

Tema 3. Amplificador operacional (AO) y sus etapas lineales

- Introducción
- Análisis de circuitos con AO
- Etapas básicas con realimentación negativa
- Amplificadores de instrumentación
- Conversión V/I e I/V
- Rectificadores de precisión
- Amplificadores logarítmicos y exponenciales
- Generadores de funciones analógicos

OBJETIVOS DEL TEMA

- Una vez estudiado este tema deberá:
 - ❑ Conocer las ventajas e inconvenientes de los AO.
 - ❑ Saber analizar etapas lineales con AO.
 - ❑ Conocer las etapas lineales básicas con AO.
 - ❑ Ser capaz de usar esas etapas como bloques para el diseño de circuitos más complejos.
 - ❑ Conocer las etapas con AO y diodos y ser capaz de analizarlas.
 - ❑ Ser capaz de usar esas etapas como bloques para el diseño de circuitos más complejos.

Introducción

- El más común de los amplificadores diferenciales es el **amplificador operacional (AO)**.

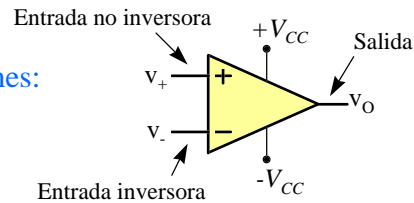
- Un **AO ideal** verifica las ecuaciones:

$$-V_{CC} \leq v_o \leq +V_{CC}$$

$$v_o = A_v (v_+ - v_-)$$

$$\parallel$$

$$\infty$$

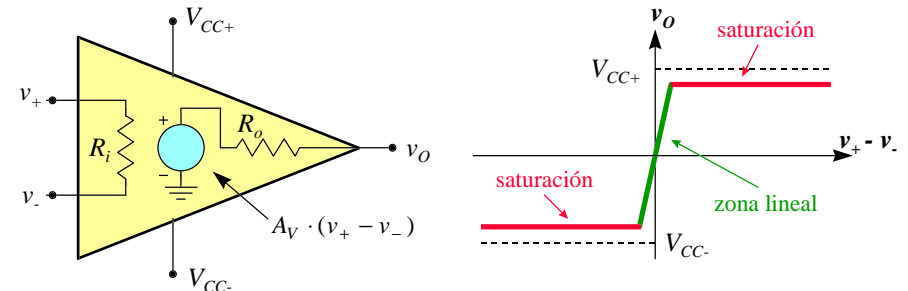


- ¿Por qué son útiles los amplificadores operacionales?

- ❑ Son muy fáciles de utilizar.
- ❑ Permiten diseñar bloques analógicos simples y poco sensibles a los componentes.
- ❑ Permiten realizar bloques complejos con pocos componentes.

Introducción

- Modelo simplificado del AO real:



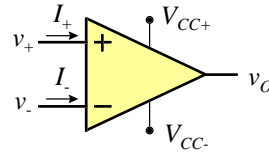
- Diferencias básicas entre **AO ideal** y **AO real (uA741)**:

	A_v	R_i	R_o	BW	Salida hasta:
❑ AO ideal	∞	∞	0	∞	alimentaciones
❑ uA741	$2 \cdot 10^5$	$2M\Omega$	75Ω	10Hz	$\cong 2V$ por debajo de alim.

Análisis de circuitos con AO

- Se supone que el AO es ideal.
 - Por las entradas no circula intensidad.

$$I_+ = I_- = 0$$



- Si no existe realimentación, o hay realimentación positiva,
 - la ganancia de la etapa es infinita $\Rightarrow v_O = V_{CC+}$ o $v_O = V_{CC-}$
 - o sea, el AO está saturado.

- Si existe realimentación negativa,
 - Si $v_O = V_{CC+}$ o V_{CC-} , el AO está saturado.
 - Si no, el AO está en zona lineal y como A_V es infinita:

$$A_f = \frac{A_V}{1 + A_V B} \approx \frac{A_V}{A_V B} = \frac{1}{B} \Rightarrow \left. \begin{array}{l} v_O = A_f \cdot v_I \text{ finito} \\ v_O = A_V \cdot (v_+ - v_-) \end{array} \right\} \Rightarrow v_+ = v_-$$

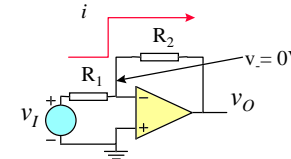
Etapas básicas con realimentación negativa

- En general, habrá realimentación negativa cuando la salida se lleve a la entrada invertida.
 - P. ej. cuando la salida del AO está conectada a su entrada inversora.

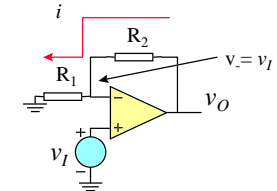
- Ejemplos:

$$\frac{v_I - 0}{R_1} = \frac{0 - v_O}{R_2} \Rightarrow v_O = -v_I \frac{R_2}{R_1}$$

$$\frac{v_I - 0}{R_1} = \frac{v_O - 0}{R_2 + R_1} \Rightarrow v_O = v_I \frac{R_2 + R_1}{R_1} \Rightarrow v_O = v_I \left(\frac{R_2}{R_1} + 1 \right)$$

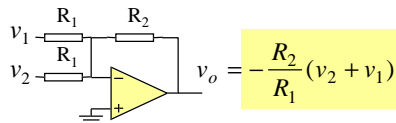


Amplificador inversor

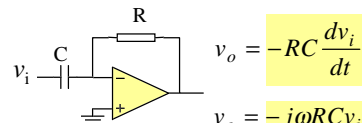


Amplificador no inversor

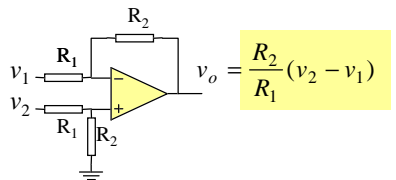
Otras etapas lineales



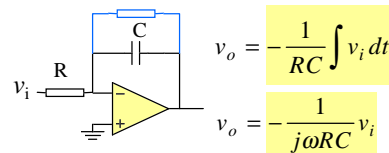
Amplificador sumador



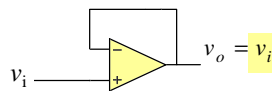
Amplificador derivador



Amplificador restador



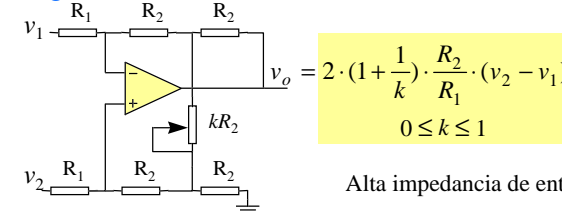
Amplificador integrador



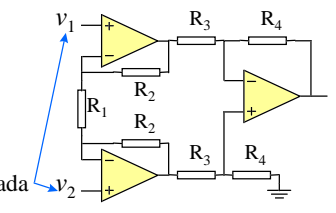
Seguidor de tensión

Amplificadores de instrumentación

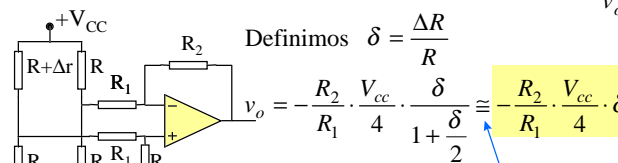
- Amplificadores diferenciales que permiten un ajuste simple de la ganancia.



Alta impedancia de entrada



$$v_O = \frac{R_4}{R_3} \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{R_2}{R_1} \right) \cdot (v_2 - v_1)$$



Definimos $\delta = \frac{\Delta R}{R}$

$$v_O = - \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{V_{cc}}{4} \cdot \frac{\delta}{1 + \frac{\delta}{2}} \approx - \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{V_{cc}}{4} \cdot \delta$$

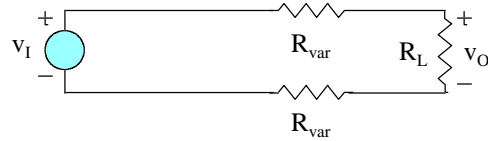
si $\delta \ll 1$

Conversión V/I (Amplif. transconductancia)

- Usos:
 - ❑ Transmitir una tensión, sin depender de la resistencia de la línea.
 - ❑ Realizar una fuente de corriente controlada por tensión.

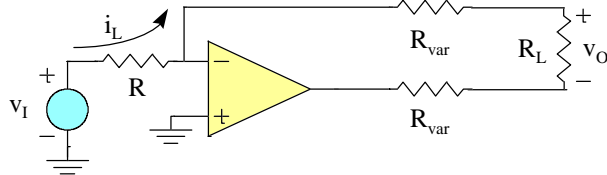
- Problema:

$$v_O = \frac{R_L}{R_L + 2 \cdot R_{var}} \cdot v_I$$



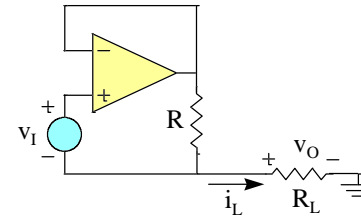
- Solución con R_L flotante:

$$v_O = R_L \cdot i_L = \frac{R_L}{R} \cdot v_I$$



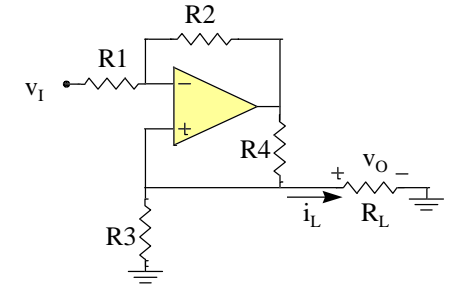
Conversión V/I (Amplif. transconductancia)

- Con R_L a tierra



$$i_L = \frac{v_I}{R} \quad v_O = R_L \cdot i_L$$

- Con R_L y fuente a tierra

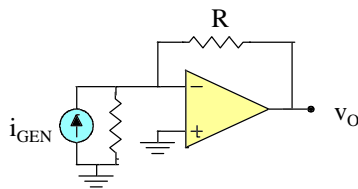


$$i_L = \frac{-v_I}{R_3} \quad \text{si} \quad \frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

La última configuración sirve como fuente de corriente controlada por tensión, pero da poca corriente (limitación del AO)

Conversión I/V (Amplif. transresistencia)

- Hay transductores cuyo modelo se aproxima a una fuente de corriente con una resistencia muy baja y/o variable (Fotodiodos).
- Para conseguir una tensión apreciable se requiere un amplificador de transresistencia o convertor I/V.



$v_O = -R \cdot i_{GEN}$ ya que por R_{GEN} no circula corriente

Rectificadores de precisión

- Permiten rectificar señales menores que la tensión umbral de los diodos.

- ❑ Utilizan AO y diodos.
- ❑ El análisis simple consiste en:
 - Suponer inicialmente que los diodos están en OFF.
 - Verificar la suposición.

- Diodo de precisión.

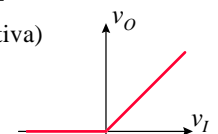
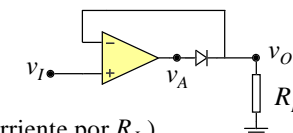
$$v_- = v_O \quad \text{y} \quad v_+ = v_I$$

$$\text{Sup. D OFF} \Rightarrow \begin{cases} v_O = 0 \text{ (no hay corriente por } R_L) \\ v_A = V_{CC+} \text{ o } v_A = V_{CC-} \text{ (No hay realim. negativa)} \end{cases}$$

$$\text{Si } v_I < 0 \Rightarrow v_A = V_{CC-} \Rightarrow \text{D OFF} \Rightarrow v_O = 0$$

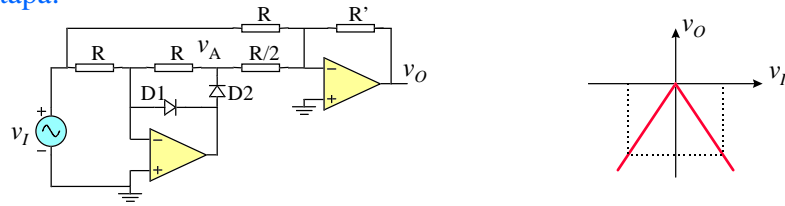
$$\text{Si } v_I > 0 \Rightarrow v_A = V_{CC+} \Rightarrow \text{D ON} \Rightarrow v_O = v_I$$

No aparece la tensión umbral del diodo



Rectificador de onda completa de precisión

- Etapa:



- Análisis:

$$\text{si } v_I < 0 \begin{cases} \text{D1 OFF} \\ \text{D2 ON} \end{cases} \Rightarrow v_A = -v_I \Rightarrow v_O = -R' \left(\frac{v_A}{R/2} + \frac{v_I}{R} \right) \Rightarrow v_O = \frac{R'}{R} \cdot v_I$$

$$\text{si } v_I > 0 \begin{cases} \text{D1 ON} \\ \text{D2 OFF} \end{cases} \Rightarrow v_A = 0 \Rightarrow v_O = -\frac{R'}{R} \cdot v_I$$

□ Ejercicio: comprobar el estado de los diodos.

Amplificador logarítmico

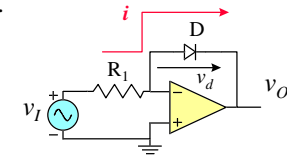
- La corriente por un diodo está controlada por: $I = I_s (e^{qv_d/kT\eta} - 1)$

□ donde:

$$E_o = \frac{kT}{q} = 25mV \text{ a } 25^\circ C \quad I_s \cong 1nA \quad 1 < \eta < 2 \rightarrow \begin{cases} 1 \rightarrow Ge \\ 2 \rightarrow Si \end{cases}$$

□ Usando un diodo en la red de realimentación podemos conseguir una ganancia logarítmica o exponencial.

- Amplificador logarítmico.

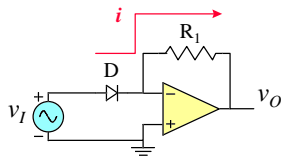


$$I = I_s (e^{qv_d/kT\eta} - 1) \Rightarrow v_d = \frac{kT}{q} \cdot \ln \left(1 + \frac{I}{I_s} \right) \Rightarrow v_o = -v_d = -\frac{kT}{q} \cdot \ln \left(1 + \frac{v_I}{R_1 I_s} \right)$$

$$\text{si } v_I \gg R_1 I_s \Rightarrow v_o = -\frac{kT}{q} \cdot (\ln(v_I) - \ln(R_1 I_s)) \Rightarrow v_o = k_1 \cdot \ln(v_I) + k_2$$

Amplificador exponencial

- Intercambiando el diodo por la resistencia:



$$v_o = -R_1 i = -R_1 I_s (e^{qv_i/kT} - 1) \Rightarrow v_o = -R_1 I_s (e^{qv_i/kT})$$

$$\text{si } v_i \gg \frac{kT}{q}$$