

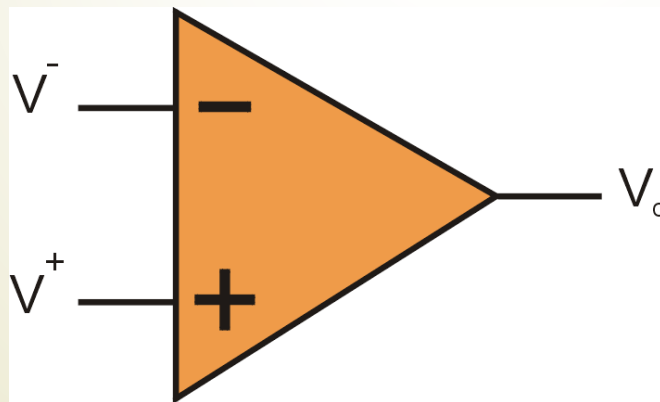
Electrónica

Curso 2025

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).

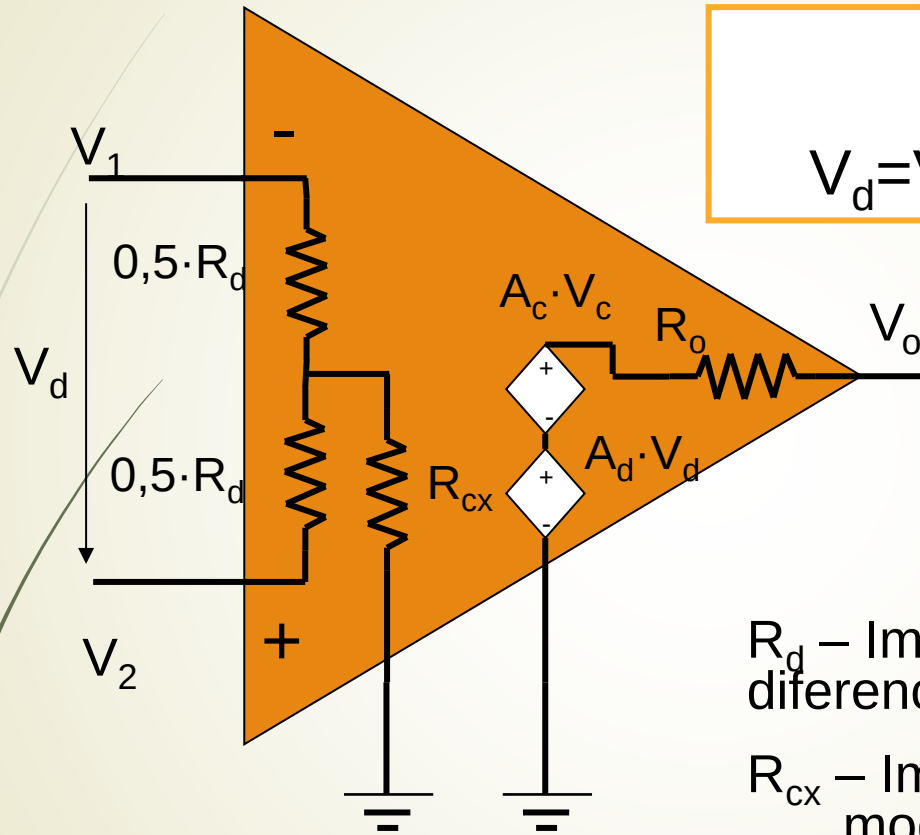
Amplificador Operacional ideal

- 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

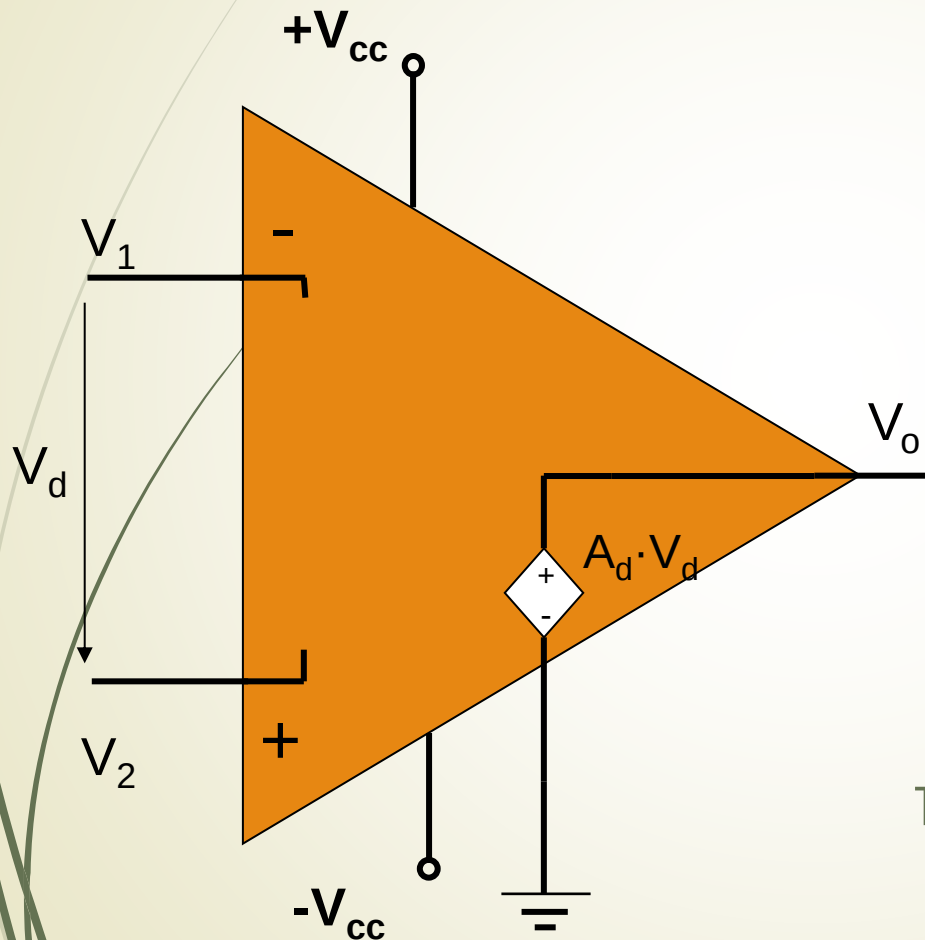
R_{cx} – Impedancia de entrada de modo común

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

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

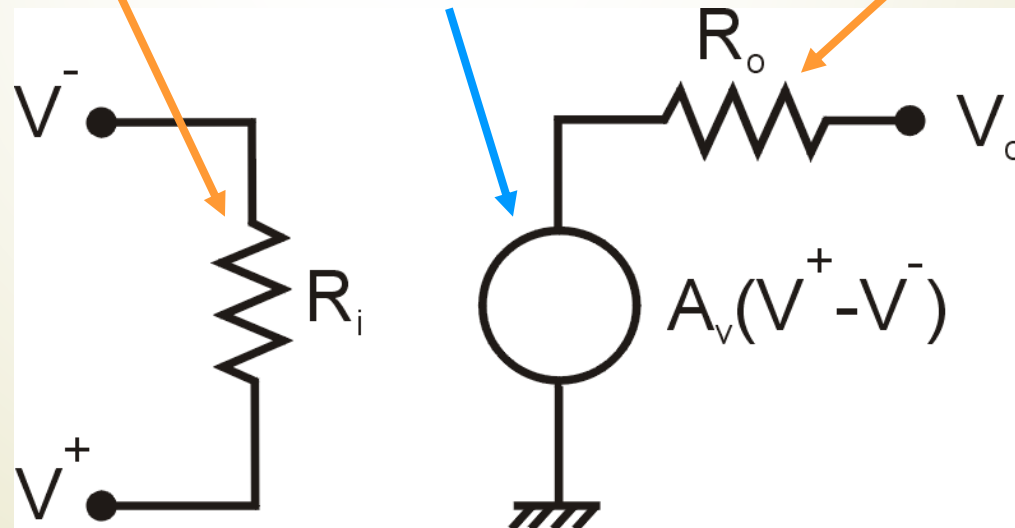
Amplificador operacional lineal (con R_i y R_o)

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

Resistencia de entrada

Fuente de tensión

Resistencia de salida



Análisis de circuitos con AO

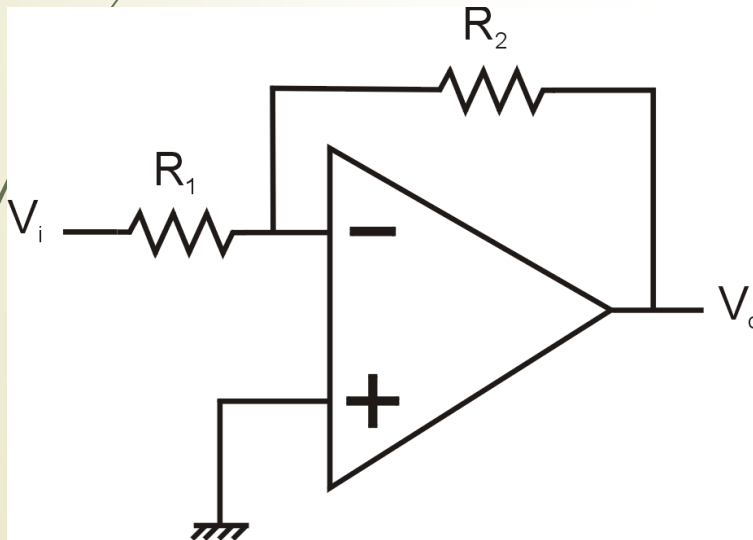
- El AO se representa por un triángulo, con dos entradas y una salida.
- En general omitimos los terminales de alimentación (obviamente necesarios).
- Si la tensión en el terminal negativo cambia, la salida cambia en sentido contrario. Este terminal se llama inversor.
- Si la tensión en el terminal positivo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

Realimentación

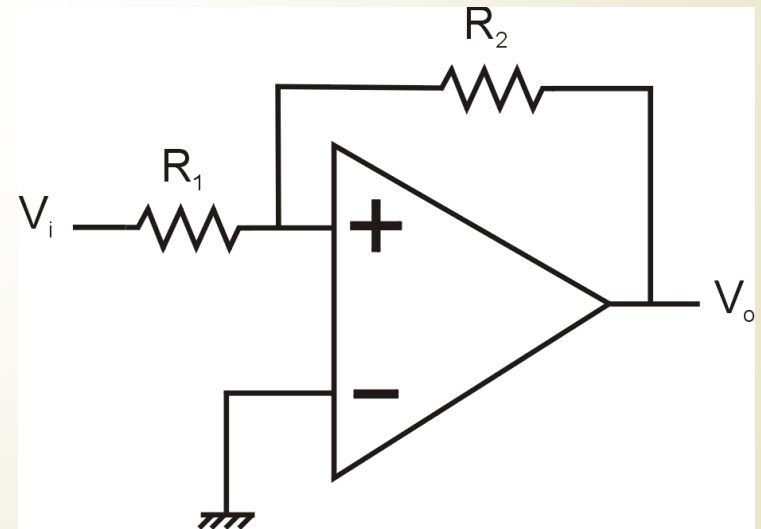
Se establece una conexión entre la entrada y la salida.

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

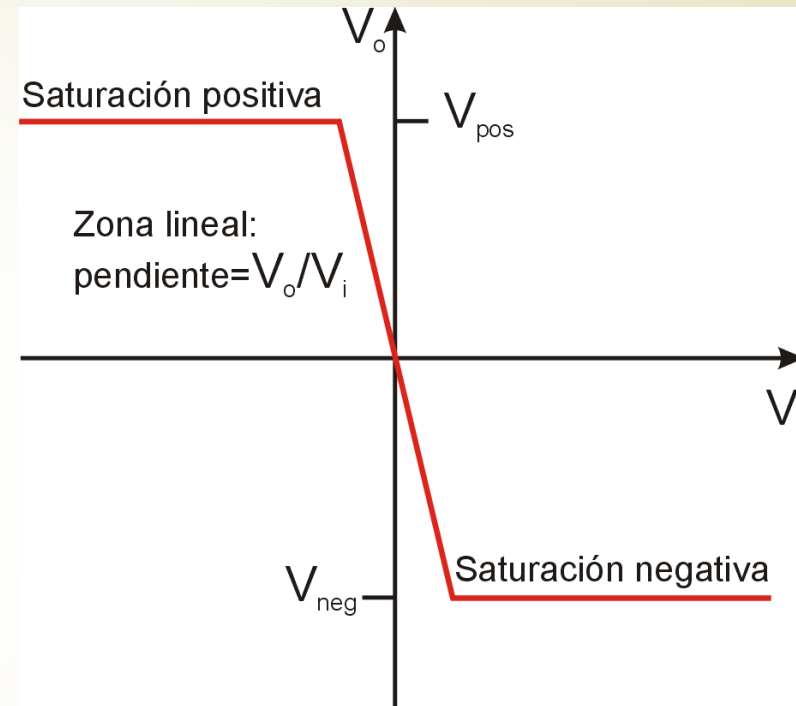
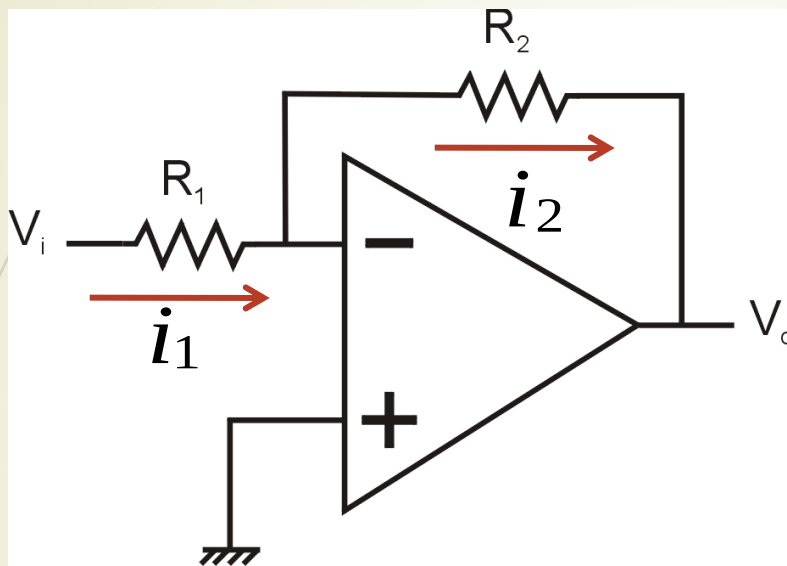
Circuitos Convertidores de Señales

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

Circuitos Filtros Activos

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

Configuración inversora



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

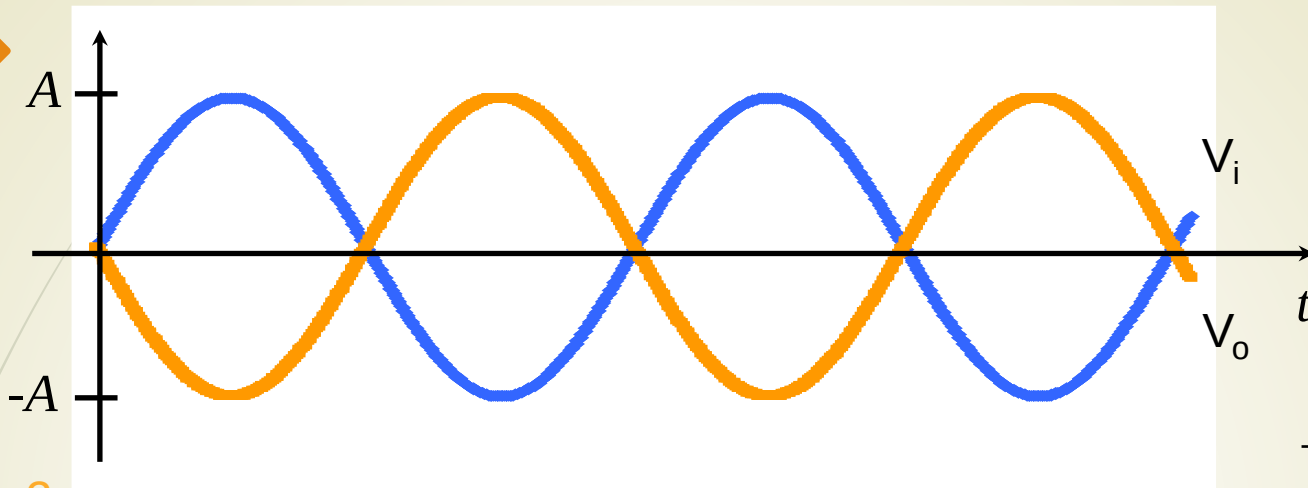
$$\frac{V_i}{R_1} = -\frac{V_o}{R_2} \Rightarrow \frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_2}{R_1}$$



- 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



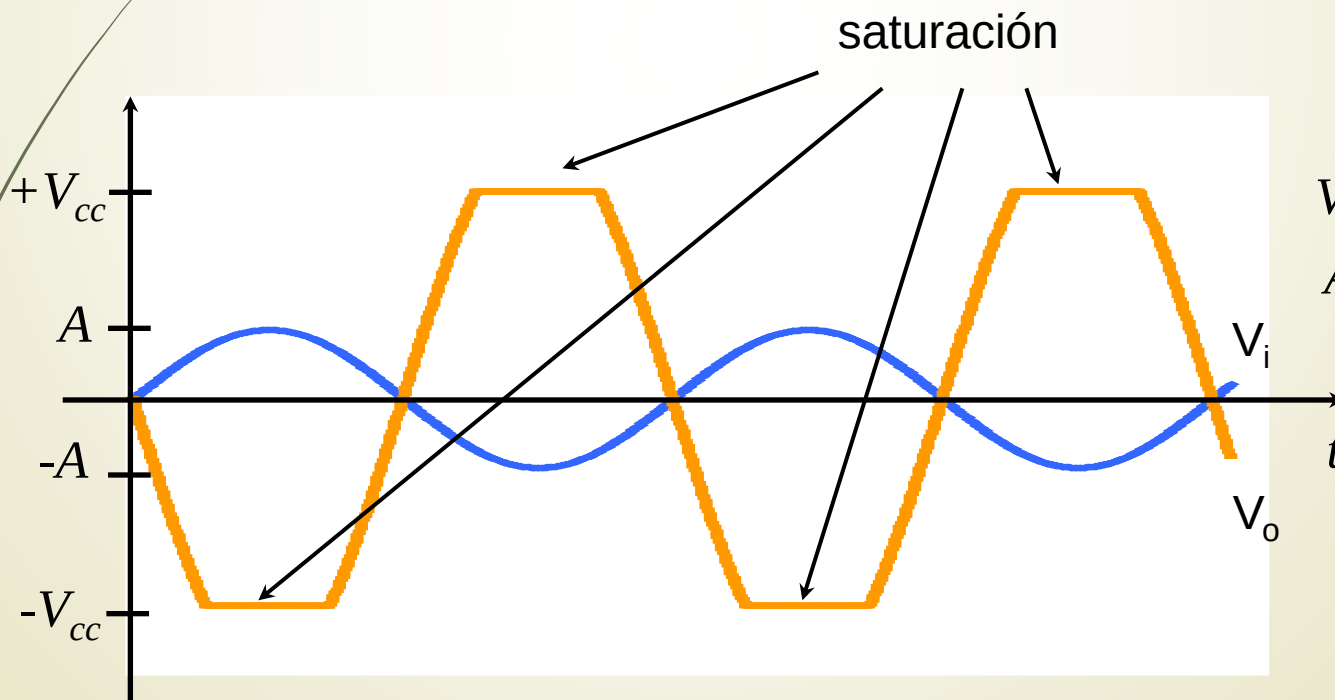
$$V_i = A \sin(\omega t)$$

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

$$R_1 = R_2$$

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

Ejemplo 2:



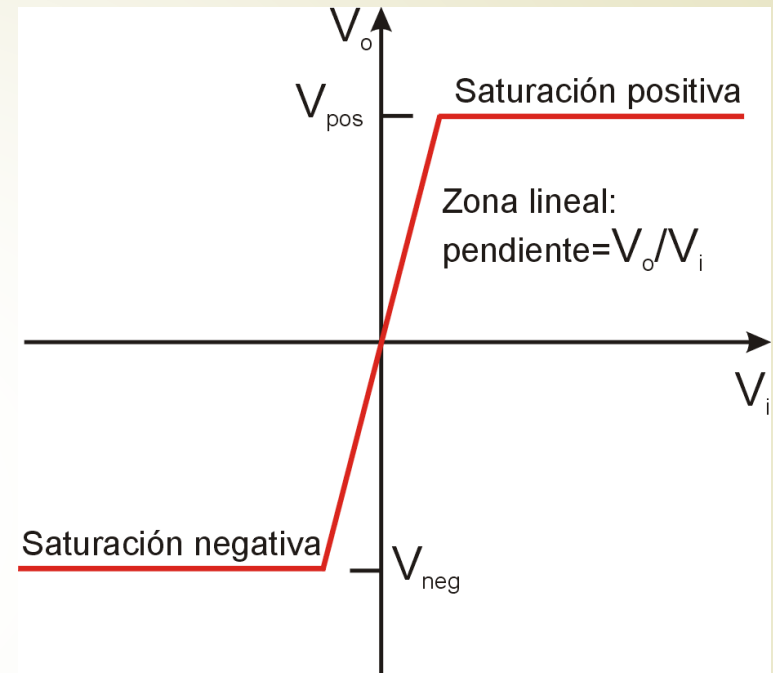
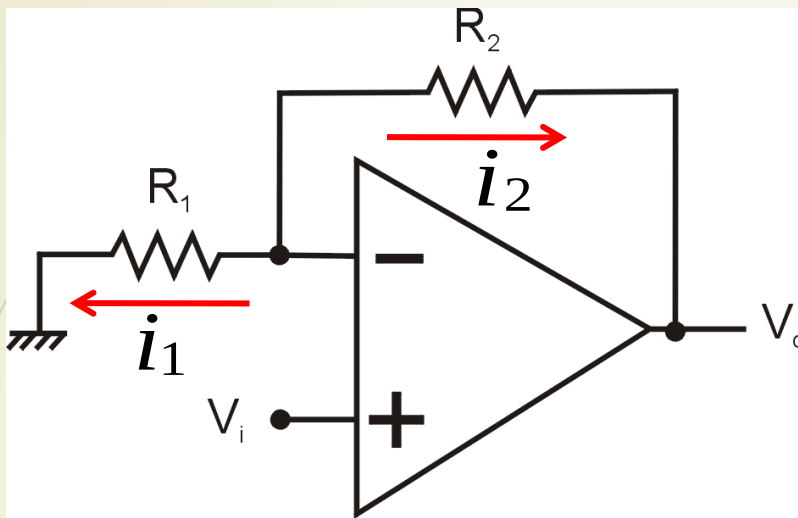
$$V_i = A \sin(\omega t)$$

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

$$R_2 = 5R_1$$

Configuración no inversora

16



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

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

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

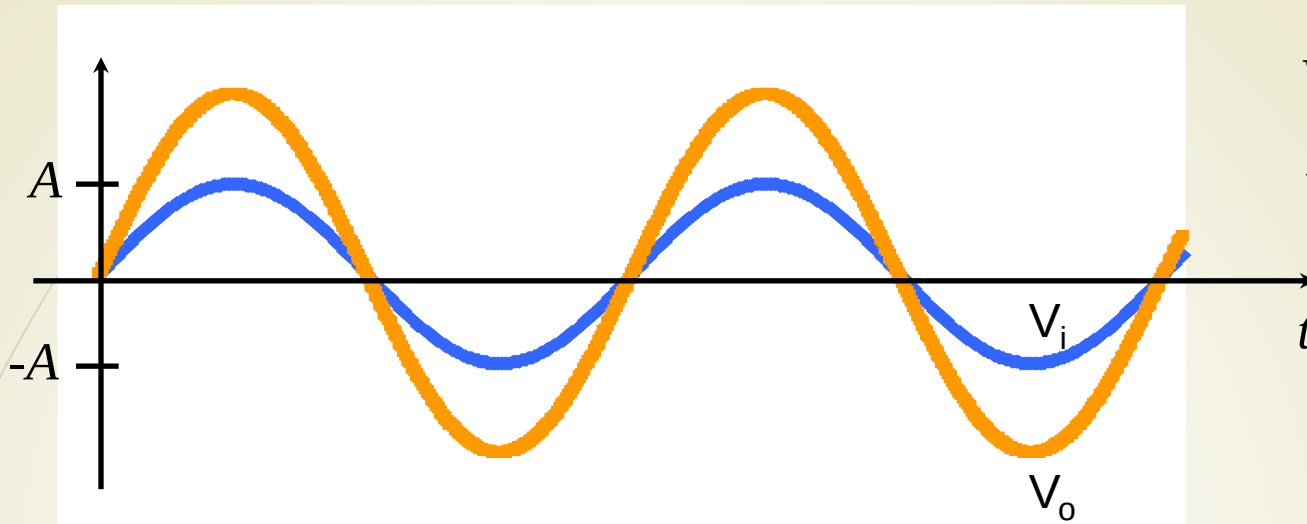
Función de transferencia:

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



- ✓ 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:

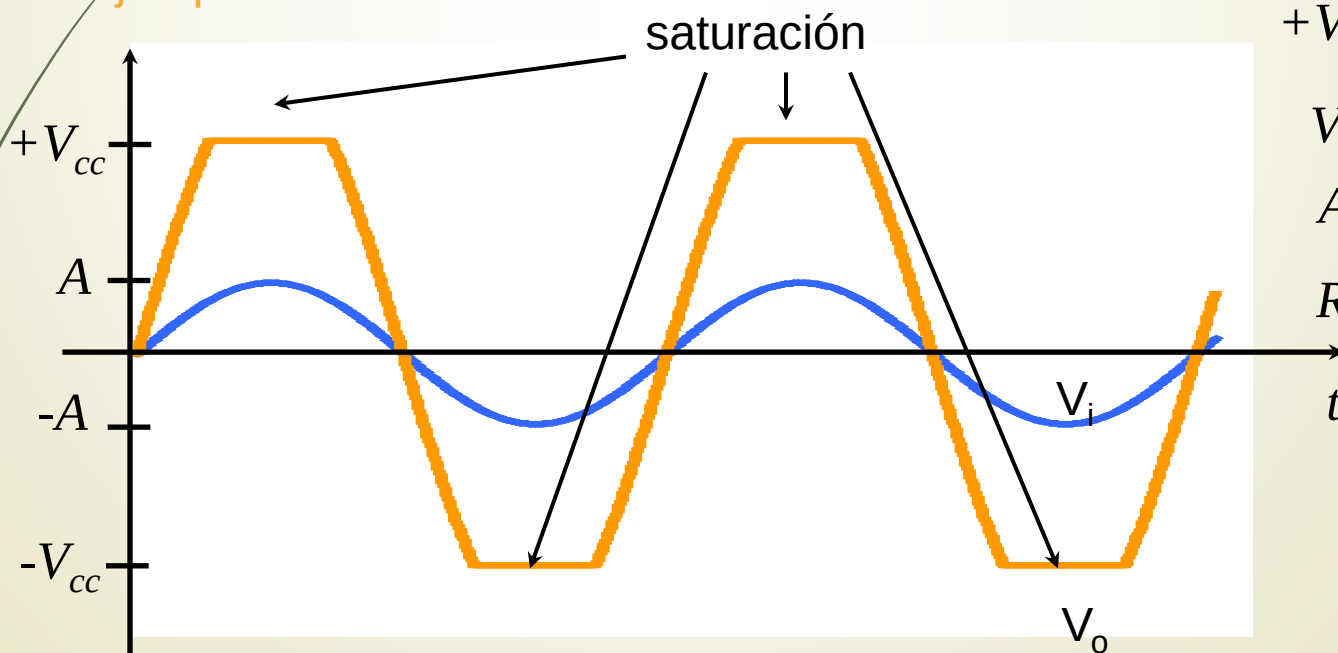


$$V_i = A \sin(\omega t)$$

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

$$R_1 = R_2$$

Ejemplo 2:



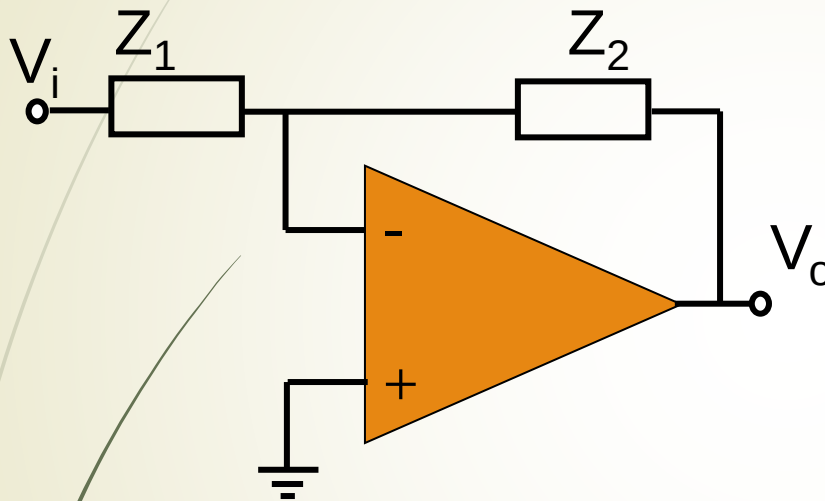
$$+V_{cc} = +15 \text{ V}$$

$$V_i = A \sin(\omega t)$$

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

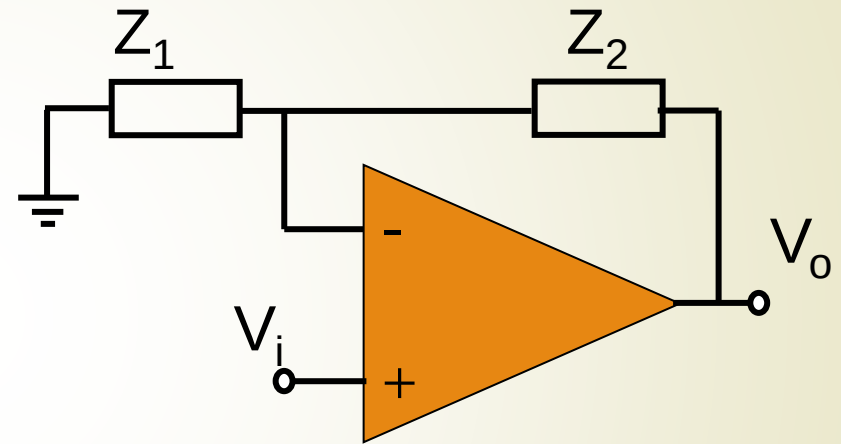
$$R_2 = 5R_1$$

En forma más general:



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

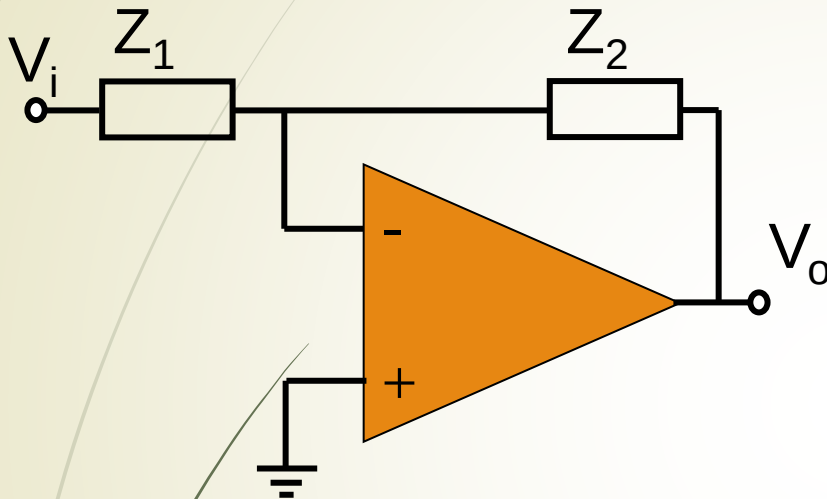
Amplificador
Inversor



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

Amplificador no
Inversor

Cambiador de signo o inversor

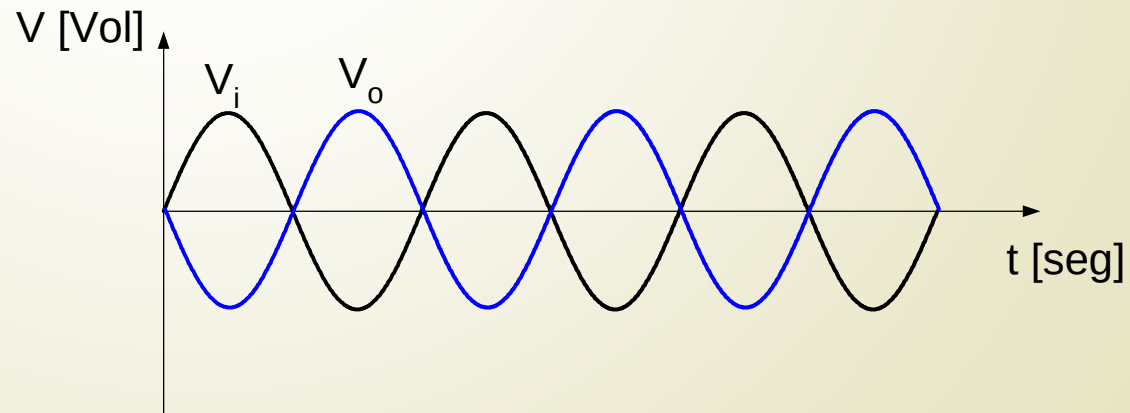


✓ Si en el circuito de la figura $Z_1 = Z_2$ entonces:

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

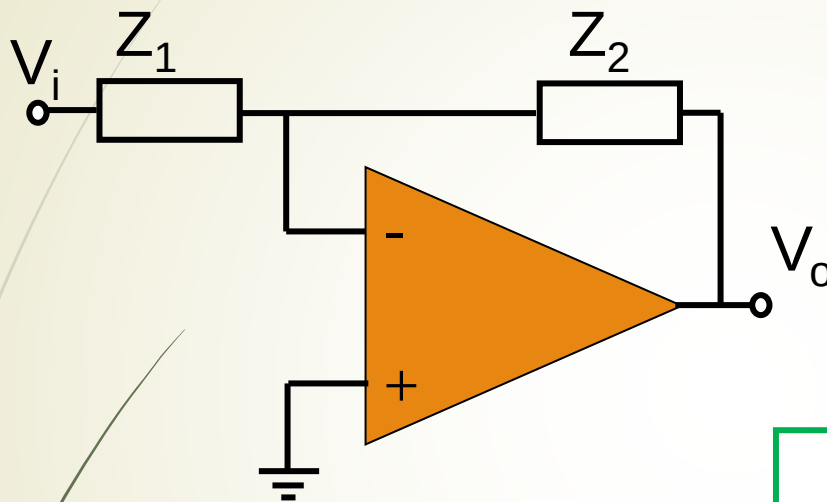
✓ Circuito inversor, la tensión de salida está desfasada 180° respecto a la de entrada

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



Cambiador de escala

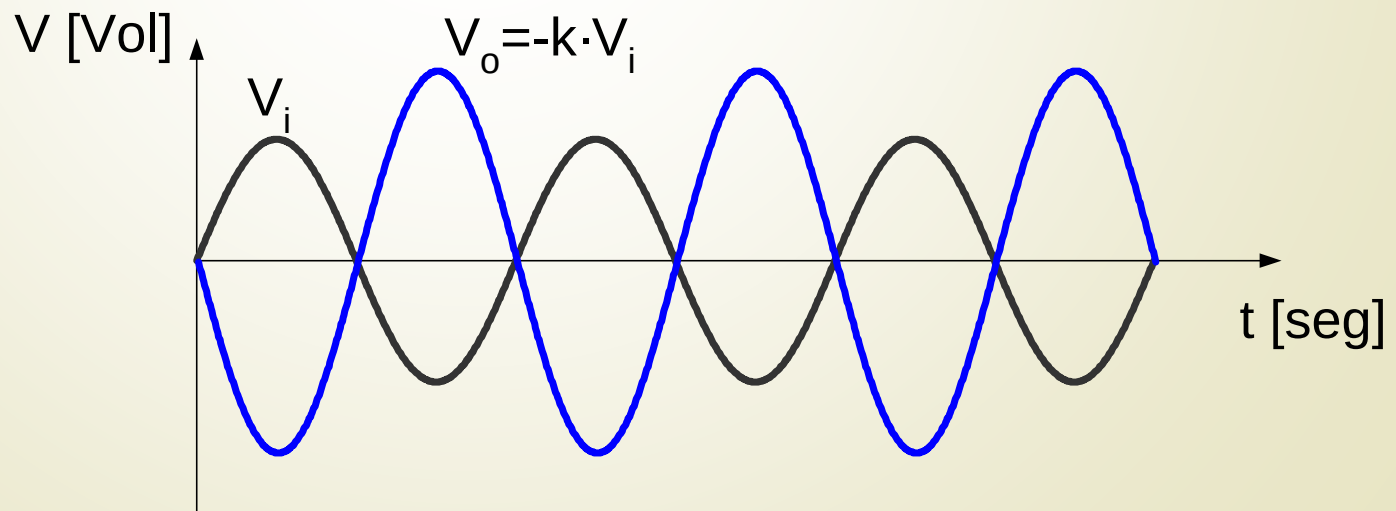
Si en el circuito de la figura $Z_2 = k \cdot Z_1$



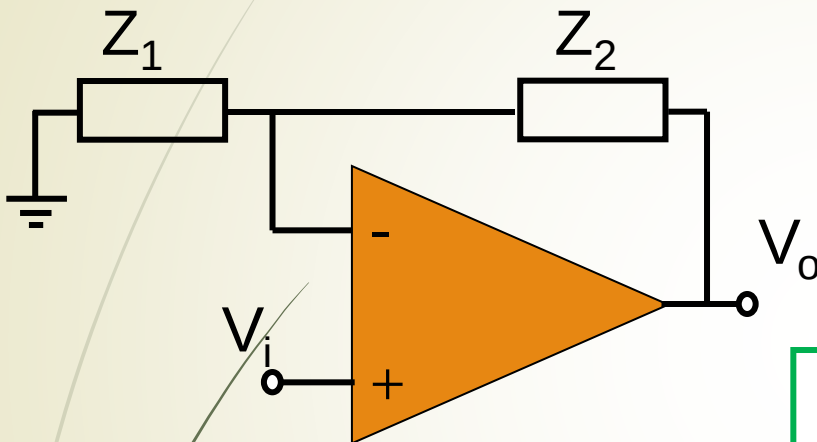
$$A_{vi} = \frac{V_o}{V_i} = -\frac{Z_2}{Z_1}$$



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



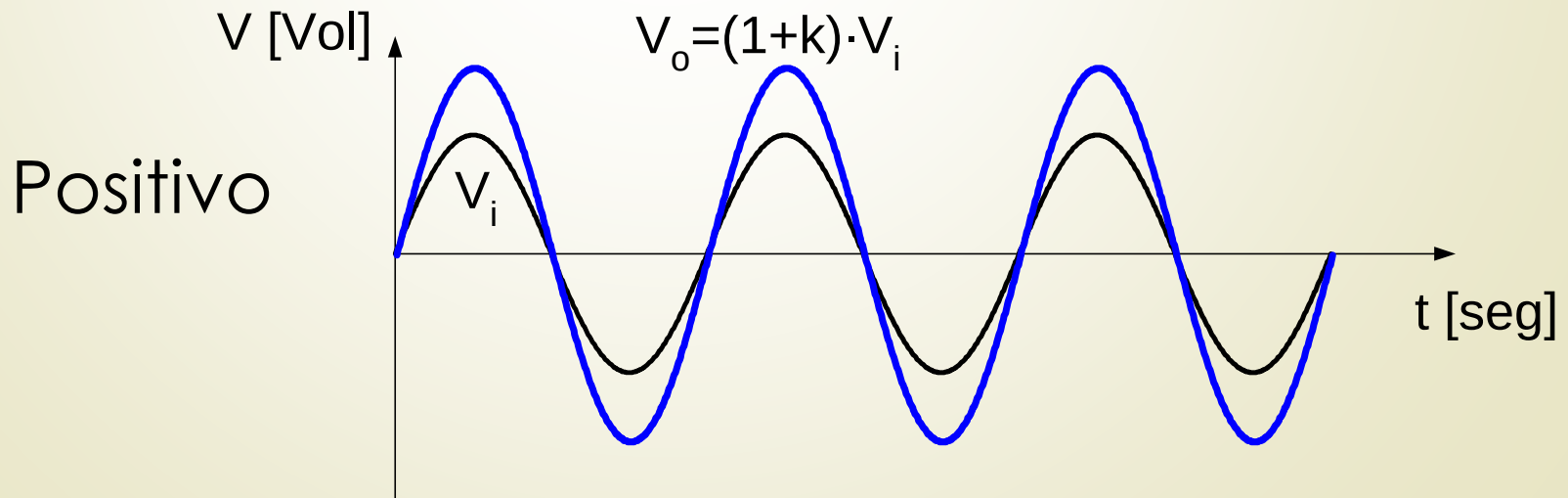
Cambiador de escala (ganancia)



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



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



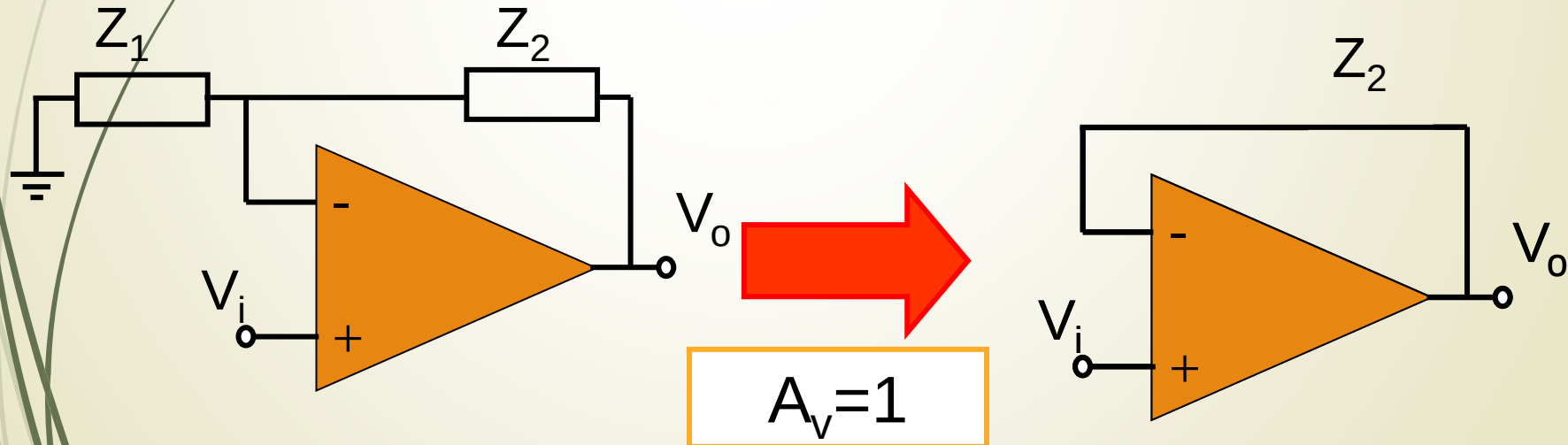
Seguidor (ganancia unitaria)

23

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

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

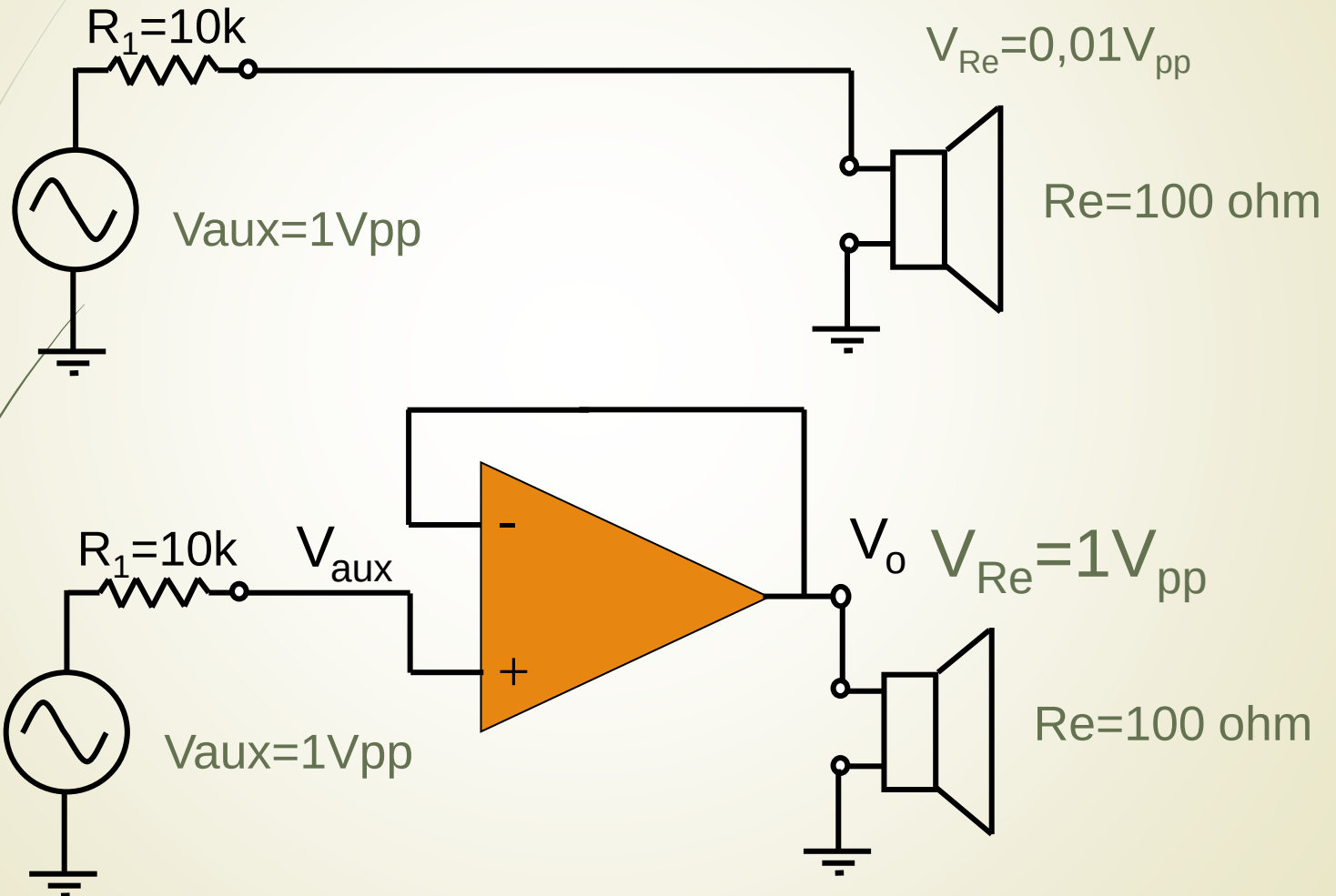
$$\Rightarrow A_v = 1$$



Seguidor

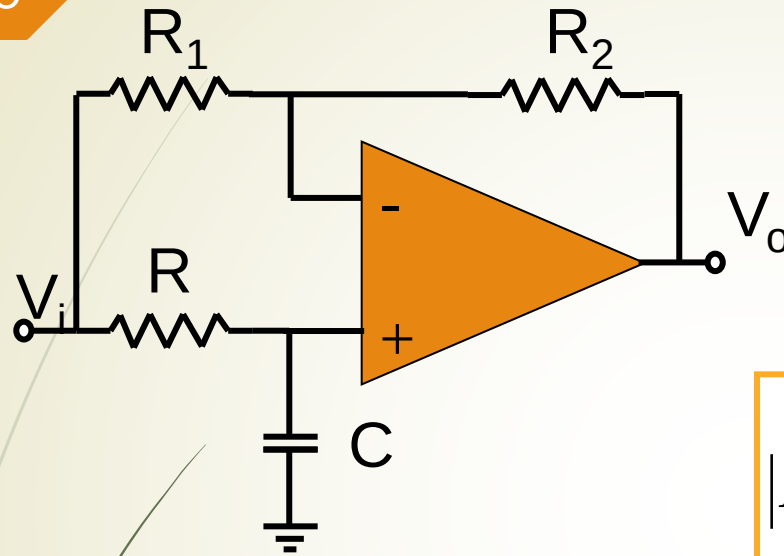
24

Ejemplo de aplicación: Adaptación de impedancias



Cambiador de fase

25



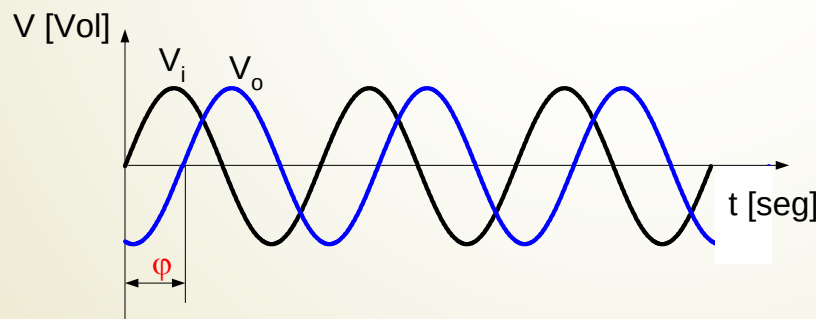
Si $R_2 = R_1$

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

Ganancia $A_v = 1$

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

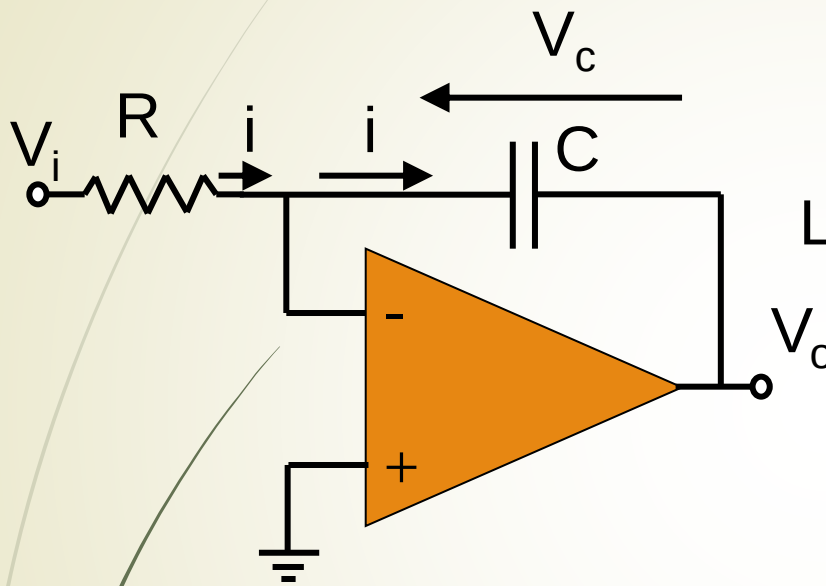
Fase



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

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

Circuito integrador (I)



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

La tensión V_c es:

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

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

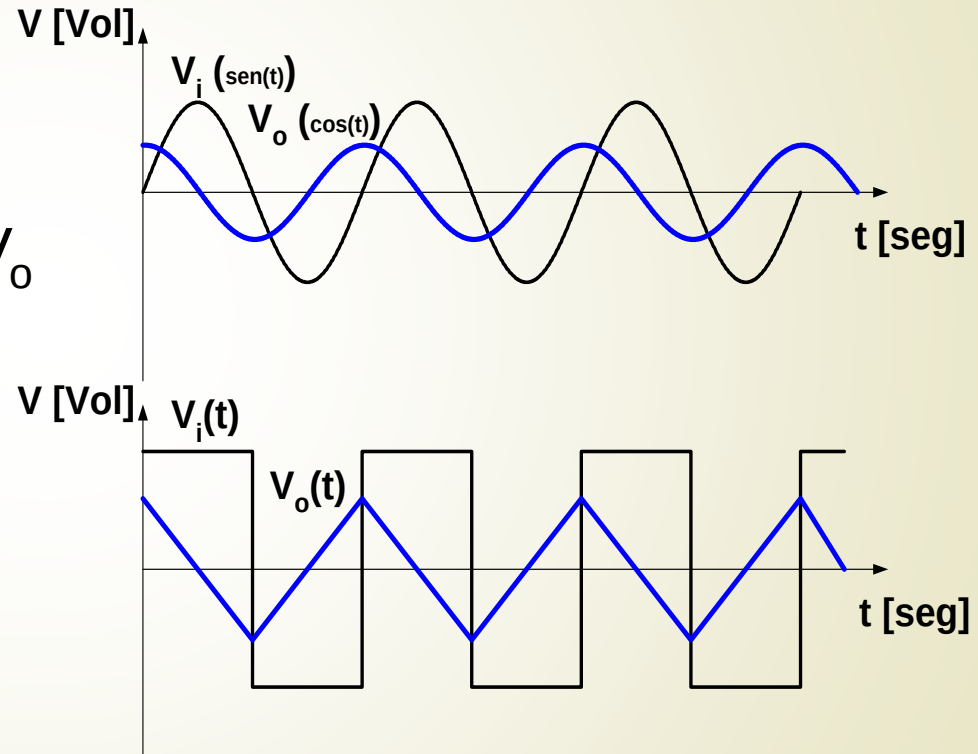
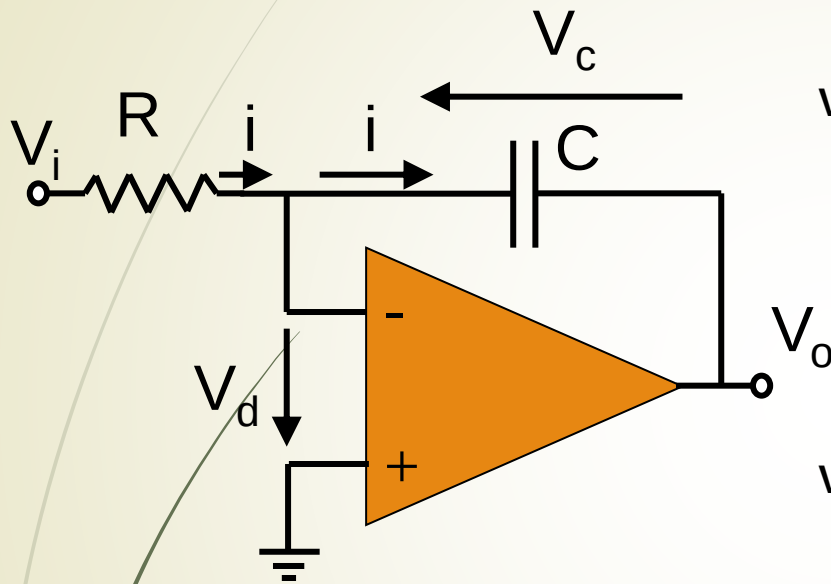
Como $V_o(t) = -V_c(t)$ entonces

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

Circuito integrador

27

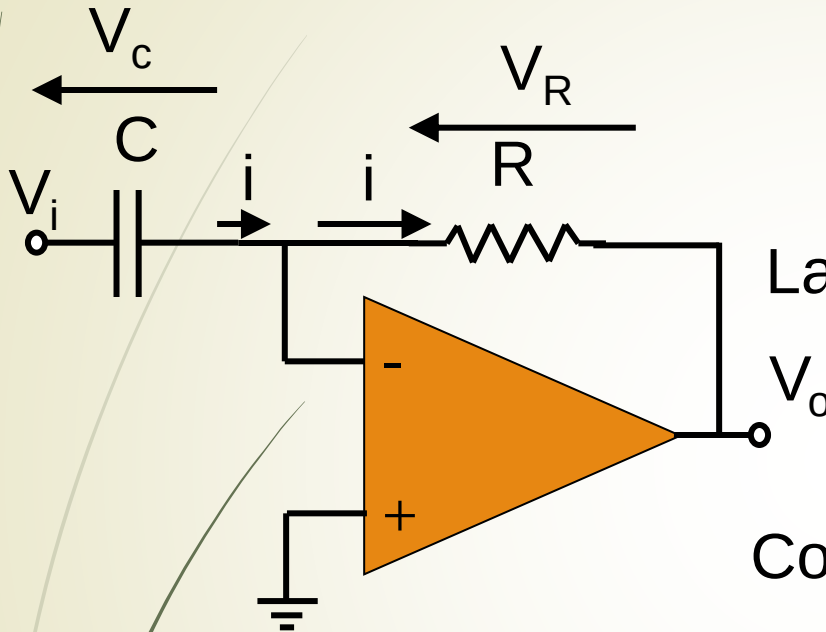
Formas de onda



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

Circuito derivador

28



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

La tensión V_R es:

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

Como $V_o(t)$ es:

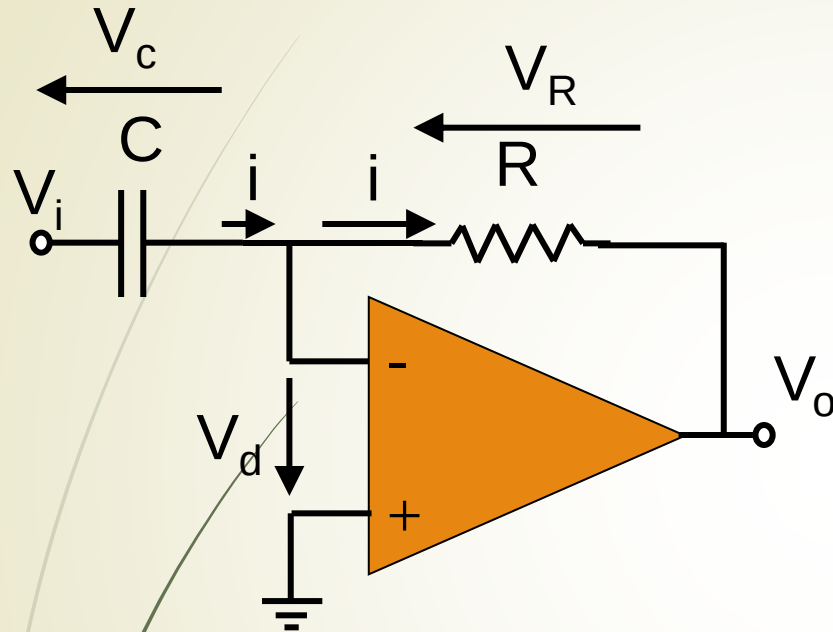
$$V_o(t) = -V_R(t)$$



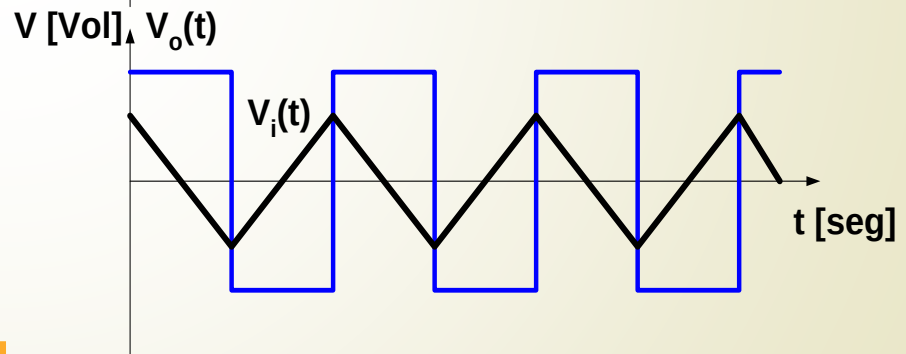
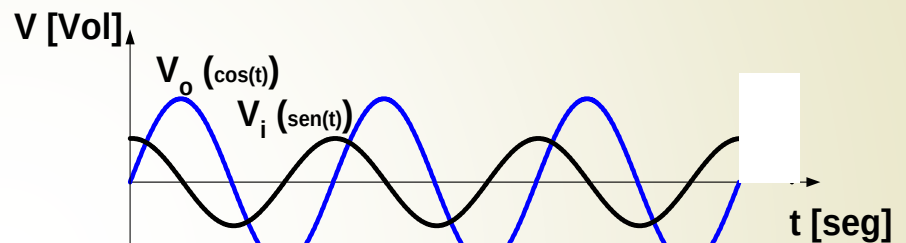
$$V_o(t) = -RC \frac{dV_i(t)}{dt}$$

Circuito derivador

29



Formas de onda

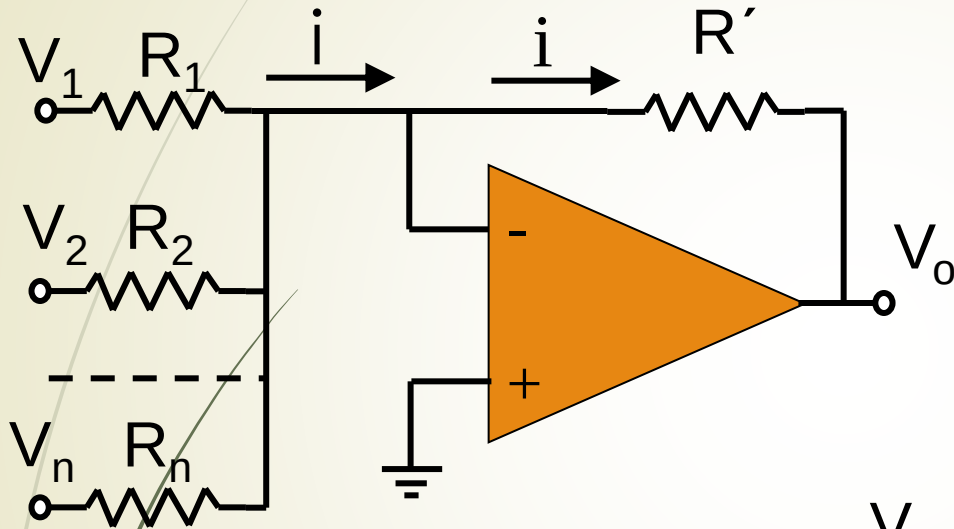


$$V_o(t) = -RC \frac{dV_i(t)}{dt}$$

Sumador

30

Sumador inversor



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

Como $V_o = -R' \cdot i$

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

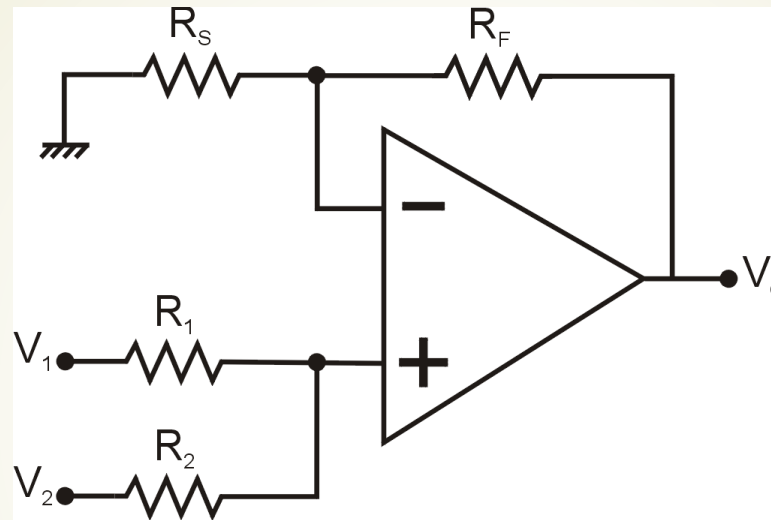
V_o es la combinación lineal de las tensiones de entrada.

Si $R_1 = R_2 = \dots = R_n$



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

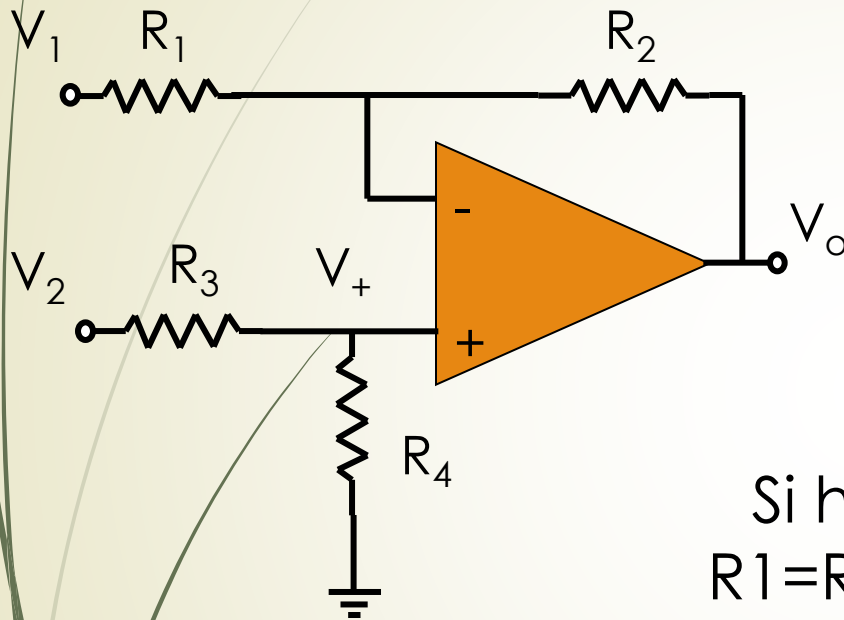
Ejercicio: sumador no inversor



- Analizar este circuito
- Obtener su función de transferencia

Amplificador diferencial: Restador

32



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 $R_2 = R_4$

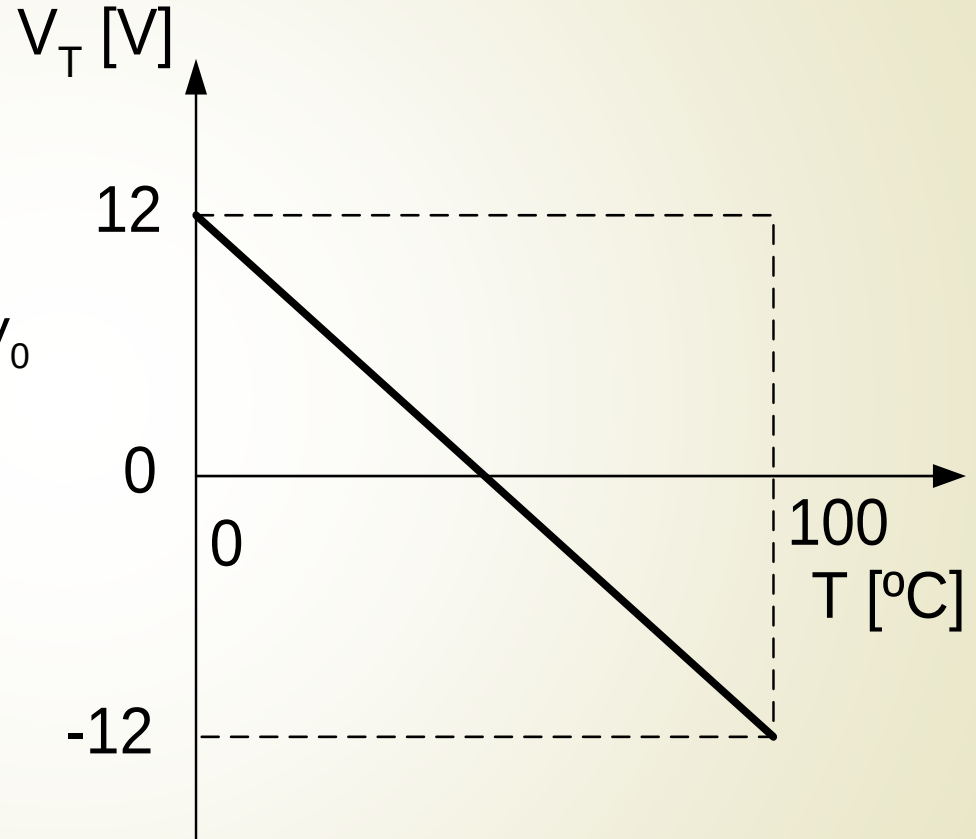
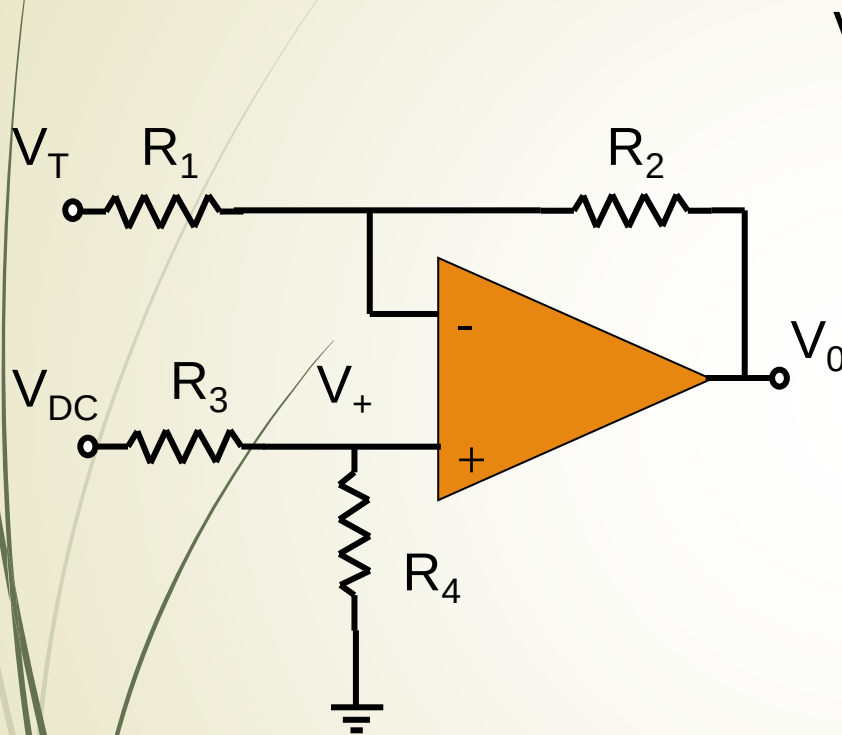
$$V_o = \frac{R_2}{R_1} \cdot (V_2 - V_1)$$

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

Adaptación de niveles

33

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



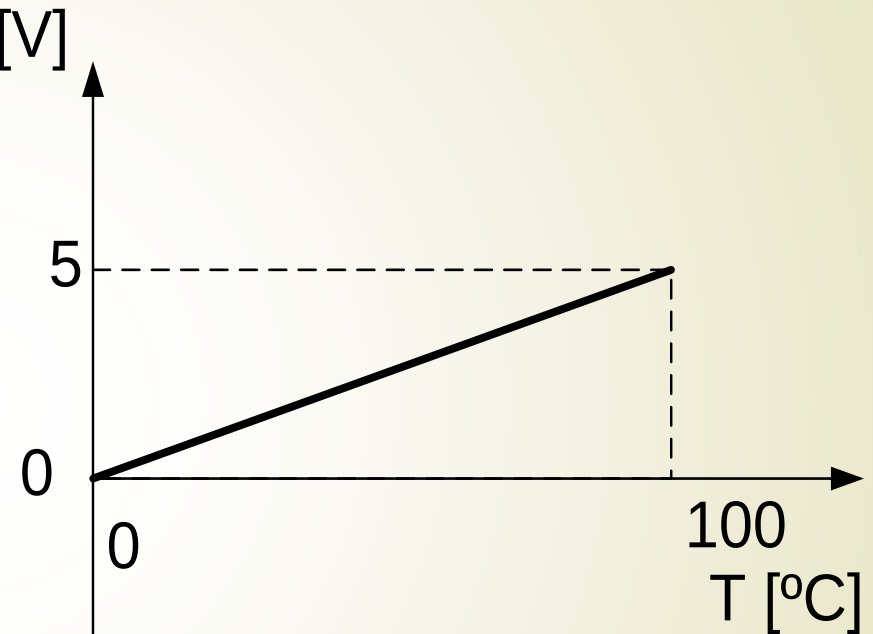
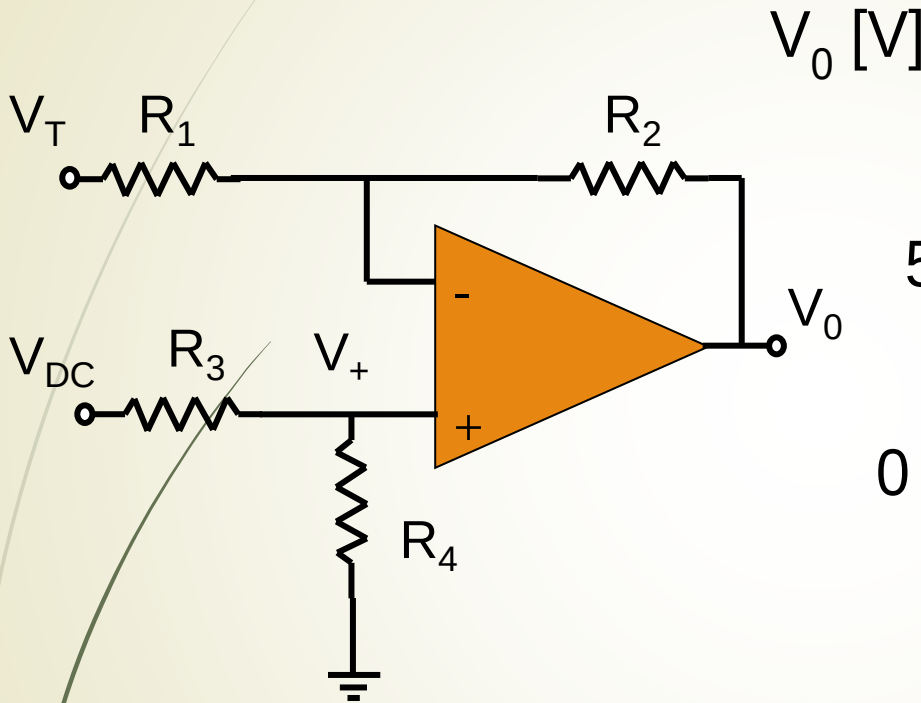
$$V_0 = V_{DC} \cdot \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) - V_T \cdot \frac{R_2}{R_1}$$

Ecuación de la recta

Adaptación de niveles

34

Ejemplo: [+12 a -12V] → [0V a 5V]



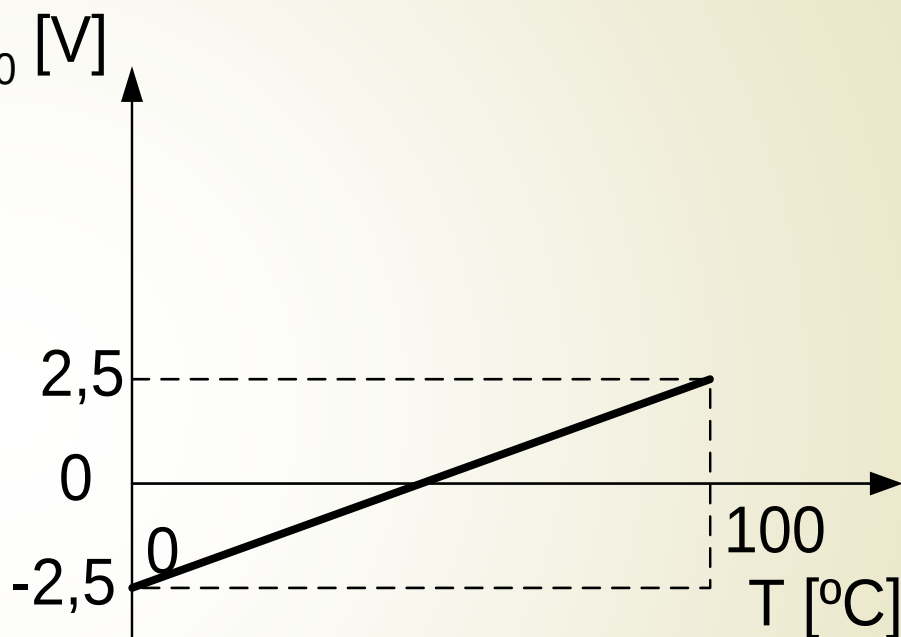
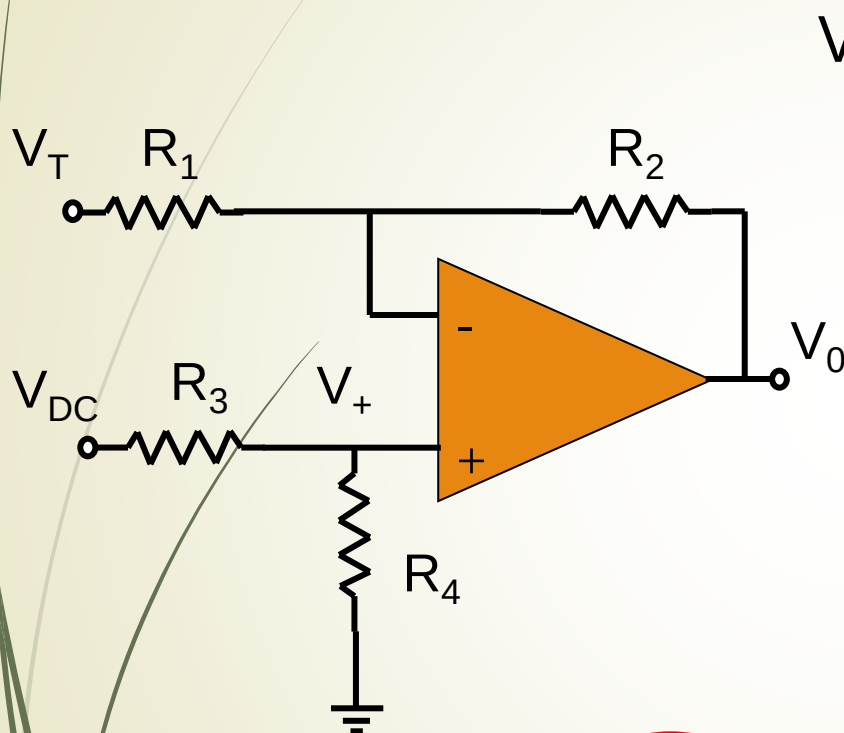
$$V_0 = V_{DC} \cdot \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) - V_T \cdot \frac{R_2}{R_1}$$

Ecuación de la recta

Adaptación de niveles

35

Ejemplo: $[+12 \text{ a } -12\text{V}] \rightarrow [-2,5 \text{ a } +2,5\text{V}]$



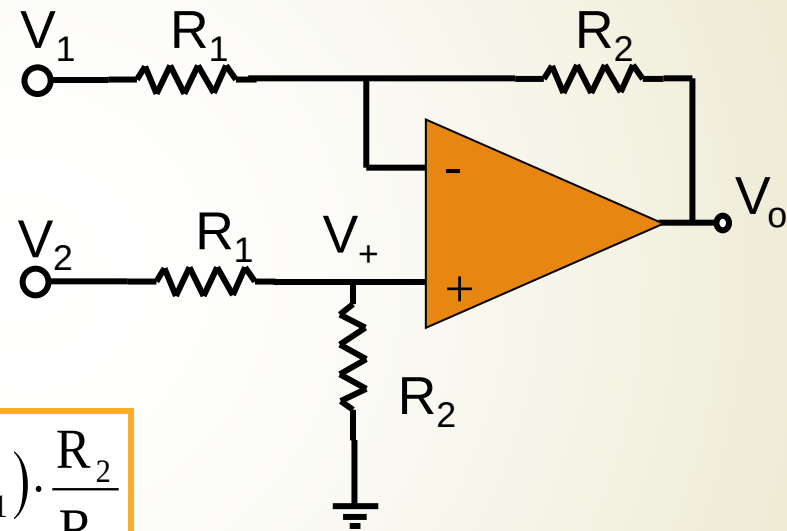
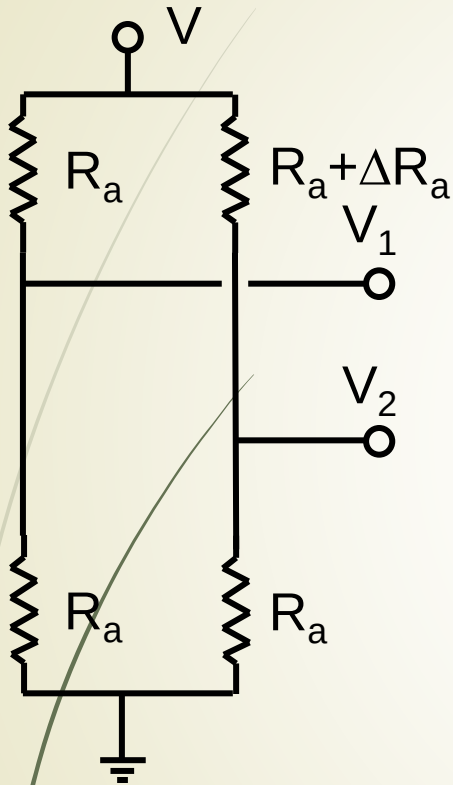
$$V_0 = V_{DC} \cdot \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) - V_T \cdot \frac{R_2}{R_1}$$

Ecuación de la recta

Amplificadores de instrumentación

36

Amplificación de señales débiles de transductores

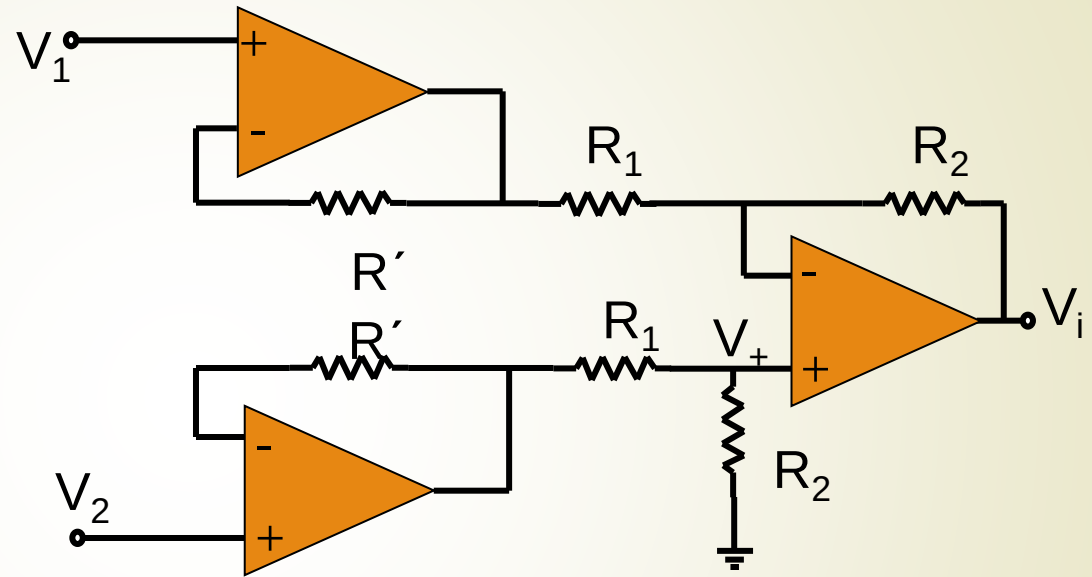
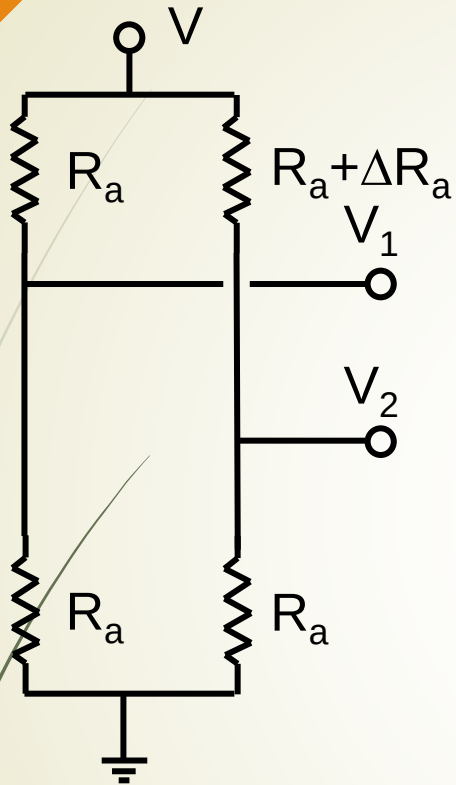


$$V_o = (V_2 - V_1) \cdot \frac{R_2}{R_1}$$

Problema: Adaptación de impedancias

Amplificadores de instrumentación

37



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

Impedancia de entrada alta

La ganancia depende de varias resistencias (R_1 y R_2)