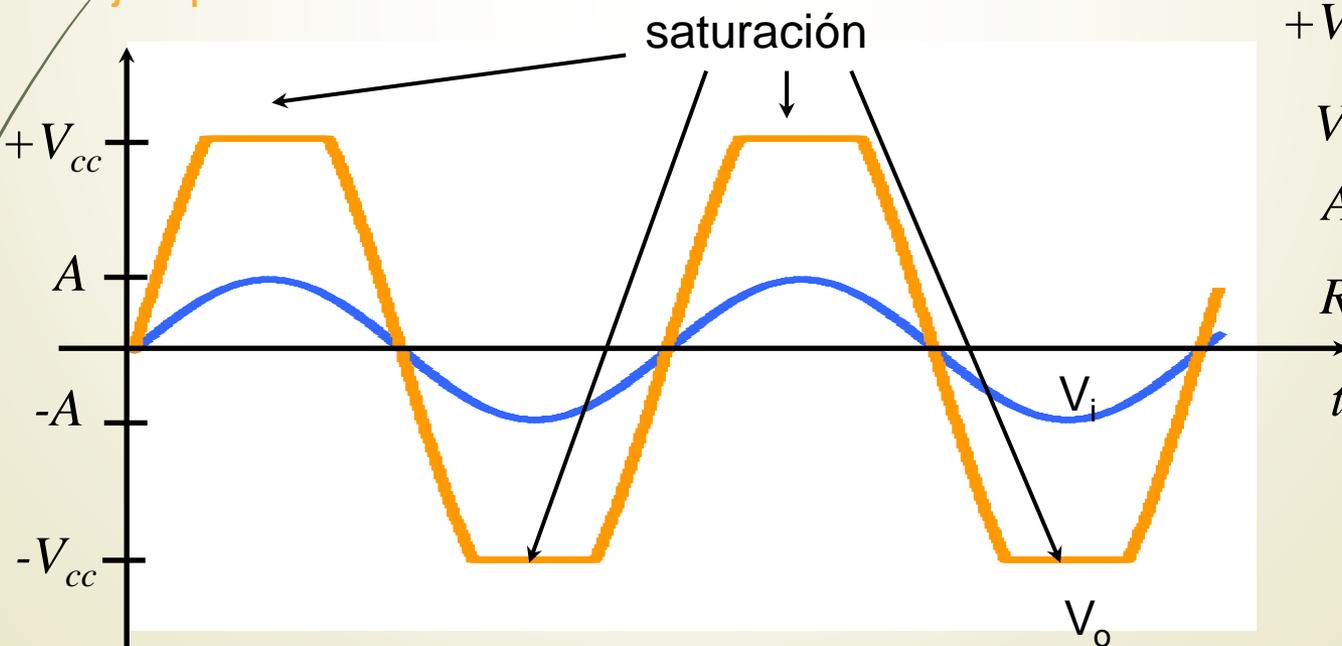


$$V_i = A \operatorname{sen}(\omega t)$$

$$A = 4 \text{ V}$$

$$R_1 = R_2$$

## Ejemplo 2:



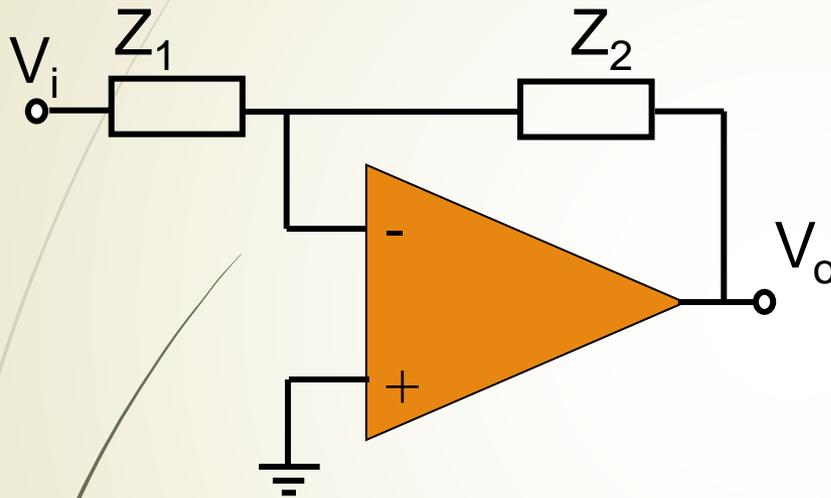
$$+V_{cc} = +15 \text{ V}$$

$$V_i = A \operatorname{sen}(\omega t)$$

$$A = 4 \text{ V}$$

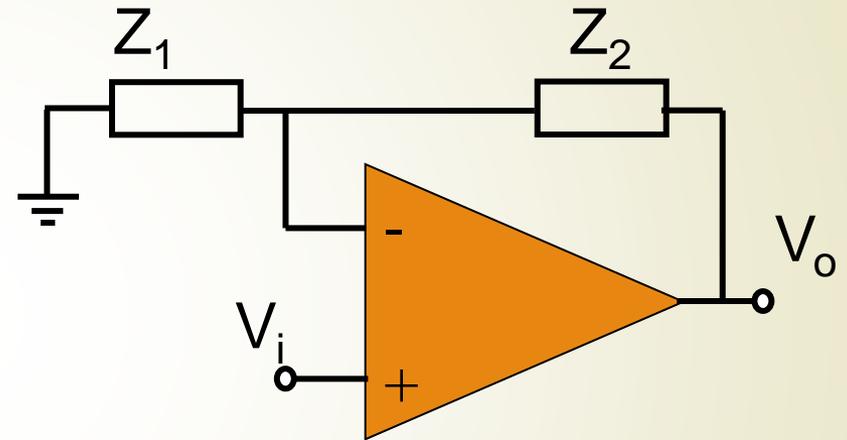
$$R_2 = 5R_1$$

En forma más general:



$$A_{vi} = \frac{V_o}{V_i} = -\frac{Z_2}{Z_1}$$

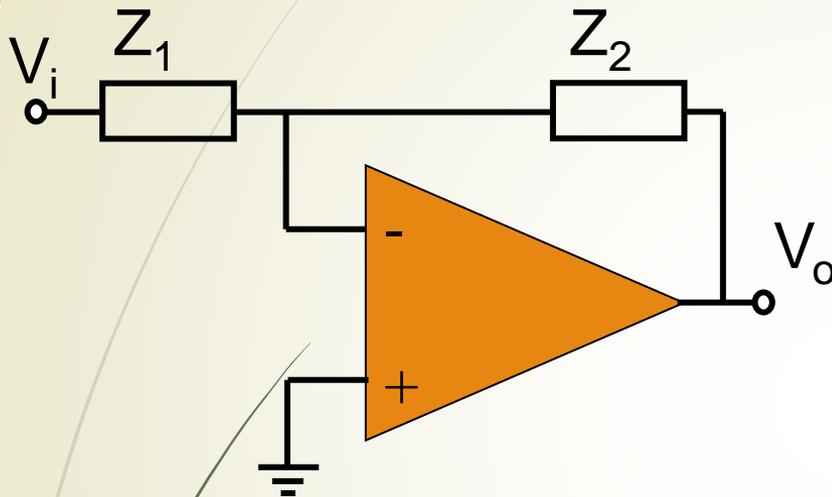
Amplificador  
Inversor



$$A_{vni} = \frac{V_o}{V_i} = 1 + \frac{Z_2}{Z_1}$$

Amplificador no  
Inversor

# Cambiador de signo o inversor

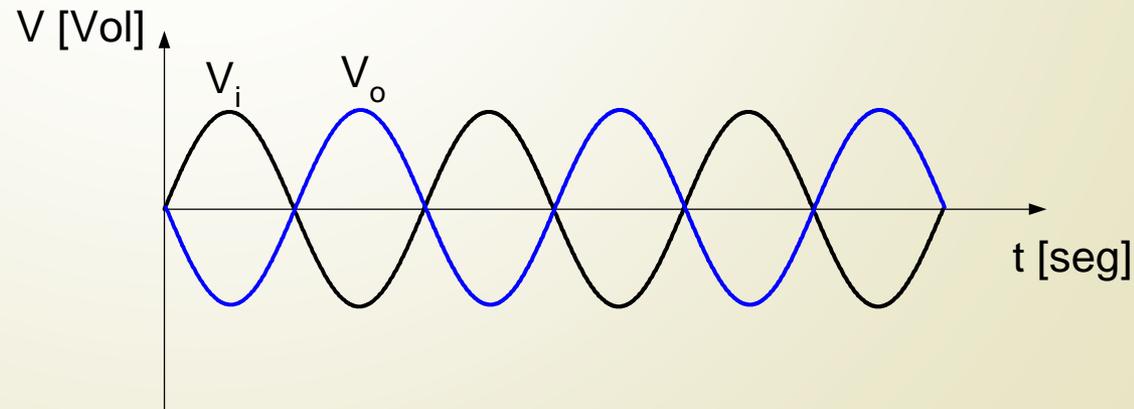


✓ Si en el circuito de la figura  $Z_1=Z_2$  entonces:

$$A_{vi} = -1 \text{ es decir } V_o = -V_i$$

✓ Circuito inversor, la tensión de salida está desfasada  $180^\circ$  respecto a la de entrada

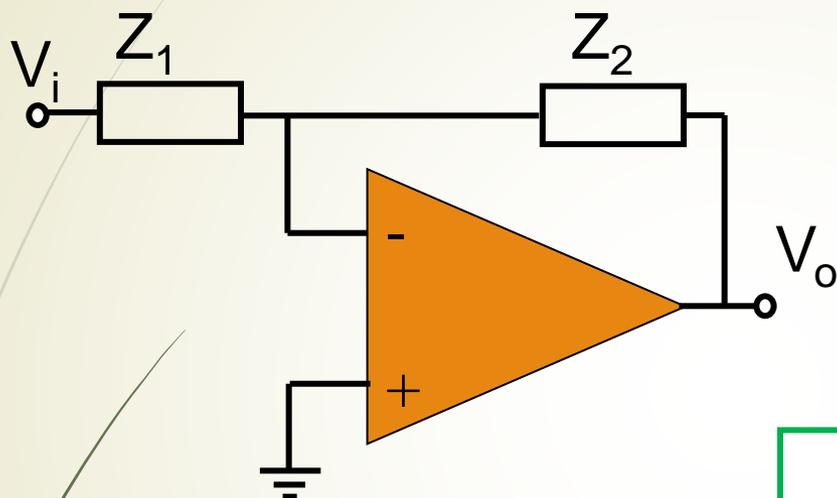
$$A_{vi} = \frac{V_o}{V_i} = -\frac{Z_2}{Z_1}$$



# Cambiador de escala

21

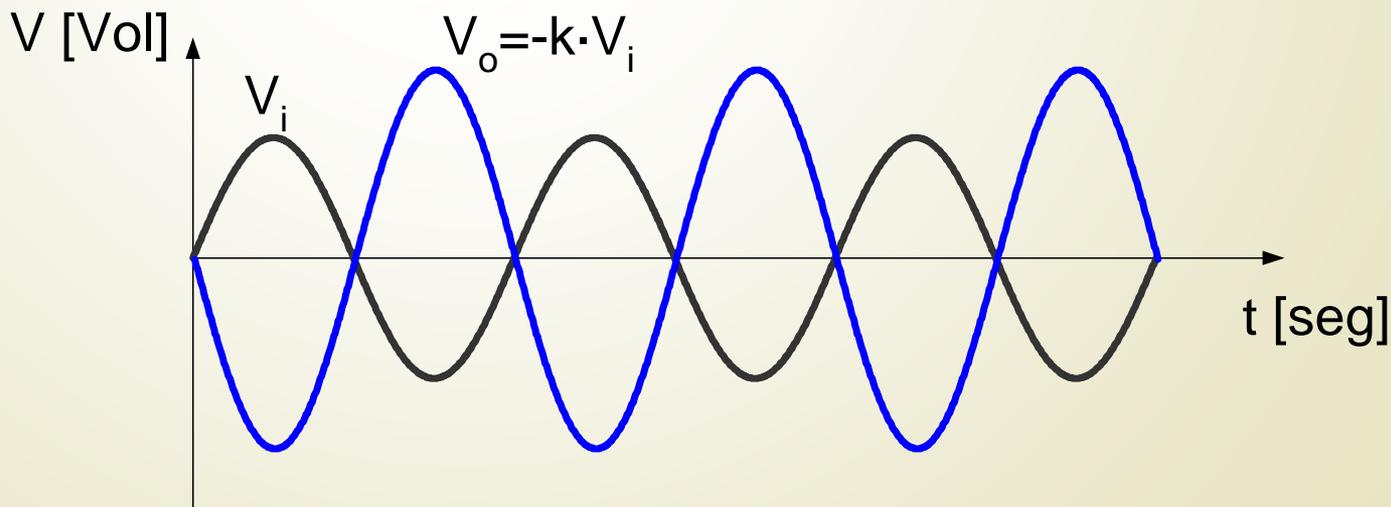
Si en el circuito de la figura  $Z_2 = k \cdot Z_1$



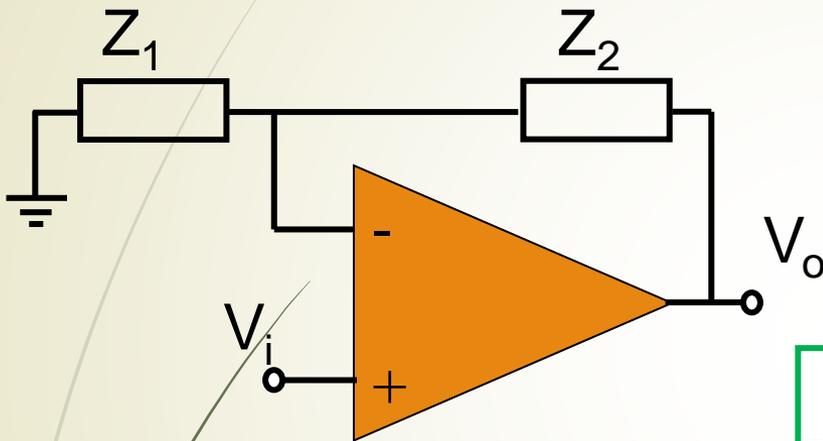
$$A_{vi} = \frac{V_o}{V_i} = -\frac{Z_2}{Z_1}$$



$$A_{vi} = -k \text{ es decir } V_o = -k \cdot V_i$$



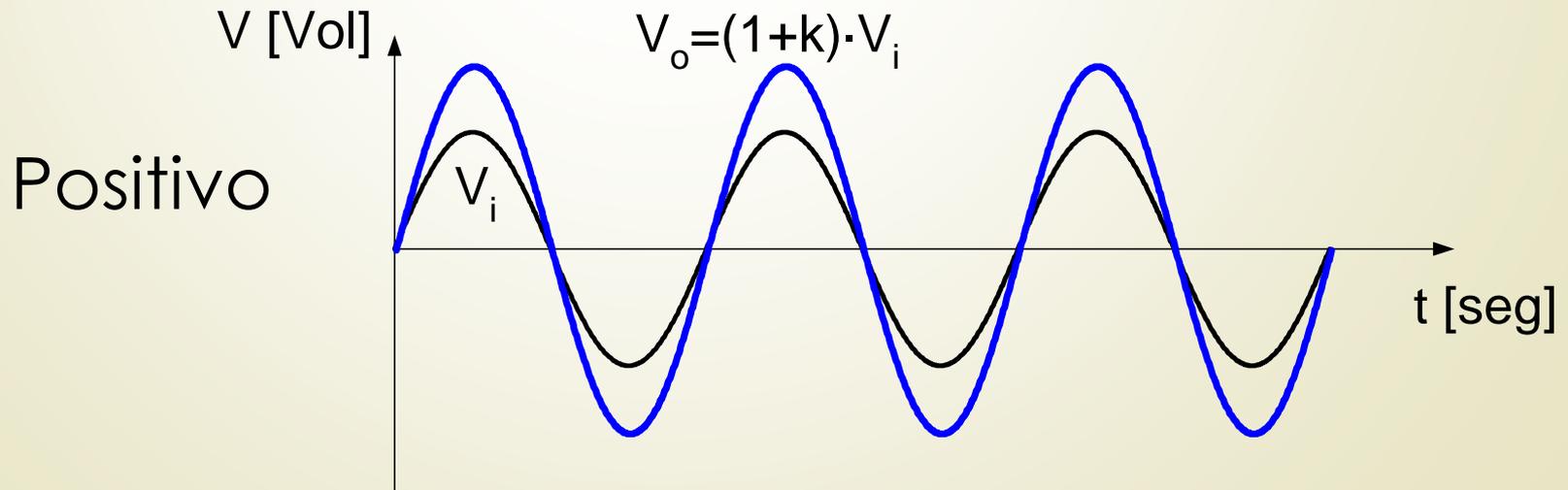
# Cambiador de escala (ganancia)



$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = 1 + \frac{Z_2}{Z_1}$$

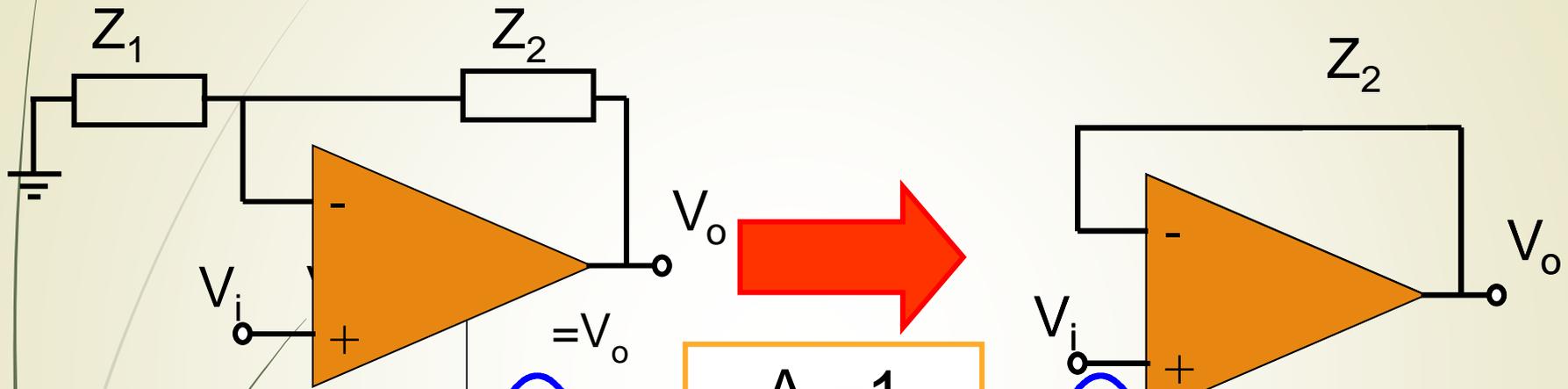


$$A_v = 1 + k \text{ es decir } V_o = (1 + k) \cdot V_i$$



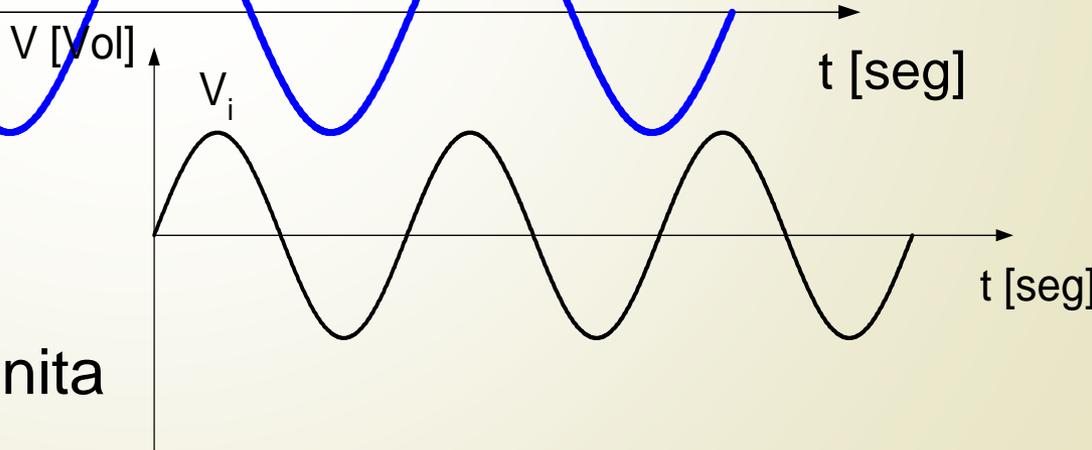
# Seguidor (ganancia unitaria)

-Si en el circuito de la figura  $Z_1 = \infty$  y  $Z_2 = 0$



$A_v = 1$

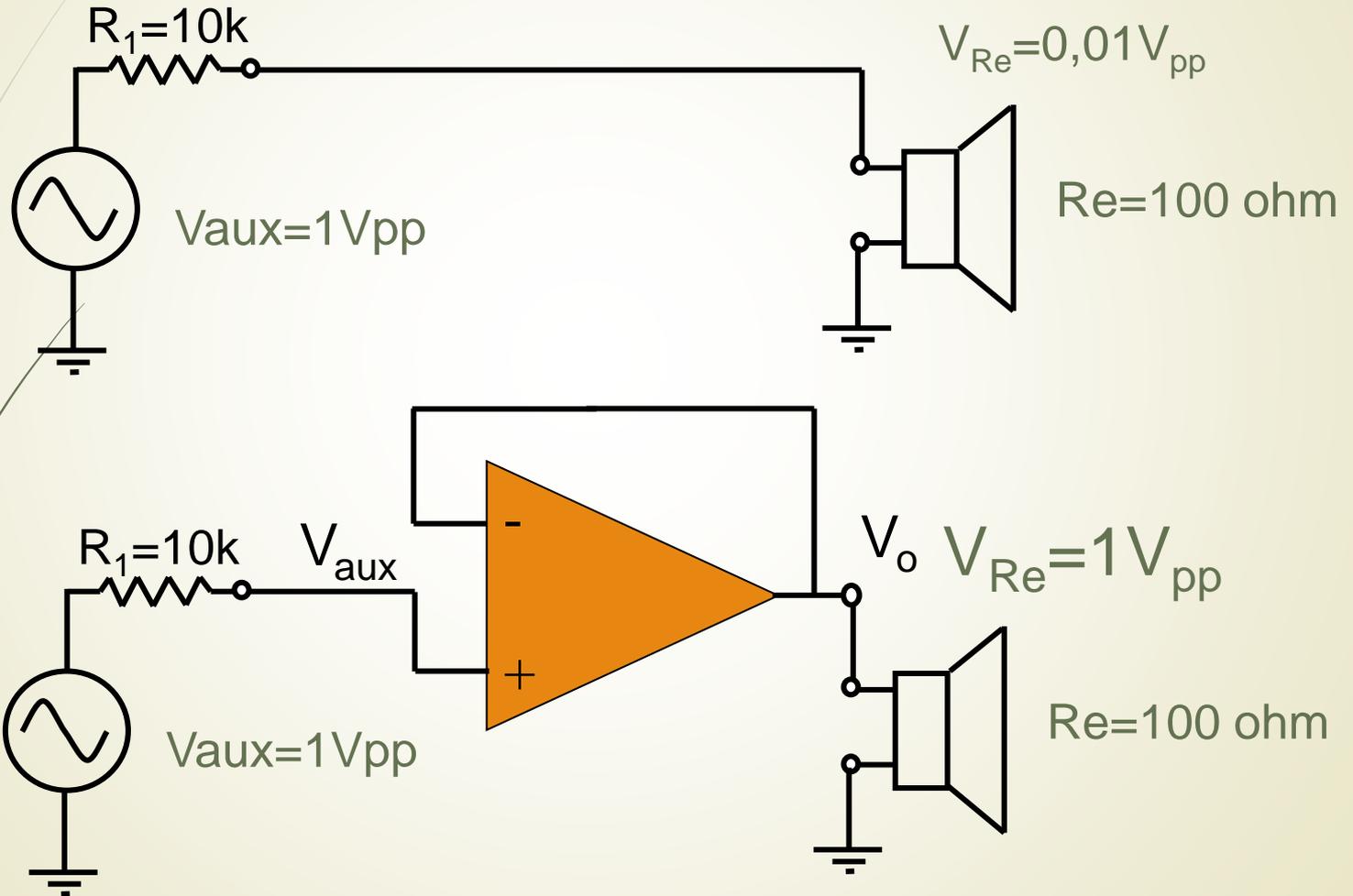
$A_v = \frac{V_o}{V_i} = 1 + \frac{Z_2}{Z_1}$



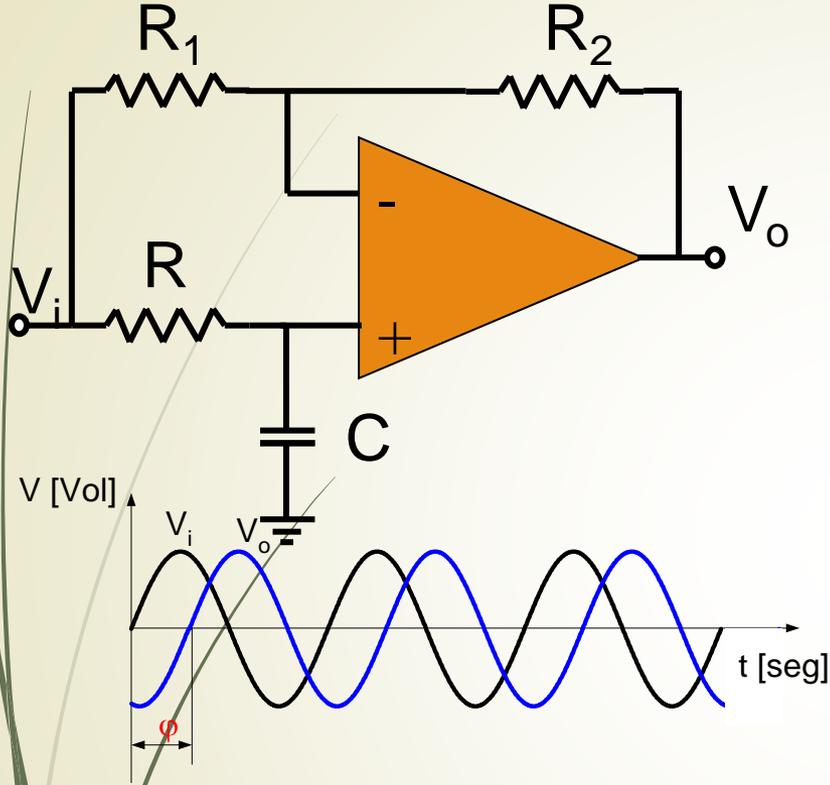
- Impedancia de salida nula
- Impedancia de entrada infinita

# Seguidor

Ejemplo de aplicación: Adaptación de impedancias



# Cambiador de fase



Si  $R_2=R_1$

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{1 - j \cdot \omega \cdot R \cdot C}{1 + j \cdot \omega \cdot R \cdot C}$$

Ganancia  $A_v=1$

$$|A_v| = \left| \frac{V_o}{V_i} \right| = \frac{\sqrt{1 + (\omega \cdot R \cdot C)^2}}{\sqrt{1 + (\omega \cdot R \cdot C)^2}} = 1$$

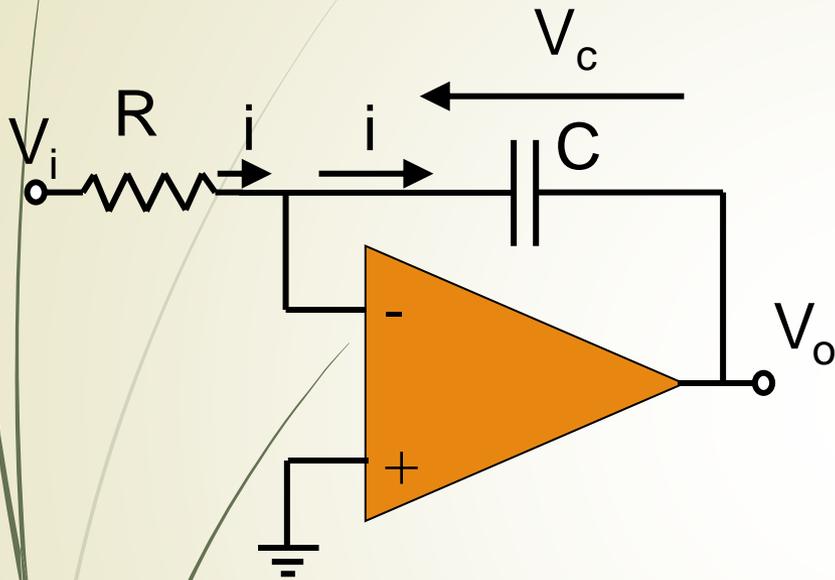
Fase

$$\begin{aligned} \varphi(A_v) &= \frac{\text{arctg}(-\omega \cdot R \cdot C)}{\text{arctg}(+\omega \cdot R \cdot C)} \\ \varphi(A_v) &= -2 \cdot \text{arctg}(+\omega \cdot R \cdot C) \end{aligned}$$

-Para  $\omega=\text{cte}$ ,  $\varphi$  es función de  $R$  y  $C$



# Circuito integrador (I)



La tensión  $V_c$  es:

$$V_c(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i(t) \cdot dt + V_c(0)$$

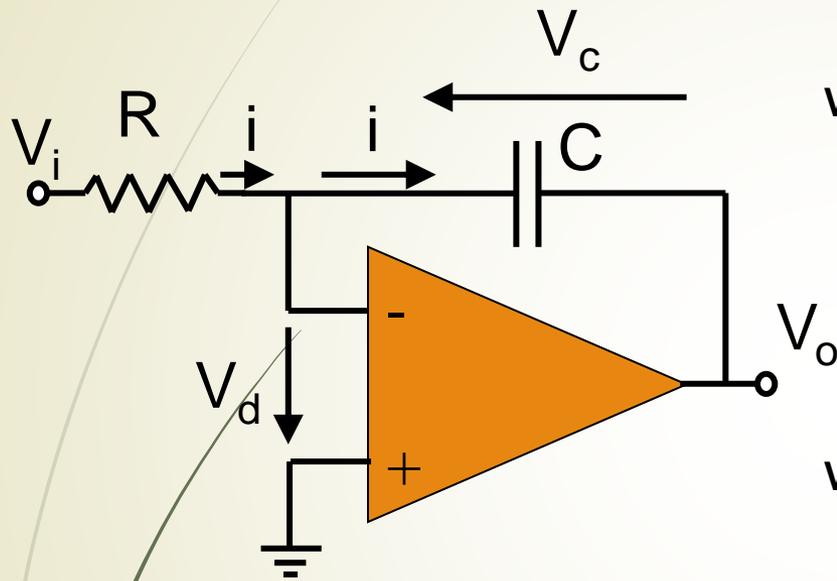
$$V_c(t) = \frac{1}{C} \int_0^t \frac{V_i(t)}{R} \cdot dt + V_c(0)$$

$$i(t) = \frac{V_i(t)}{R}$$

Como  $V_o(t) = -V_c(t)$  entonces

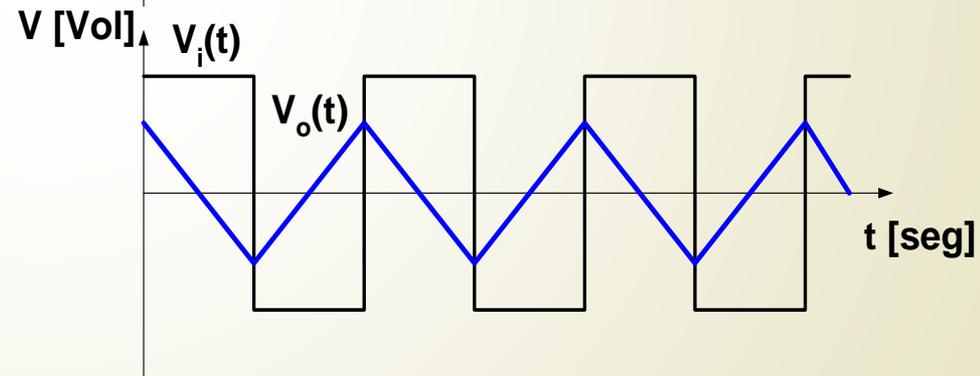
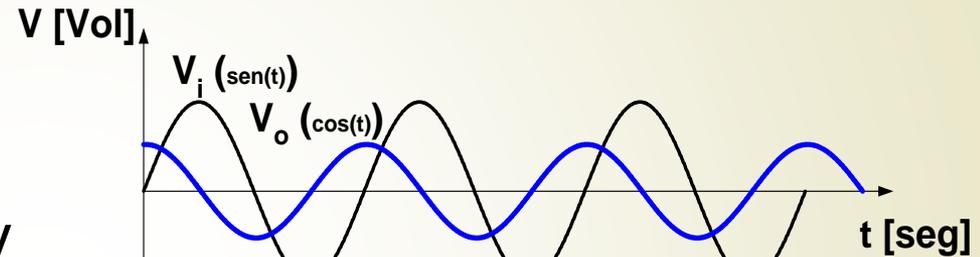
$$V_o(t) = -\frac{1}{R \cdot C} \int_0^t V_i(t) \cdot dt - V_c(0)$$

# Circuito integrador

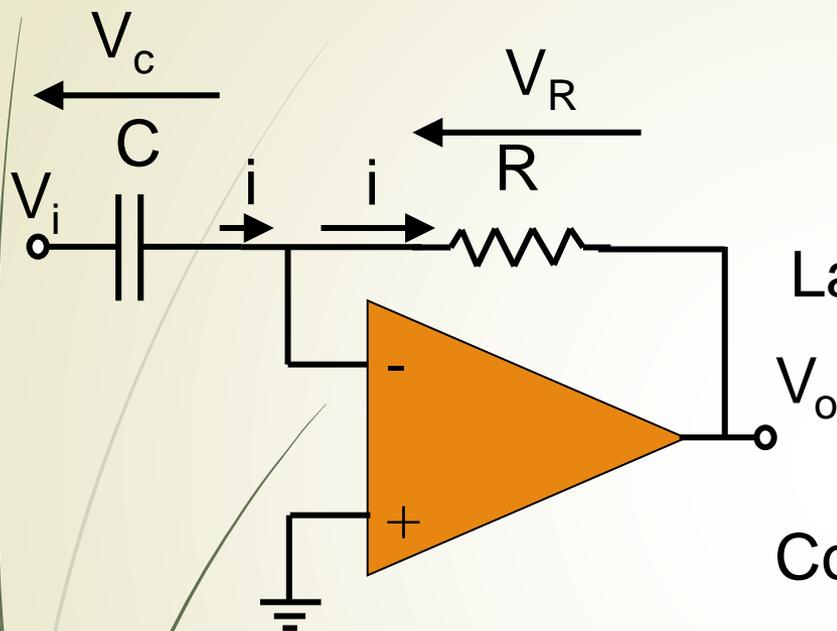


$$V_o(t) = -\frac{1}{R \cdot C} \int_0^t V_i(t) \cdot dt - V_c(0)$$

## Formas de onda



# Circuito derivador



$$i(t) = C \frac{dV_i(t)}{dt}$$

La tensión  $V_R$  es:

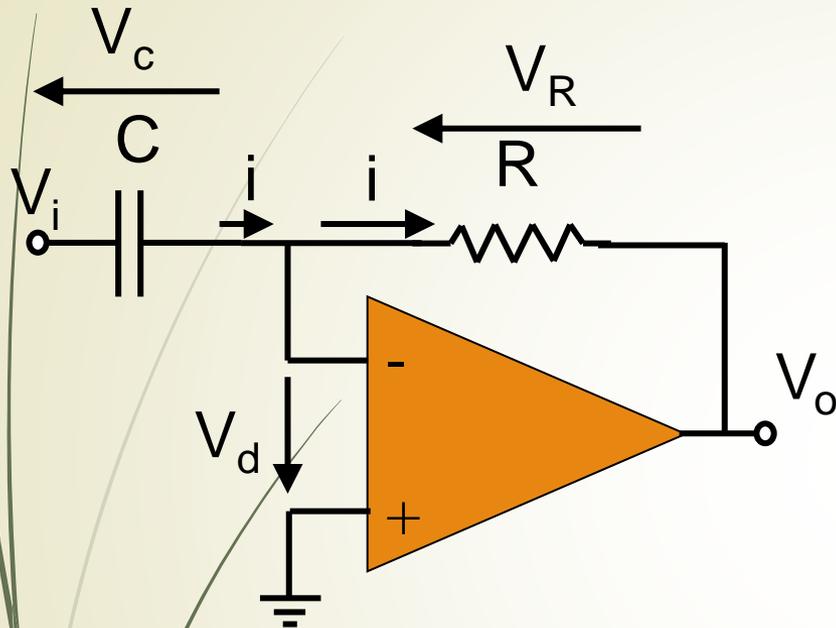
$$V_R(t) = i(t) \cdot R$$

Como  $V_o(t)$  es:

$$V_o(t) = -V_R(t)$$

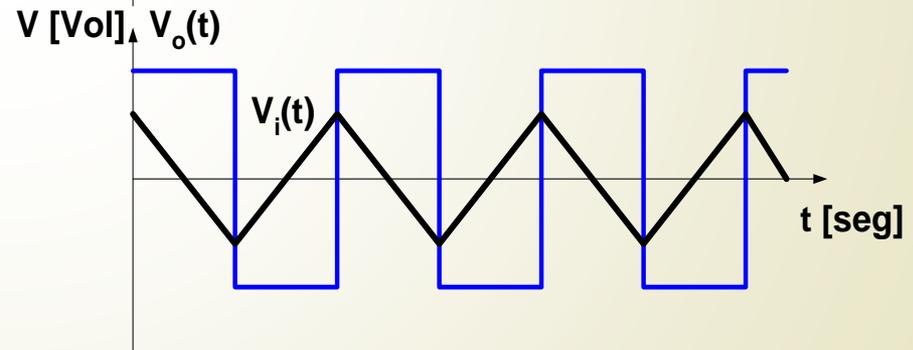
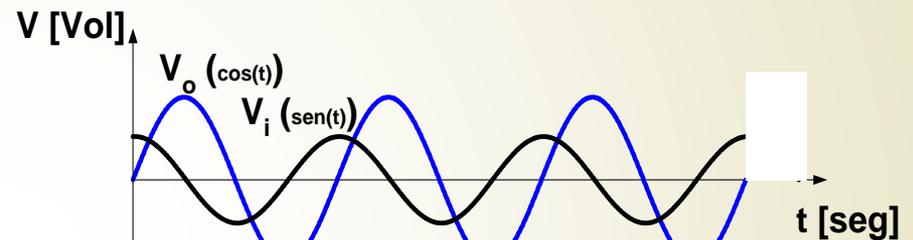
$$V_o(t) = -RC \frac{dV_i(t)}{dt}$$

# Circuito derivador



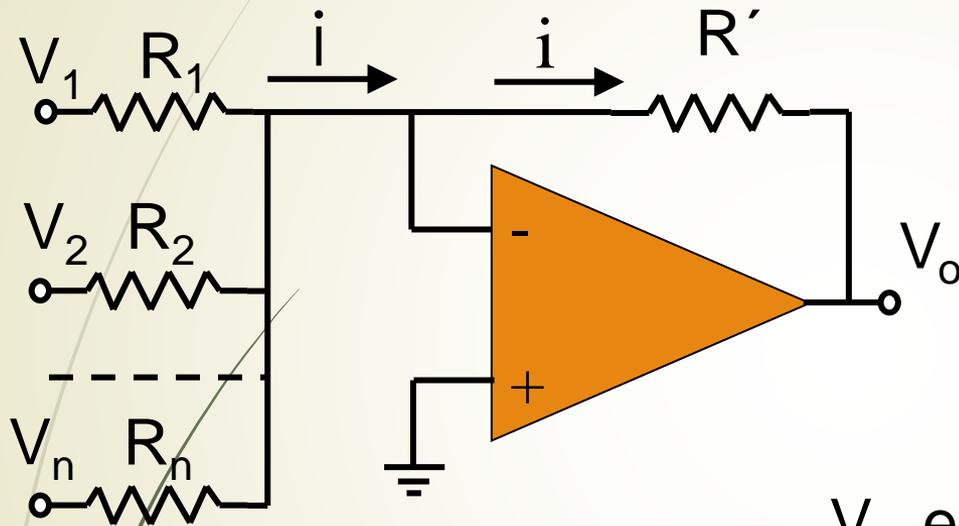
$$V_o(t) = -RC \frac{dV_i(t)}{dt}$$

## Formas de onda



# Sumador

## Sumador inversor



$$i = \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \dots + \frac{V_n}{R_n}$$

Como  $V_o = -R' \cdot i$

$$V_o = -\left( \frac{R'}{R_1} \cdot V_1 + \frac{R'}{R_2} \cdot V_2 + \dots + \frac{R'}{R_n} \cdot V_n \right)$$

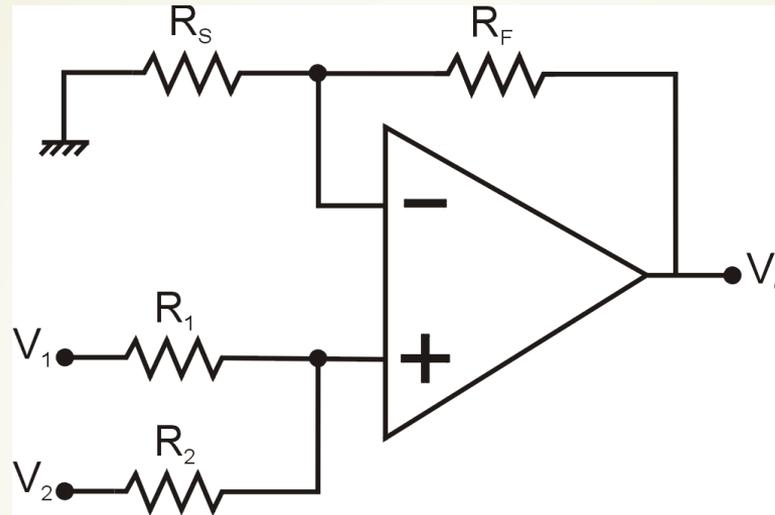
$V_o$  es la combinación lineal de las tensiones de entrada.

Si  $R_1 = R_2 = \dots = R_n$



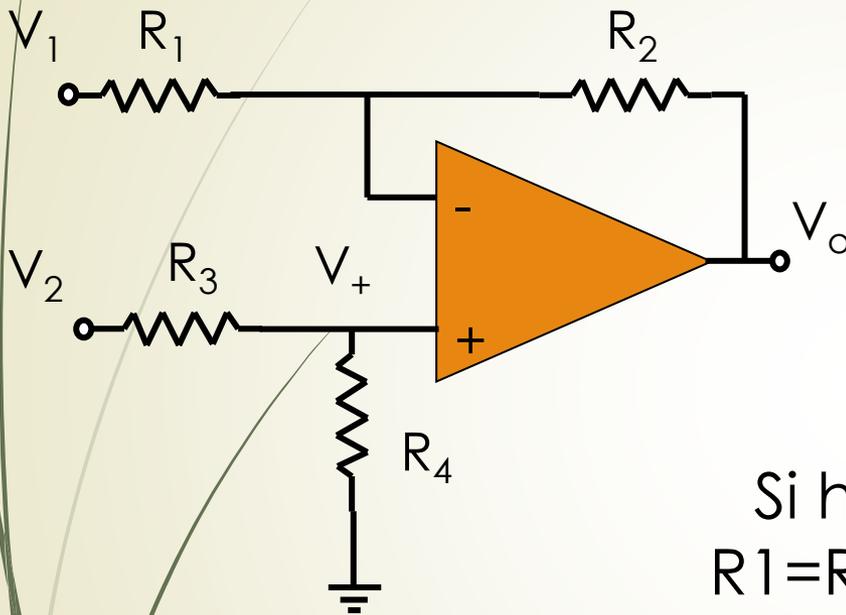
$$V_o = -\frac{R'}{R_1} \cdot (V_1 + V_2 + \dots + V_n)$$

## Ejercicio: sumador no inversor



- Analizar este circuito
- Obtener su función de transferencia

# Amplificador diferencial: Restador



Aplicando superposición:

$$V_o = V_2 \cdot \left( \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \cdot \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) - V_1 \cdot \frac{R_2}{R_1}$$

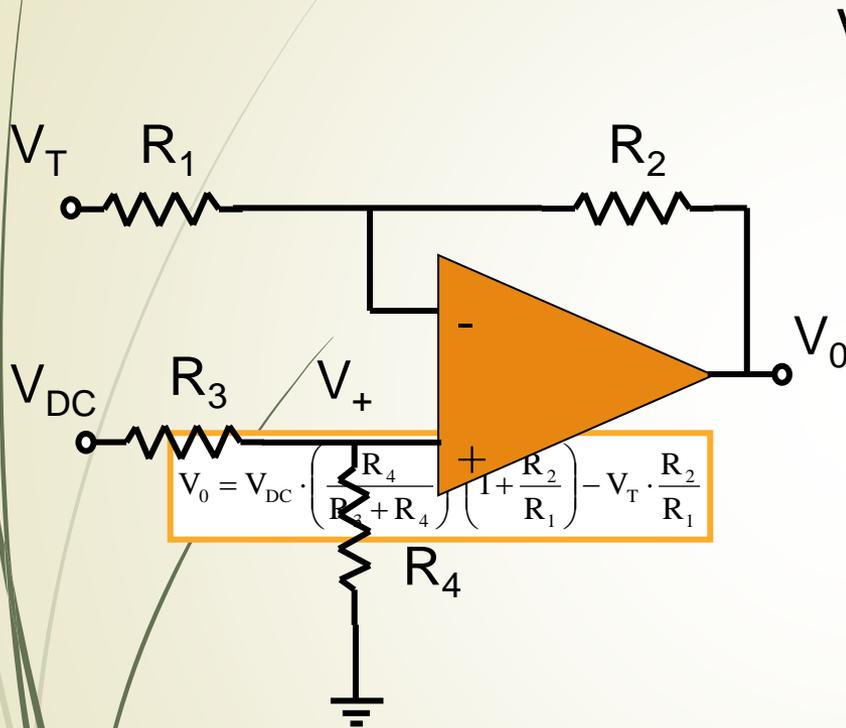
Si hacemos  
 $R_1 = R_3$  y  $R_2 = R_4$

$$V_o = \frac{R_2}{R_1} \cdot (V_2 - V_1)$$

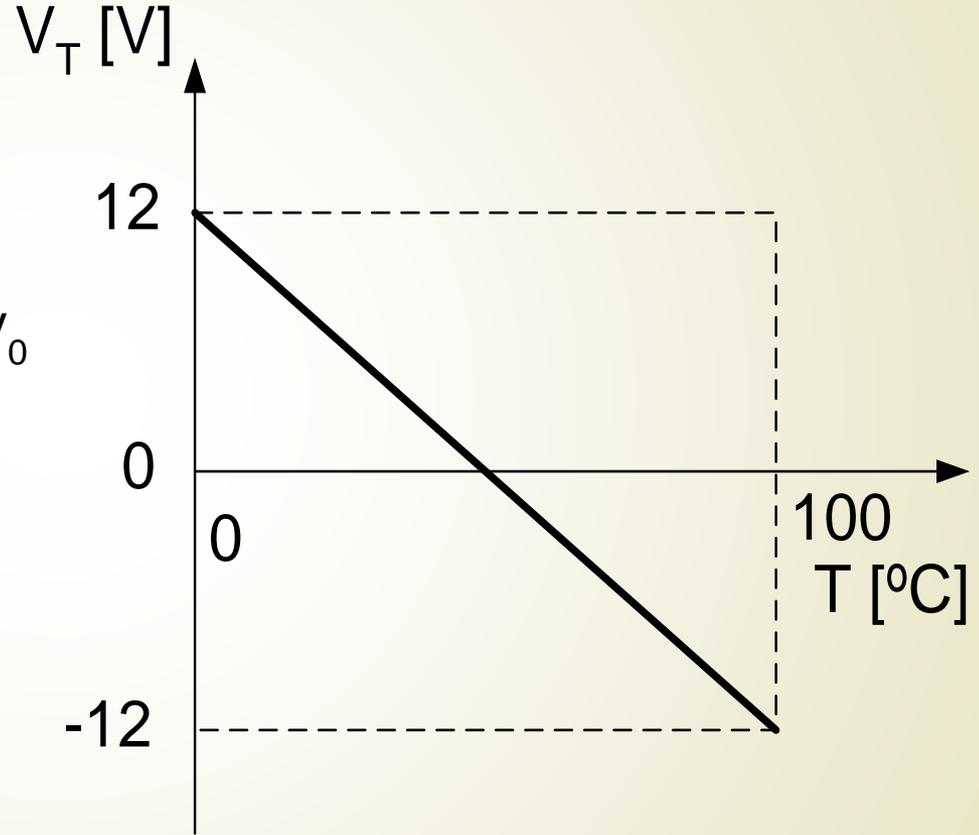
La tensión de salida es proporcional a la diferencia de las tensiones de entrada.

# Adaptación de niveles

Ejemplo: [+12 a -12V] -> [0V a 5V]



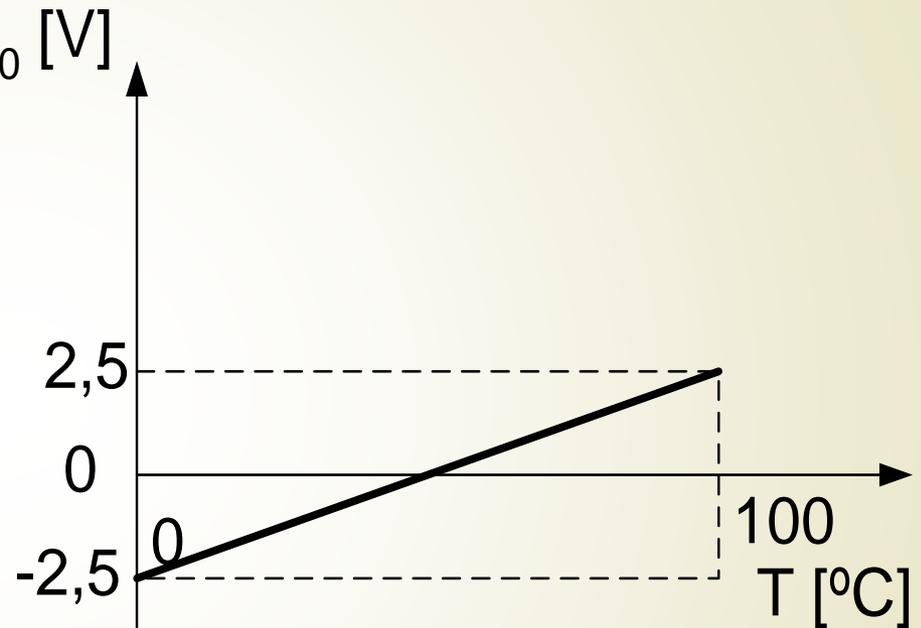
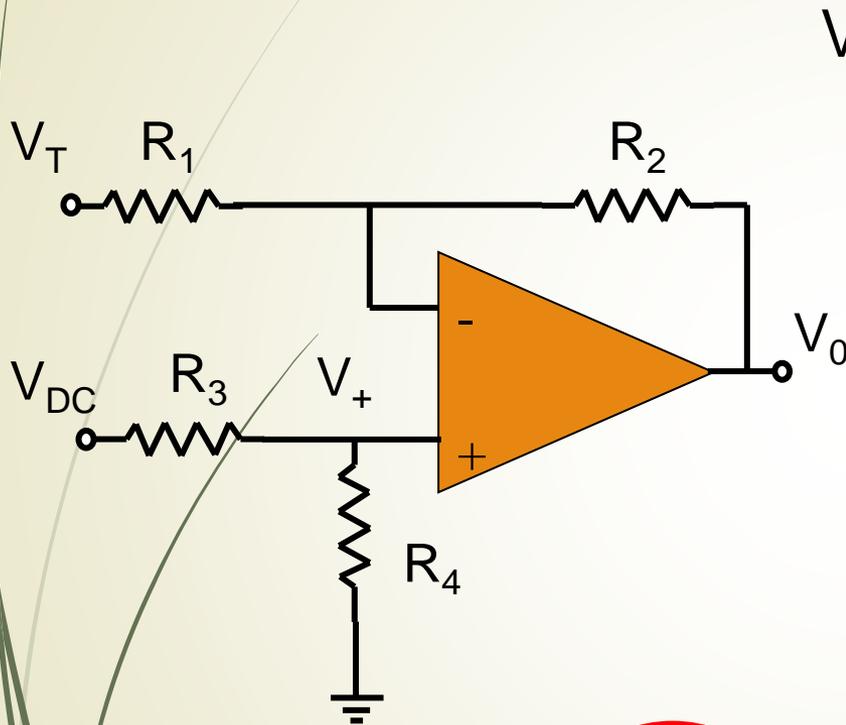
$$V_0 = V_{DC} \cdot \left( \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) - V_T \cdot \frac{R_2}{R_1}$$



Ecuación de la recta

# Adaptación de niveles

Ejemplo: [+12 a -12V] -> [0V a 5V]

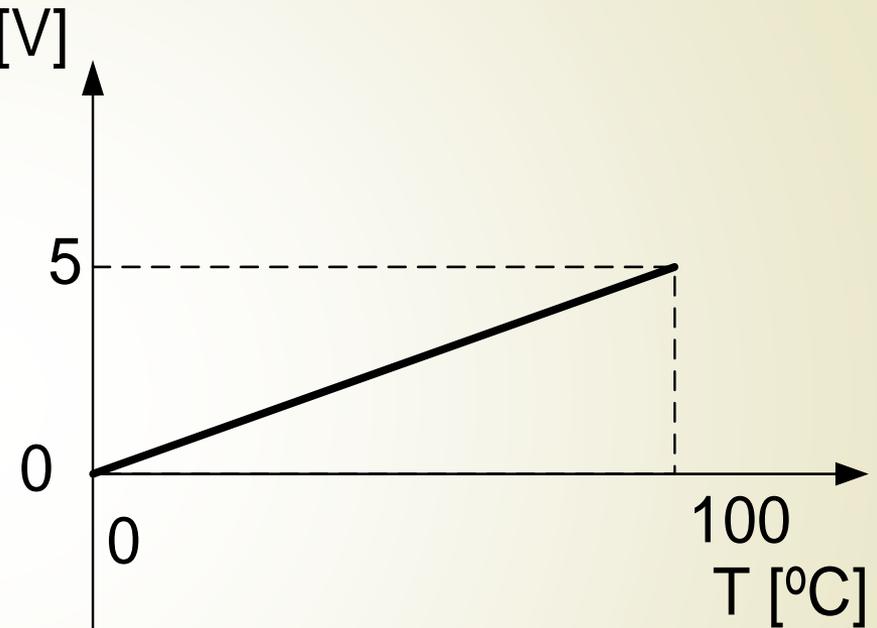
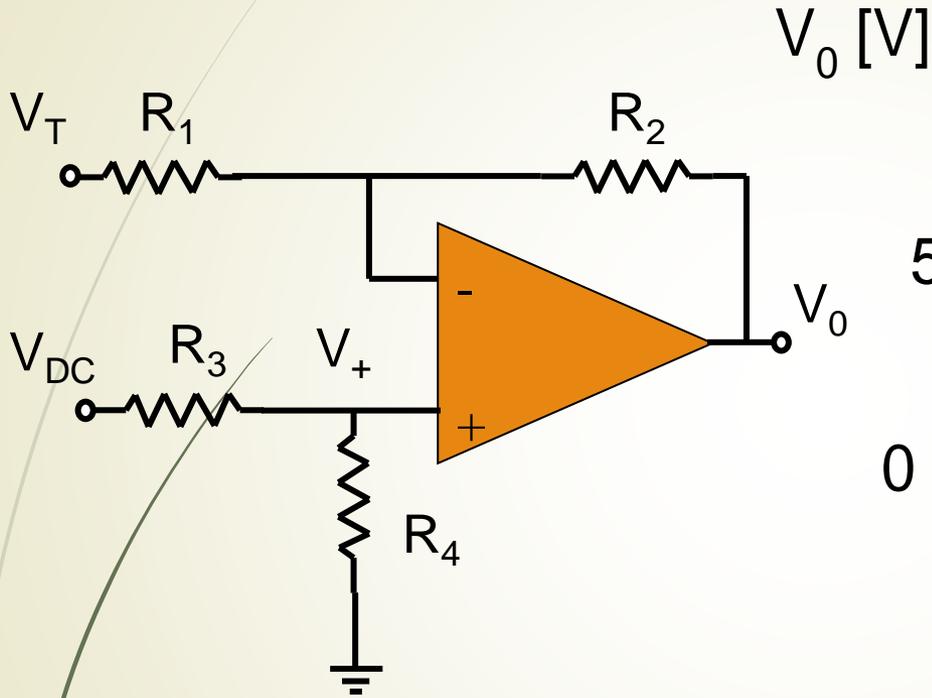


$$V_0 = V_{DC} \cdot \left( \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \cdot \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) - V_T \cdot \frac{R_2}{R_1}$$

Ecuación de la recta

# Adaptación de niveles

Ejemplo: [+12 a -12V] -> [0V a 5V]

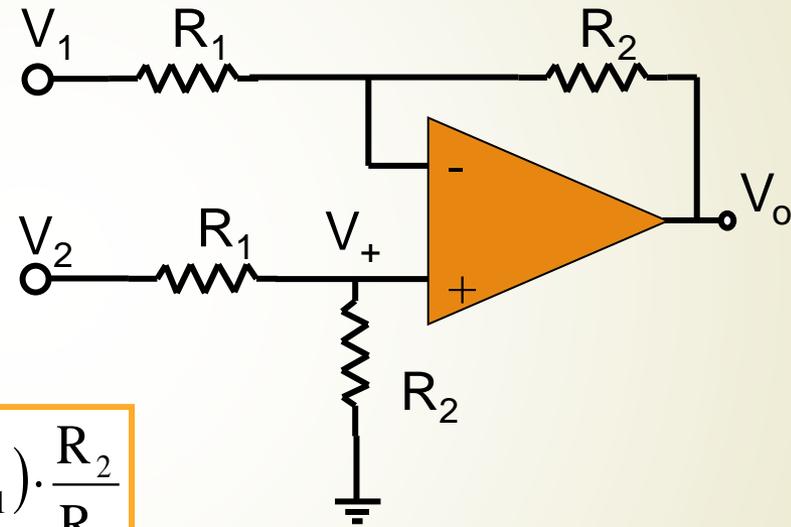
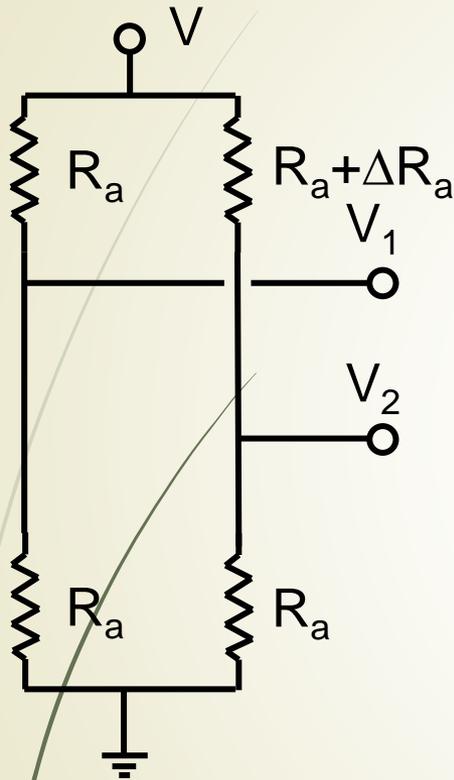


$$V_0 = V_{DC} \cdot \left( \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \cdot \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) - V_T \cdot \frac{R_2}{R_1}$$

Ecuación de la recta

# Amplificadores de instrumentación

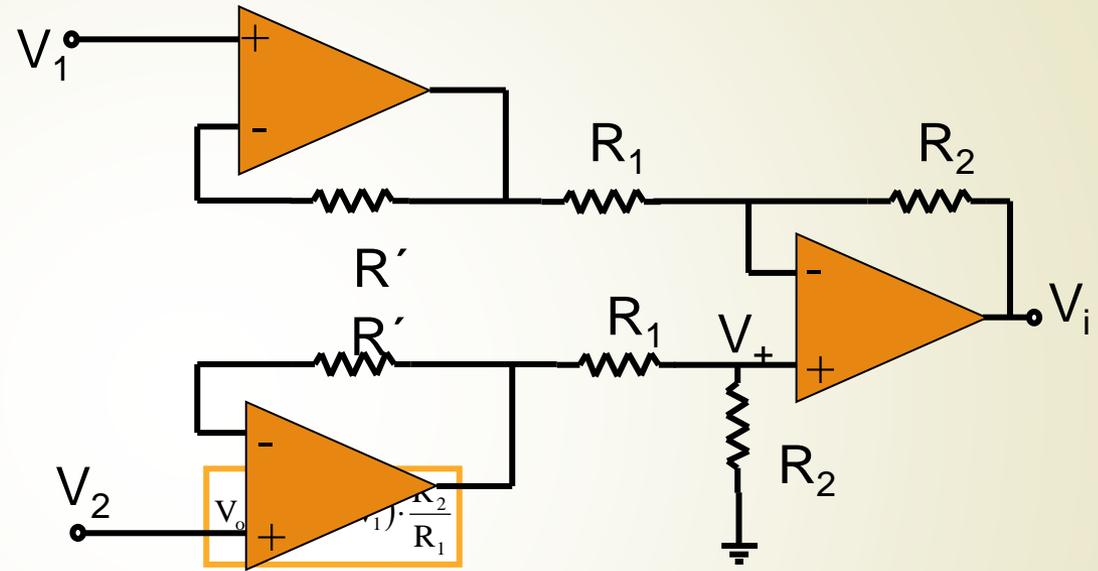
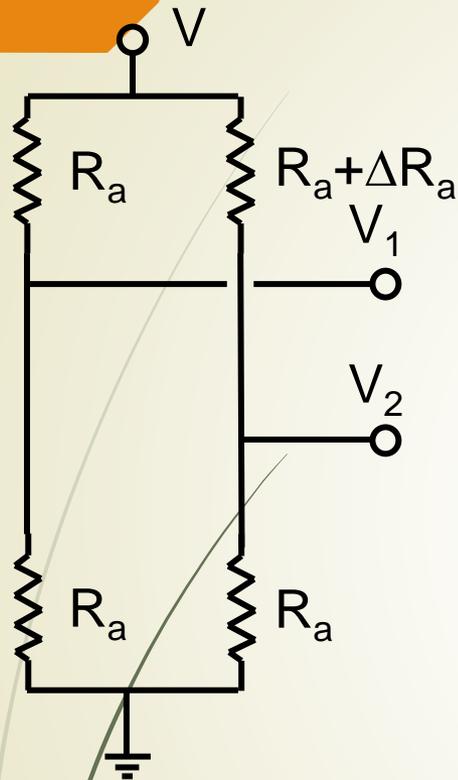
## Amplificación de señales débiles de transductores



$$V_o = (V_2 - V_1) \cdot \frac{R_2}{R_1}$$

Problema: Adaptación de impedancias

# Amplificadores de instrumentación



Impedancia de entrada alta

La ganancia depende de varias resistencias ( $R_1$  y  $R_2$ )