T7. Procesado analógico de la señal con amplificadores operacionales.

departament d' Electrònica
Universitat de Barcelona

Procesado de la señal con AO

- **Objetivos.**
- **Introducción.**
- **Amplificador Operacional.**
- **Aplicaciones no-lineales.**
- **Aplicaciones lineales.**

Objetivos

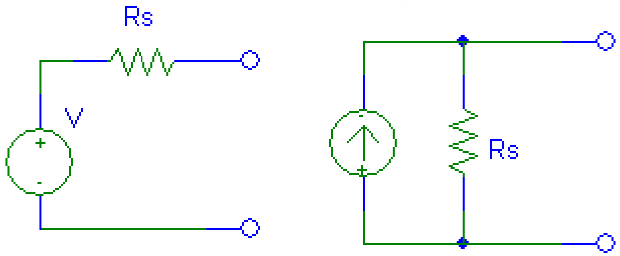
- **Entender el funcionamiento de un amplificador operacional.**
- **Conocer algunas de las aplicaciones del amplificador operacional.**
- **Resolver circuitos que contienen estos amplificadores.**

Introducción

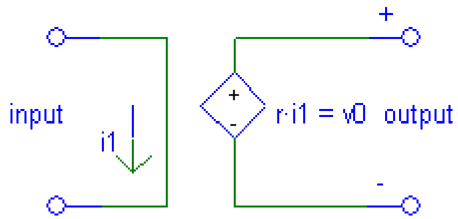
- **Trabajar directamente con transistores es relativamente complicado (en circuitos algo complejos).**
- **Un dispositivo hecho con transistores, llamado <u>Amplificador operacional</u> (AO), permite realizar múltiples funciones de forma sencilla:**
  - » **Permite realizar funciones (suma, derivada, integral, etc.) de forma muy sencilla.**
  - » **Cada bloque (función) puede conectarse a otro sin que se afecten mútuamente.**

Introducción

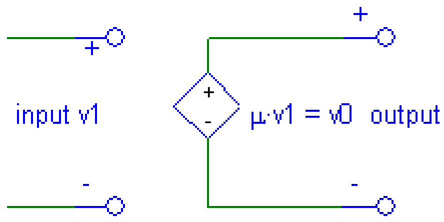
- Antes de comenzar con el AO, veamos distintos tipos de fuentes:
  - » Fuentes ideales.
  - » Fuentes reales.
  - » Fuentes controladas:



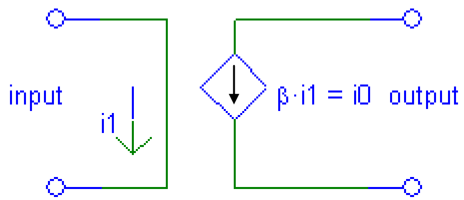
Modelización de una fuente de tensión o corriente



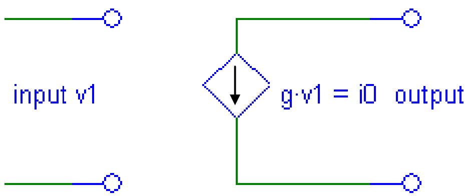
Fuente de tensión gobernada por corriente



Fuente de tensión gobernada por tensión



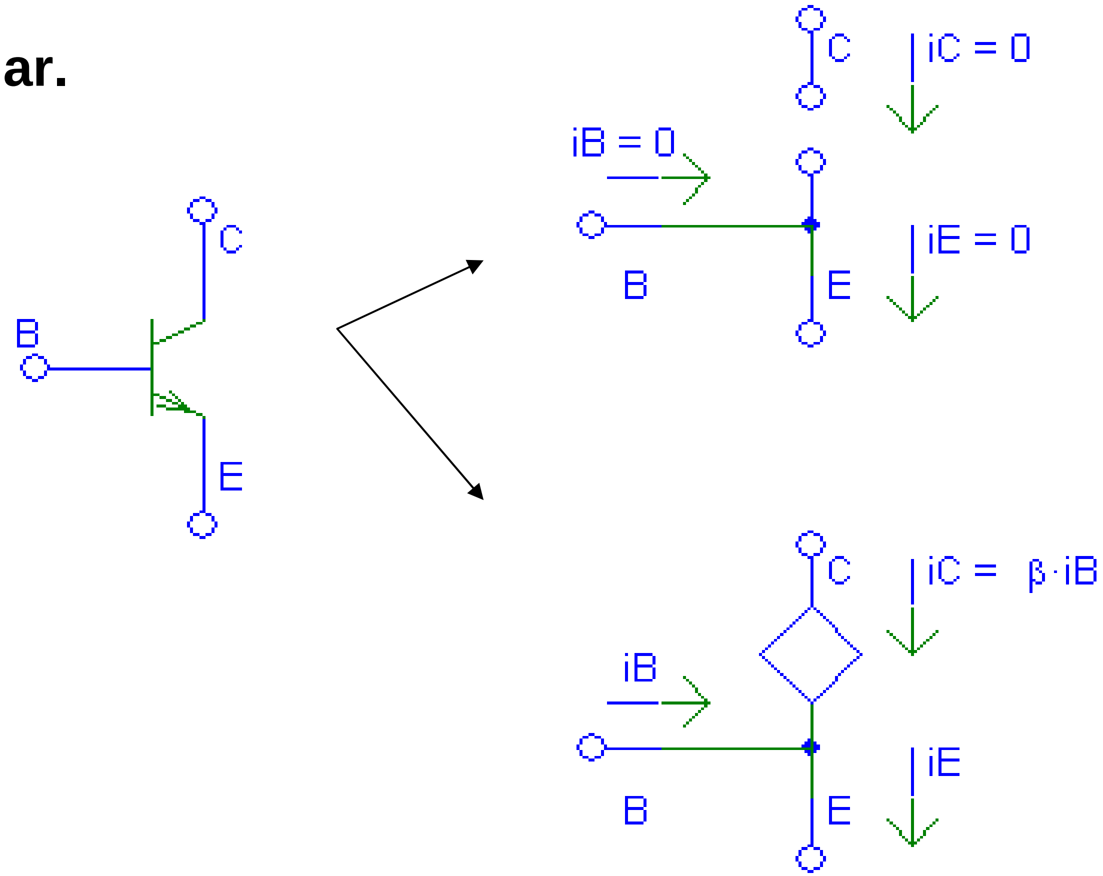
Fuente de corriente gobernada por corriente



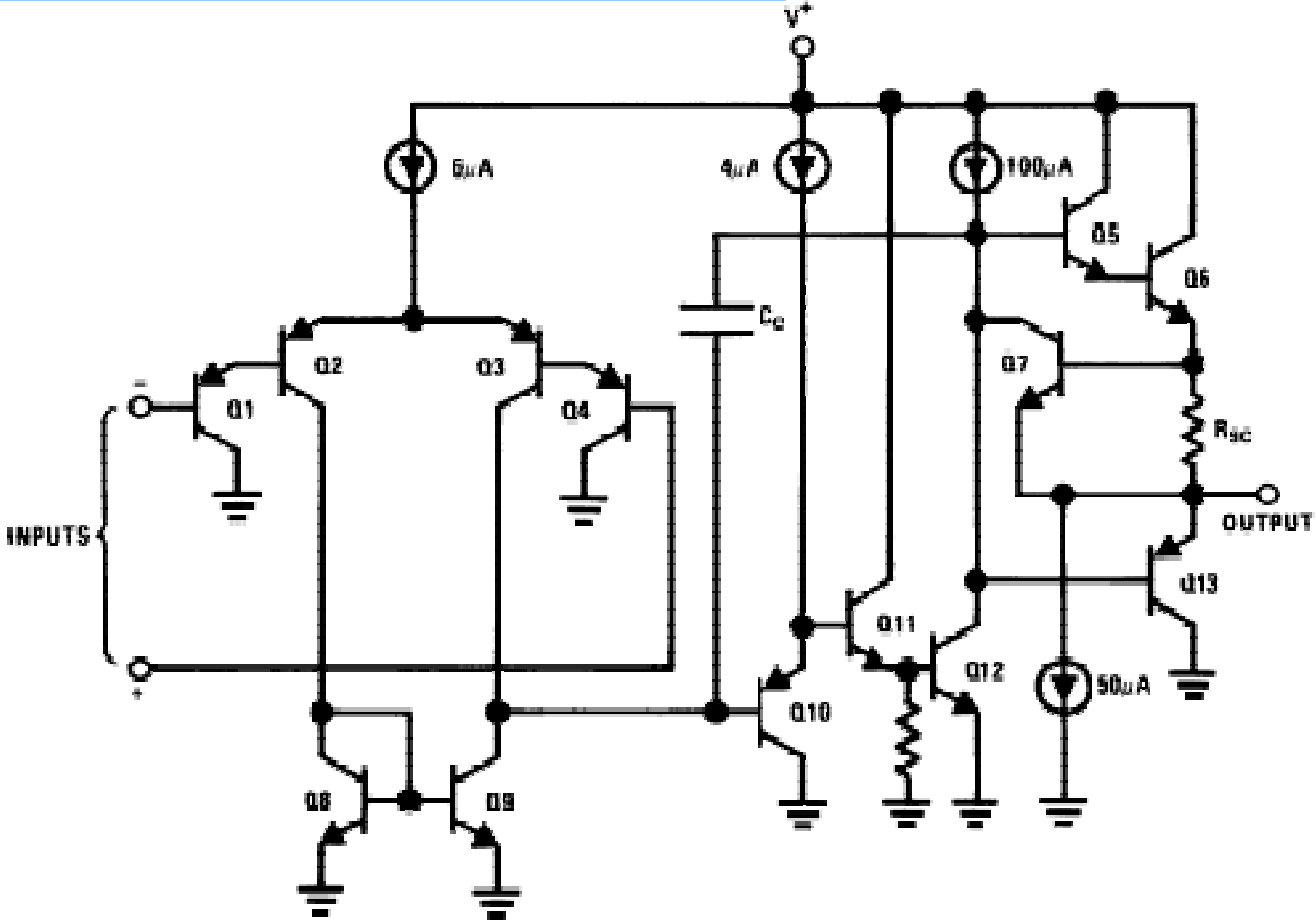
Fuente de corriente gobernada por tensión

Introducción

- **Las fuentes controladas suelen usarse en modelos de dispositivos.**
  - » **Ej: Transistor bipolar.**

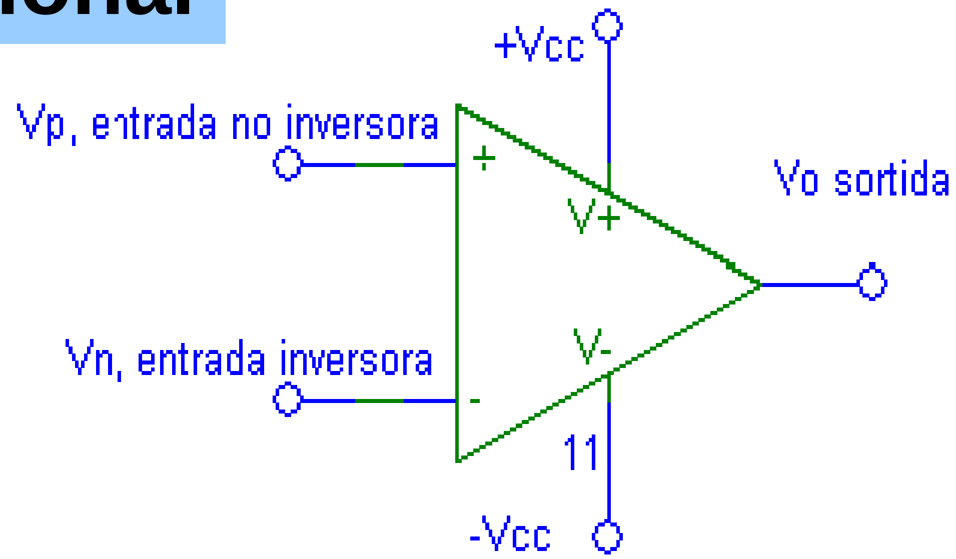


Amplificador Operacional

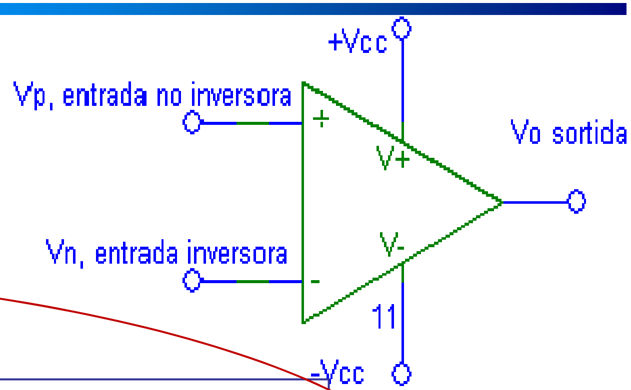


Amplificador Operacional

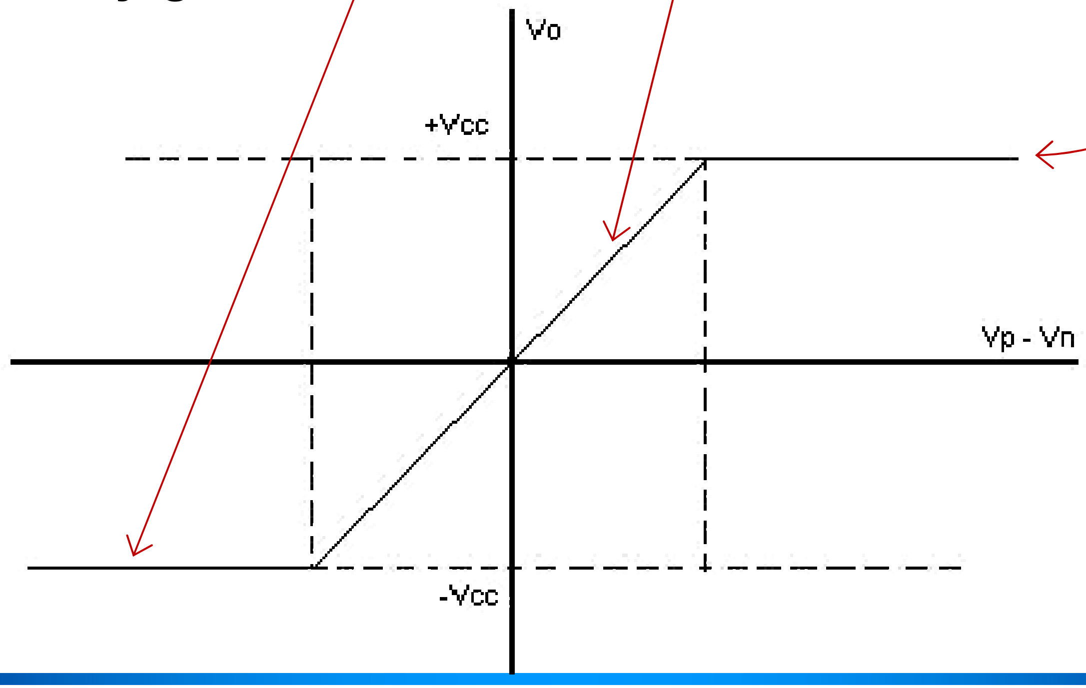
- **Esquema del AO:**
  - **Activo: necesita alimentación externa.**
  - **5 terminales:**
    - **2 entradas: +, –.**
    - **1 salidas.**
    - **2 de alimentación: +V_{cc}, -V_{cc}.**
      - **V_{cc+} ha de ser mayor que V_{cc-}**



Amplificador Operacional



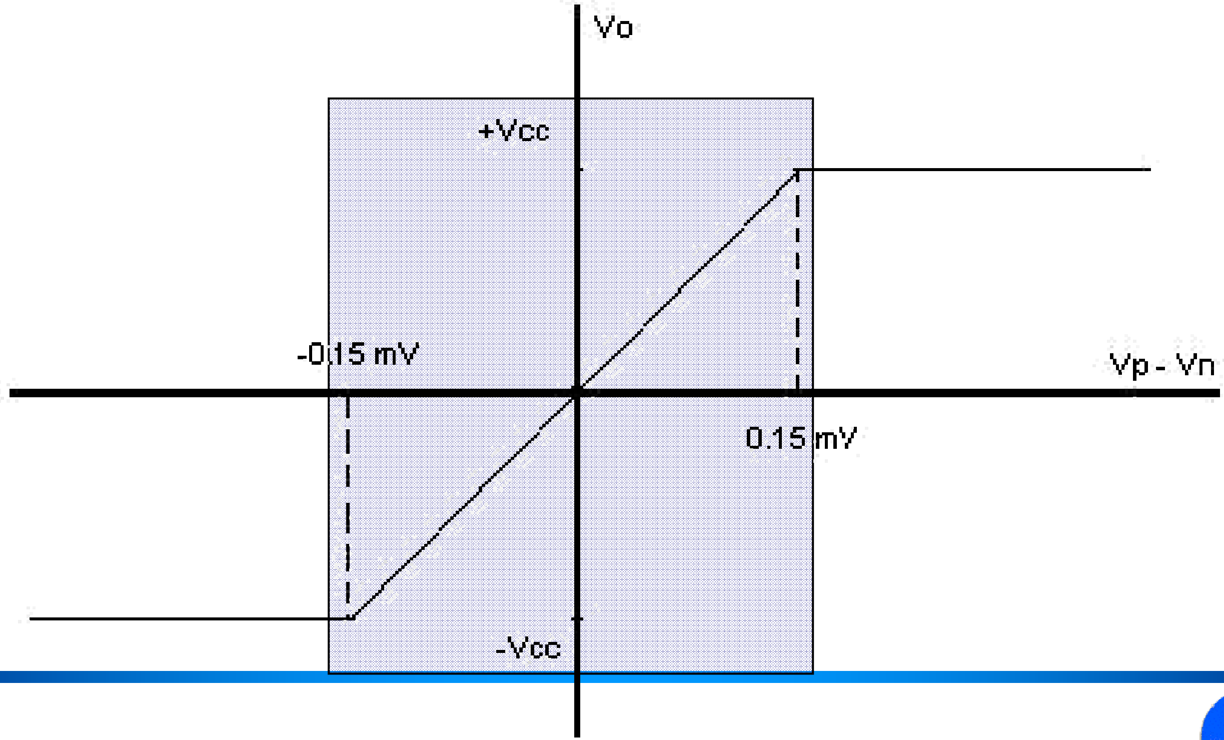
- **Función del AO:**
  - **La salida máxima es V_{cc+}.**
  - **La salida mínima es V_{cc-}.**
  - **Entre V_{cc-} y V_{cc+}, la salida es:** $\boxed{V_o = \mu \cdot (v_+ - v_-)}$
  - **μ es muy grande.**



Amplificador Operacional

- **Ejemplo de AO:**
  - » **V_{cc+}=15V, V_{cc-}=-15V.**
  - » **μ=10^5.**
  - » **Determinar (V_+-V_-) máximo en la zona lineal.**

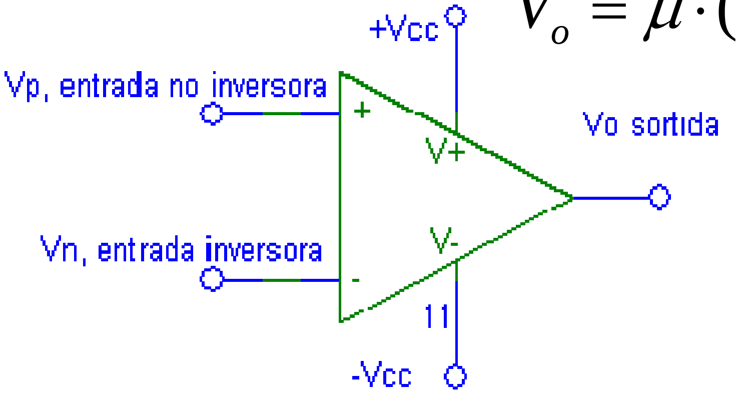
$$V_o = \mu \cdot (V_+ - V_-) \quad \Rightarrow \quad (V_+ - V_-)_{\max} = 15V / 10^5 = 0.15mV$$

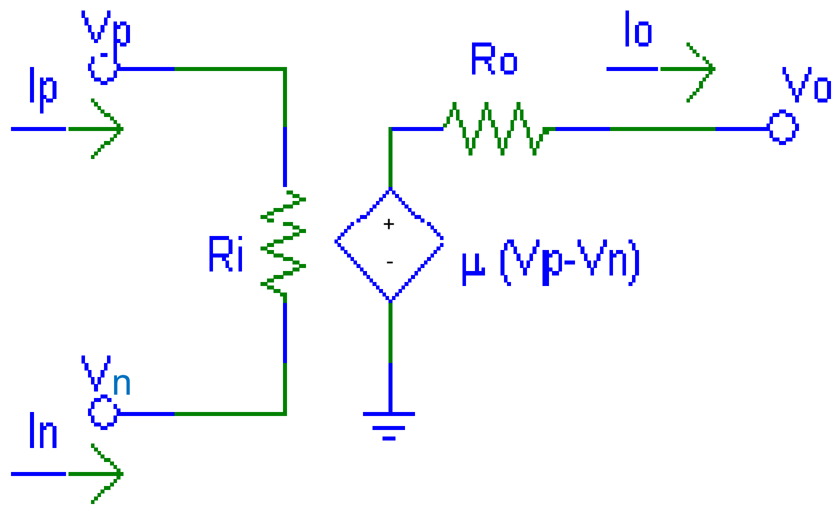


Amplificador Operacional

Circuito equivalente (zona lineal):

$$V_o = \mu \cdot (V_p - V_n)$$





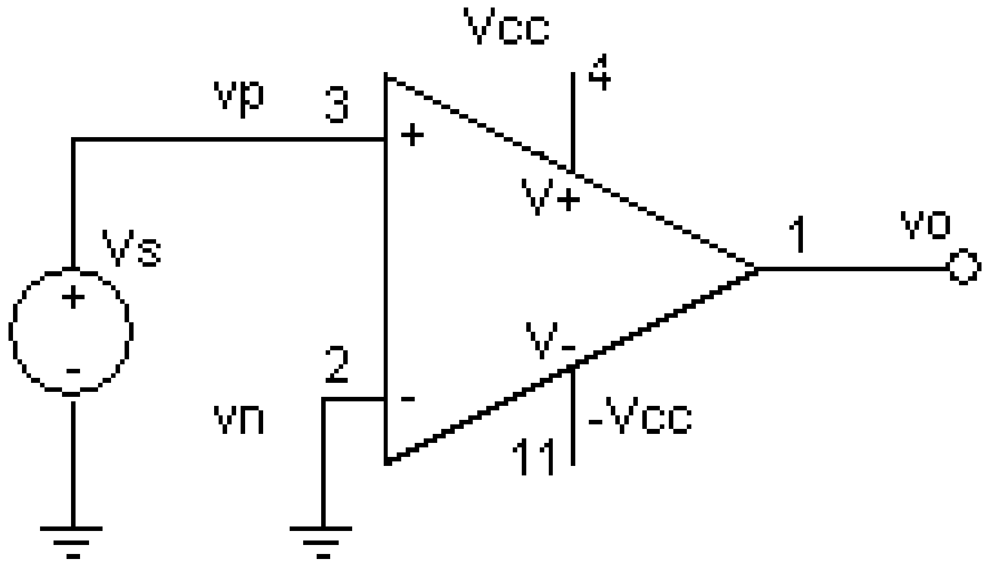
Parámetro	Nombre	Valores habituales	Valores ideales
µ	Ganancia en bucle abierto	10^5 - 10^7	∞
R_i	Resistencia de entrada	$10^6 – 10^{13}$ Ω	∞
R_o	Resistencia de salida	10 – 100 Ω	0
±Vcc	Tensión de alimentación	±15V	±15V *

Amplificador operacional

- **Características principales del AO ideal:**
  - **$R_i \rightarrow \infty$, por tanto no pasa corriente por la entrada + ni por la -.**
    - **El circuito al que se conecte no se verá afectado.**
  - **R_o = 0, por tanto la salida es como una fuente de tensión ideal.**
    - **La salida no se verá afectada al conectar otro circuito a la salida.**
    - **Lo que conecte a la salida sólo verá una fuente de tensión.**
- **Consecuencia: Cada circuito formado por un AO será un bloque funcional.**
  - **Los bloques podrán interconectarse sin que vean modificadas su función.**

Aplicaciones no-lineales

- **Bloque comparador:**
  - **Si $V_+ > V_- \rightarrow V_o = V_{cc+}$.**
  - **Si $V_+ < V_- \rightarrow V_o = V_{cc-}$.**



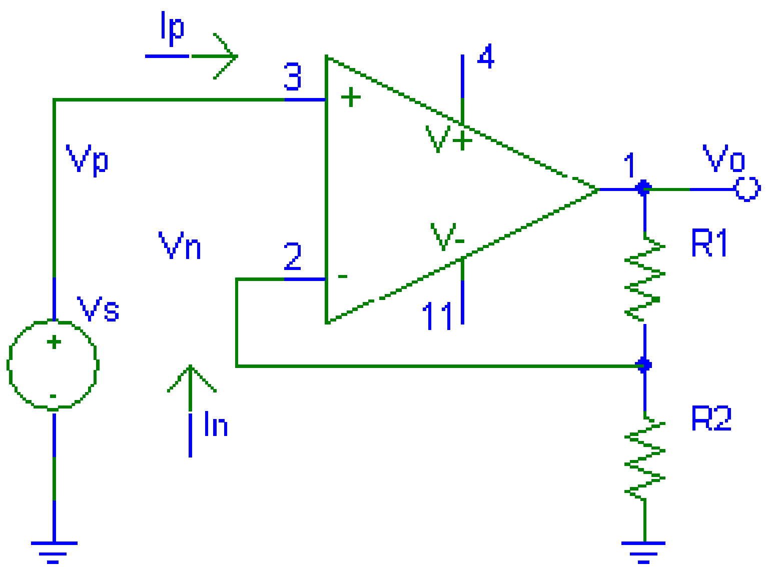
Aplicaciones lineales

- Para trabajar en la zona lineal, se realiza una **realimentación** negativa (de la salida a la entrada -).
  - Así se consigue que la salida no se sature.
  - Esta realimentación es estable: Si V_o aumenta, $-\mu \cdot \Delta V_n$ haría disminuir la salida y viceversa.
  - Si la salida no se satura, $V_+ - V_- = V_o/\mu \rightarrow V_- = V_+$.
- Por tanto, para resolver circuitos con AO en aplicaciones lineales (realim. negativa) utilizaremos la condición $V_- = V_+$.
- En la zona lineal, el amplificador es como un componente lineal.
  - Por tanto, pueden usarse los principios del tema0 para componentes lineales: superposición, Thevenin, etc.
  - También puede aplicarse Laplace.

Aplicaciones lineales

Amplificador no-inversor:

» **Función: Amplifica la señal de entrada. El factor de amplificación se fija por las resistencias del circuito.**



$$\textit{Sabemos que } I_p = I_n = 0$$

$$V_+ = V_s \quad \Rightarrow \quad V_- = V_+ = V_s$$

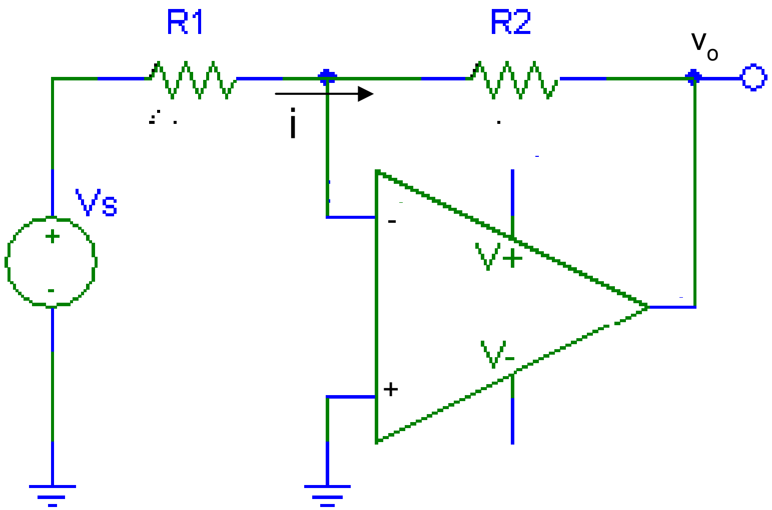
$$\Rightarrow \quad I_{R2} = V_S / R_2$$

$$\Rightarrow \quad V_O = I_{R2} \cdot (R_1 + R_2) = \frac{R_1 + R_2}{R_2} \cdot V_S = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \cdot V_S$$

Amplificador no-inversor

Aplicaciones lineales

- **Amplificador inversor:**
  - » **Función: Amplifica la señal de entrada cambiando el signo. El factor de amplificación se fija por las resistencias del circuito.**



Amplificador inversor

$$Sabemos\ que\ I_n = 0 \quad \Rightarrow \quad i_{R1} = i_{R2}$$

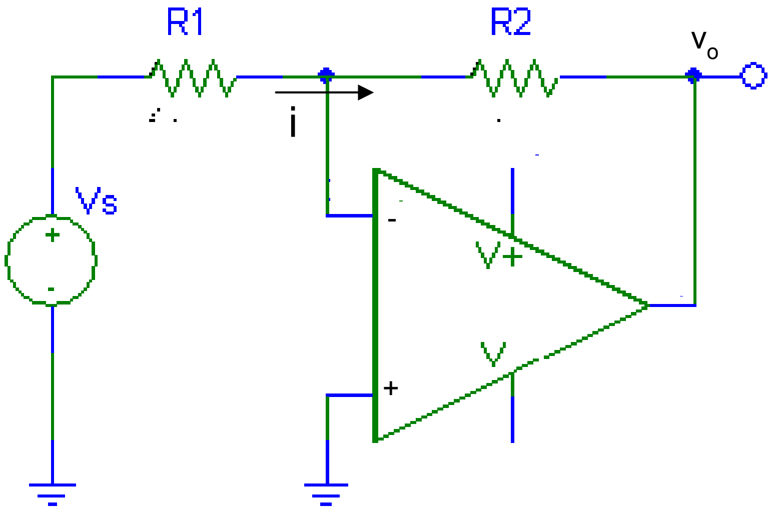
$$V_+ = 0 \quad \Rightarrow \quad V_- = V_+ = 0$$

$$\Rightarrow \quad i = (V_S - 0)/R_1$$

$$\Rightarrow \quad V_O = 0 - i \cdot R_2 = -\frac{R_2}{R_1} \cdot V_S$$

Aplicaciones lineales

- **Conversor tensión/corriente (o de transconductancia):**
  - » **Función: Tiene una salida de corriente (por la rama de realimentación) proporcional a la tensión de entrada.**
  - » **Un ejemplo es el amplificador inversor, tomando i como la señal de salida i_0).**

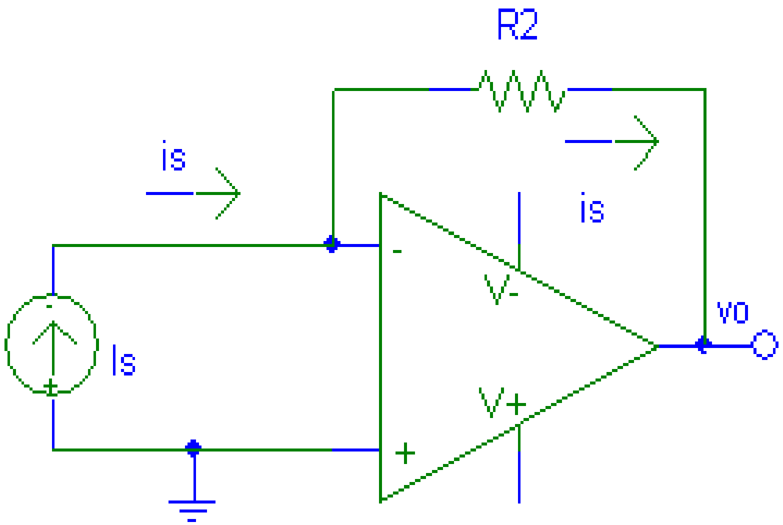


$$i_0 = i = \frac{1}{R_1} \cdot V_S$$

Amplificador inversor

Aplicaciones lineales

- **Conversor corriente/tensión (o de transimpedancia):**
  - **Función: Proporciona una salida de tensión proporcional a la corriente de entrada.**



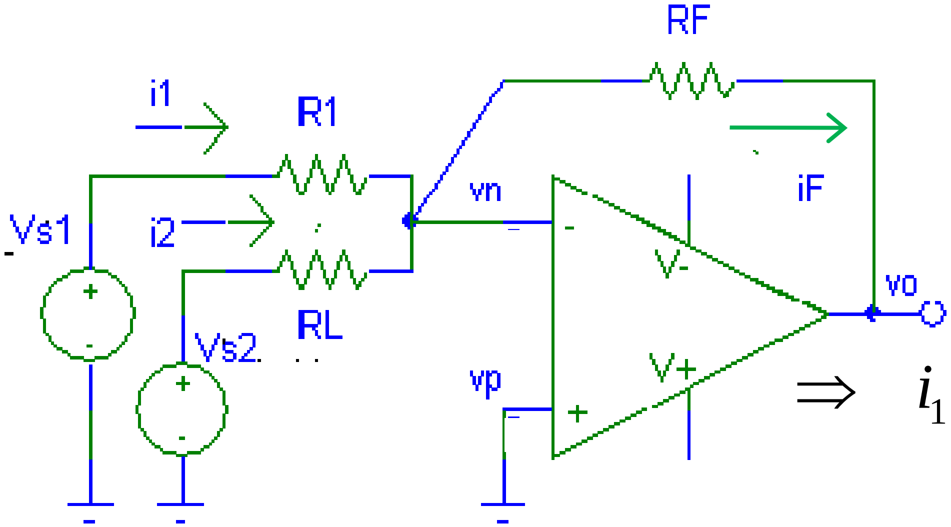
$$Sabemos\ que\ I_n = 0 \quad \Rightarrow \quad i_{R2} = i_S$$

$$V_+ = 0 \quad \Rightarrow \quad V_- = V_+ = 0$$

$$\Rightarrow \quad V_O = 0 - i_S \cdot R_2 = -R_2 \cdot i_S$$

Aplicaciones lineales

- **Bloque sumador (inversor):**
  - » **Función: Proporciona una tensión de salida que es suma de dos términos, cada uno proporcional a una entrada de tensión.**



$$Sabemos\ que\ I_n = 0 \quad \Rightarrow \quad i_F = i_1 + i_2$$

$$V_+ = 0 \quad \Rightarrow \quad V_- = V_+ = 0$$

$$\Rightarrow \quad i_1 = \frac{V_{S1}}{R_1} \qquad y \qquad i_2 = \frac{V_{S2}}{R_2}$$

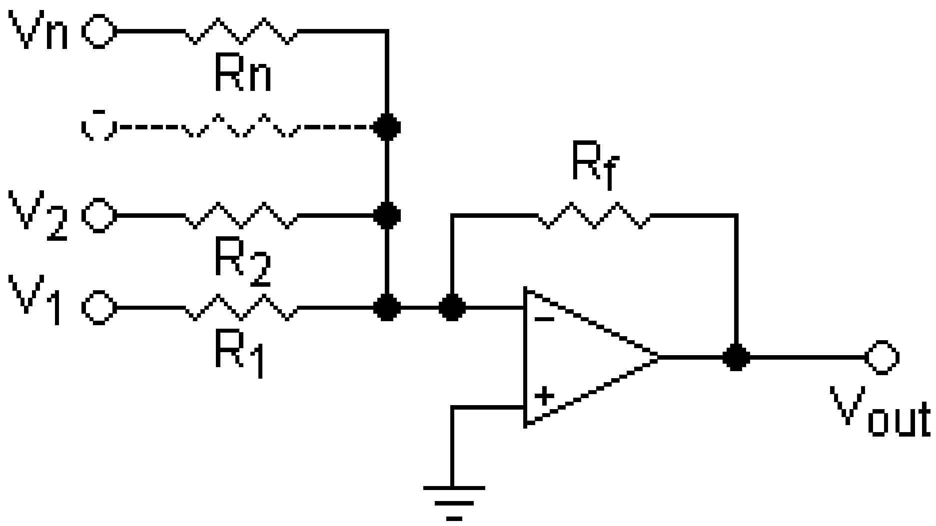
$$\Rightarrow \quad V_O = 0 - i_F \cdot R_F = -\left(\frac{R_F}{R_1} \cdot V_{S1} + \frac{R_F}{R_2} \cdot V_{S2} \right)$$

  - » **Si $R_F=R_1=R_2$, entonces $V_O=-(V_{S1}+V_{S2})$**

Aplicaciones lineales

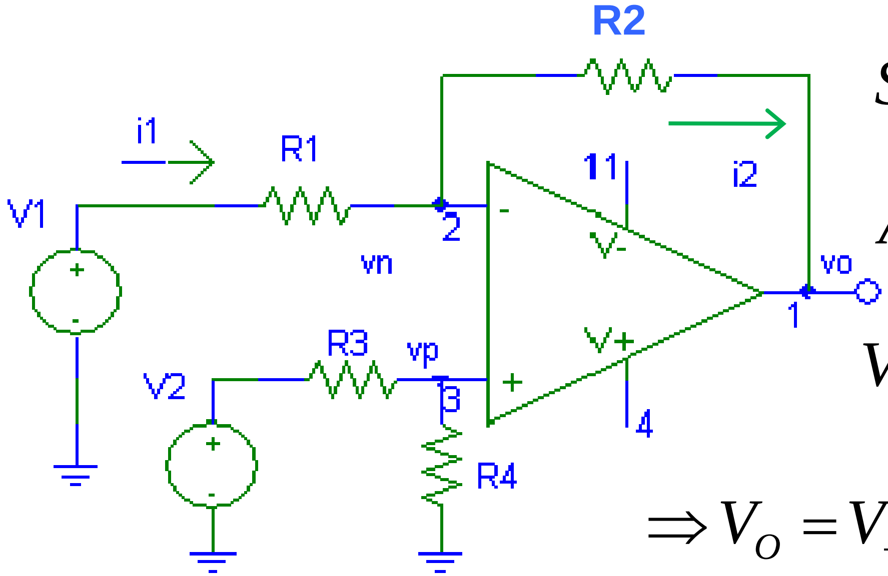
- **Bloque sumador (inversor): (cont.)**
  - **Fácilmente se puede extrapolar el resultado para n entradas.**

$$V_O = -\sum_{i=1}^{n} \frac{R_F}{R_i} \cdot V_i$$



Aplicaciones lineales

- **Bloque restador:**
  - » **Función: Proporciona una tensión de salida que es resta de dos términos, cada uno proporcional a una entrada de tensión.**



$$Sabemos\ que\ I_n = 0 \quad \Rightarrow \quad i_2 = i_1$$

$$Además\ I_p = 0 \quad \Rightarrow \quad V_+ = \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot V_2$$

$$V_- = V_+ \quad \Rightarrow i_1 = (V_1 - V_+)/R_1$$

$$\Rightarrow V_O = V_- - i_2 \cdot R_2 = \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot V_2 - \frac{R_2}{R_1} V_1$$

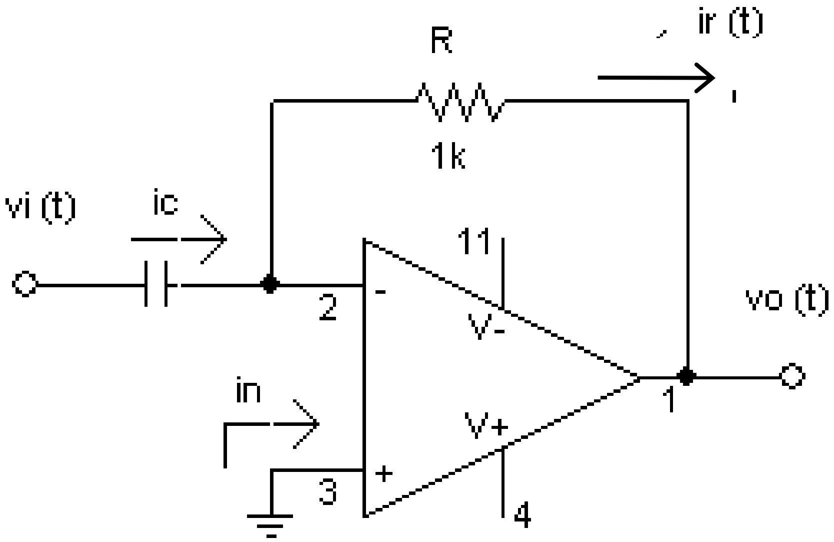
bloque restador.

  - » **Si $R_1=R_2=R_3=R_4$, entonces $V_O=(V_2-V_1)$**

  - » **Puede hacerse también por el principio de superposición.**

Aplicaciones lineales

- **Bloque derivador (inversor):**
  - **Función: Proporciona una tensión de salida que es proporcional a la derivada de la tensión de entrada.**



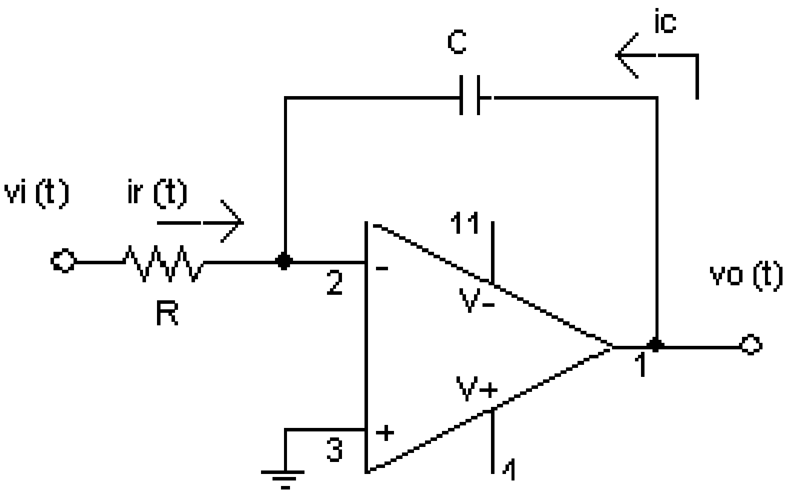
$$\text{Sabemos que} \quad i_C = C \cdot \frac{dV_C}{dt} =$$

$$= C \cdot \frac{d(V_i - 0)}{dt} = C \cdot \frac{dV_i}{dt}$$

$$\Rightarrow V_O = 0 - i_C \cdot R = -R \cdot C \cdot \frac{dV_i}{dt}$$

Aplicaciones lineales

- **Bloque integrador:**
  - **Función: Proporciona una tensión de salida que es proporcional a la integral de la tensión de entrada.**



$$Sabemos\ que \quad i_r = V_i / R$$

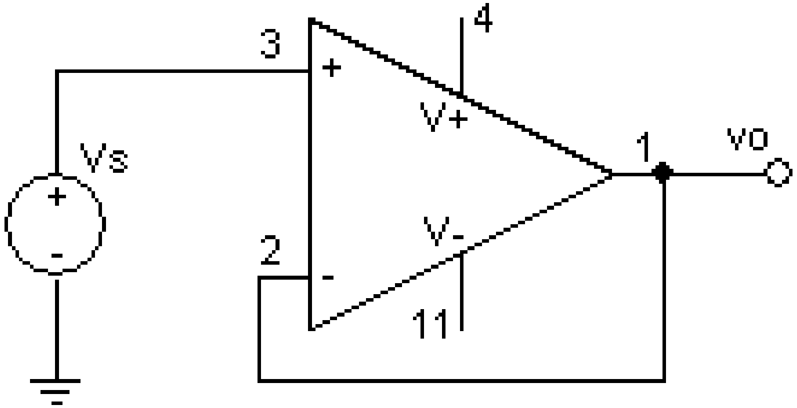
$$\Rightarrow C \cdot \frac{d(0 - V_O)}{dt} = V_i / R$$

$$\Rightarrow V_O = -\frac{1}{R \cdot C} \cdot \int_{-\infty}^{t} V_i(\tau) \cdot d\tau$$

Aplicaciones lineales

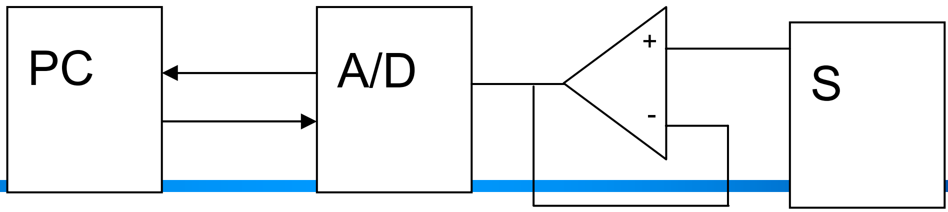
Bloque seguidor:

- » **Función: Proporciona una tensión de salida que es igual a la entrada.**



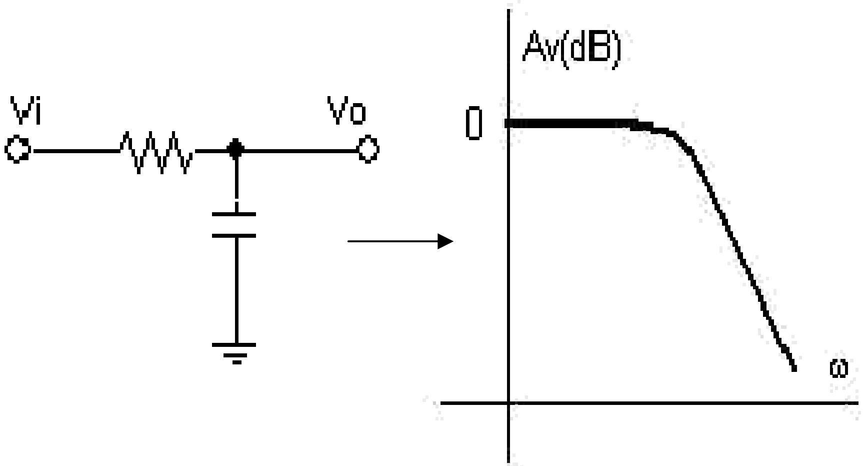
$$V_O = V_- = V_+ = V_S$$

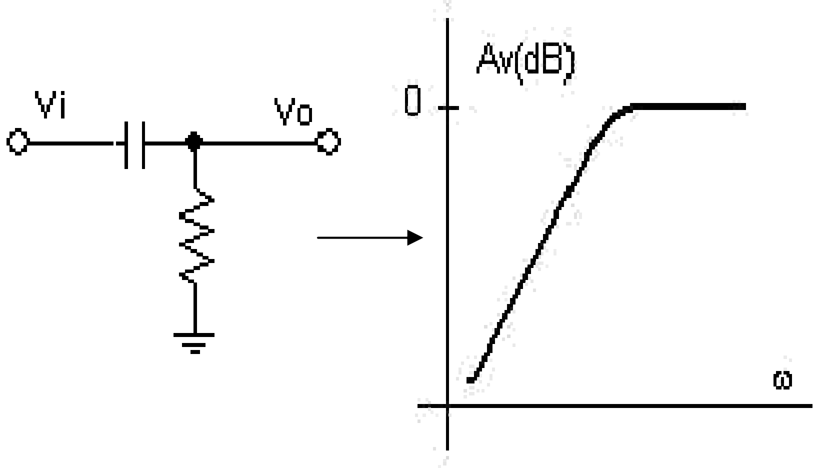
- » **Utilidad: Si V_S fuese un punto de tensión de un circuito, podemos aplicar esta tensión a otro circuito sin que el inicial se vea afectado.**
- » **Ej: Sistema de adquisición de datos:**



Aplicaciones lineales

- **Filtros activos:**
  - **Los filtros pasivos los hemos visto en el tema anterior:**



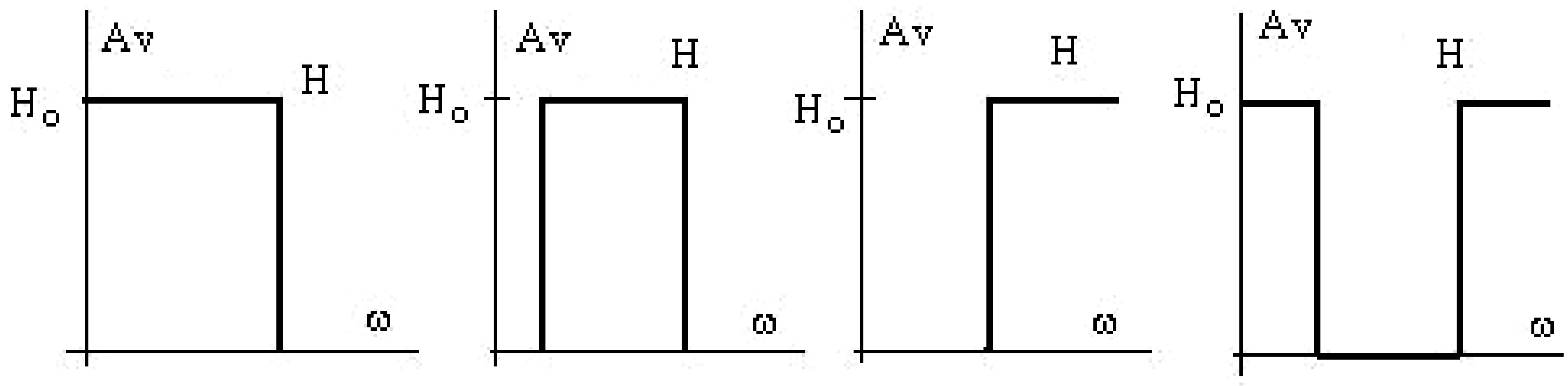


Filtros Pasivos

- **Inconvenientes:**
  - **Al conectarlos entre sí se ven influenciados unos a otros.**
  - **Un circuito con muchos polos requeriría un circuito complejo a resolver.**
  - **Ganancia máxima 1 (= 0 dB).**

Aplicaciones lineales

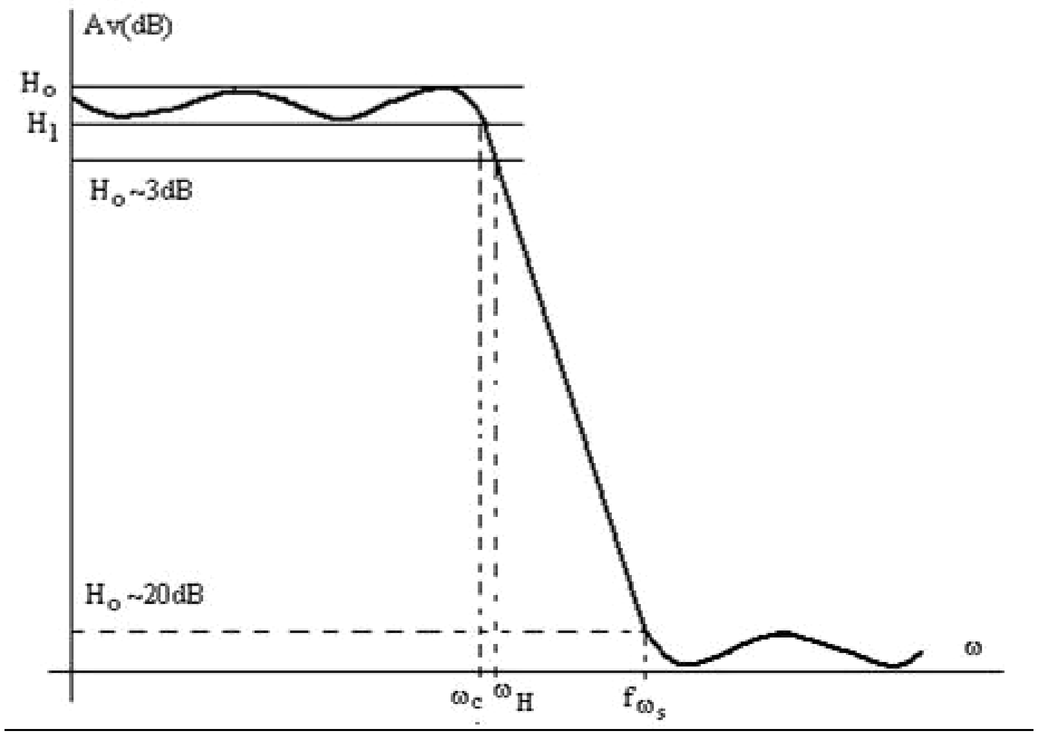
- **Filtros activos: (cont.)**
  - **Ventajas:**
    - **Para conseguir un número alto de polos y/o ceros, se puede conseguir conectando bloques básicos.**
    - **Se consiguen ganancias mayores a 1.**
  - **Ganancias vs ω para filtros ideales:**



Ideales: pasa bajos pasa banda pasa altos rechazo de banda

Aplicaciones lineales

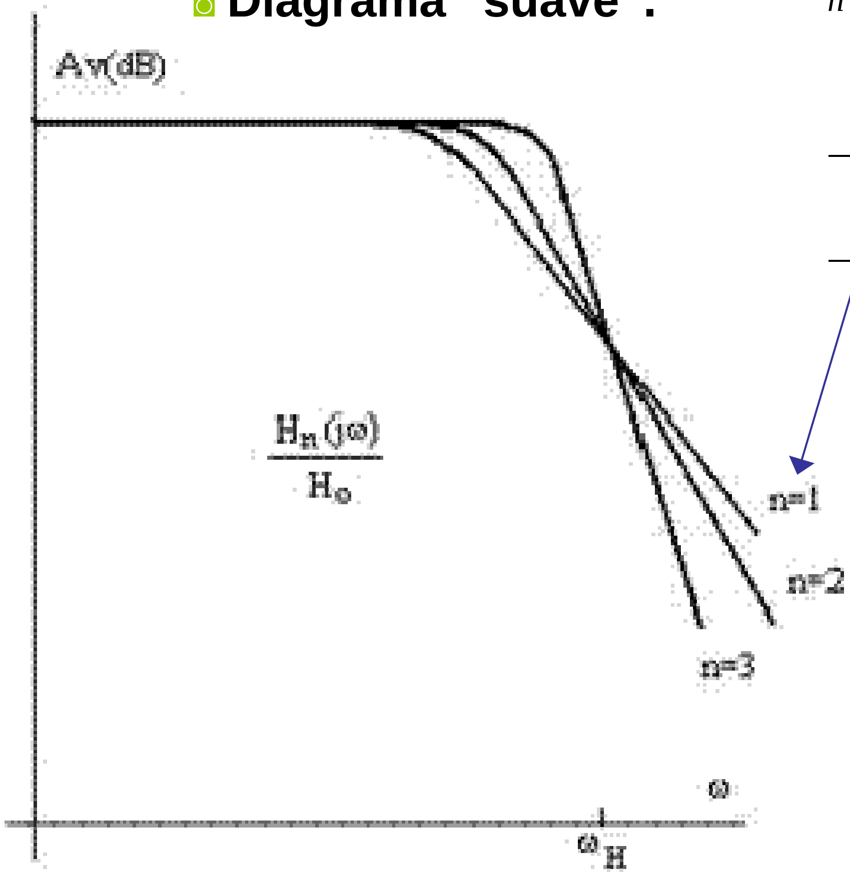
- **Filtros activos: (cont.)**
  - **Los filtros reales pueden tener una forma como la siguiente:**
    - **Pendiente finita.**
    - **Bandas pasante y de rechazo no planas.**



Aplicaciones lineales

- **Filtros activos: (cont.)**
  - **Polinomios de Butterworth ($B_n(s)$):**
    - **Diagrama "suave".**

$$H_n(s) = \frac{H_o}{B_n(s)} \longrightarrow \left|H_n(j\omega)\right|^2 = \frac{H_o^2}{1+\left(\frac{\omega}{\omega_o}\right)^{2n}}$$



N	$B_n(s)$
1	$\frac{s}{\omega_0}+1$
2	$\frac{s^2}{\omega_o^2}+\sqrt{2}\frac{s}{\omega_o}+1$
3	$\left(\frac{s}{\omega_o}+1\right)\left(\frac{s^2}{\omega_o^2}+\frac{s}{\omega_o}+1\right)$

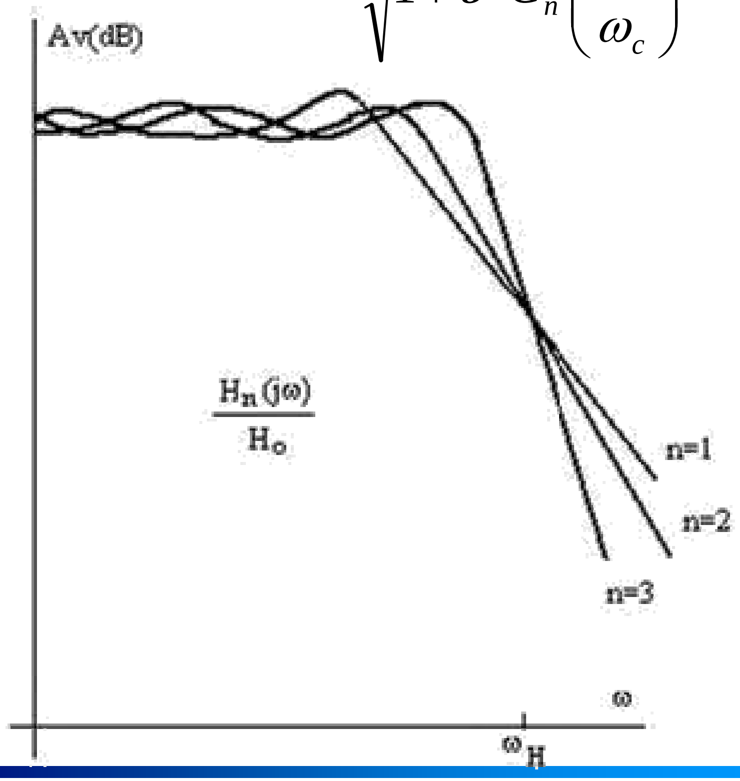
Aplicaciones lineales

Filtros activos: (cont.)

» Polinomios de Chebyshev:

$$\left|H(j\omega)\right| = \frac{H_o}{\sqrt{1+\varepsilon^2 C_n^2\left(\dfrac{\omega}{\omega_c}\right)}}$$

$$C_n\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right) = \begin{cases} \cos\left(n\cdot\arccos\left(\dfrac{\omega}{\omega_c}\right)\right) & 0 \le \dfrac{\omega}{\omega_c} \le 1 \\ \cos\left(n\cdot ar\cosh\left(\dfrac{\omega}{\omega_c}\right)\right) & \dfrac{\omega}{\omega_c} > 1 \end{cases}$$

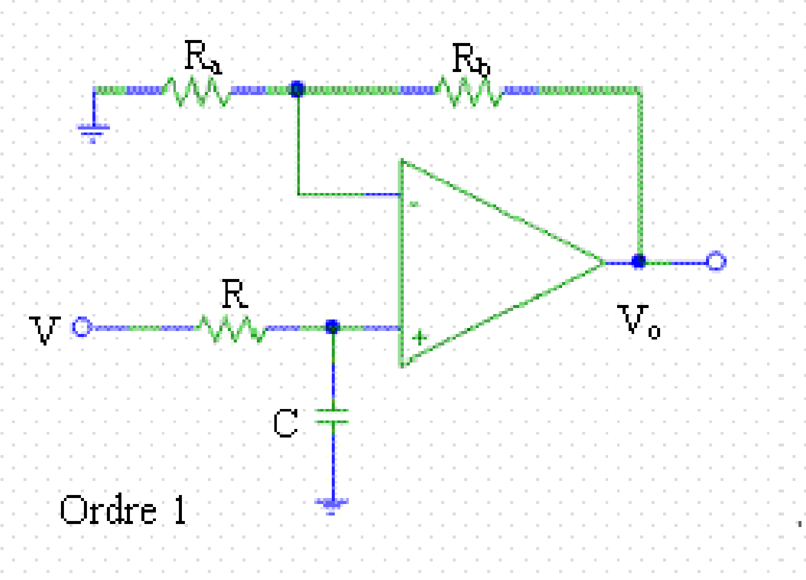


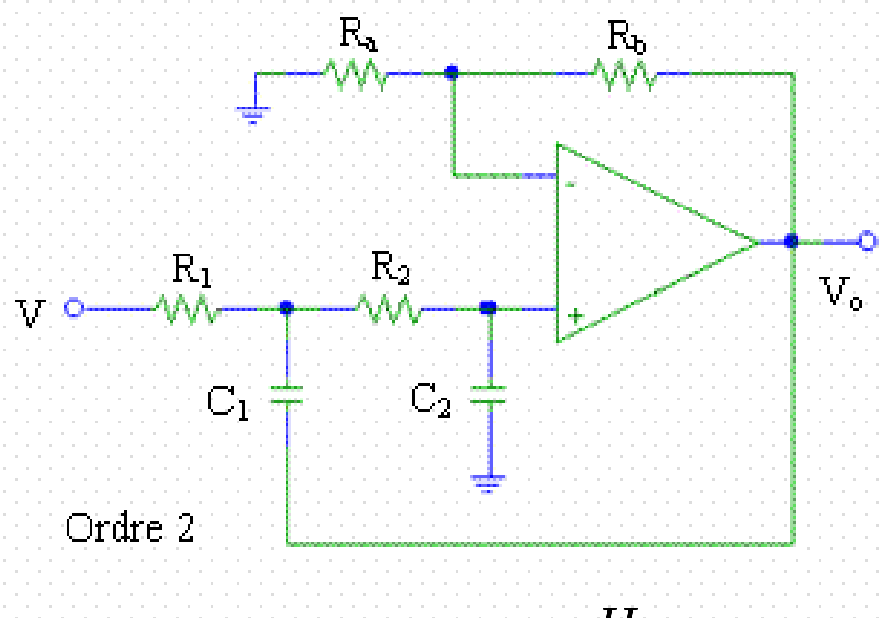
N	$B_n(s)$
1	$\dfrac{s}{\omega_0}+2.863$
2	$\dfrac{s^2}{\omega_o^2}+1.425\dfrac{s}{\omega_o}+1.516$
3	$\left(\dfrac{s}{\omega_o}+0.626\right)\left(\dfrac{s^2}{\omega_o^2}+0.626\dfrac{s}{\omega_o}+1.142\right)$

Aplicaciones lineales

Filtros activos: (cont.)

» Celdas de Sallen Key:





$$H_s = \frac{H_0}{sRC + 1}$$

$$H_s = \frac{H_0}{R^2C^2s^2 + RCs(3 - H_0) + 1}$$

$$\omega_o = \frac{1}{RC} \qquad i \qquad H_0 = 1 + \frac{R_B}{R_A}$$

donde $R_1=R_2=R$ i $C_1=C_2=C$