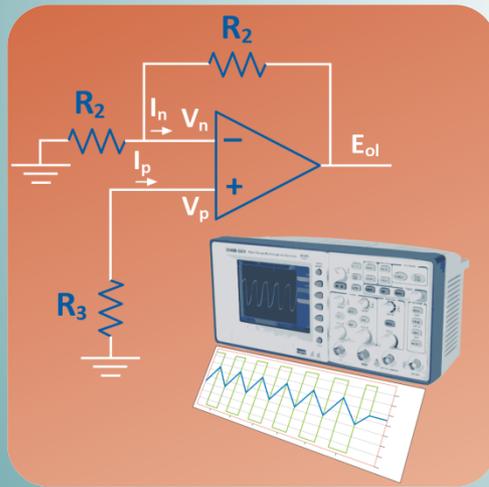


Electrónica Básica

Tema A.1.

El amplificador operacional y de transconductancia:
conceptos básicos



Gustavo A. Ruiz Robredo

Juan A. Michell Martín

DPTO. DE ELECTRÓNICA Y COMPUTADORES

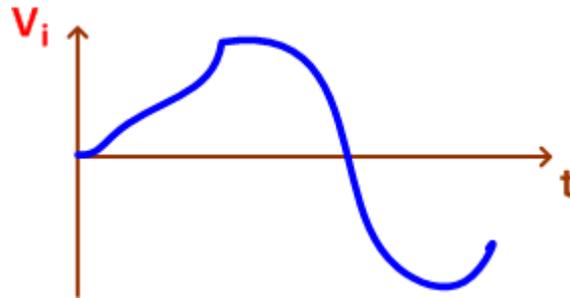
Este tema se publica bajo Licencia:

[Creative Commons BY-NC-SA 3.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/)

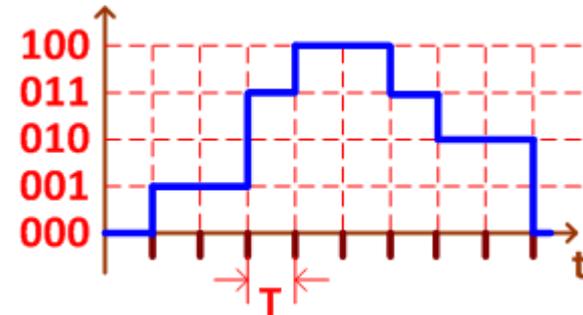


Introducción: Analógico versus Digital

- Las señales que transmiten información pueden ser analógica y digital:
 - **Señales analógicas** toman un rango de amplitudes continuo en el tiempo.
 - **Señales digitales** toman un conjunto finito de valores de amplitud (a menudo binarios) a intervalos de tiempo generalmente espaciados uniformemente en el tiempo. Es decir, son señales discretas en amplitud y frecuencia.



Señal analógica



Señal digital

- El mundo real es analógico (sonido, luz, magnitudes físicas,)
- Muchas de las entradas/salidas de los sistemas electrónicos son analógicos.
- Muchos sistemas electrónicos, especialmente los que manejan amplitudes bajas o muy alta frecuencia, requieren una aproximación analógica.

Mundo analógico

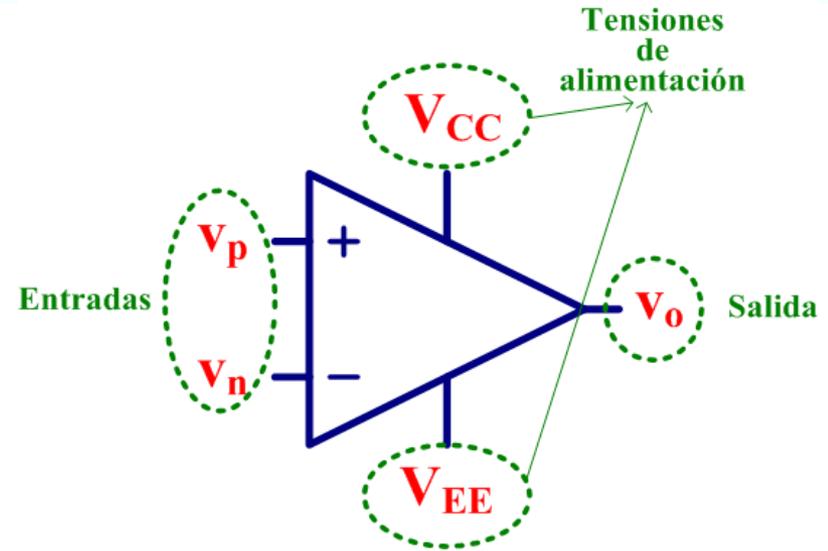


- El proceso de **amplificación** de señales de baja amplitud es una de las operaciones básicas que es necesario realizar con circuitos analógicos → **Necesitamos amplificadores.**
- Idealmente, un amplificador produce una señal de salida con la misma forma de onda que la entrada pero de mayor amplitud.
- El **amplificador operacional** es el componente básico de la electrónica analógica por su versatilidad y prestaciones.

Introducción al amplificador operacional

- Usualmente denominados AO o “*Operational amplifier*” o “op-amp” o “Op Amps” o OA
 - Un **amplificador** es un dispositivo que acepta una señal de entrada variable y produce una señal de salida similar de mayor amplitud.
- Normalmente se conecta su salida con la entrada a través de una **realimentación** (“Feedback Loop”)
- La mayoría de los OAs se comportan como **amplificadores de tensión**: proporcionan una tensión salida que es una versión amplificada de la tensión de entrada.
- Los OAs constituyen el **componente básico** de la mayoría de los sistemas analógicos.
- El nombre de amplificador operacional tiene su origen en la capacidad de realizar **operaciones matemáticas** tales como derivación e integración.
- Las técnicas de fabricación de circuitos integrados han permitido desarrollar OAs **de altas prestaciones a bajo precio**.

➤ Un **amplificador operacional** es un circuito monolítico integrado de altas prestaciones con una entrada diferencial (v_p, v_n) y salida (v_o), generalmente, simple.



➤ Es uno de los dispositivos electrónicos más utilizados: equipos de consumo, industria y militar.

➤ Campos de uso:

- Aplicaciones lineales.
- Aplicaciones no-lineales.
- Circuitos dependientes de la frecuencia

▪ Breve reseña histórica

- **1941:** Primer OA basado en válvulas.
- **1961:** Primeros OAs con componentes discretos..
- **1963:** Primer OA monolito μ A702 diseñado por by Bob Widlar (Fairchild Semiconductor). Sin mucho éxito. Bob Widlar diseñó el μ A709 con éxito total.
- **1968:** Se fabrica el μ A741 (Fairchild Semiconductor). Rotundo éxito. Todavía se sigue fabricando en la actualidad.
- **1970:** Primer OA con diseño FET.
- **1972:** OAs con alimentación simple (*Single supply*).

.... Diversificación.

▪ Clasificación

➤ Aplicaciones **militares, industriales o comerciales.**

- Comercial: 0 °C a 70 °C (a veces -10 °C a 70 °C)

- Industrial: -40 °C a 85 °C (a veces -25 °C a 85 °C)

- Militar: -55 °C a 125 °C (a veces -65 °C a 275 °C)

➤ **Compensación** interna o externa para evitar inestabilidad.

➤ **Rail-to-rail** input/output con niveles de tensión muy próximos a las tensiones de alimentación.

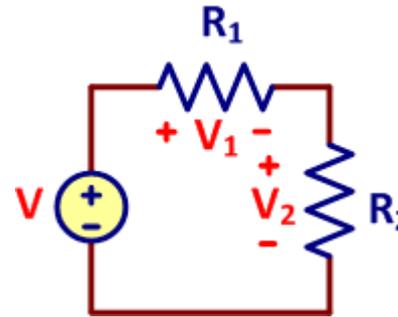
➤ OAs **programables** mediante una resistencia externa para ajustar ganancia, respuesta en frecuencia, etc...

➤ De acuerdo a su **propósito**: bajo ruido, ancho de banda, consumo de potencia, etc..

Teoría de Circuitos: Repaso

■ Ley de Kirchoff de tensión

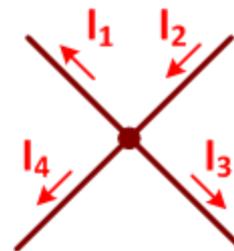
Kirchoff's Voltage Law o KVL



$$V = \sum_i V_i = V_1 + V_2$$

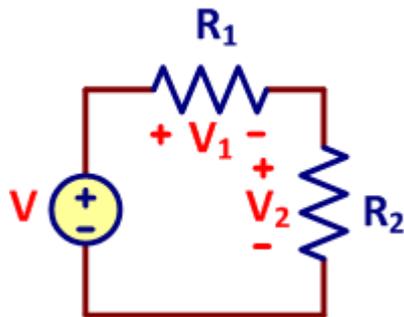
■ Ley de Kirchoff de corriente

Kirchoff's Current Law o KCL



$$\sum_i I_i = 0 \Rightarrow I_1 - I_2 + I_3 + I_4 = 0$$

■ Regla de división de tensión

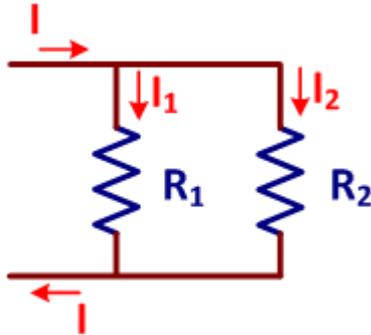


$$V_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V$$

$$V_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V$$

Prob A.I.1

■ Regla de división de corriente

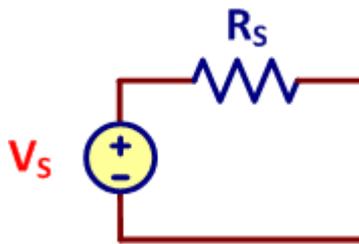


$$I_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I$$

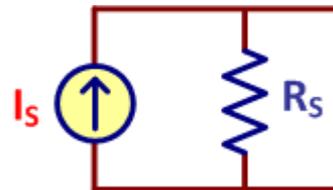
$$I_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} I$$

Prob A.I.2

■ Equivalente Thevenin y Norton



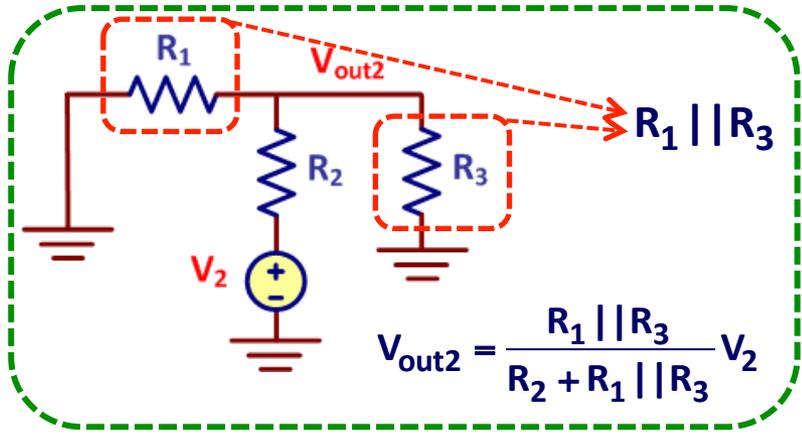
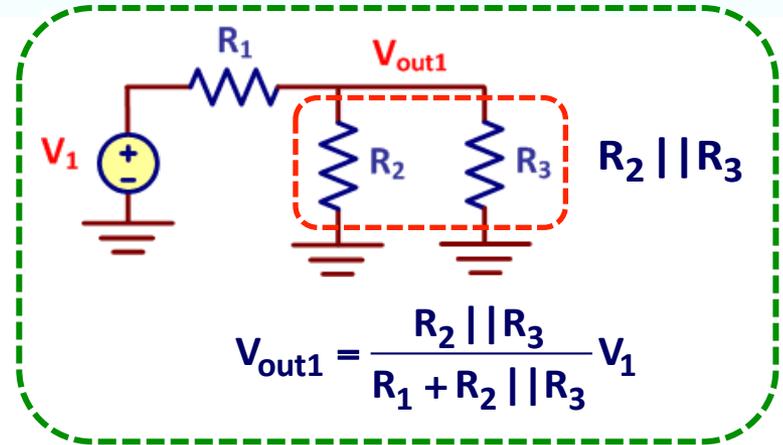
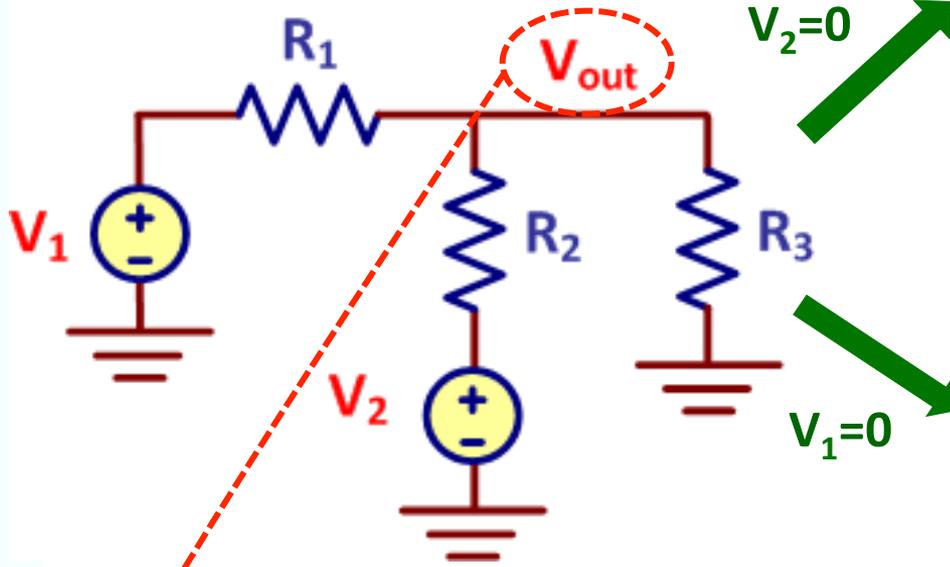
Thevenin



Norton

$$I_S = \frac{V_S}{R_S}$$

Principio de superposición



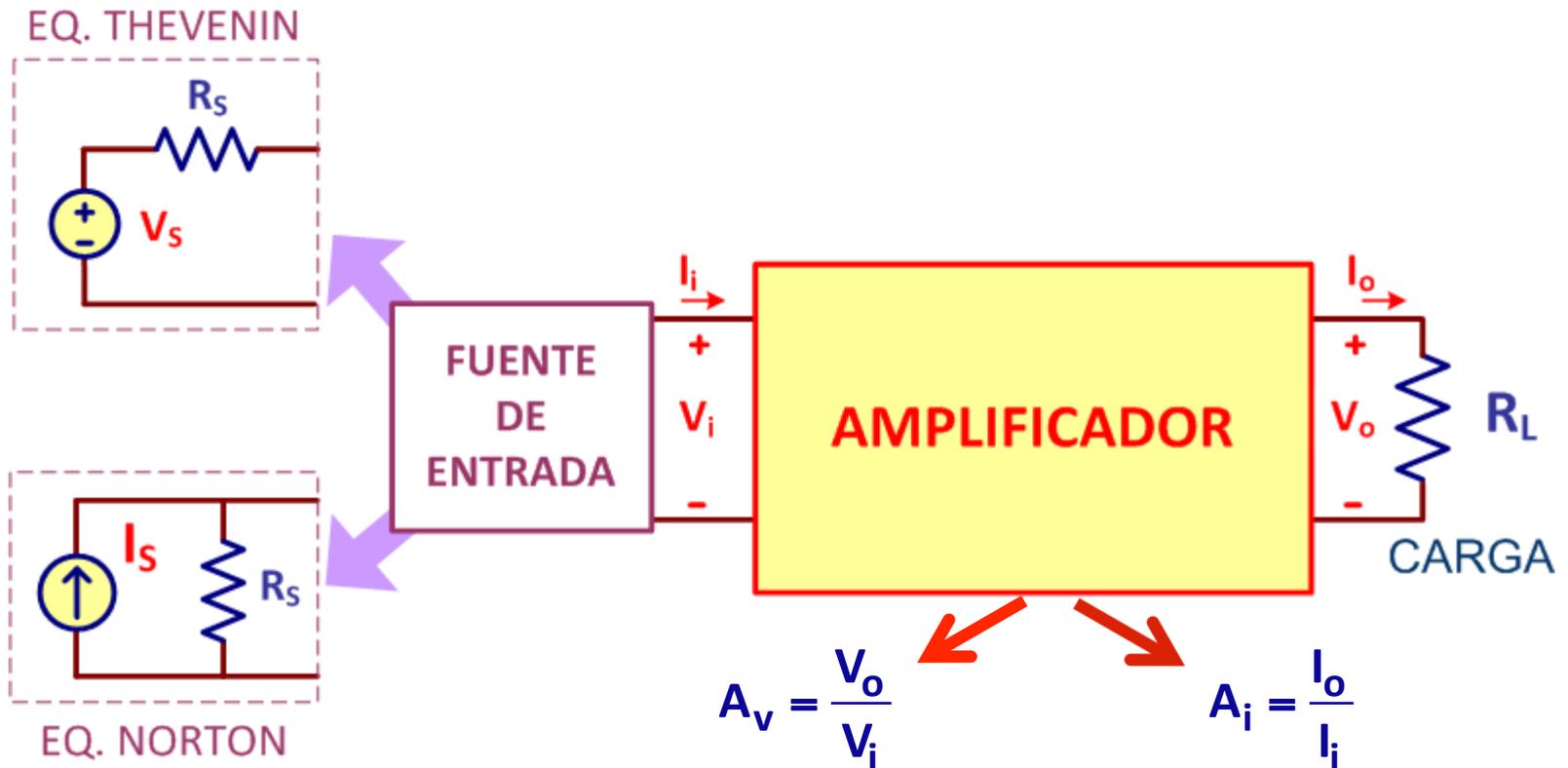
Prob A.I.3.B
 LTspice IV

Prob A.I.3.C
 LTspice IV

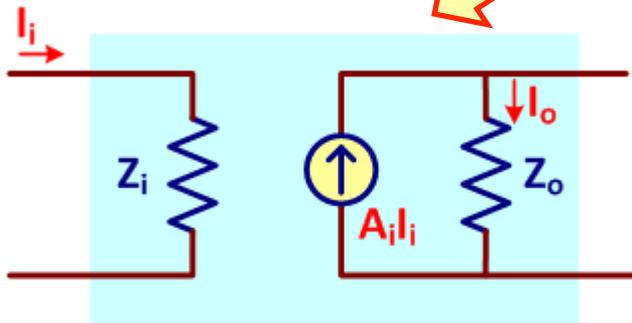
$$V_{out} = V_{out1} + V_{out2} = \frac{R_2 || R_3}{R_1 + R_2 || R_3} V_1 + \frac{R_1 || R_3}{R_2 + R_1 || R_3} V_2$$

Amplificación: Conceptos básicos

Un amplificador puede ser definido como un dispositivo o circuito capaz de aumentar (amplificar) una señal dada.



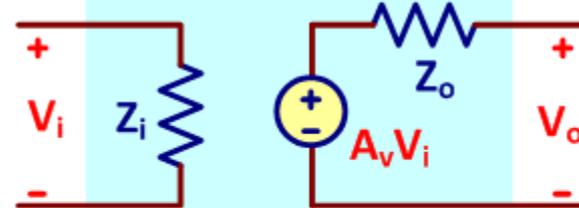
AMPLIFICADOR



Modelo equivalente de corriente

Impedancia de entrada: Z_i

$$\text{Ganancia en tensión: } A_v = \frac{V_o}{V_i}$$



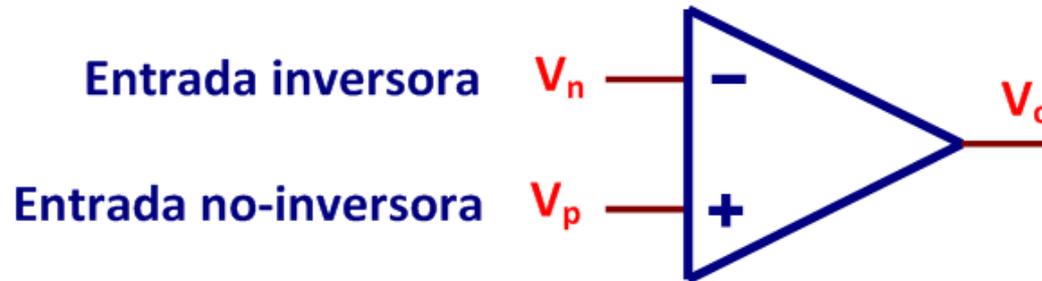
Modelo equivalente de tensión

Impedancia de salida: Z_o

$$\text{Ganancia en corriente: } A_i = \frac{I_o}{I_i}$$

Questión: Demostrar que $A_v = A_i \frac{Z_o}{Z_i}$

Amplificador Operacional ideal



- Se define tensión de entrada en **modo diferencial** (V_d)

$$V_d = V_p - V_n$$

- Se define tensión de salida como

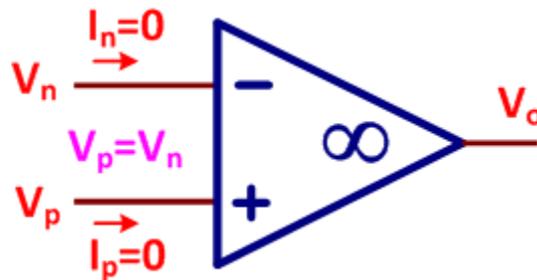
$$V_o = A_d (V_p - V_n)$$

- La **ganancia en modo diferencial** (A_d) viene reflejada en las hojas de características del fabricante como Large Signal Voltage Gain o Open Loop Voltage Gain (A_{VOL}).

- Idealmente, $A_{VOL} \rightarrow \infty \Rightarrow V_p = V_n$

■ Características del OA ideal

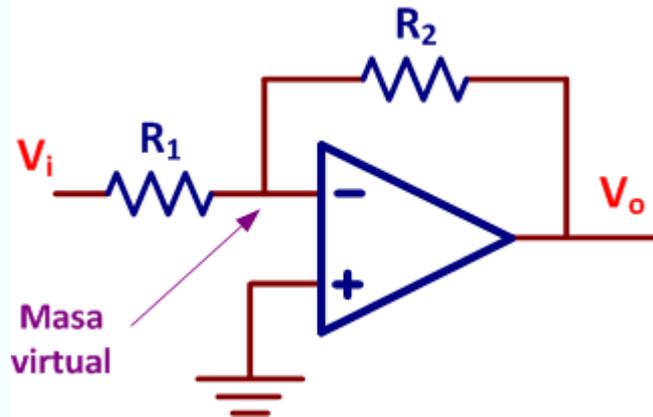
- Resistencia de entrada ∞
- Resistencia de salida 0
- Ganancia de tensión en modo diferencial (A_{VOL}) es $\infty \Rightarrow V_n = V_p$
- Corrientes de entrada nulas ($I_p = I_n = 0$)
- Ancho de banda $\infty \Rightarrow$ independiente de la frecuencia
- Ausencia de desviación en las características con la temperatura (*no drift*)



Modelo ideal del OA

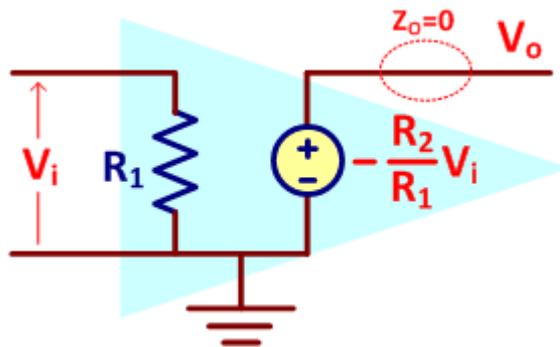
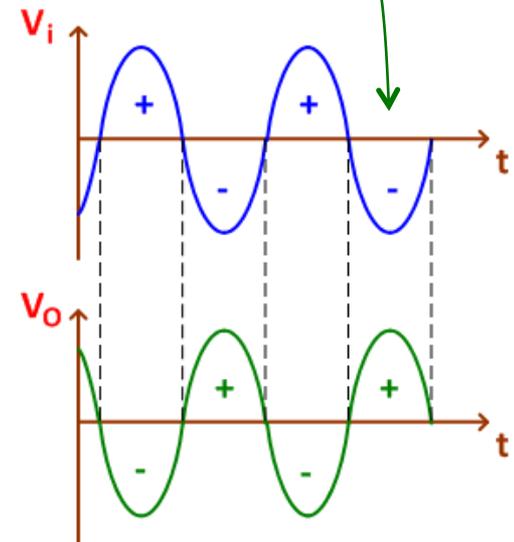
Configuraciones básicas

Amplificador inversor



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

Signo (-) significa un desfase entre la entrada y salida de 180°

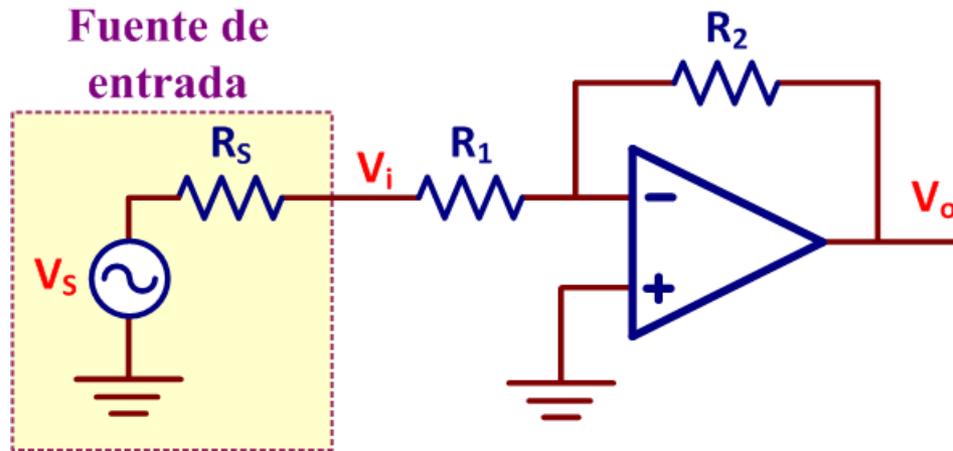


Modelo equivalente del amplificador inversor

Prob A.I.4.A



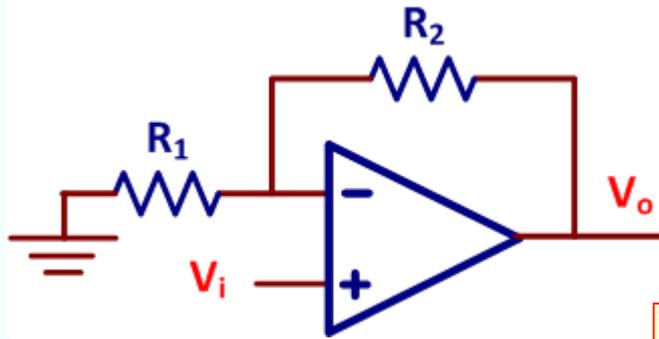
➤ Efecto de la fuente de entrada



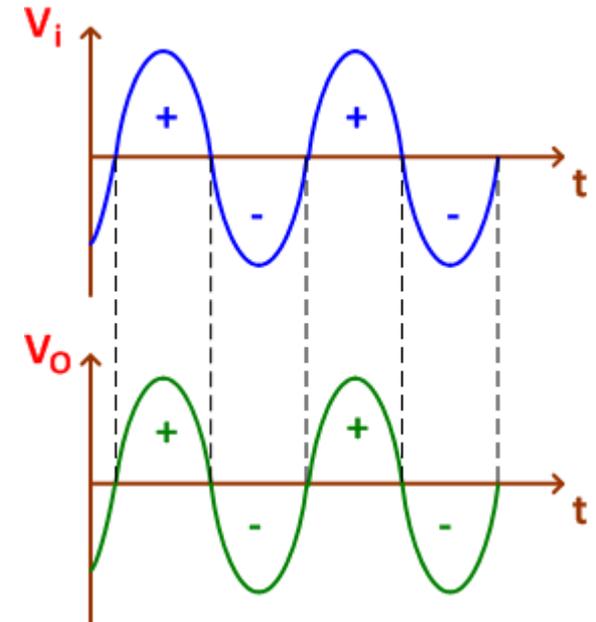
$$A_{V_s} = \frac{V_o}{V_s} = \frac{V_i}{V_s} \frac{V_o}{V_i} = \frac{V_i}{V_s} A_V = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_s} \right) \left(- \frac{R_2}{R_1} \right) = - \frac{R_2}{R_1 + R_s}$$

Prob A.I.5.A

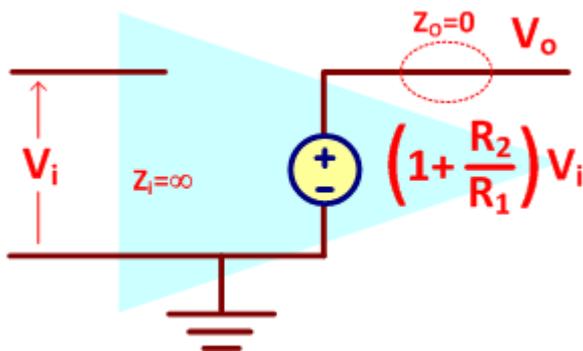
■ Amplificador no-inversor



$$A_V = \frac{V_o}{V_i} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$



V_i y V_o en fase

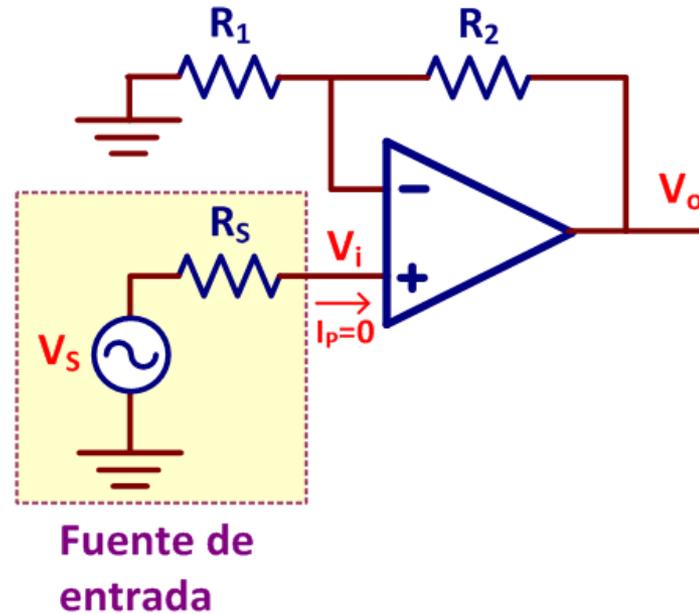


Modelo equivalente del amplificador no-inversor

Prob A.I.4.B



➤ Efecto de la fuente de entrada



$$V_i = V_s \text{ al ser } I_p = 0$$

$$A_{V_S} = \frac{V_o}{V_S} = \frac{V_i}{V_S} \frac{V_o}{V_i} = \frac{V_i}{V_S} A_V = A_V$$

Prob A.I.5.B

■ Valores prácticos de las resistencias

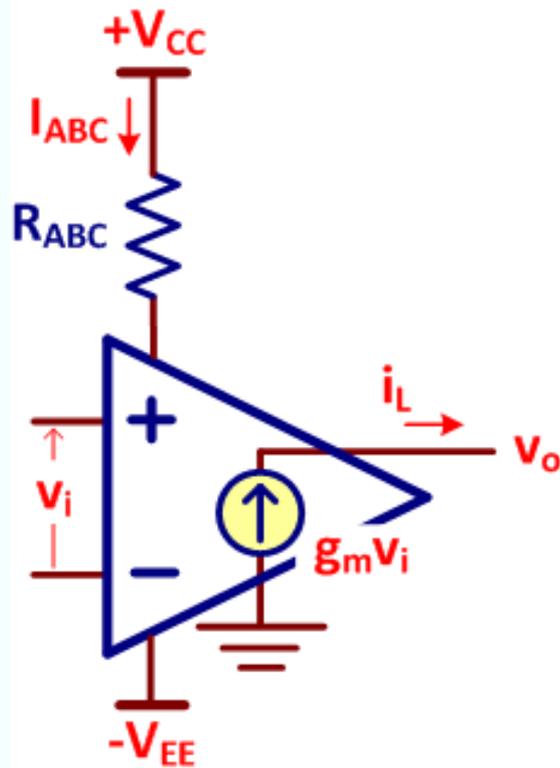
- En las expresiones de la ganancia en las configuraciones básicas del OA, se observa que su valor depende de la **relación** de las resistencias con independencia de su valor individual.
- En la asignación de valores a las resistencias externas del OA:
 - Valores muy **bajos** → Elevado consumo de **potencia**.
 - Valores muy **altos** → Incremento **ruido** y susceptibilidad a las capacidades parásitas pueden limitar el ancho de banda y originar **inestabilidad** y oscilaciones.
- Valores adecuados, dependiendo de cada aplicación, son

$$1\text{k}\Omega < R < 1\text{M}\Omega$$

Amplificador operacional de transconductancia

- El amplificador operacional de transconductancia u **OTA** (Operational Transconductance Amplifier) es un amplificador cuya corriente de salida es directamente proporcional a la tensión de entrada. Es decir, es una **fuente de corriente controlada por tensión**.
- Su campo de aplicación son los **osciladores controlados por tensión (VCO)**, **filtros analógicos** y, en general, **amplificadores de ganancia variable**.
- El primer OTA es el **CA3080** introducido in 1969 por RCA.
- Otros OTA populares son **LM13600/700** (National Semiconductor) y el **NE5517** (Signetics).

■ Modelo del OTA



OTA LM3080

$$I_{ABC} = \frac{V_{CC} - (-V_{EE}) - V_{BE}}{R_{ABC}}$$

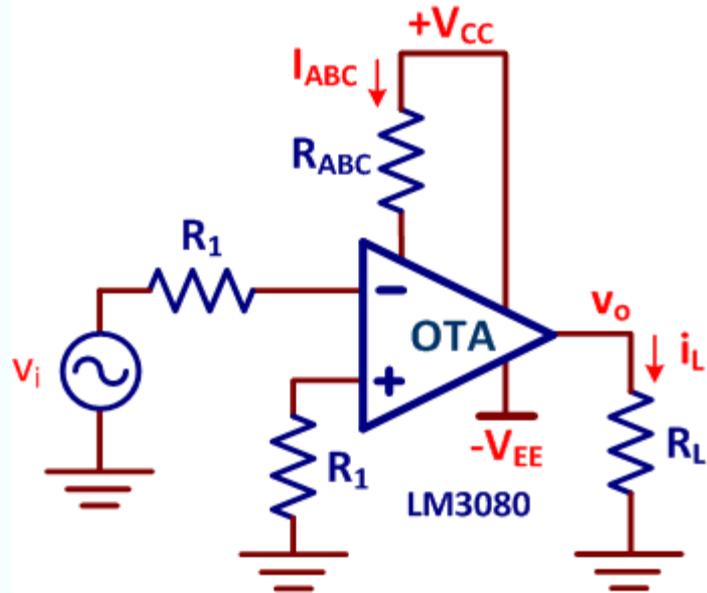
$\approx 0.7V$

$$0.1\mu A \leq I_{ABC} \leq 1mA$$

$$g_m = k \cdot I_{ABC}$$

$$k = 19.2V^{-1} \text{ a } 25^\circ C \text{ (Tensión recíproca)}$$

■ Configuración inversora

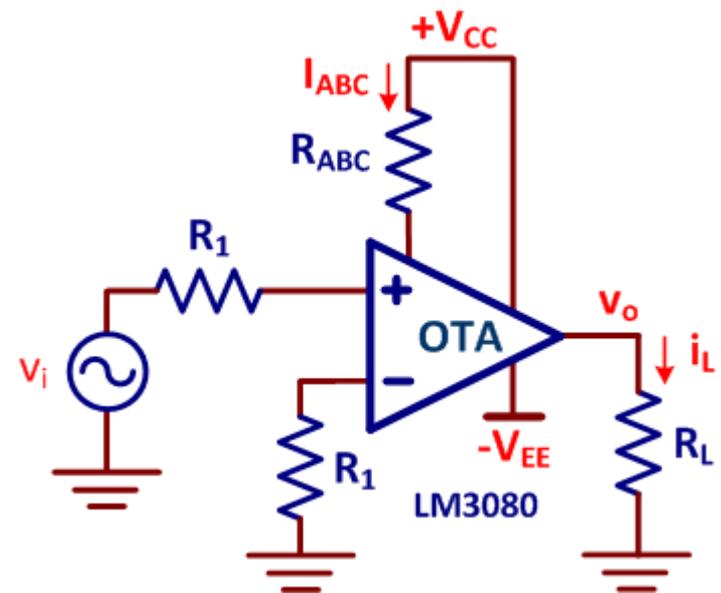


$$i_L = -g_m v_i$$

$$v_o = i_L R_L = -g_m R_L v_i \Rightarrow A_V = \frac{v_o}{v_i} = -g_m R_L$$

Prob A.I.8

■ Configuración no-inversora



$$i_L = g_m v_i$$

$$v_o = i_L R_L = g_m R_L v_i \Rightarrow A_V = \frac{v_o}{v_i} = g_m R_L$$

Prob A.I.9

■ Linealización con diodos de entrada

- Los diodos de entrada (LM13700, CA3280A, NE5517) permiten linealizar la g_m , ampliar el rango de tensión de entrada y proporcionar estabilidad frente a la temperatura.

