



## Tema 2. El amplificador Operacional

M<sup>a</sup> del Carmen Coya Párraga

1



## El amplificador Operacional: índice

- 2.1) Introducción.
- 2.2) Representación simplificada. Aproximación ideal del A.O.
- 2.3) Circuitos lineales con A.O.
  - 2.4.1) Amplificador no inversor
  - 2.4.2) Amplificador inversor
  - 2.4.3) A.O. Seguidor de voltaje
  - 2.4.4) Amplificador diferencial
  - 2.4.5) Integrador
  - 2.4.6) Diferenciador
- 2.5) Circuitos no lineales: Comparador y Disparador de Schmitt
- 2.6) Propiedades no ideales de los A.O.

2



## El amplificador Operacional

- ☞ Dispositivo básico en el procesamiento de señales, en los dispositivos electrónicos.
- ☞ Es un **elemento no lineal**, aunque en muchas ocasiones se comporta como un elemento de circuito lineal.

Electrónica analógica → amplificador  
Electrónica digital → inversor

3



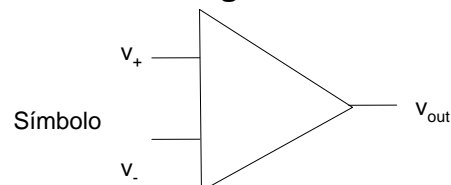
## El amplificador Operacional

- ☞ El Amplificador Operacional es un **amplificador de gran ganancia**, empleado para llevar a cabo múltiples funciones (filtrado analógico, rectificación, conmutación, acoplamiento...)

☞ “Circuito integrado básico”

$$V_{out} = A(v_+ - v_-)$$

GANANCIA



4



## El amplificador Operacional

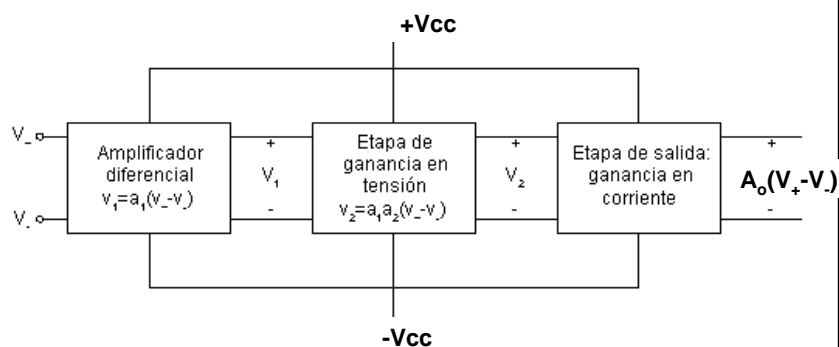
☞ Diversidad de funciones en el procesamiento de la señal:

- amplificación
- filtrado analógico
- acoplamiento
- rectificación
- detección umbral
- conmutación digital...

5



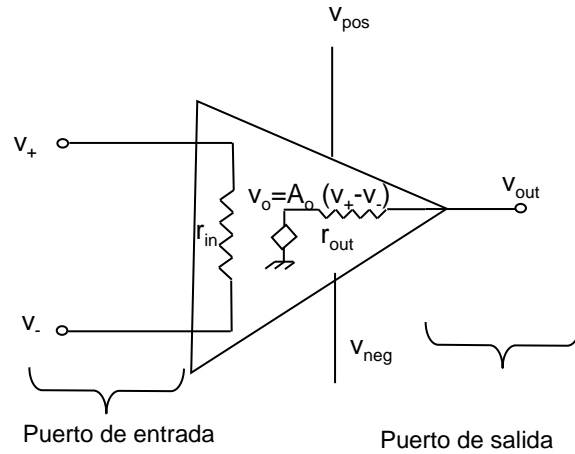
## El amplificador Operacional como C.I



6



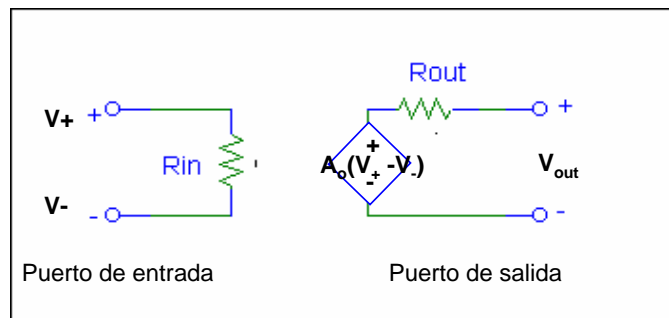
### MODELO SIMPLIFICADO DEL AMPLIFICADOR OPERACIONAL



7



### MODELO SIMPLIFICADO DEL AMPLIFICADOR OPERACIONAL



8



### MODELO SIMPLIFICADO DEL AMPLIFICADOR OPERACIONAL

Valores típicos

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

$$r_{in} \geq 10^6 \Omega$$

$$r_{out} \leq 100 \Omega$$

$V_o$  tiene como límites ideales  $v_{pos}$  y  $v_{neg}$

$$v_o = A_0(v_+ - v_-) \text{ si } v_{neg} \leq A_0(v_+ - v_-) \leq v_{pos}$$

$$v_o = v_{pos} \text{ si } A_0(v_+ - v_-) > v_{pos}$$

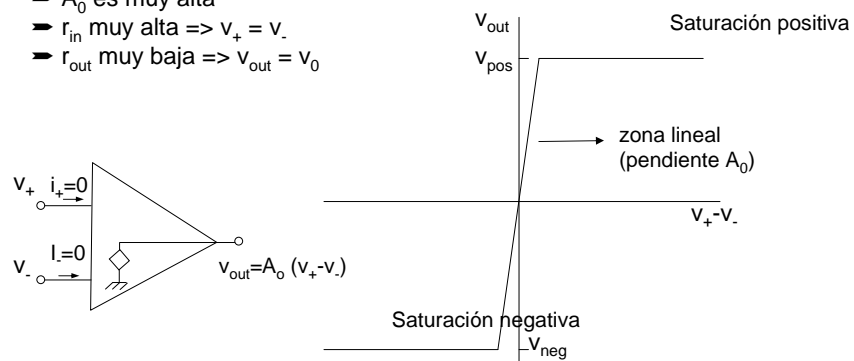
$$v_o = v_{neg} \text{ si } A_0(v_+ - v_-) < v_{neg}$$

9



### APROXIMACIÓN IDEAL DEL AMPLIFICADOR OPERACIONAL

- Los límites de saturación son los voltajes de alimentación ( $v_{pos}$  y  $v_{neg}$ )
- $A_0$  es muy alta
- $r_{in}$  muy alta  $\Rightarrow v_+ = v_-$
- $r_{out}$  muy baja  $\Rightarrow v_{out} = v_o$



10



## CIRCUITOS LINEALES CON A.O.

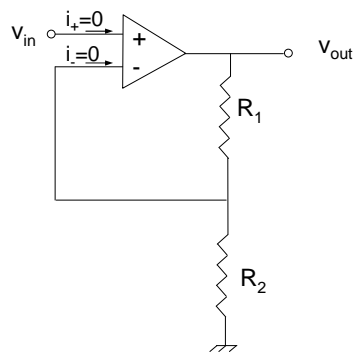
### Consideraciones

- 1) El comportamiento del A.O. se considera ideal
  - 2) El AO opera en condiciones de lazo cerrado (**retroalimentación negativa**)
  - 2) Como veremos, **las características del circuito dependerán de los valores externos y no del A.O.**
- => **Los circuitos son independientes de la ganancia interna del A.O y de  $r_{in}$  y  $r_{out}$**

11



### Amplificador no inversor



Función de transferencia

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{R_2 + R_1}{R_2}$$

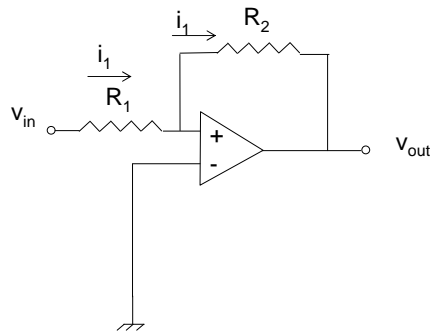
Resistencia de entrada

$$R_{in} = \frac{v_{in}}{i_{in}} = \infty$$

12



### Amplificador inversor



Función de transferencia

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = -\frac{R_2}{R_1}$$

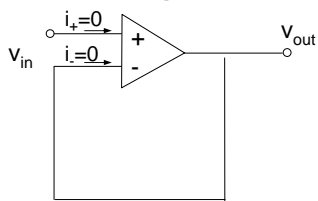
Resistencia de entrada

$$R_{in} = \frac{v_{in}}{i_{in}} = R_1$$

13



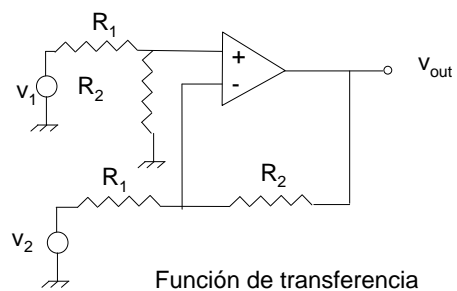
### Seguidor de voltaje



Función de transferencia

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = 1$$

### Amplificador diferencial



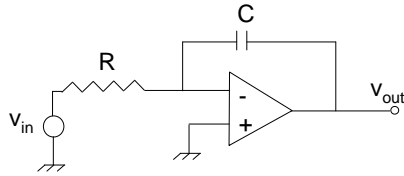
Función de transferencia

$$v_{out} = \frac{R_2}{R_1} (v_1 - v_2)$$

14



### Integrador

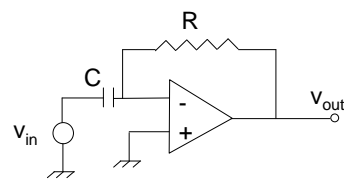


Función de transferencia

$$v_{out} = \frac{-1}{RC} \int v_{in} dt$$

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{1}{j\omega R_1 C}$$

### Diferenciador



Función de transferencia

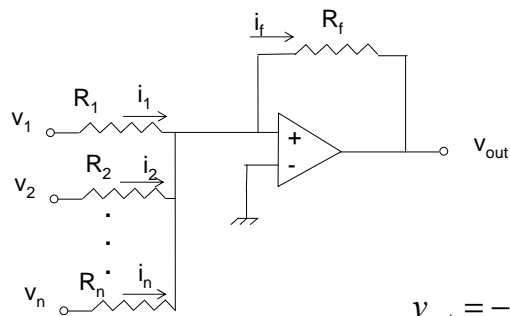
$$v_{out} = -RC \frac{dv_{in}}{dt}$$

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = -j\omega CR_2$$

15



### Amplificador sumador



Función de transferencia

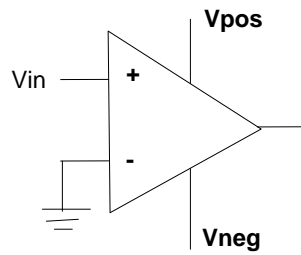
$$v_{out} = -R_f \left( \frac{v_1}{R_1} + \frac{v_2}{R_2} + \dots + \frac{v_n}{R_n} \right)$$

16



### CIRCUITOS NO LINEALES

- Un AO conectado sin retroalimentación se saturara => circuitos no lineales
- El AO funciona en su zona no lineal excepto en las transiciones de  $V_{pos}$  a  $V_{neg}$
- Circuito no lineal con muchas aplicaciones en el procesamiento de señales.



$$v_{in} \geq 0 \Rightarrow V_{out} = V_{pos}$$

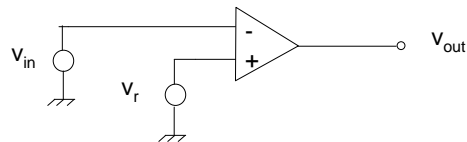
$$v_{in} \leq 0 \Rightarrow V_{out} = V_{neg}$$

17



### CIRCUITOS NO LINEALES

#### Comparador e indicador de polaridad de lazo abierto



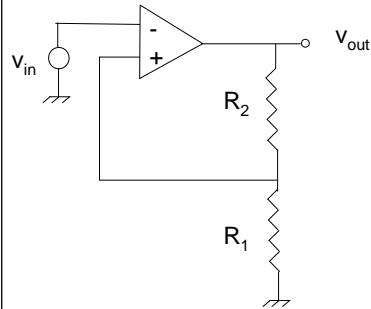
$$\text{Si } v_{in} > v_r \Rightarrow (v_{in} - v_r) > 0 \Rightarrow v_{out} = v_{pos}$$

$$\text{Si } v_{in} < v_r \Rightarrow (v_{in} - v_r) < 0 \Rightarrow v_{out} = v_{neg}$$

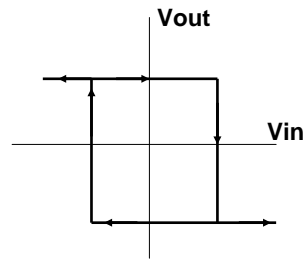
18



### Disparador Schmitt (Utiliza retroalimentación positiva)



Función de transferencia con histéresis



19



### Disparador Schmitt (Utiliza retroalimentación positiva)

Para  $v_{in} = 0 \Rightarrow v_{out}$  puede ser  $V_{pos}$  ó  $V_{neg}$ :

$$v_+ = \frac{v_{out} R_1}{R_1 + R_2}$$

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

$$\text{Si } v_{in} > v_+ \Rightarrow (v_+ - v_-) < 0 \Rightarrow v_{out} = v_{neg} \Rightarrow v_+ = \frac{v_{neg} R_1}{R_1 + R_2}$$

$V_{out}$  sólo regresará a  $V_{pos}$  si  $V_{in}$  se hace más negativa que  $V_+$ , es decir si  $V_{in} = 0$

20



### Propiedades no lineales de los AO

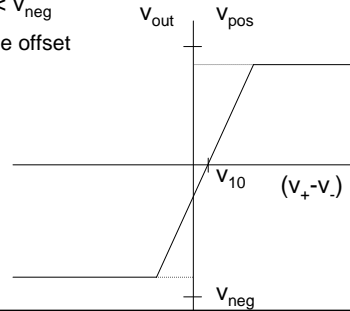
El AO real no es ideal

$$\begin{cases} A_0 \text{ finita} \\ r_{in} \text{ finita} \\ r_{out} \text{ no nula} \end{cases}$$

- 1) Niveles de saturación de salida
- 2) Voltaje de desvío de entrada
- 3) Voltaje de desvío de salida
- 4) Corriente de polarización de entrada
- 5) Corriente de salida (limitada en un AO real)

$$\begin{cases} V_{sat \text{ pos}} < V_{pos} \\ V_{sat \text{ neg}} < V_{neg} \end{cases}$$

tensiones de offset



$$V_{out} = A_0(v_{in} - V_{10})$$

$$V_{out}(0) = -A_0 V_{10}$$

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

21

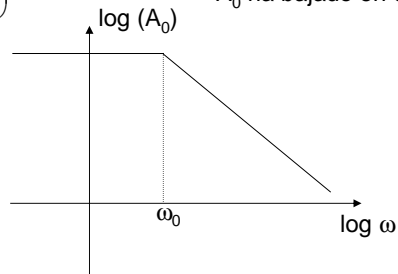


### Propiedades no lineales de los AO

- 6) Respuesta en frecuencia del AO: BW finito

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

$\omega_0$  es la frecuencia de corte, frecuencia a la que el módulo de  $A_0$  ha bajado en un 70 %

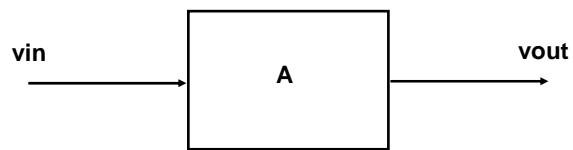


22



### Apéndice 1: Realimentación

Sistema en lazo abierto (sin realimentación):  
A factor de amplificación en lazo abierto.



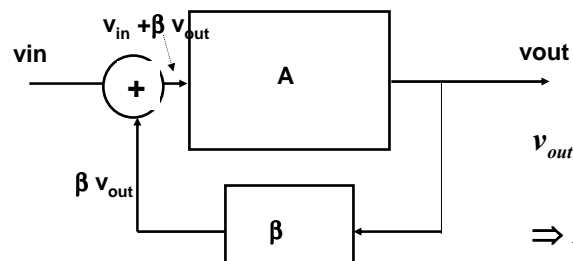
$$v_{out} = Av_{in}$$

23



### Apéndice 1: Realimentación

Sistema en lazo cerrado (con realimentación):  
 $A_f$  = factor de amplificación en lazo cerrado.  
 $\beta$  = factor de realimentación (<0, realimentación negativa, >0 positiva)



$$v_{out} = \frac{A}{1 - A \cdot \beta} v_{in}$$

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

24



### Apéndice 1: Realimentación

Sistema en lazo cerrado (con realimentación):

Casos posibles: dependen del factor de realimentación:

1-  $\beta < 0 \Rightarrow$  realimentación negativa,  $A_f < A$ , pero sistema más estable.

Caso más interesante.  $\beta$   $v_{out}$  desfasado  $180^\circ$  respecto a la entrada.

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

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

25



### Apéndice 1: Realimentación

Justificación realimentación negativa

Supongamos que una "inestabilidad" causa un cambio en  $A$  ( $\Delta A$ ) del sistema sin realimentar ¿cuánto cambia  $A_f$  ( $\Delta A_f$ ) del sistema realimentado?. El cambio será:

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

Si dividimos por  $A_f$ :

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

{ Si  $\beta < 0$ ,  $\Delta A_f > \Delta A \rightarrow$  MAYOR INESTABILIDAD  
Si  $\beta < 0$ ,  $\Delta A_f < \Delta A \rightarrow$  AUMENTA LA ESTABILIDAD DEL SISTEMA

26



### Apéndice 1: Realimentación

Justificación realimentación negativa

Además como utilizamos Amplificadores Operacionales ideales:  $A \gg 1$ :

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

El factor de amplificación  $A_f$ , sólo depende del circuito externo ( $\beta$ ), y no de las propiedades internas del amplificador operacional ( $A$ ,  $r_{in}$ ,  $r_{out}$ ...), como ya habíamos comentado.