

# Tema 4. Amplificador Operacional

## Índice

El Amplificador Operacional: modelo simplificado, modelo ideal, límites de operación

Realimentación del amplificador operacional

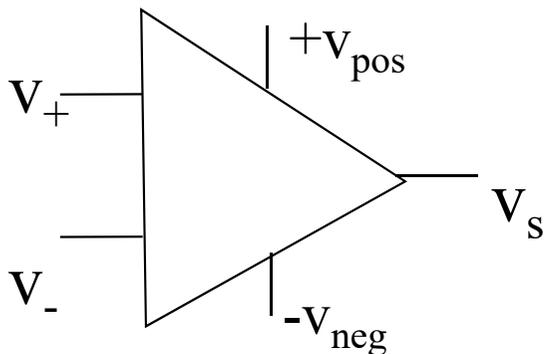
Montajes lineales: amplificador inversor, seguidor de tensión, amplificador no inversor, sumador, restador, integrador, diferenciador

Montajes no lineales: comparadores

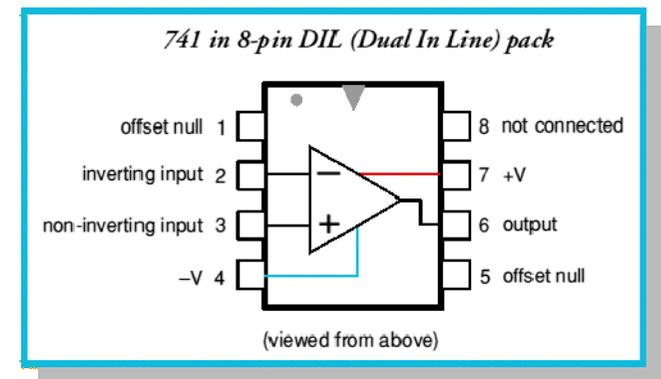
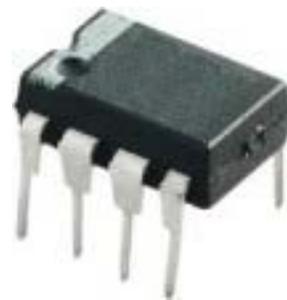
# El Amplificador Operacional (AO)

- Es un **Circuito Electrónico Integrado** (CI, *microchip*)
- Tiene numerosas aplicaciones en electrónica analógica: amplificación, filtrado analógico, acoplamiento, rectificación, detección de umbrales y conmutación digital.

## Símbolo del AO

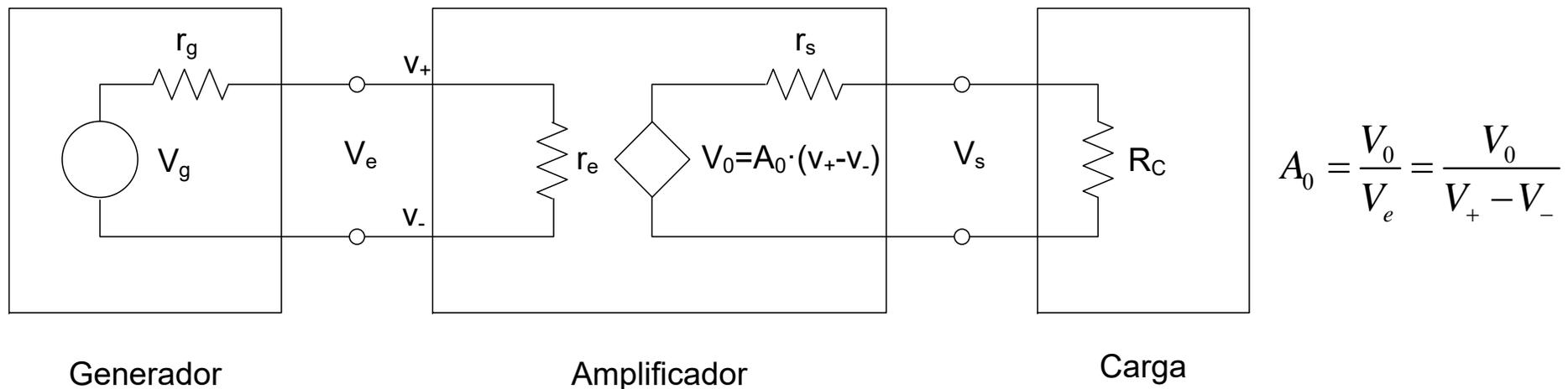


## Encapsulado típico de un AO (DIP-8)



# El Amplificador Operacional (AO)

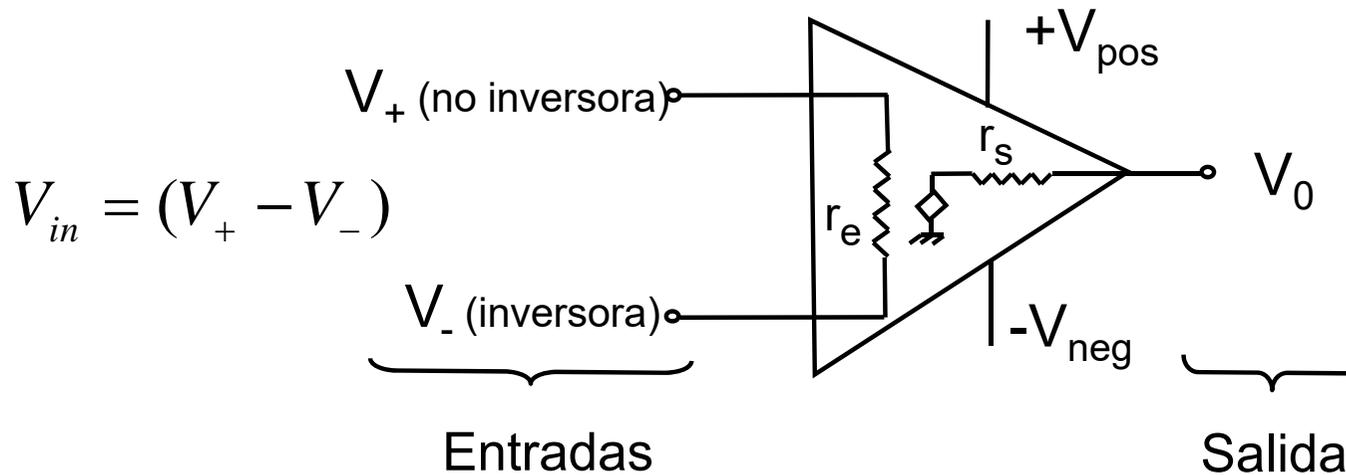
Dispositivo electrónico con **dos entradas (V+, V-)** a las cuales se conecta una señal llamada **fuente (source)** y produce una señal de salida proporcional, **ganancia (gain)**, a la señal de entrada. Esta señal de salida se conecta normalmente a otro circuito o elemento, llamado **carga (load)**.



$$A_0 = \frac{V_0}{V_e} = \frac{V_0}{V_+ - V_-}$$

$$\frac{V_s}{V_g} = \frac{r_e}{r_e + r_g} \cdot A_0 \cdot \frac{R_C}{r_s + R_C} \quad \text{idealmente} \quad \longrightarrow \quad \frac{V_s}{V_g} = A_0$$

# Modelo Simplificado del AO



**Ganancia interna (en lazo abierto) del AO**

$$V_0 = A_0(V_+ - V_-)$$

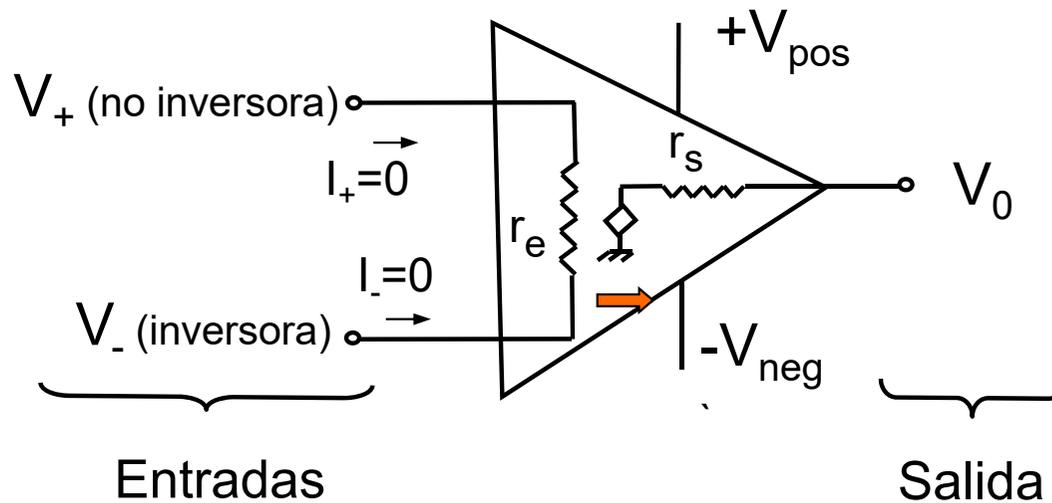
**Valores típicos en AO reales**

$$10^4 \leq A_0 \leq 10^6$$

$$r_e \geq 10^6 \Omega$$

$$r_s \leq 100 \Omega$$

# Modelo Ideal del AO



$$V_0 = A_0(V_+ - V_-)$$

✓ Ganancia muy alta  $A_0 \rightarrow (V_+ - V_-) = \frac{V_0}{A_0}; \boxed{V_+ \approx V_-}$

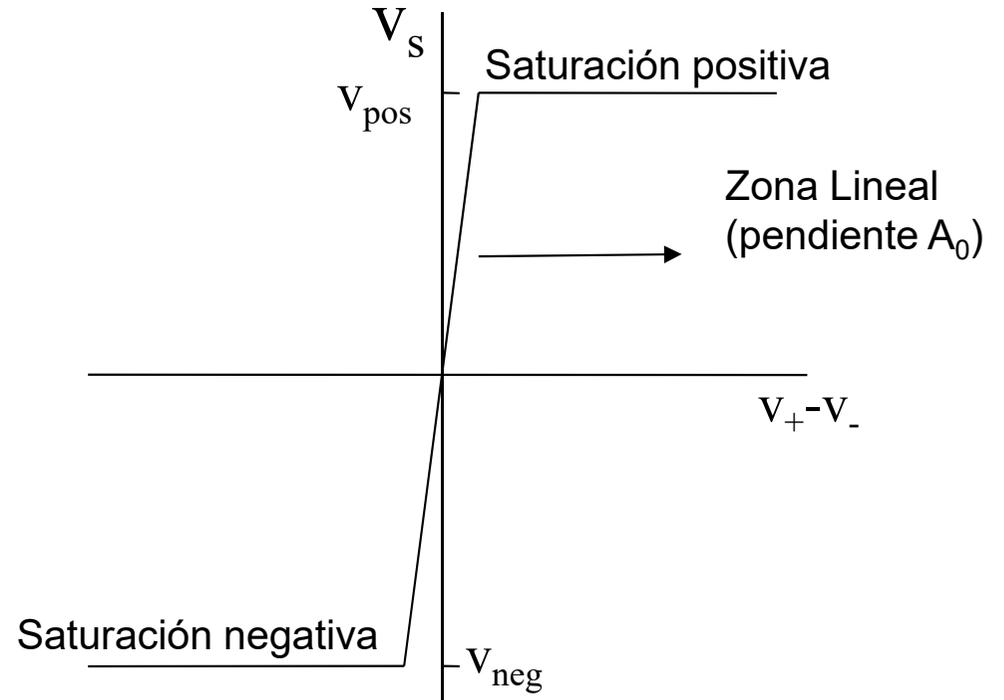
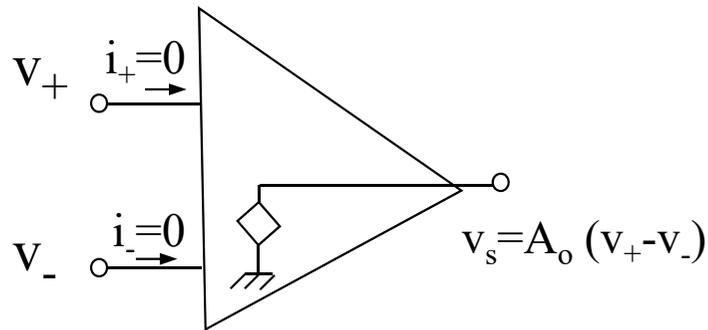
✓  $r_e$  muy alta  $\rightarrow \boxed{I_+ \approx I_- \approx 0}$

✓  $r_s$  muy baja  $\sim 0 \rightarrow \boxed{V_0 = V_s}$

# Límites de funcionamiento del AO Ideal

- Saturación de la salida a ( $V_{pos}$  y  $V_{neg}$ )**  $\Rightarrow$ 

$$\begin{cases}
 v_s = A_0(v_+ - v_-) \text{ si } V_{neg} \leq A_0(v_+ - v_-) \leq V_{pos} \\
 v_s = V_{pos} \text{ si } A_0(v_+ - v_-) > V_{pos} \\
 v_s = V_{neg} \text{ si } A_0(v_+ - v_-) < V_{neg}
 \end{cases}$$



## Montajes lineales con AO

Consideraciones de partida:

$$\Rightarrow (v_+ = v_-; i_+ = i_- = 0; v_s = v_0)$$

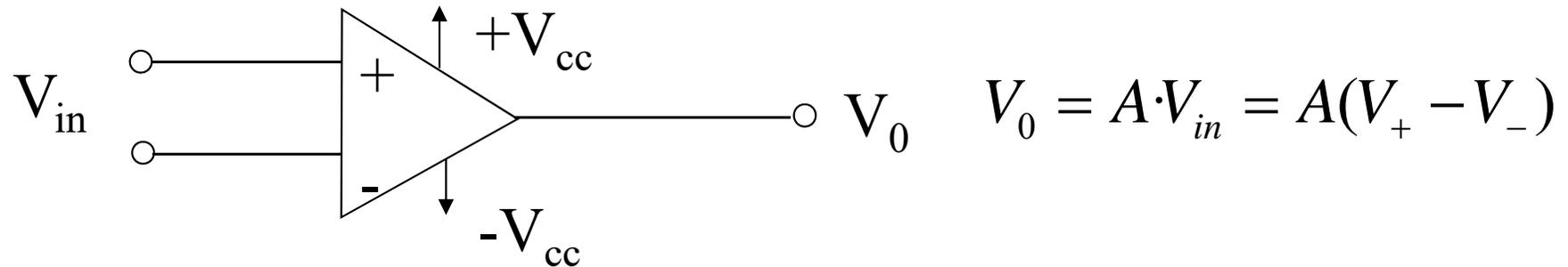
- El Amplificador Operacional (AO) es **ideal**
- El AO trabaja en **lazo cerrado (con realimentación negativa)**
- Se verá que las características en lazo cerrado **dependen de los componentes externos** del circuito en el que se encuentra el AO.



**Los circuitos lineales con AO son independientes de la ganancia interna del AO ( $A_0$ ), de  $r_e$  y de  $r_s$**

# AO sin realimentación (en lazo abierto)

## Ganancia en Lazo Abierto (A)



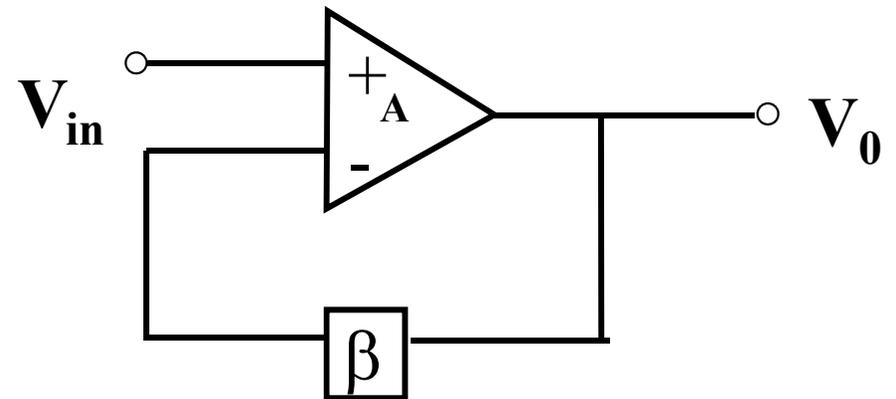
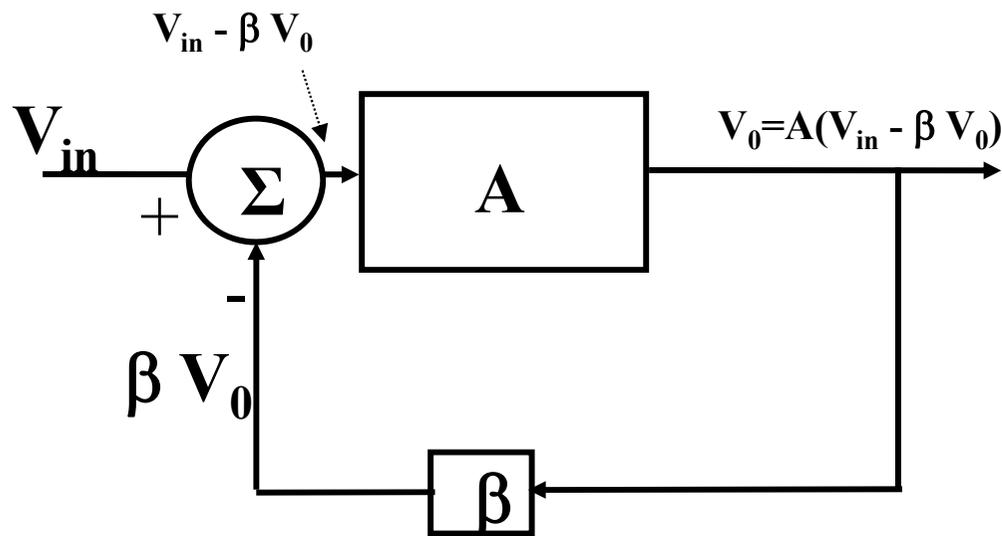
$$A \rightarrow \infty \quad \longrightarrow \quad \begin{aligned} V_{in} \geq 0 &\Rightarrow V_0 = +V_{cc} \\ V_{in} \leq 0 &\Rightarrow V_0 = -V_{cc} \end{aligned}$$

Para obtener diferentes funcionalidades del AO **tenemos que realimentarlo**, es decir, conectar la salida con la entrada.

# AO realimentado (en lazo cerrado)

A: Ganancia en Lazo Abierto

$A_f$ : Ganancia en Lazo Cerrado



$$V_0 = A(V_{in} - \beta V_0) \Rightarrow V_0 = \frac{A}{1 + A \cdot \beta} V_{in} \Rightarrow A_f = \frac{A}{1 + A \cdot \beta}$$

Si  $A \rightarrow \infty$   $A_f = \frac{1}{\beta} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{A \cdot \beta}} \Rightarrow A_f \approx \frac{1}{\beta}$

**¡La ganancia en lazo cerrado depende solamente de los componentes de la red de realimentación!**

## Resumen: AO en Lazo Cerrado (con realimentación)

- ✓ **Realimentación negativa: sistema estable**
- ✓ **Realimentación positiva: sistema inestable.** Se usa para construir osciladores, circuitos disparadores de Schmitt (Schmitt trigger)
- ✓ Ganancia Ideal en Lazo Cerrado  $(A_f) = 1/\beta$

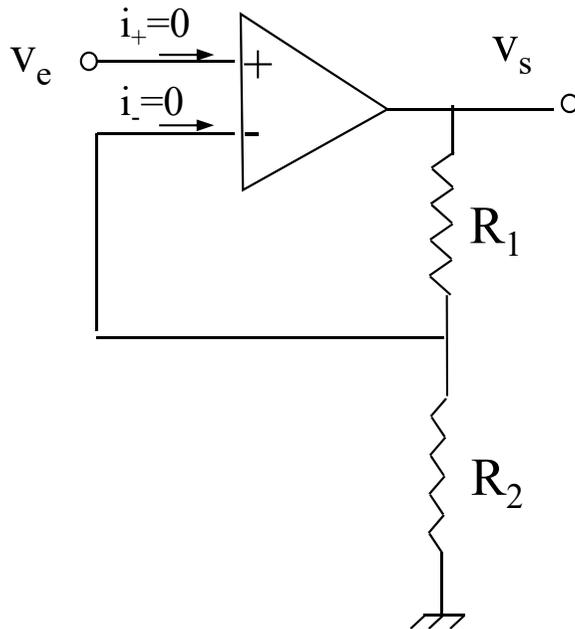
✓ **La ganancia en lazo cerrado sólo depende de la red de realimentación y es independiente de las propiedades internas del AO:  $A$ ,  $r_e$ ,  $r_o$ ...**

# Montajes lineales con AO

El Amplificador Operacional (AO) es ideal  $\Rightarrow (v_+ = v_-; i_+ = i_- = 0; v_s = v_o)$

## Amplificador no inversor:

Función de transferencia (modelo ideal)



$$V_- = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_s$$

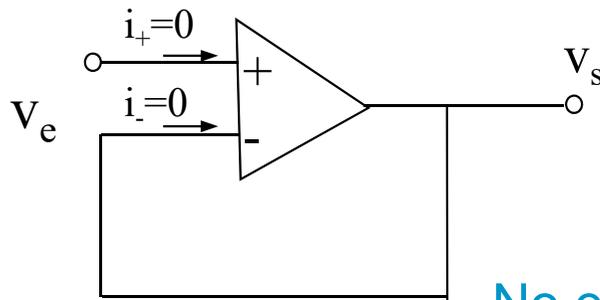
$$V_e = V_- = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_s \Rightarrow \frac{V_s}{V_e} = \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$

Impedancia de entrada

$$R_e = \frac{v_e}{i_e} = \infty$$

# Montajes lineales con AO

## Seguidor de tensión



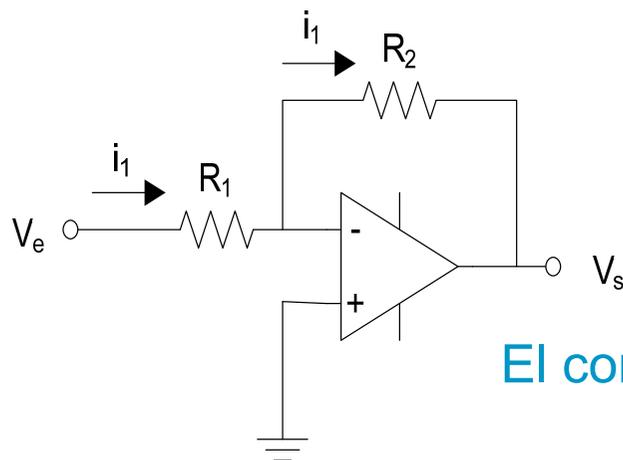
Función de transferencia:

Amplificador no inversor con  $\Rightarrow R_1 = 0$  y  $R_2 = \infty$

$$\frac{V_s}{V_e} = 1$$

No es un amplificador, es un desacoplador de impedancias.

## Amplificador Inversor



Función de transferencia (modelo ideal)

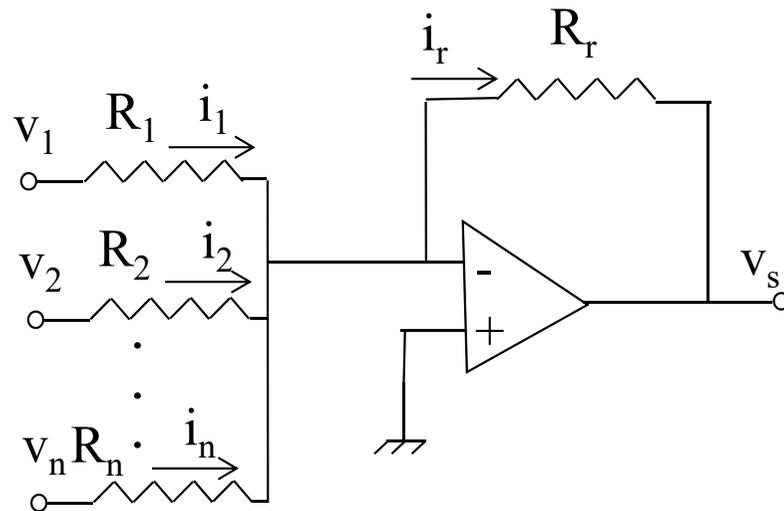
$$\frac{V_e - 0}{R_1} = \frac{0 - V_s}{R_2} \Rightarrow \frac{V_s}{V_{in}} = -\frac{R_2}{R_1}$$

(Para ondas senoidales se produce una inversión de fase o un desfase de  $180^\circ$ )

El concepto de “**Cortocircuito virtual**” simplifica el análisis

# Montajes lineales con AO

## Amplificador sumador

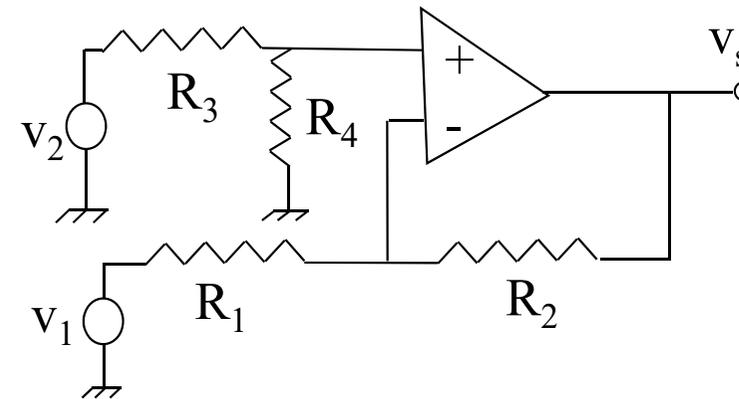


Función de transferencia

$$v_s = -R_r \left( \frac{v_1}{R_1} + \frac{v_2}{R_2} + \dots + \frac{v_n}{R_n} \right)$$

Utilizado en mezcla de audio

## Amplificador restador



Función de transferencia

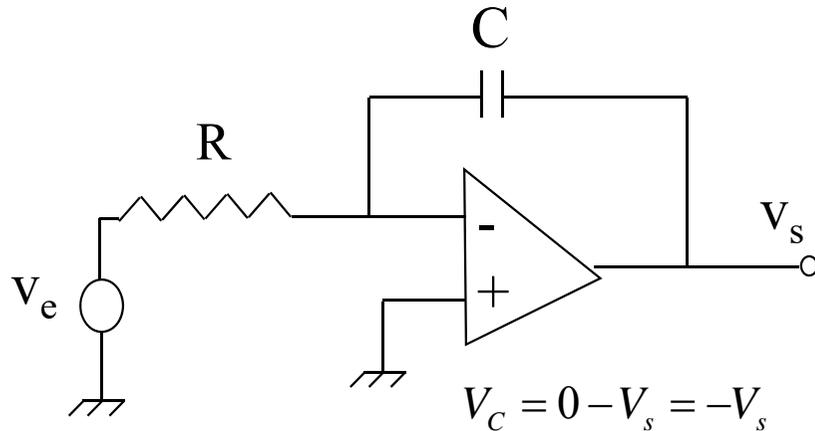
$$v_s = \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \left( \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) v_2 - \frac{R_2}{R_1} v_1$$

$$\text{Si } \frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3}; \quad v_s = \frac{R_2}{R_1} (v_2 - v_1)$$

Amplificador de instrumentación

# Montajes lineales con AO

## Integrador



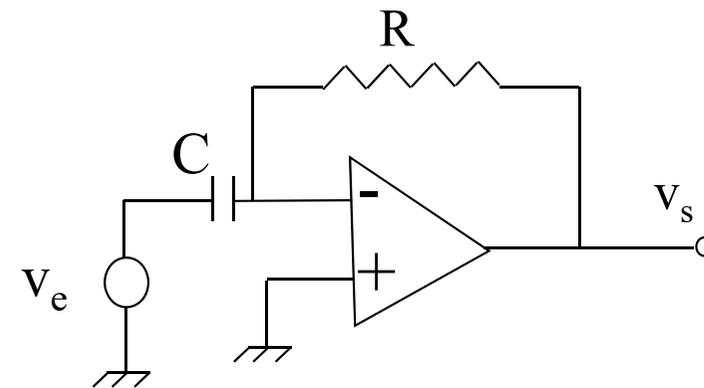
Función de transferencia

$$i = \frac{V_e}{R} = C \frac{dV_C}{dt} \Rightarrow \frac{dV_C}{dt} = \frac{V_e}{RC}$$

$$\frac{dV_s}{dt} = -\frac{V_e}{RC} \Rightarrow V_s = -\frac{1}{RC} \int V_e dt$$

$$\frac{v_s}{v_e} = \frac{-1}{j\omega RC}$$

## Diferenciador



Función de transferencia

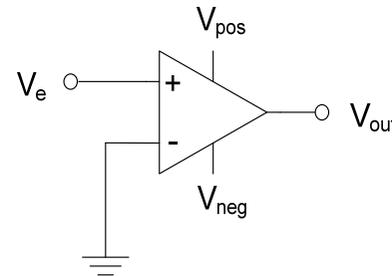
$$i = C \frac{dV_e}{dt} \quad v_s = -RC \frac{dv_e}{dt}$$

$$\frac{v_s}{v_e} = -j\omega CR$$

Usado en generadores de funciones, filtros activos, CAD y control analógico

# Montajes no lineales con AO. Comparadores

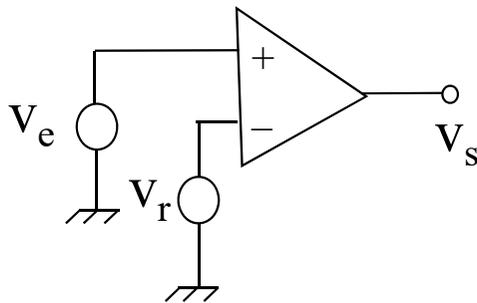
- Un AO sin realimentación se satura  $\Rightarrow$  circuitos no lineales
- Los circuitos no lineales tienen muchas aplicaciones en procesamiento de señal.



$$v_e \geq 0 \Rightarrow V_s = V_{pos}$$

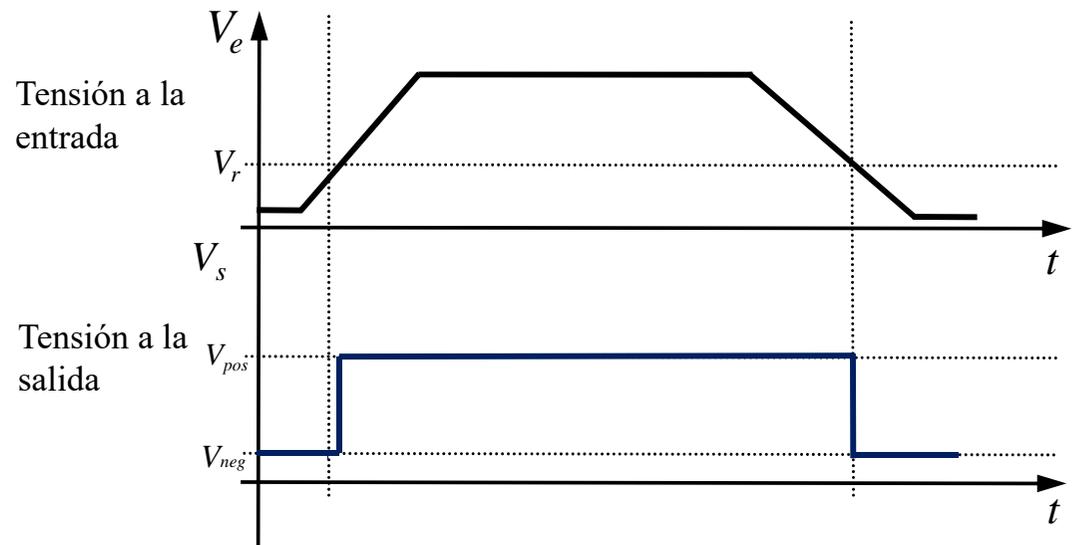
$$v_e \leq 0 \Rightarrow V_s = V_{neg}$$

## Comparador en Lazo Abierto y Detector de Polaridad



$$\text{Si } v_e > v_r \Rightarrow (v_e - v_r) > 0 \Rightarrow v_s = V_{pos}$$

$$\text{Si } v_e < v_r \Rightarrow (v_e - v_r) < 0 \Rightarrow v_s = V_{neg}$$



- **Microelectrónica.** Jacob Millman, Arvin Grabel.  
McGraw Hill.
- **Microelectrónica: Circuitos y Dispositivos.**  
Mark N. Horenstein. Ed. Prentice Hall
- **The Art of Electronics.** Paul Horowitz.  
Cambridge University Press.