

# Tema 2.

# Amplificadores Operacionales

Joaquín Vaquero López

# Amplificadores Operacionales (AO): Índice

---

2.1) Introducción a los AO

2.2) Modelo simplificado. Modelo Ideal

2.3) Circuitos Lineales con AO

2.4.1) Amplificador No Inversor

2.4.2) Amplificador Inversor

2.4.3) Seguidor de tensión

2.4.4) Amplificador diferencial

2.4.5) Integrador

2.4.6) Diferenciador

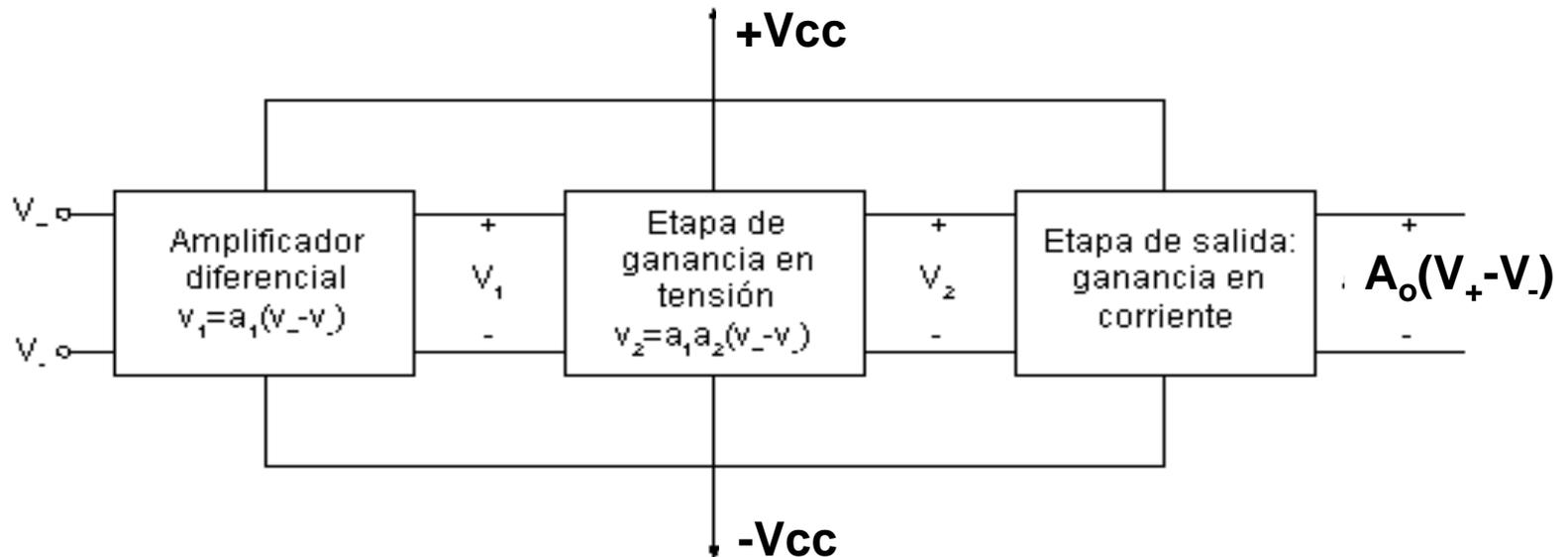
2.5) Circuitos No Lineales: Comparador y Disparador Schmitt

2.6) AO No Ideal.

Apéndice. Realimentación Negativa.

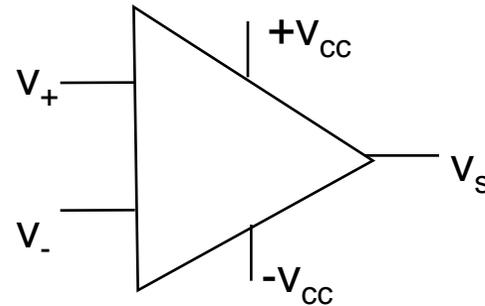
# Introducción a los Amplificadores Operacionales

- ✓ Es un Circuito Electrónico Integrado (**CI**)
- ✓ Es un componente **no lineal**, aunque se puede utilizar en aplicaciones lineales.
- ✓ Es un componente de **ganancia** muy alta.
- ✓ Numerosas aplicaciones en **electrónica analógica** (amplificación, filtrado analógico, acoplamiento, rectificación, detección de umbrales y conmutación digital).



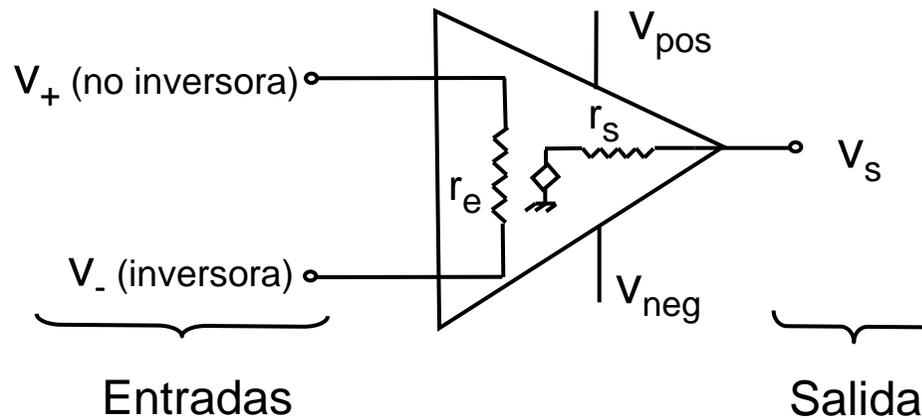
# Modelo Simplificado del Amplificador Operacional

**Símbolo del AO:**



¡¡Todas las tensiones referidas a una tierra común!!

**Modelo simplificado:**



**Ganancia interna del AO**

$$V_s = A_0 (v_+ - v_-)$$

Valores típicos:

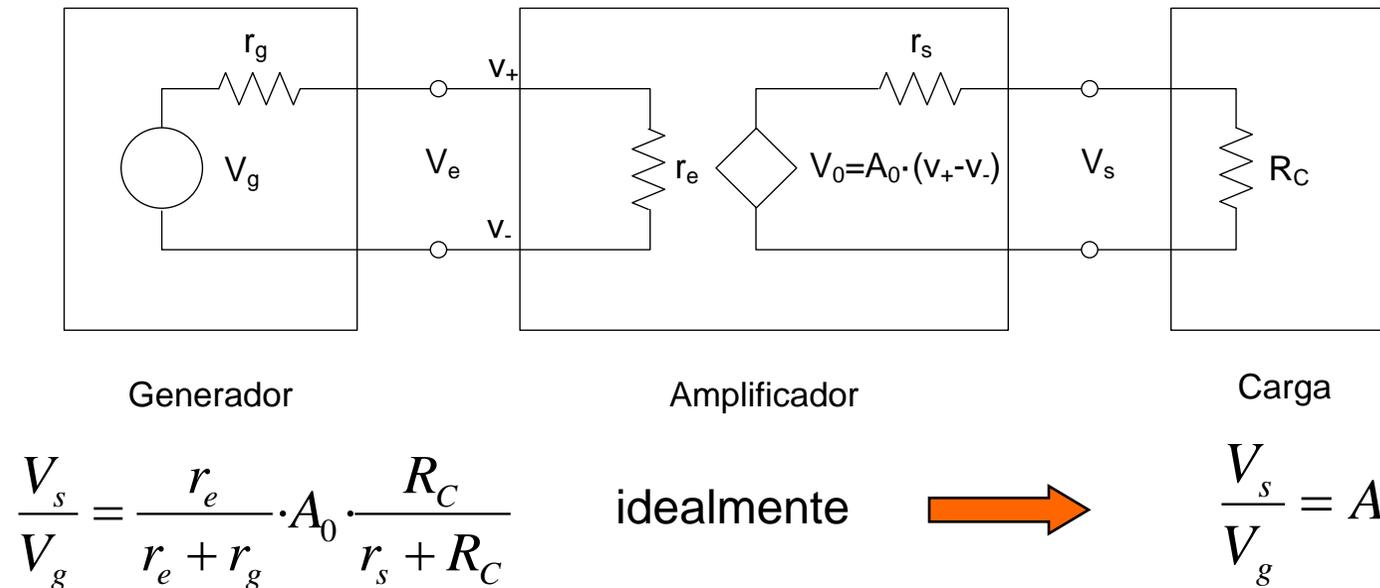
$$10^4 \leq A_0 \leq 10^6$$

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

$$r_s \leq 100 \Omega$$

# Modelo Simplificado del Amplificador Operacional

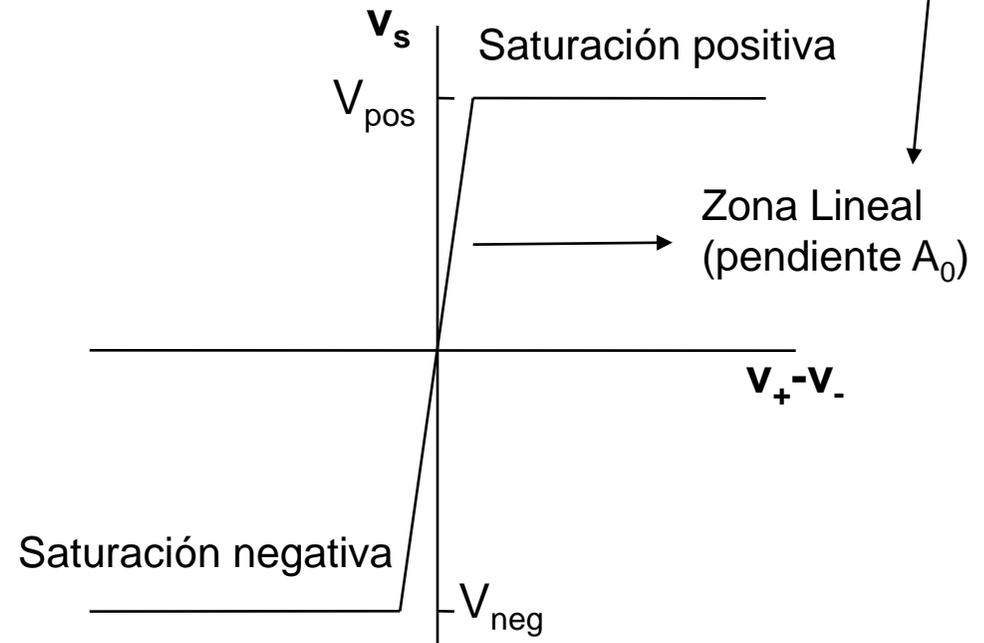
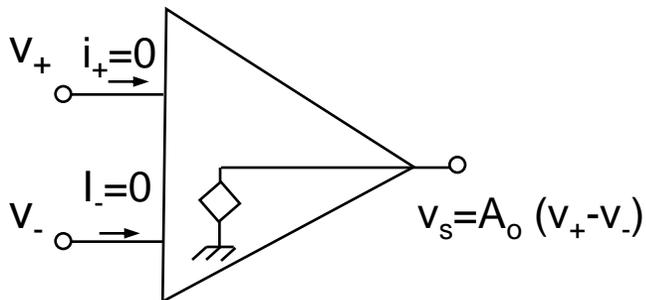
El AO es un dispositivo electrónico con dos entradas a las cuales se conectan una señal llamada **fuentes (source)** y produce una señal de salida proporcional, **ganancia (gain)**, a la señal de entrada. Esta señal de salida se conecta normalmente a otro circuito o elemento, llamado **carga (load)**.



# Modelo Ideal del Amplificador Operacional

- ✓ Los límites para la saturación de la salida son las tensiones de alimentación ( $V_{pos}$  y  $V_{neg}$ )  $\Rightarrow$ 

$$\begin{cases} V_o = A_0(v_+ - v_-) & \text{si } V_{neg} \leq A_0(v_+ - v_-) \leq V_{pos} \\ v_o = V_{pos} & \text{si } A_0(v_+ - v_-) > V_{pos} \\ v_o = V_{neg} & \text{si } A_0(v_+ - v_-) < V_{neg} \end{cases}$$
- ✓ Ganancia muy alta  $A_0 \Rightarrow (v_+ - v_-) = \frac{v_o}{A_0}$ ;  $v_+ = v_-$
- ✓  $r_e$  muy alta  $\Rightarrow i_+ = i_- = 0$
- ✓  $r_s$  muy baja  $\Rightarrow v_s = v_o$



# Circuitos Lineales con Amplificadores Operacionales

## Consideraciones de partida:

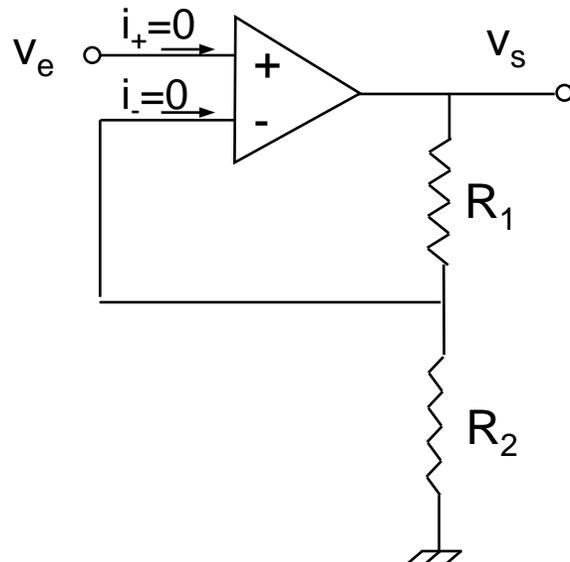
- 1) El Amplificador Operacional (AO) es ideal  $\Rightarrow (v_+ = v_-; i_+ = i_- = 0; v_s = v_0)$
- 2) El OA trabaja en **lazo cerrado (realimentación negativa)**
- 3) Se verá que las **características en lazo cerrado dependen de los componentes externos del circuito en el que se encuentra el AO.**
- 4) La precisión del circuito no depende tanto de la calidad de los componentes sino de su relación entre ellos (p.e. la deriva de temperatura)



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

# Circuitos Lineales con Amplificadores Operacionales

## Amplificador no inversor



Función de transferencia (modelo simplificado)

$$v_s = A_0 \cdot (v_+ - v_-) = A_0 (v_e - v_s \cdot \beta); \quad \beta = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$\frac{v_s}{v_e} = \frac{1}{\beta} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{A_0 \cdot \beta}}$$

Función de transferencia (modelo ideal)

$$A_0 \rightarrow \infty; \quad \frac{v_s}{v_e} = \frac{1}{\beta} = \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$

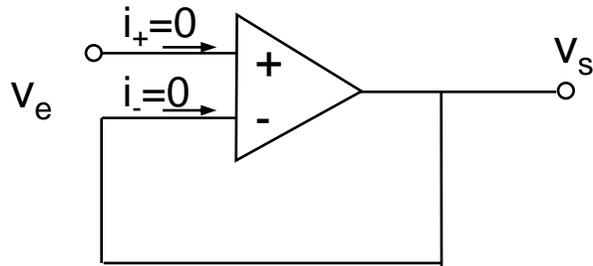
Impedancia de entrada

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

¡¡Corriente de entrada 0!! , la salida no carga la entrada

# Circuitos Lineales con Amplificadores Operacionales

## Seguidor de tensión (o de emisor)



Función de transferencia:

No inversora con  $R_1 = 0$  y  $R_2 = \infty$

$$\frac{v_s}{v_e} = 1$$

No es un amplificador, es un desacoplador de impedancias.

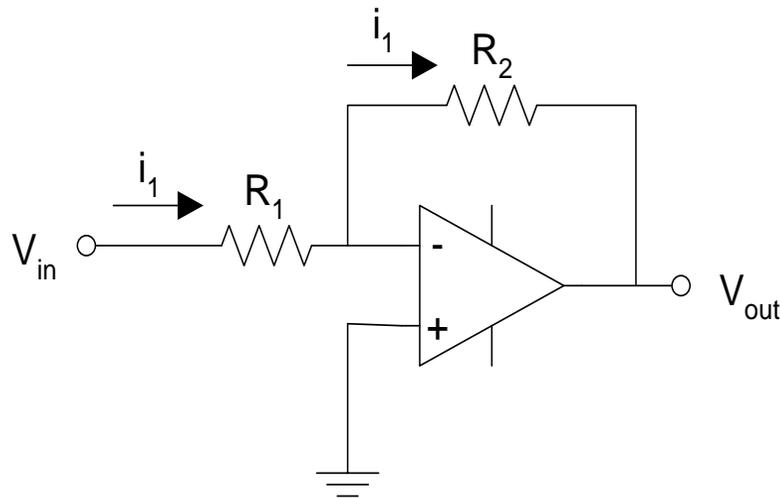
Impedancia de entrada:

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

¡¡Corriente de entrada 0!!, la salida no carga la entrada

# Circuitos Lineales con Amplificadores Operacionales

## Amplificador Inversor



El concepto de “Cortocircuito virtual” simplifica el análisis

Función de transferencia (modelo ideal)

$$\frac{v_s}{v_e} = -\frac{R_2}{R_1}$$

(Para formas de onda senoidales, produce una inversión de fase o un desfase de 180°)

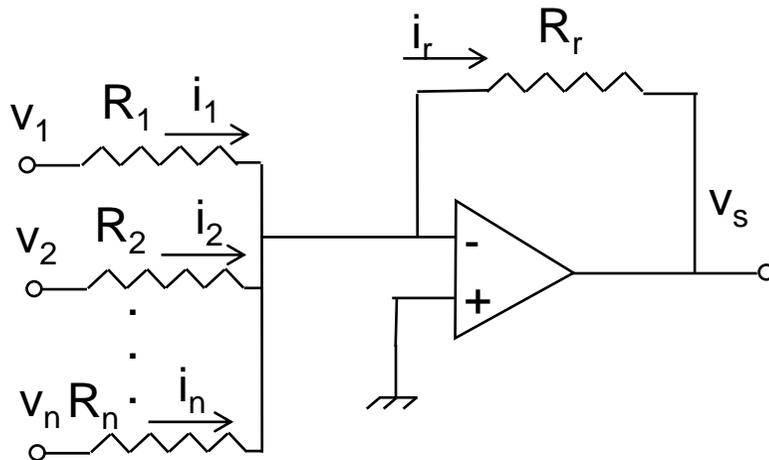
Impedancia de entrada:

$$R_e = \frac{v_e}{i_e} = R_1$$

La corriente de entrada depende de  $R_1$ ,  
La salida puede cargar la entrada.

# Circuitos Lineales con Amplificadores Operacionales

## Amplificador sumador

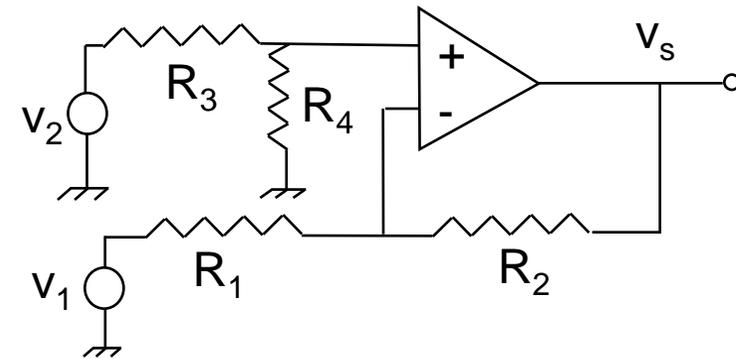


Función de transferencia

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

Utilizado en mezcla de audio

## Amplificador restador



Función de transferencia

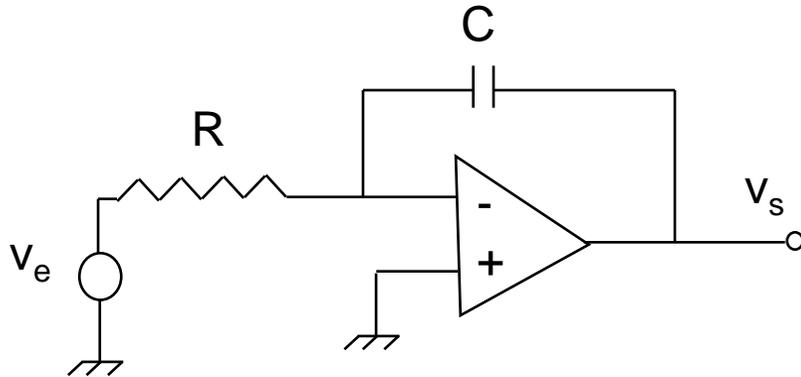
$$v_s = \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \left( \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) v_2 - \frac{R_2}{R_1} v_1$$

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

Puente equilibrado  $\Rightarrow$  **Amplificador de instrumentación**

# Circuitos Lineales con Amplificadores Operacionales

## Integrador

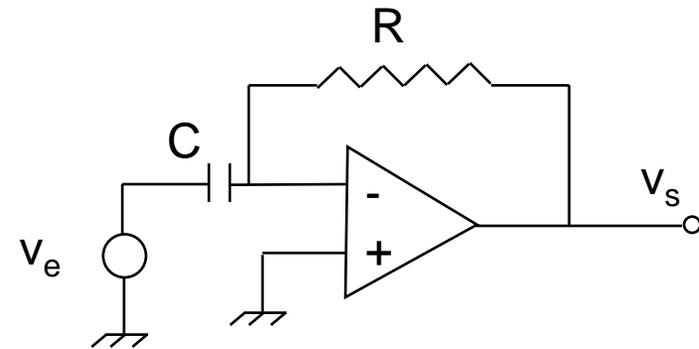


Función de transferencia

$$v_s = \frac{-1}{RC} \int v_e dt + v_s(0)$$
$$\frac{v_s}{v_e} = \frac{1}{j\omega RC}$$

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

## Diferenciador

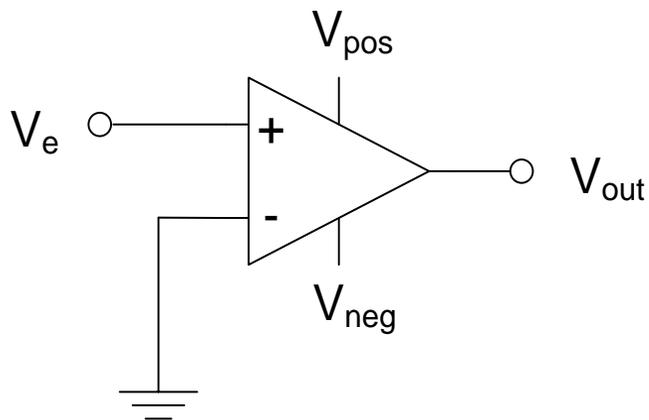


Función de transferencia

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

# Circuitos No Lineales con AO

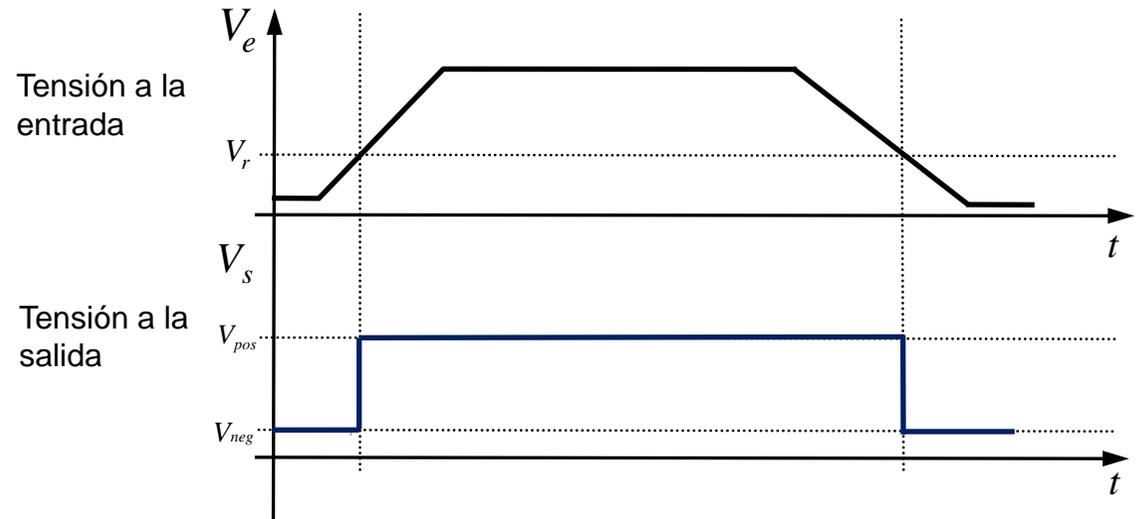
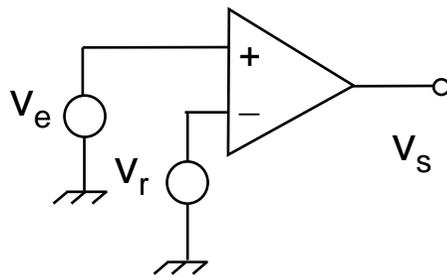
- Un AO sin realimentación se satura  $\Rightarrow$  circuitos no lineales
- El AO trabaja en la zona no lineal excepto en las transiciones de  $V_{pos}$  a  $V_{neg}$
- Los circuitos no lineales tienen muchas aplicaciones en procesamiento de señal.



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

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

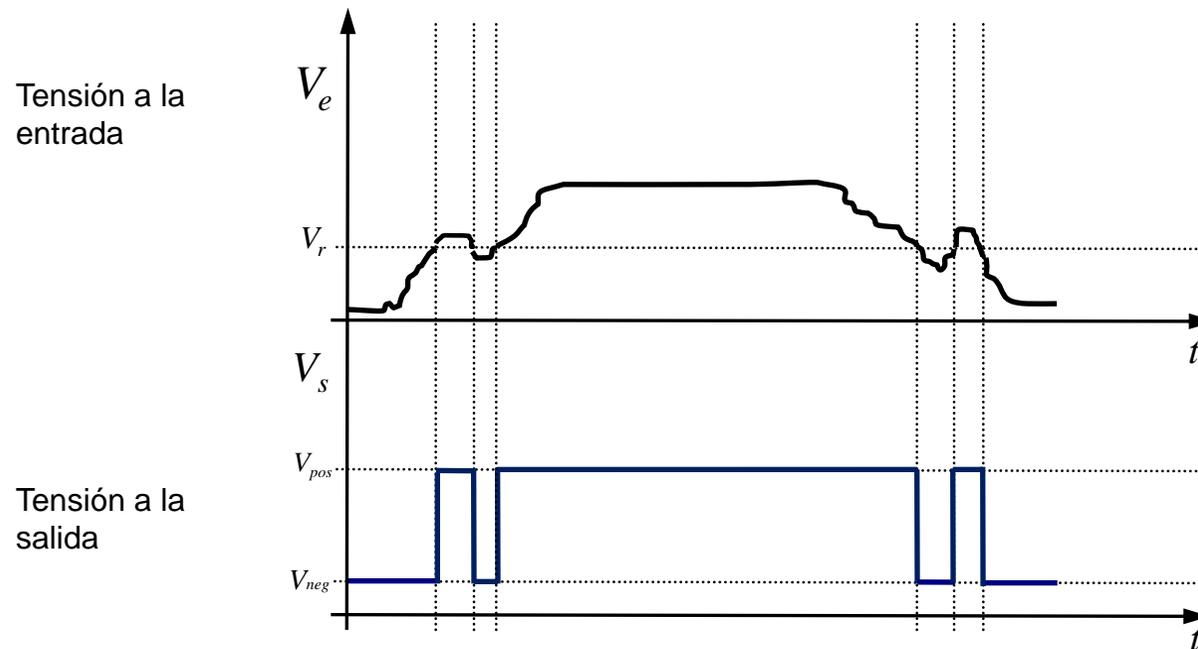
## Comparador en Lazo Abierto y Detector de Polaridad



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

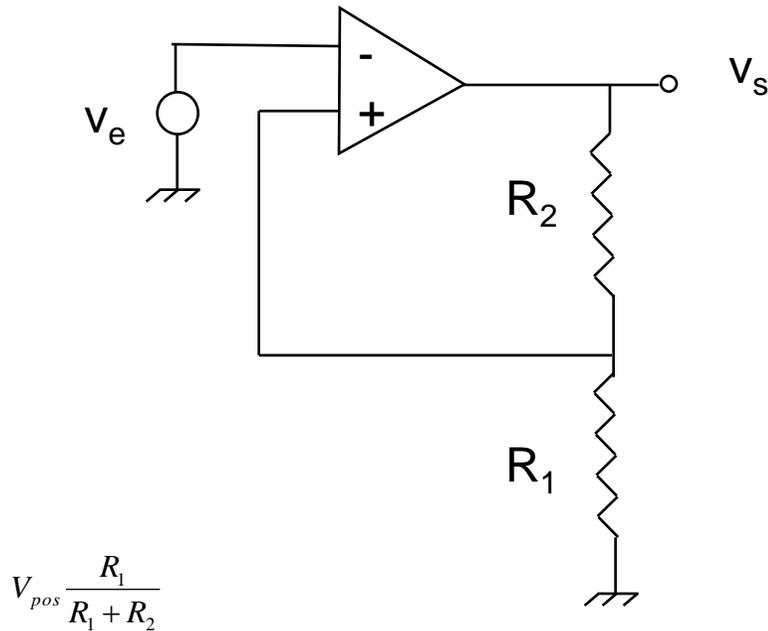
$$\text{Si } v_e < v_r \Rightarrow (v_e - v_r) < 0 \Rightarrow v_s = V_{\text{neg}}$$

## Disparador Schmitt (Schmitt Trigger). Realimentación positiva

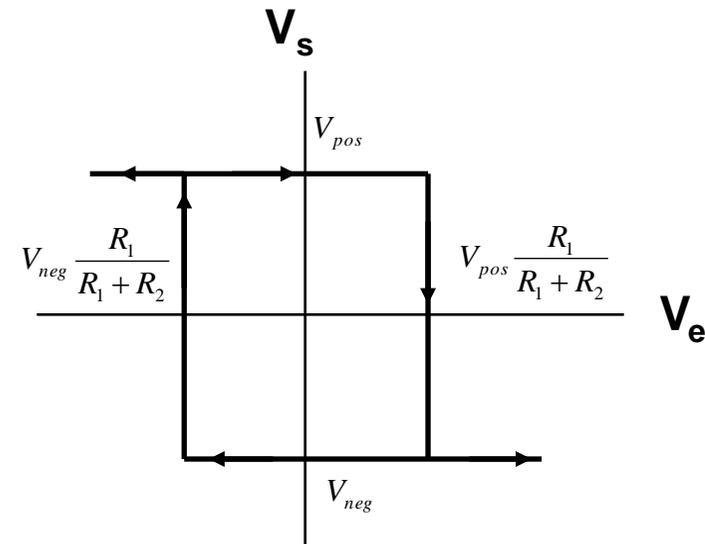


Fluctuaciones de la salida (sin histéresis)

## Disparador Schmitt (Schmitt Trigger). Realimentación positiva



Función de transferencia con histéresis



## Disparador Schmitt (Realimentación positiva)

Para  $V_e = 0 \Rightarrow V_s$  puede ser  $V_{pos}$  o  $V_{neg}$ :

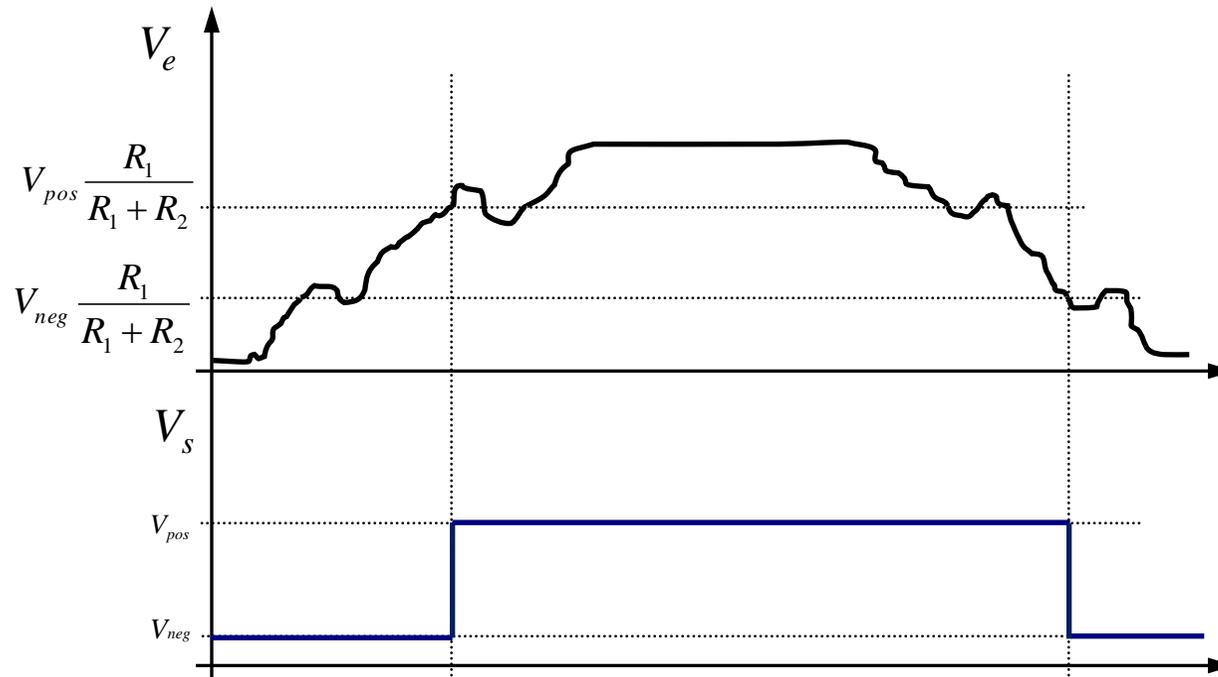
$$v_+ = \frac{v_s \cdot R_1}{R_1 + R_2}$$

$$\text{Si } v_s = V_{pos} \Rightarrow v_+ = \frac{V_{pos} \cdot R_1}{R_1 + R_2} \Rightarrow (v_+ - v_-) > 0 \Rightarrow v_s = V_{pos}$$

$$\text{Si } v_e > v_+ \Rightarrow (v_+ - v_-) < 0 \Rightarrow v_s = V_{neg} \Rightarrow v_+ = \frac{V_{neg} \cdot R_1}{R_1 + R_2}$$

$V_s$  conmuta a  $V_{pos}$  si  $V_e$  se hace más negativa que  $v_+$ , por tanto si  $V_e < \frac{V_{neg} \cdot R_1}{R_1 + R_2}$

## Disparador Schmitt (Schmitt Trigger). Realimentación positiva



Sin fluctuaciones de la salida (con histéresis)

# Amplificador Operacional No Ideal

El AO real tiene no idealidades

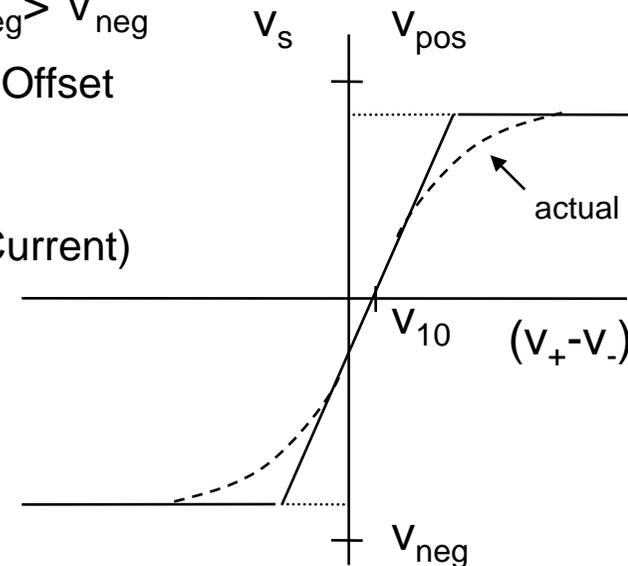
- $A_0$  finita
- $r_e$  finita
- $r_s$  no nula

- 1) Saturación de la tensión de salida
  - 2) Desviación (Offset) de la tensión de entrada
  - 3) Desviación (Offset) de la tensión de salida
  - 4) Corriente de polarización de entrada (Bias Current)
  - 5) Corriente de salida limitada
- $\left\{ \begin{array}{l} V_{\text{sat pos}} < V_{\text{pos}} \\ V_{\text{sat neg}} > V_{\text{neg}} \end{array} \right.$  Tensiones de Offset

$$V_s = A_0 (v_e - v_{10})$$

$$V_s(0) = -A_0 v_{10}$$

$$I_{\text{pol}} = (I_+ + I_-)/2$$

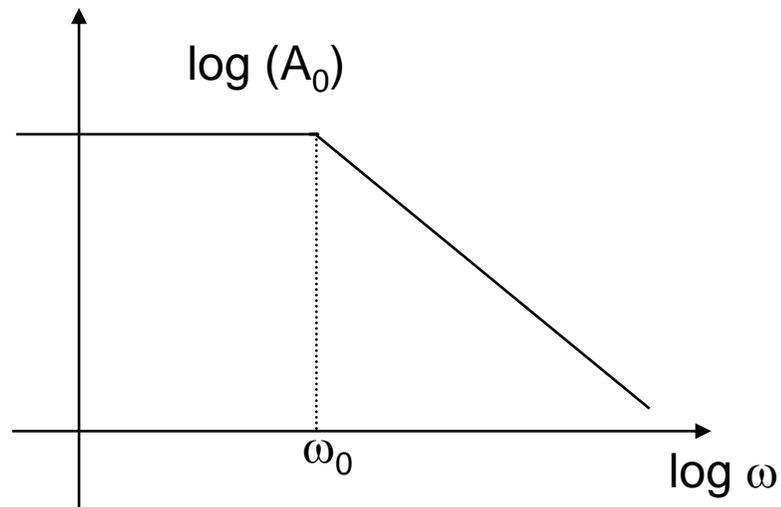


# Amplificador Operacional No Ideal

6) Respuesta en frecuencia del AO: Ancho de banda (Bandwith) finito

$$A_0(j\omega) = \frac{A_0}{\left(1 + j \frac{\omega}{\omega_0}\right)}$$

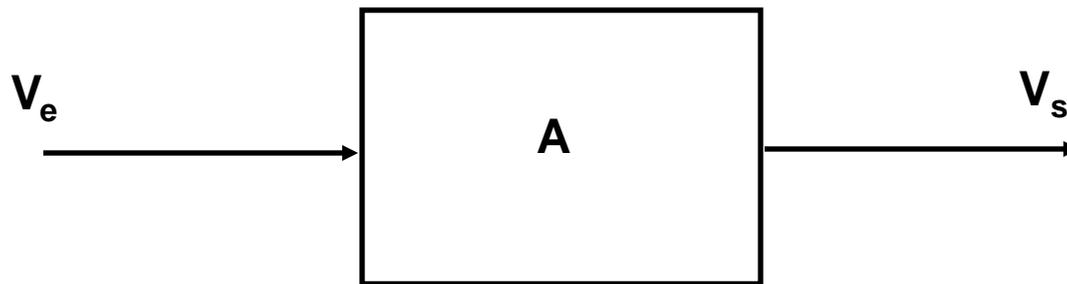
$\omega_0$  es la frecuencia de corte, que es la frecuencia a la cual el módulo de  $A_0$  ha caído hasta un 70%



# Apéndice. Realimentación Negativa

Sistema en Lazo Abierto (sin realimentación):

Ganancia en Lazo Abierto (A)



$$v_s = A \cdot v_e$$

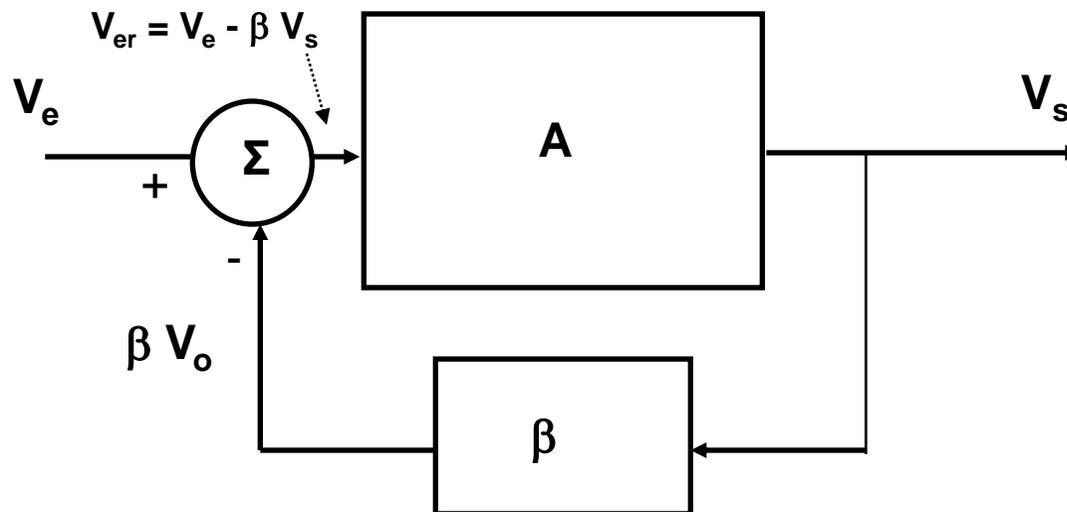
# Apéndice. Realimentación Negativa

Sistema en Lazo Cerrado (con realimentación):

$A_f$  = Ganancia en Lazo Cerrado

$\beta$  = Realimentación (>0, realimentación negativa, <0 realimentación positiva)

$V_{er}$  = Señal de error



$$v_s = \frac{A}{1 + A \cdot \beta} v_e$$

$$\Rightarrow A_f = \frac{A}{1 + A \cdot \beta}$$

$$A_f = \frac{1}{\beta} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{A \cdot \beta}}$$

# Apéndice. Realimentación Negativa

Sistema en Lazo Cerrado (con realimentación):

$A \cdot \beta$  = Ganancia de Lazo

$1/\beta$  = Ganancia Ideal en Lazo Cerrado (error de ganancia)

$1 + 1/(A \cdot \beta)$  = Término de error

Posibles escenarios: Dependen de la realimentación:

1-  $\beta > 0 \Rightarrow$  Realimentación negativa,  $A_f < A$ , sistema más **estable**.

Caso más interesante:  $\beta \cdot V_s$  restado de  $V_e$ .

2-  $\beta < 0 \Rightarrow$  Realimentación positiva,  $A_f > A$ , pero sistema **inestable**.

3-  $A \cdot \beta = -1 \Rightarrow A_f \rightarrow \infty$ , máxima inestabilidad

# Apéndice. Realimentación Negativa

Justificación de la relimentación negativa (Insensibilidad a la Ganancia)

Una perturbación que cause un cambio en  $A$  ( $\Delta A$ ) en el sistema en Lazo Abierto ¿Qué cambio produce en  $A_f$  ( $\Delta A_f$ ) en el sistema en Lazo Cerrado?:

$$\frac{\Delta A_f}{\Delta A} = \frac{\partial A_f}{\partial A} = \frac{(1 + \beta A) - \beta A}{(1 + \beta A)^2} = \frac{1}{(1 + \beta A)^2} \Rightarrow \Delta A_f = \frac{\Delta A}{(1 + \beta A)^2} \Rightarrow \Delta A_f = \frac{\Delta A}{(1 + \beta A)} \cdot \frac{A_f}{A}$$

Por tanto:

$$\frac{\Delta A_f}{A_f} = \frac{1}{(1 + \beta A)} \frac{\Delta A}{A}$$

$\left\{ \begin{array}{l} \text{Si } \beta < 0, \Delta A_f > \Delta A \rightarrow \text{Sistema más inestable} \\ \text{Si } \beta > 0, \Delta A_f < \Delta A \rightarrow \text{Sistema más estable} \end{array} \right.$

# Apéndice. Realimentación Negativa

Justificación de la relimentación negativa

Usando un AO ideal:  $A \gg 1$ :

$$A_f = \frac{A}{(1 + \beta \cdot A)} \Rightarrow A_f = \frac{1}{\frac{1}{A} + \beta} \xrightarrow{A \gg 1} A_f \approx + \frac{1}{\beta}$$

La amplificación en Lazo Cerrado  $A_f$  sólo depende del circuito externo ( $\beta$ ) y es independiente de las propiedades internas del AO ( $A_0$ ,  $r_e$ ,  $r_s$ ....), como ya sabíamos.