



# **TEMA 6**

# **AMPLIFICADORES OPERACIONALES**

Profesores:

Germán Villalba Madrid

Miguel A. Zamora Izquierdo

Departamento de Ingeniería de la Información y Comunicaciones  
Universidad de Murcia

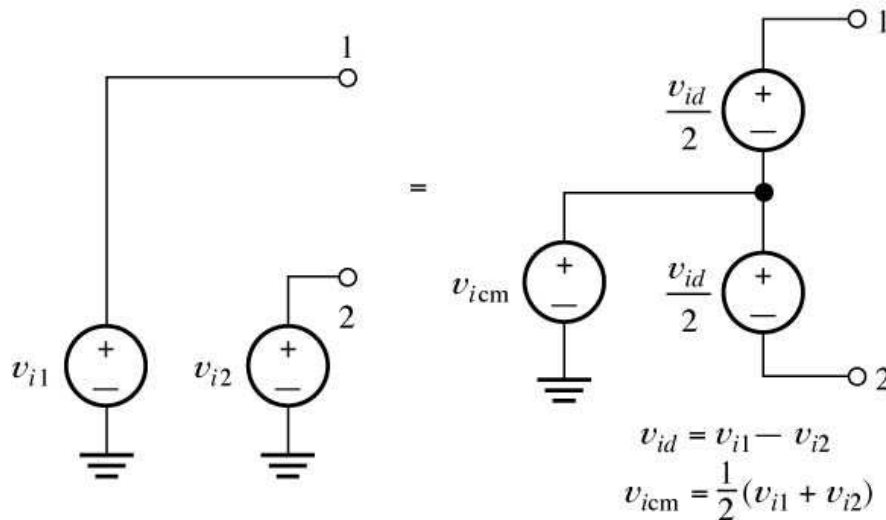
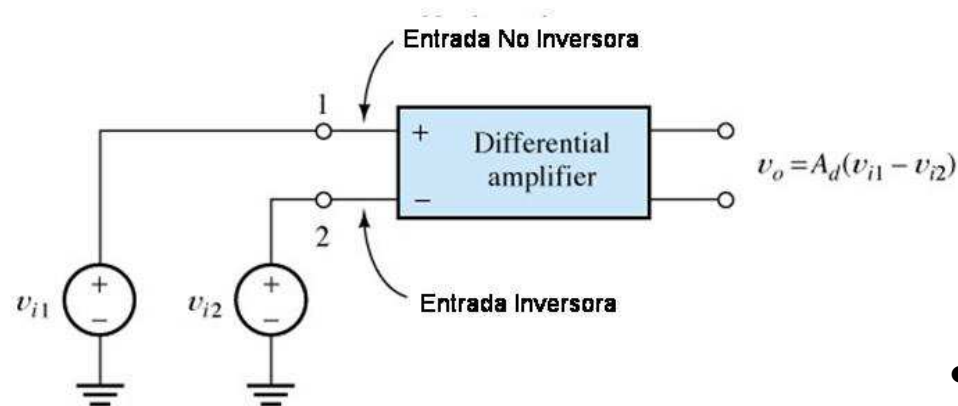
## CONTENIDO

- Introducción
- El amplificador diferencial
- El amplificador operacional ideal
- Caracterización de un amplificador operacional no ideal
  - Alimentación del amplificador operacional
  - Slew – rate
  - Excursión de la tensión de salida
  - Errores de continua.
  - Cancelación de los efectos de las corrientes de polarización.
  - Restricción del cortocircuito virtual
- Circuitos amplificadores: inversor, no inversor, sumador, diferencial, integrador y derivador.
- Seguidor de tensión.
- Anexo VI.I. Conversión Digital – Analógica (DAC) con AO.

## INTRODUCCION

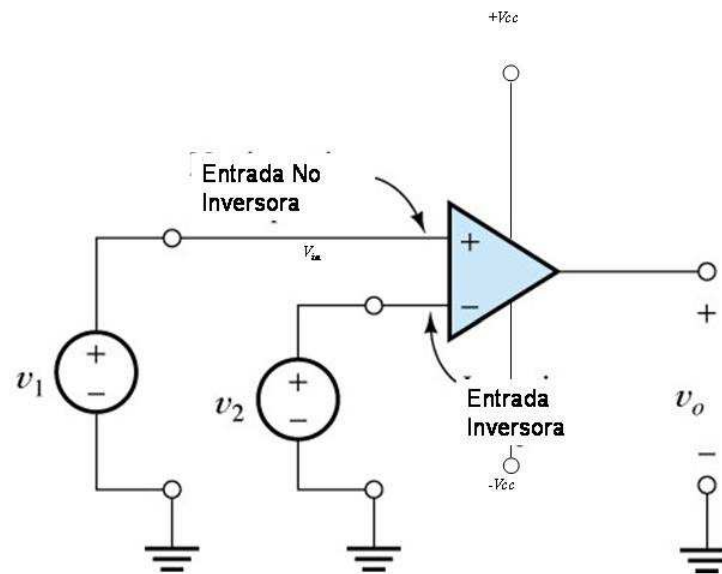
- En la década de los cuarenta, las calculadoras analógicas utilizaban circuitos electrónicos analógicos para realizar ciertas operaciones. La complejidad que presentaban se solucionaba al tomar una parte de la señal de salida e introducirla en la entrada (**realimentación**). El nombre de **amplificador operacional** proviene precisamente de ser usado inicialmente para realizar operaciones analógicas.
- Cuando el AO se realimenta, el circuito trabaja en **bucle cerrado**. Cuando no existe realimentación, opera en condiciones de **lazo abierto**.
- Por medio de redes de componentes pasivos (resistencias, condensadores, bobinas) se consigue una gran variedad de funcionalidades (inversor, no inversor, seguidor, sumador, integrador, etc.), respondiendo el sistema a la configuración adoptada y a los valores de los componentes, sin que afecten las variaciones en las características del AO. Es decir, el sistema es independiente de la dispersión de las características del AO debido a los procesos de fabricación.

## EL AMPLIFICADOR DIFERENCIAL



- El **Amplificador Diferencial** dispone de dos señales de entrada (aplicadas a los terminales inversor y no inversor), produciendo una tensión de salida proporcional a la diferencia entre las tensiones de entrada. (ver figura).
- Notación:
  - La diferencia entre las tensiones de entrada se llama **tensión de entrada diferencial**  $V_{id}$ .
  - La **ganancia diferencial** ( $A_d$ ) es la ganancia del amplificador.
  - La **tensión de entrada de modo común** ( $V_{icm}$ ) es la media de las tensiones de entrada.

## AMPLIFICADOR OPERACIONAL. DEFINICIÓN DE TERMINALES

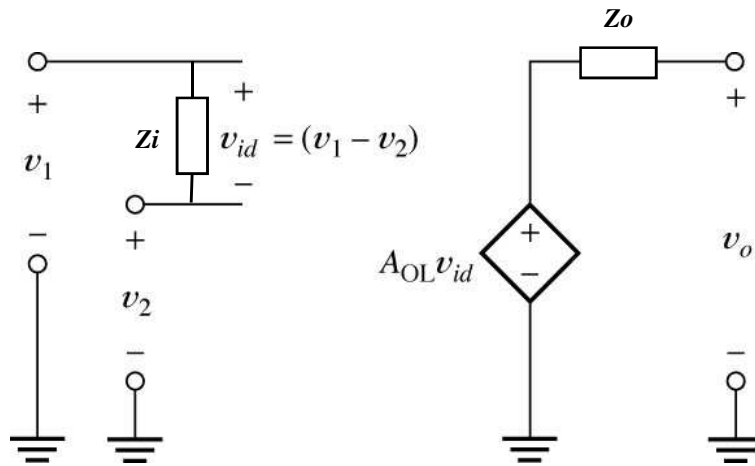


- Todas las diferencias de potencial son con respecto a masa.
- Dispone de dos terminales de entrada y uno de salida
- Y dos terminales para conexión de alimentación +Vcc y -Vcc.
- El A.O. solo tiene dos zonas de funcionamiento:
  - Lineal: la salida toma valores comprendidos entre +Vcc y -Vcc.
  - Saturación: la tensión de salida adquiere el valor de los dos valores de alimentación +Vcc ó -Vcc.
- La operación que siempre realiza el A.O.

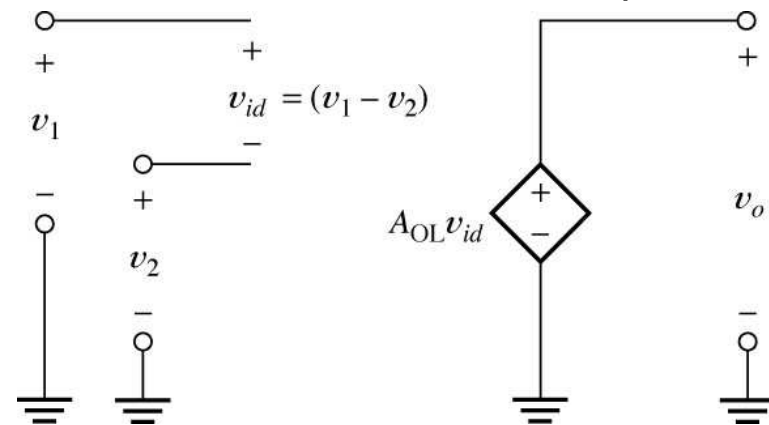
$$V_o = A_v (V_1 - V_2) = A_v \cdot V_{in}$$

## AMPLIFICADOR OPERACIONAL IDEAL Y REAL

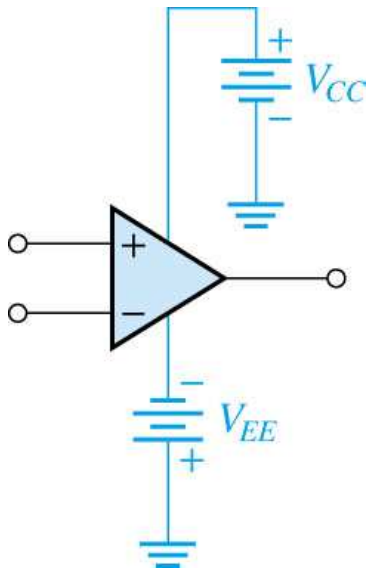
- Características AO real (u741):
  - $Z_i=100\text{M}\Omega$
  - $A_{vo}=100000$
  - $Z_o=40\ \Omega$ .
  - $W_D [1\text{Hz}, 1\text{MHz}]$



- Características AO ideal:
  - Impedancia entrada ( $Z_i$ ) infinita.
  - Ganancia en bucle abierto ( $A_{vo}$ ) infinita para la entrada diferencial.
  - Ganancia nula para la señal en modo común.
  - Impedancia de salida ( $Z_o$ ) nula.
  - Ancho de banda  $W_D$  infinito.
  - Ausencia de desviación de características con la temp.



## ALIMENTACION DEL AMPLIFICADOR OPERACIONAL



Alimentación del AO

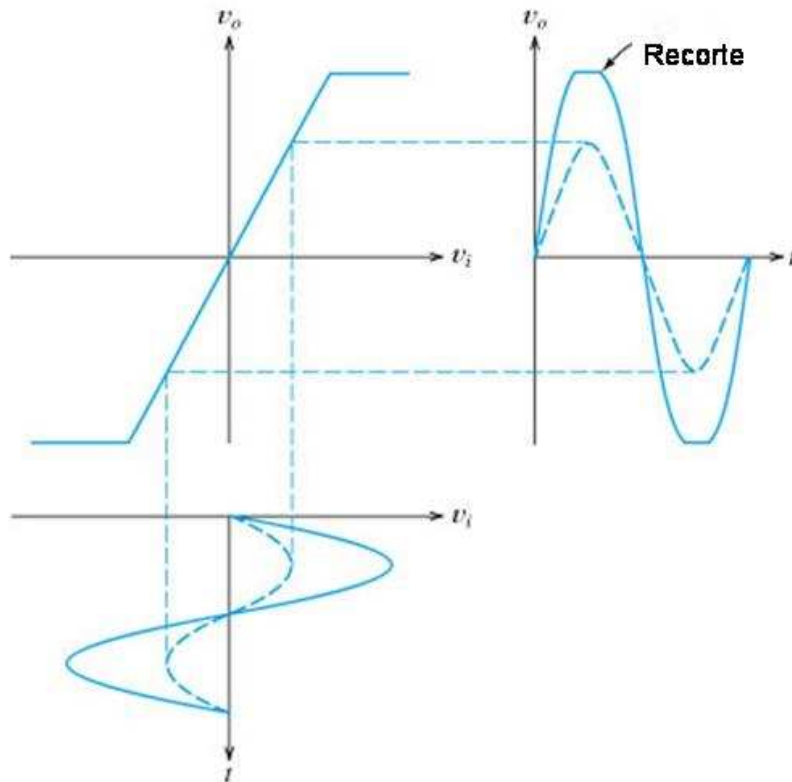
- Al menos es necesario aplicar una fuente de alimentación continua, pudiendo ser las dos fuentes de tensión iguales pero de signo contrario respecto a masa (alimentación simétrica), o diferentes (alimentación asimétrica).
- La selección de los valores de tensión de alimentación y el tipo de alimentación depende de la aplicación en la que deba trabajar.
- Las dos alimentaciones representan los límites del rango de valores posibles de la tensión de salida del amplificador operacional, es decir, nunca la salida podrá alcanzar el valor de tensión dado por la fuente de alimentación (ver Excursión de la Tensión de Salida).
- Se debe tener en cuenta que muchas veces no se muestran explícitamente las conexiones con las fuentes de alimentación en los esquemas de circuitos electrónicos.

## SLEW RATE

- Un efecto no lineal de los AO reales es que la variación de la tensión de salida en el tiempo está limitada (**SLEW-RATE**: velocidad de subida).
- La tensión de salida no puede aumentar (o disminuir) más rápido que este límite.
  - Como dato indicativo, decir que el uA741 y alimentación a 15 Vpp y con  $R_L > 2k$ , el valor típico es  $5 \times 10^5$  V/s (se suele expresar como 0.5 V/us).
- El slew-rate puede ocasionar que la forma de la onda de salida de un amplificador real pueda ser muy diferente a la de un operacional ideal.

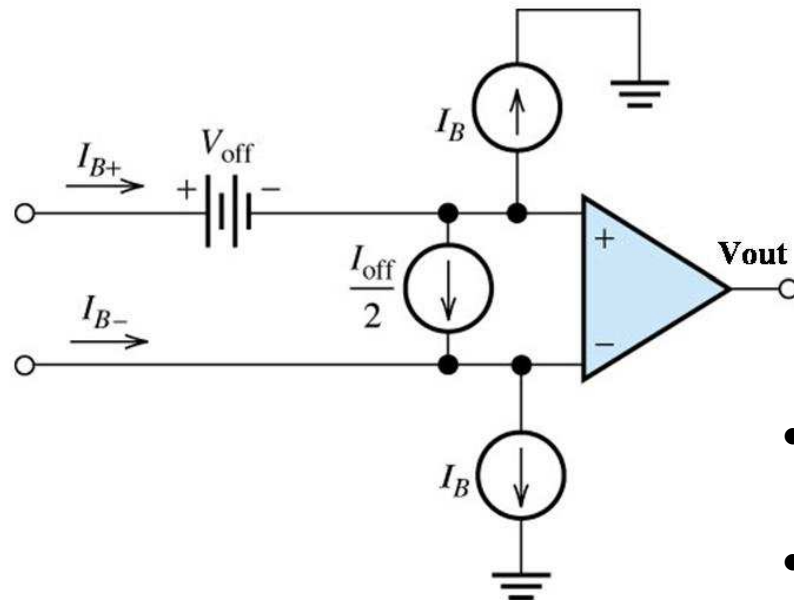


## EXCURSION DE LA TENSION DE SALIDA



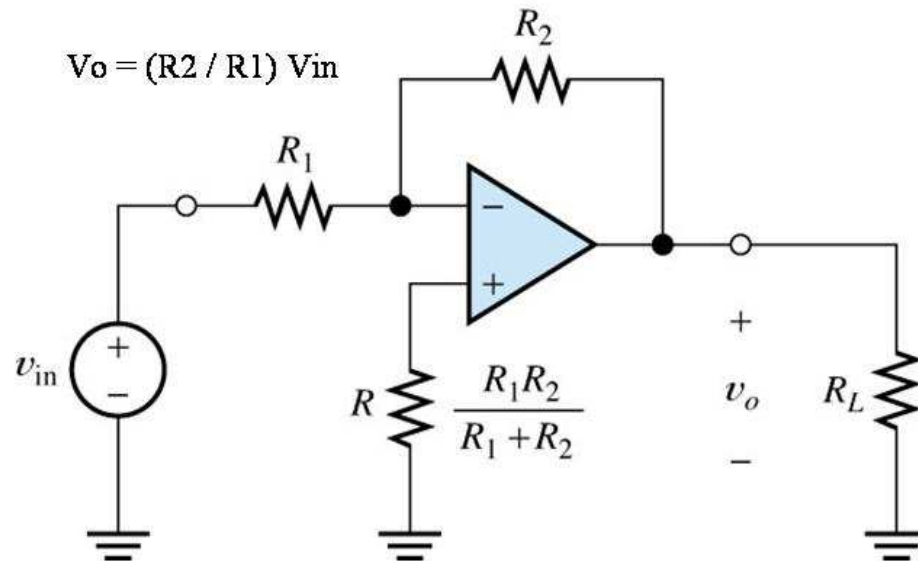
- Existen varios modos de trabajo no lineal para los amplificadores operacionales reales:
  - La tensión de salida presenta un límite máximo y un límite mínimo.
- Si la señal de entrada es suficientemente grande, la salida puede alcanzar dichos límites, dejando así de responder y se produce un recorte.
- El margen de tensión antes de producirse el recorte depende del AO, de la resistencia de carga y del valor de las alimentaciones.
- Por ejemplo, para el uA741 alimentado a +15v y –15v, tiene como límite máximo, en unas determinadas condiciones, +14v y –14v.

## ERRORES DE CONTINUA



- Los AO contienen circuitos de entrada acoplados en continua. La corriente entra o sale de los terminales de entrada del operacional, siendo:
  - $I_{B+}$  corriente que entra en la entrada no inversora.
  - $I_{B-}$  corriente que entra en la entrada inversora.
  - $I_B$  es la media de estas dos corrientes, y se denomina corriente de polarización (bias current).
- En el caso ideal (características de entrada simétricas) siendo ambas corrientes iguales.
- En el caso real, las corrientes de polarización no son iguales, creando una llamada **corriente de desviación**.  $I_{off} = I_{B+} - I_{B-}$
- Otro error es tener una tensión de salida diferente de cero para una tensión de entrada nula (**offset voltage**).

## CANCELACION DE LOS EFECTOS DE LAS CORRIENTES DE POLARIZACION



- Consiste en diseñar circuitos que anulen los efectos de las dos fuentes de corriente de polarización.
- En la configuración del inversor, si se añade una resistencia en la entrada no inversora del AO, no se producen cambios de la ganancia del amplificador, pero se anulan los efectos de la fuente  $I_b$ .
- El valor de dicha resistencia debe ser el paralelo de las restantes resistencias ( $R_1$  y  $R_2$ ).

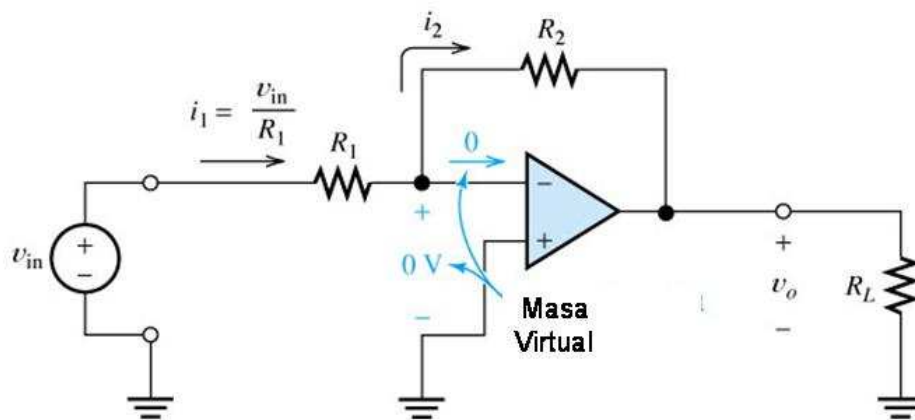
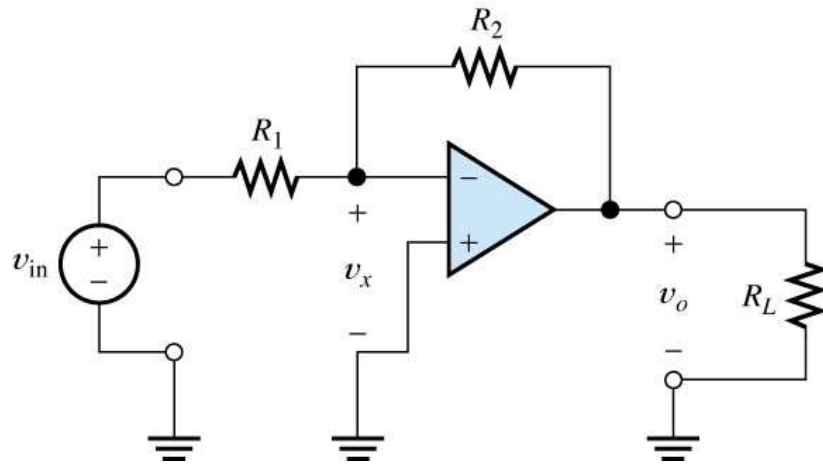
## REALIMENTACIÓN

- **Definición**
  - Conectar o inyectar una señal de la salida con alguna de las entradas
  - Una muestra de tensión o corriente en algún punto de la salida la llevamos a la entrada
- **Realimentación positiva.** Cuando la realimentación se hace a la entrada no inversora. Circuitos inestables, rápidamente la salida se satura a los valores máximo o mínimo (tensiones de alimentación)
- **Realimentación negativa.** Cuando la realimentación se hace a la entrada inversora. La ganancia se reduce respecto al valor en lazo abierto y el circuito es más estable.

## RESTRICCIÓN DEL CORTOCIRCUITO VIRTUAL

- Aproximando las características al modelo ideal, se facilitan los cálculos teniendo en cuenta lo siguiente:
  - La impedancia del operacional se considera infinita, por lo que las corrientes de entrada al operacional se pueden considerar nulas.
  - **Si existe realimentación negativa**, se puede considerar que las dos entradas se encuentran siempre al mismo potencial (siempre que no se llegue a la zona de saturación). Decimos que existe un **cortocircuito virtual** entre ambas entradas, ya que aunque tienen la misma tensión, entre ellas no circula corriente.
- Esto se debe a que la ganancia del AO es tan elevada que unas décimas de milivoltio de tensión diferencial entre las entradas satura la salida; por tanto, al realimentar negativamente, si ambas tensiones se desequilibran y dejan de ser iguales, la realimentación negativa compensa esta diferencia y hace que las entradas tomen nuevamente el mismo valor.
- Así pues, en lazo abierto las entradas pueden tener potenciales diferentes, ya que no existe ninguna realimentación.

## AMPLIFICADOR INVERSOR



- La determinación de la ganancia de tensión en bucle cerrado se realizará teniendo en cuenta la restricción del cortocircuito virtual (con realimentación negativa), las leyes de Kirchhoff y teniendo en cuenta que las corrientes en las entradas es nula.

Suponiendo que en la entrada inversora está al mismo potencial que la entrada no inversora, la corriente proveniente del generador de señal que circula por R1 tendrá que continuar su camino por R2 hasta el terminal de salida.

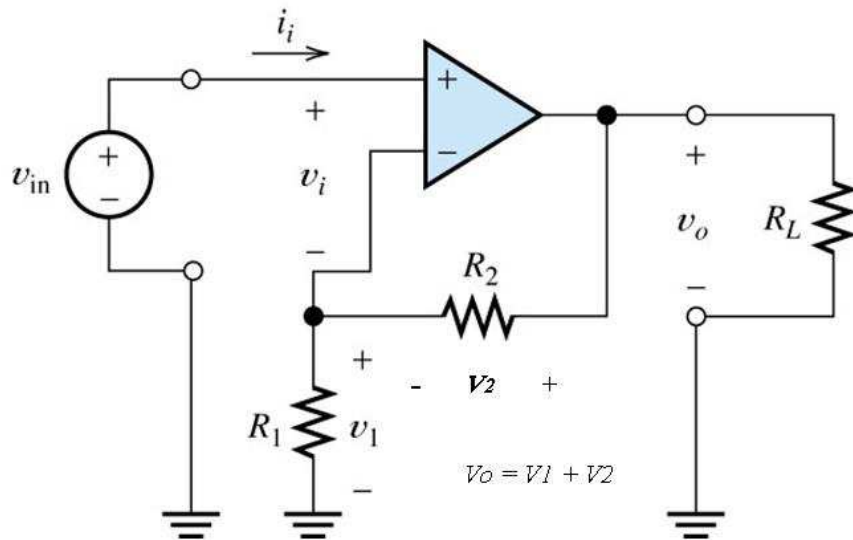
$$i_{R1} = i_{R2}$$

$$\frac{V_{IN} - V_-}{R_1} = \frac{V_- - V_O}{R_2}; \text{ con } V_- = 0 \text{ voltios}$$

$$V_O = -V_{IN} \left( \frac{R_2}{R_1} \right)$$

## AMPLIFICADOR NO INVERSOR

- Se trata de un amplificador con  $A_v > 0$ .
- La ganancia viene dada por la relación entre las resistencias de realimentación.
- La impedancia de entrada es teóricamente infinita, pues la corriente de entrada es cero.
- Al ser la ganancia independiente de la carga, la tensión de salida es independiente de la carga; por tanto, la impedancia de salida es cero.



$$i_i = i_+ = i_- = 0$$

$$i_{R1} = i_{R2} = i_R$$

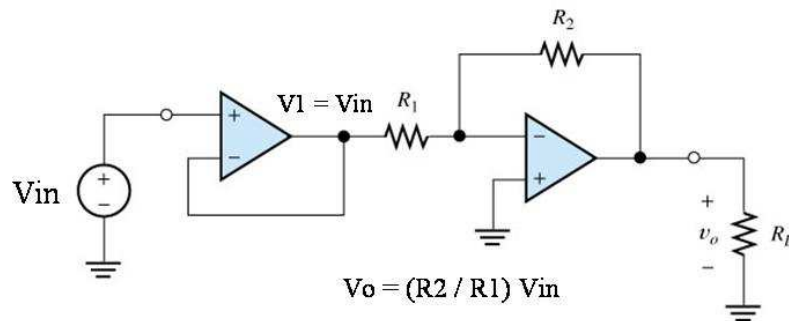
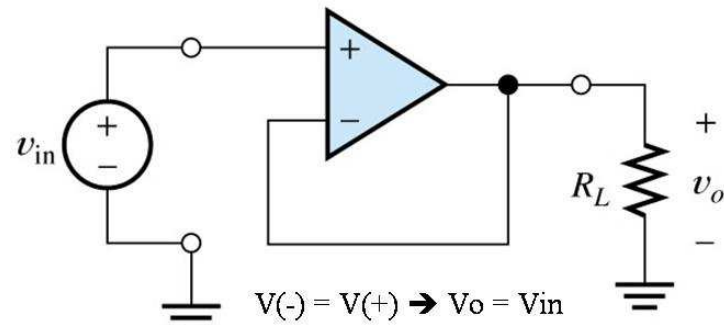
$$V_1 = V_- = V_+ = V_{IN}$$

$$i_{R1} = \frac{V_1}{R_1} = \frac{V_{IN}}{R_1}$$

$$V_O = i_R (R_1 + R_2) = V_{IN} \frac{R_1 + R_2}{R_1} = V_{IN} \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$

$$A_V = \frac{V_O}{V_{IN}} = \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$

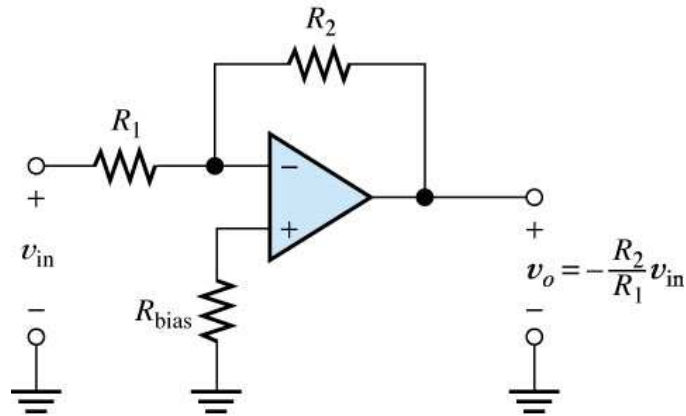
## SEGUIDOR DE TENSION



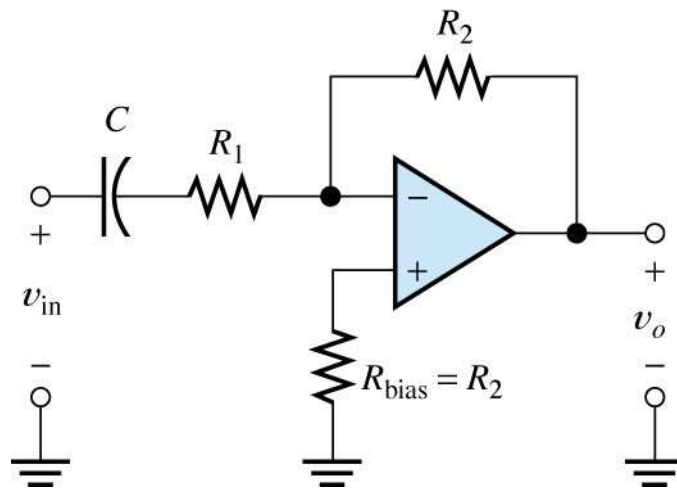
- Del amplificador no inversor, se puede deducir que la ganancia mínima es la unidad, si  $R_2$  es cero, o si  $R_1$  se deja en circuito abierto.
- La tensión de salida sigue a la entrada (seguidor).
- Se utiliza principalmente como etapa de adaptación de la entrada al sistema, proporcionando una resistencia de entrada elevada.
- En el circuito inferior, en la etapa previa al inversor, se dispone de un seguidor para proporcionar a la etapa inversora la tensión del generador de señal exhibiendo además una alta impedancia de entrada.



## CIRCUITOS AMPLIFICADORES: INVERSOR EN CC Y ACOPLADO EN CA



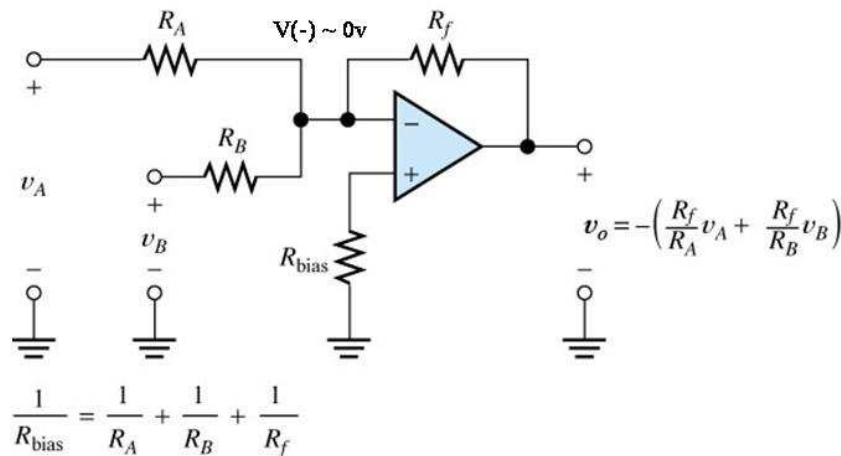
$$R_{\text{bias}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$



- El estudio del inversor Corresponde con lo desarrollado anteriormente.
- En el acoplado en corriente alterna incorpora un condensador que bloquea la continua, con las siguientes peculiaridades:
  - Para calcular  $R_{\text{bias}}$  (cancela efectos de corrientes de polarización) solo se tienen en cuenta los efectos de  $R_2$ , pues la circulación de corrientes en continua a través de  $R_1$  está bloqueada por el condensador.
  - Solamente se invertirá y amplificará la señal variable inyectada por  $V_{\text{in}}$  (se considera a frecuencias medias, y la reactancia capacitiva del condensador a dichas frecuencias es 0).

## CIRCUITOS AMPLIFICADORES: SUMADOR INVERSOR

- La salida es la inversa de la suma de las tensiones de entrada.
- La entrada no inversora está a masa, por lo que al tener realimentación negativa la entrada inversora estará virtualmente a 0 voltios.
- Desde cada una de las entradas circula una corriente hacia la entrada inversora, que no tiene otro camino de salida que dirigirse a la salida del amplificador a través de la resistencia de realimentación.
- Aplicando la 1ª Ley de Kirchoff, y la Ley de Ohm, se obtiene la tensión de salida en función de las de entrada.

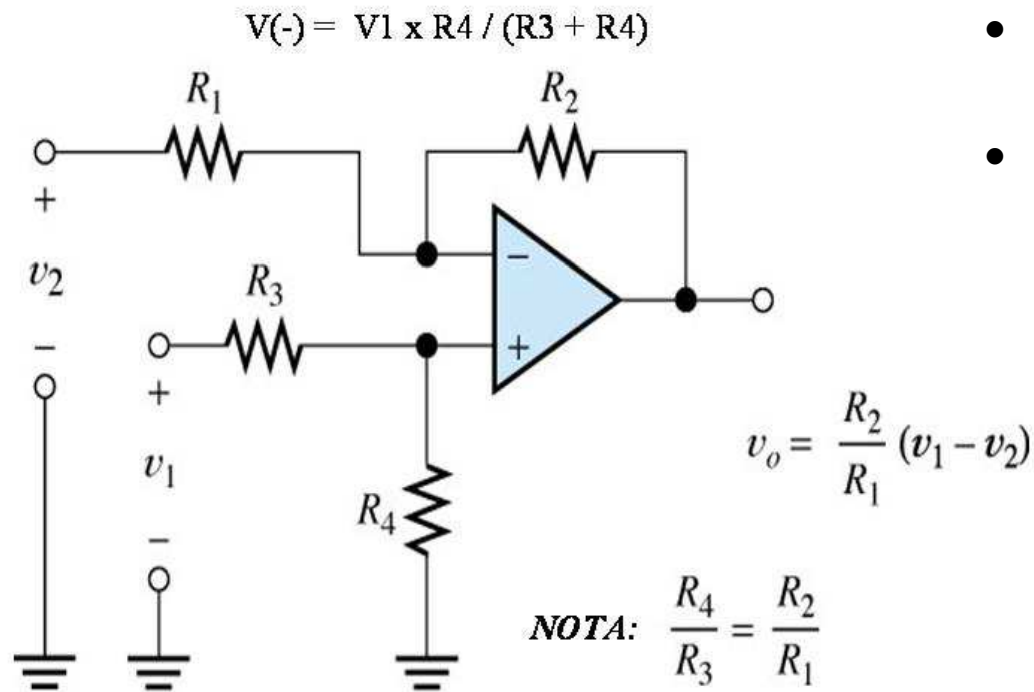


$$i_A + i_B = i_f$$

$$\frac{V_A - V_-}{R_A} + \frac{V_B - V_-}{R_B} = \frac{V_- - V_O}{R_f}; \text{ con } V_- = 0 \text{ voltios}$$

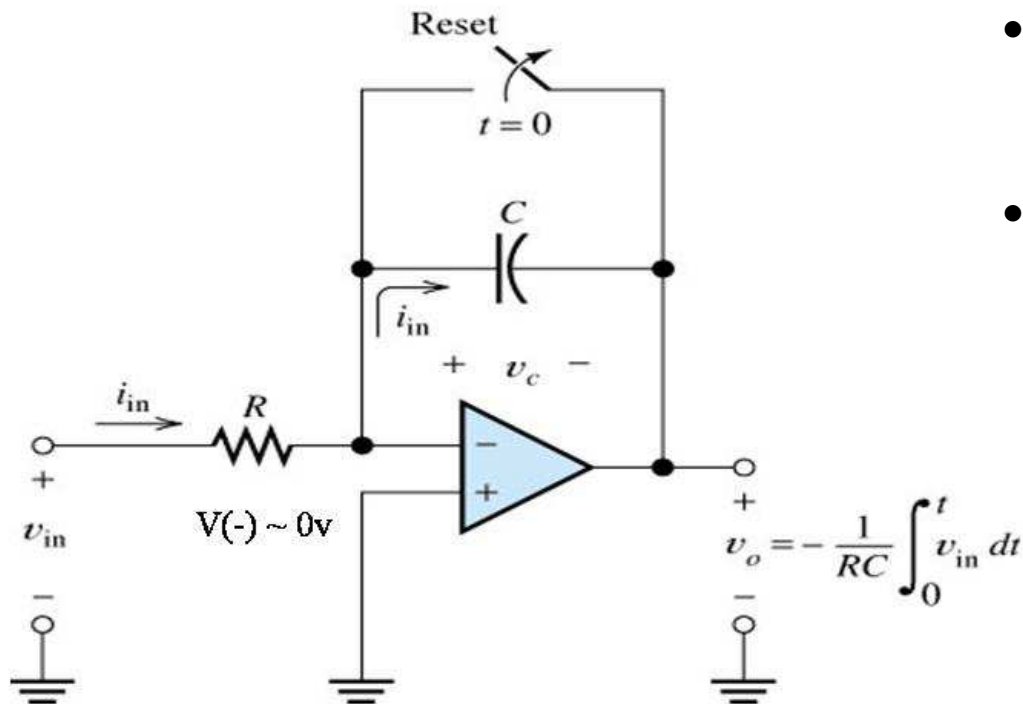
$$V_O = -R_f \left( \frac{V_A}{R_A} + \frac{V_B}{R_B} \right)$$

## CIRCUITOS AMPLIFICADORES: DIFERENCIAL



- La tensión de salida es una constante multiplicada por la señal diferencial de entrada ( $v_1 - v_2$ ).
- La ganancia para la señal de modo común es cero.
- Para minimizar los efectos de la corriente de polarización, se deberían seleccionar  $R_2 = R_4$  y  $R_1 = R_3$ .

## CIRCUITOS AMPLIFICADORES: INTEGRADOR



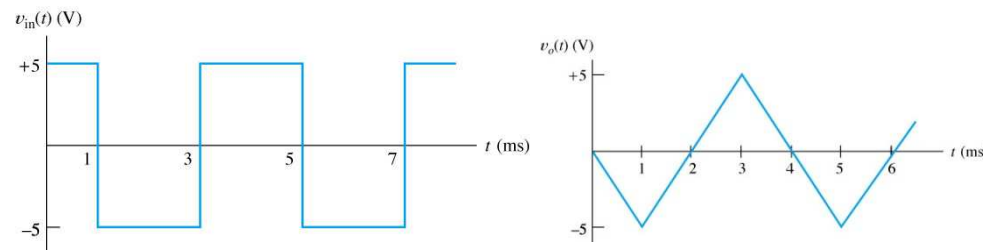
- Su tensión de salida es proporcional a la integral en el tiempo de la tensión de entrada.
- Es útil en instrumentación, por ejemplo, un acelerómetro nos devuelve una señal proporcional a la aceleración de un objeto. Aplicada a un integrador, se obtiene la velocidad de dicho objeto. Volviendo a integrar se obtiene la posición.

$$i_{in}(t) = \frac{v_{in}(t)}{R}$$

$$v_C(t) = \frac{1}{C} \int_0^{tx} i_{in}(t) dt$$

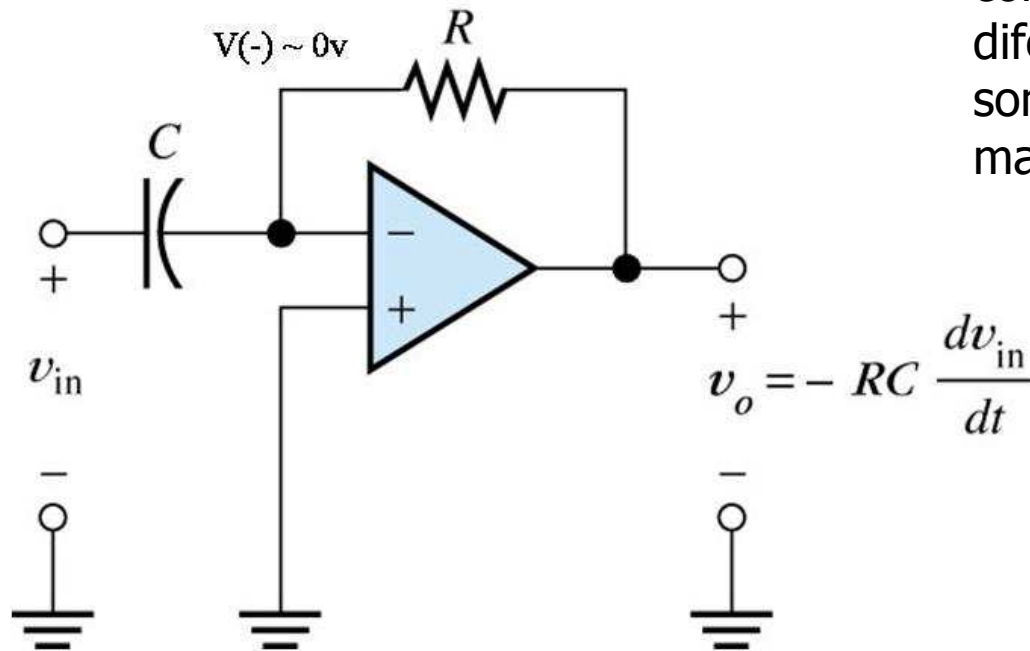
$$v_O(t) = -v_C(t)$$

$$v_O(t) = -\frac{1}{RC} \int_0^{tx} v_{in}(t) dt$$



## CIRCUITOS AMPLIFICADORES: DERIVADOR

- Su salida es proporcional a la derivada en el tiempo de la tensión de entrada.
- Su análisis es similar al del inversor, únicamente que la intensidad de entrada es la correspondiente al condensador teniendo en cuenta que la diferencia de tensión a la que está sometido es la de entrada menos la masa virtual.



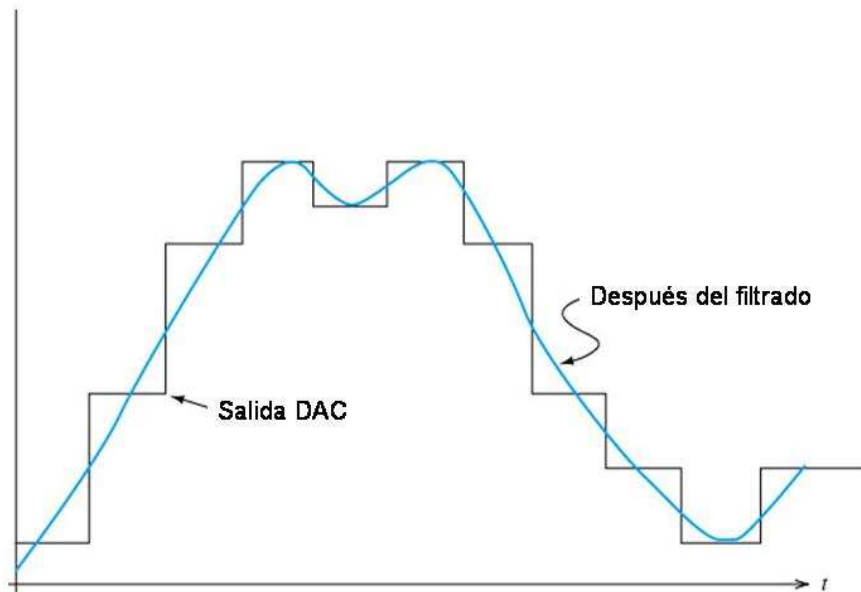
$$i_{in}(t) = C \frac{dv_{in}(t)}{dt}$$

$$v_o(t) = -i_{in}(t)R$$

$$v_o(t) = -RC \frac{dv_{in}(t)}{dt}$$

## ANEXO VI.I – CONVERSION DIGITAL – ANALOGICO (DAC) CON AMPLIFICADORES OPERACIONALES

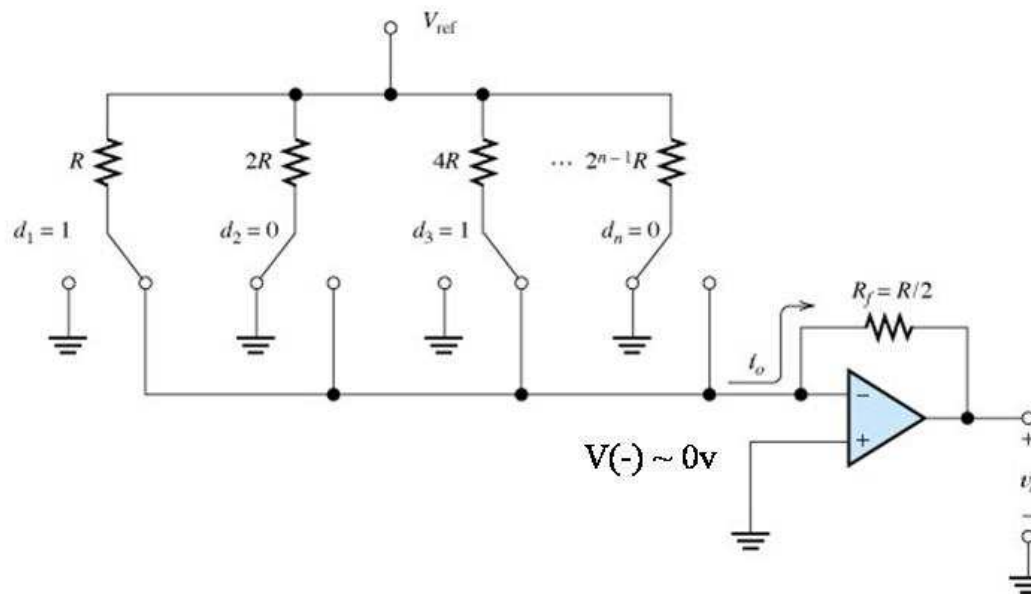
- La conversión digital analógica consiste en reconstruir una señal analógica a partir de los códigos binarios.
- La señal del DAC no es exactamente la misma que la señal analógica original, por los siguientes motivos:
  - Los códigos no contienen información sobre el valor de la señal entre dos muestras. La señal reconstruida es una aproximación escalonada de la señal original. Un filtro paso bajo realiza la aproximación (ver figura).
  - La señal reconstruida está retrasada en el tiempo respecto a la señal original.



- La diferencia más importante entre la señal reconstruida y la señal original es la debida al hecho de que los códigos no representan las amplitudes exactas de las muestras. Así el DAC debe aproximar cada amplitud al valor central de la zona correspondiente. La diferencia entre los valores de muestreo y las amplitudes reconstruidas se denomina **error** o **ruido de cuantificación**.

## ANEXO VI.I – CONVERSION DIGITAL – ANALOGICO (DAC) CON AMPLIFICADORES OPERACIONALES

- Un ejemplo de DAC es el implementado a partir de una red de resistencias ponderadas y un amplificador operacional.
- Se basa en controlar los conmutadores mediante los bits correspondientes del código de entrada. Para  $d_i=1$  el conmutador se conecta a la entrada del operacional; si  $d_i=0$ , se conecta a masa.
- La corriente que circula por cada resistencia es independiente del resto que estén conectadas, siendo  $i_o$  la suma de todas las corrientes.



$$i_i = \frac{V_{ref}}{R} 2^{-i+1}$$

$$v_o = -R_f i_o = -DV_{ref}$$