

TEMA 5 .

AMPLIFICADOR OPERACIONAL

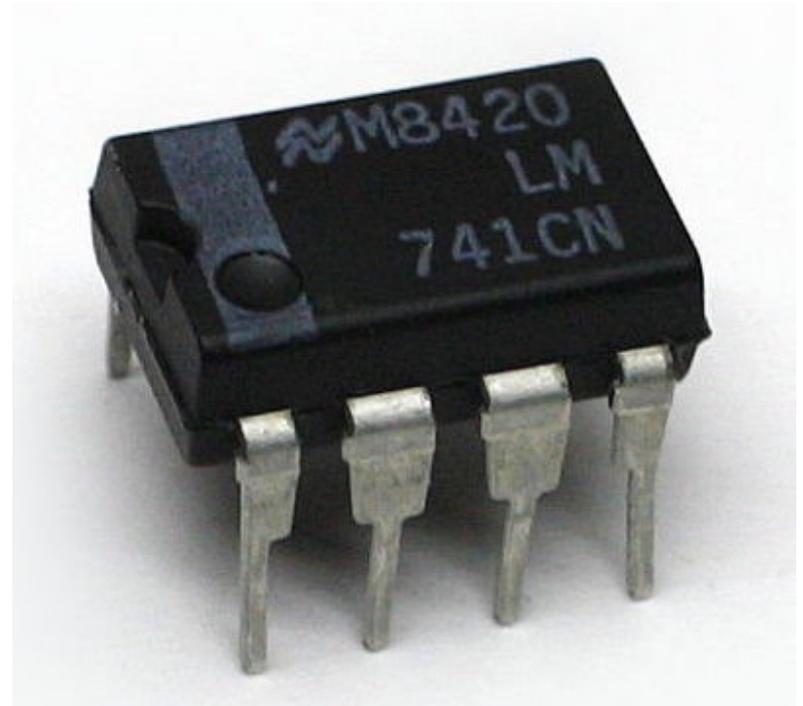
Fundamentos Electrónica Física

Docente: Francisco Javier Llopis Cánovas
Docente: Beatriz Rodríguez Mendoza
Docente: Silvestre Rodríguez Pérez
Docente: Julio Francisco Rufo Torres

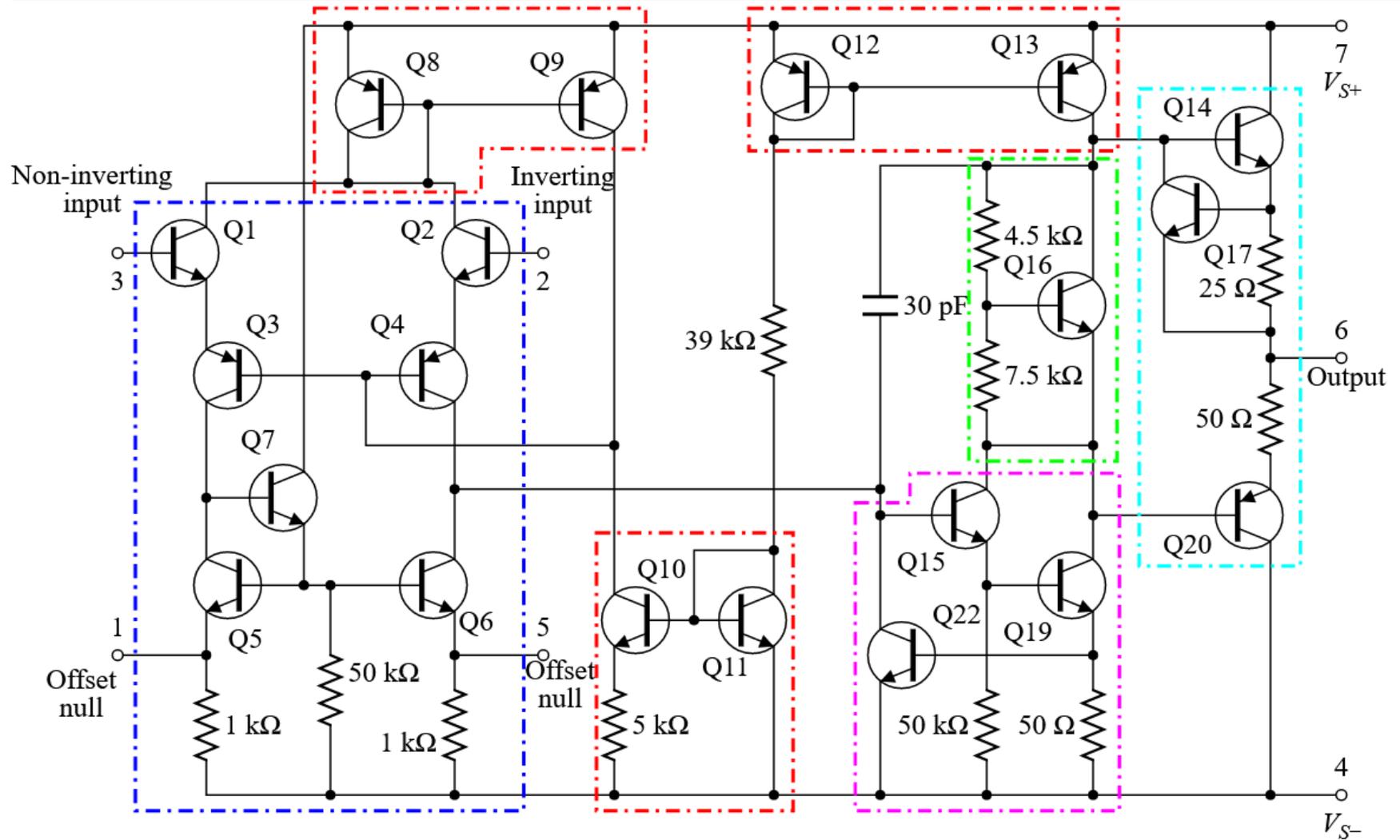


Tema 5. – OPAMP

- Introducción
- Funcionamiento ideal
- Regiones de operación
- Lazo abierto
- Lazo cerrado



Tema 5. – OPAMP



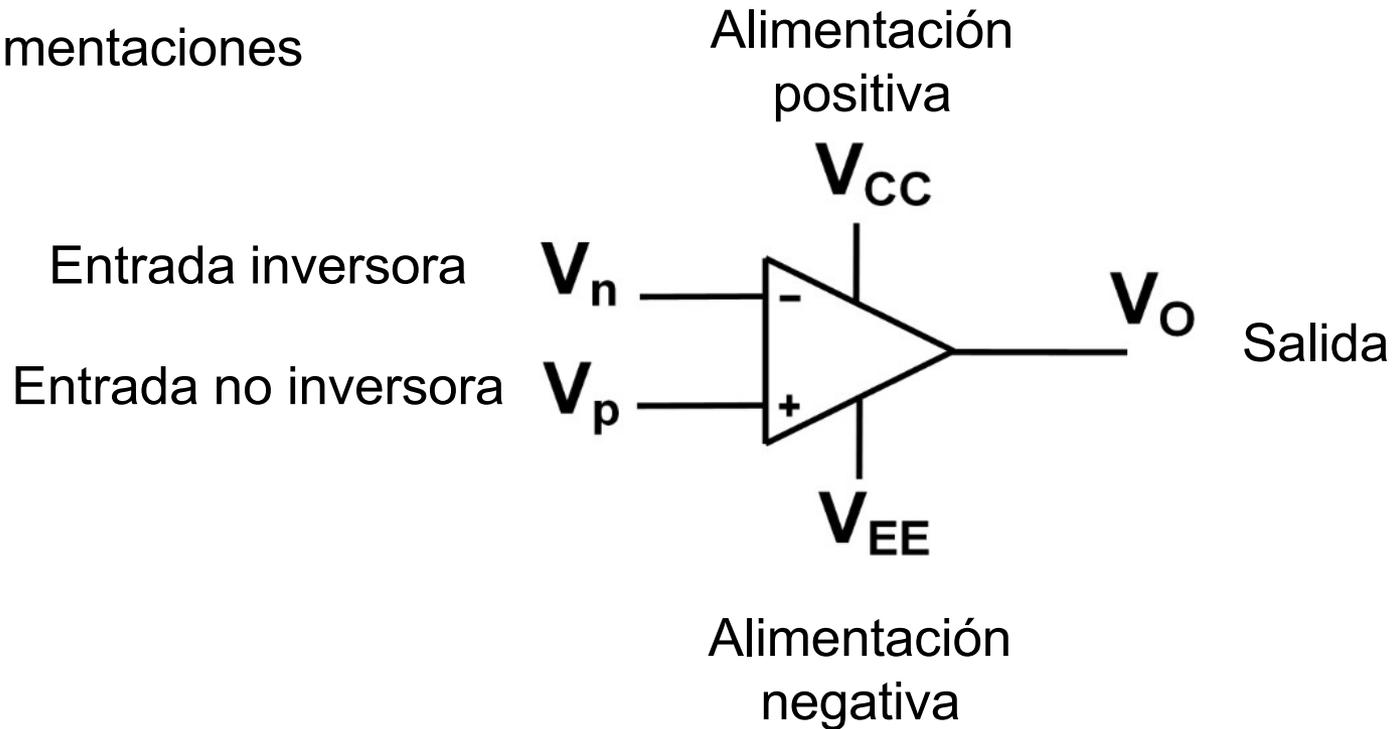
INTRODUCCIÓN

- Amplificador Operacional: AO, OpAmp
- Componente de amplia utilización en la electrónica actual
- Dispositivo activo, basado en transistores bipolares y/o MOSFETs
- La primera versión (μ A702) data de 1964
- La versión actual (μ A741) de 1968
- Precio actual: 10-25 céntimos

INTRODUCCIÓN

➤ 5 Terminales

- 2 entradas
- 1 salida
- 2 alimentaciones



Tema 5. – OPAMP

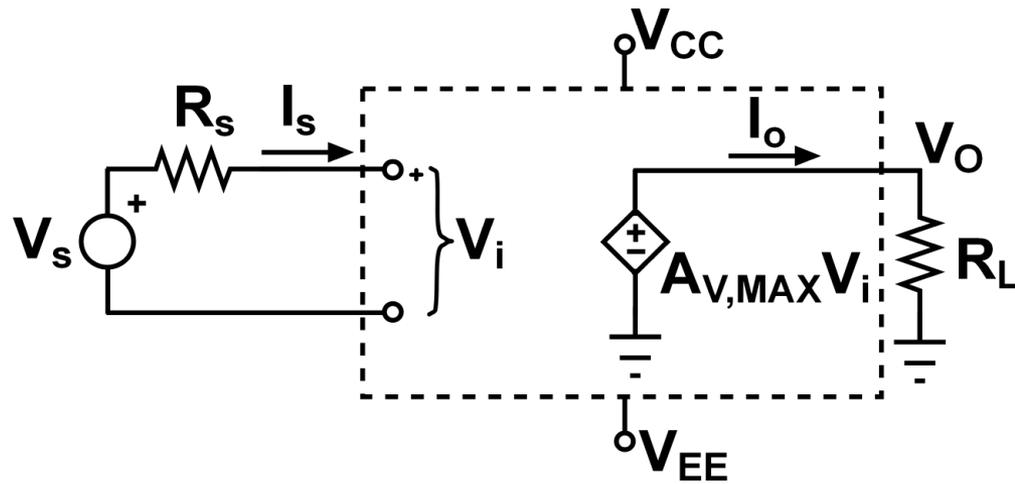
- Introducción
- **Funcionamiento ideal**
- Regiones de operación
- Lazo abierto
- Lazo cerrado

FUNCIONAMIENTO IDEAL

➤ El AO ideal presenta las características de un amplificador de voltaje perfecto:

- Resistencia de entrada infinita ($R_{IN} = \infty$)
- Resistencia de salida nula ($R_{OUT} = 0$)
- Ganancia infinita ($A_{V,MAX} = \infty$)

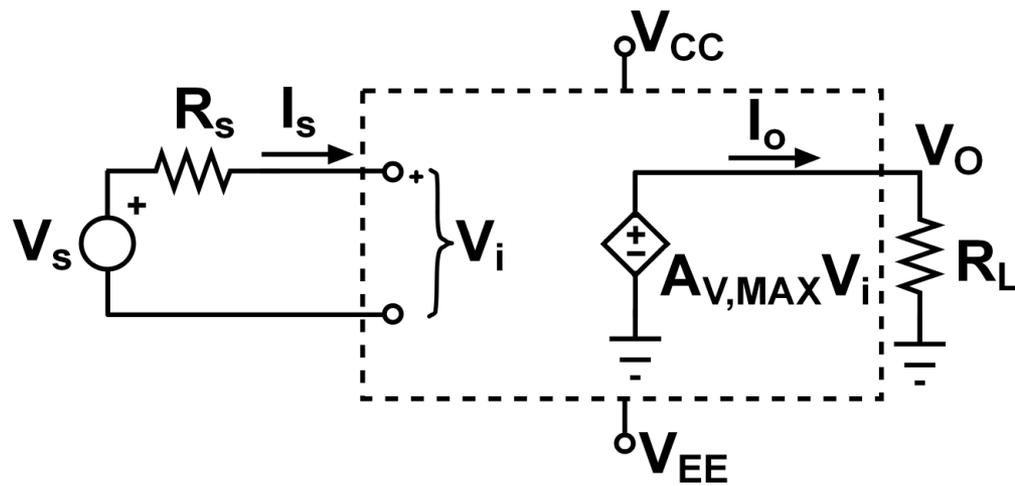
$$A_V = \frac{R_{IN}}{R_{IN} + R_g} A_{V,MAX} \frac{R_L}{R_L + R_{OUT}} = A_{V,MAX} = \infty$$



FUNCIONAMIENTO IDEAL

- La potencia que entrega el generador de señal es nula ($I_s = 0$), debido a la resistencia de entrada infinita
- La potencia que se entrega a la carga (P_L) la proporciona la fuente dependiente. Dado que la energía no se puede crear a partir de la nada, la potencia vendrá de la alimentación del AO

$$P_L = V_o I_o = \frac{V_o^2}{R_L} = \frac{A_V^2 V_i^2}{R_L}$$



3 LEYES

- La corriente que circula a través de las dos entradas del AO es nula (debido a la resistencia de entrada infinita)

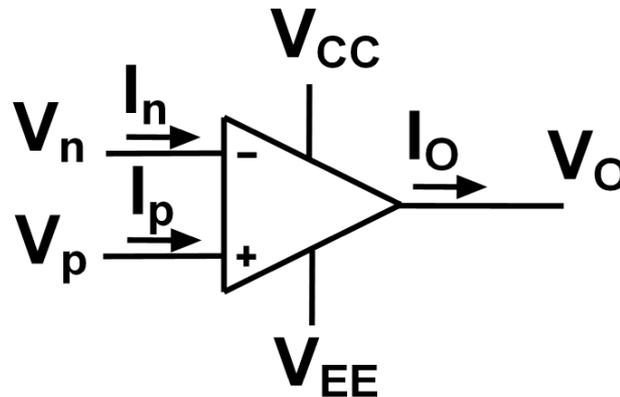
$$I_p = I_n = 0$$

- La tensión de salida es proporcional a la diferencia de los voltajes de entrada

$$V_O = A_V (V_p - V_n)$$

- La tensión de salida está limitada entre los valores de alimentación

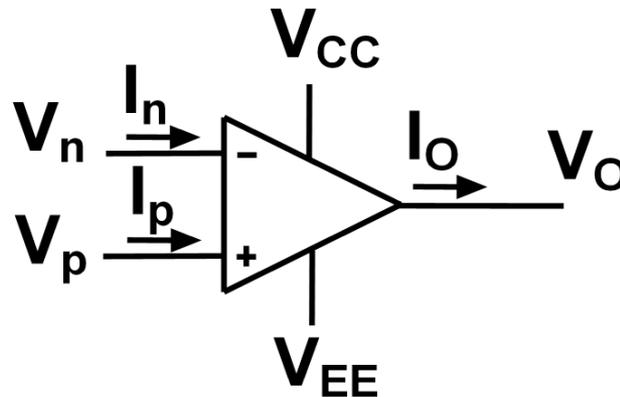
$$V_O \in [V_{CC}, V_{EE}]$$



CORRIENTE DE SALIDA

- La corriente que circula a través de la salida del AO (I_O) no tiene por que ser nula
- Tendrá el valor y el signo necesarios para que se cumplan las 3 leyes, que fijan el valor de la tensión de salida V_O
- En la práctica, está limitada hasta un valor máximo, tanto en sentido positivo como negativo (normalmente simétrico)

$$I_O \in [I_{O,max}, -I_{O,max}]$$



LIMITACIONES

- Además de la limitación en la tensión de salida (3ª ley) y la corriente máxima de salida, existen otras limitaciones que alejan el comportamiento del AO del ideal
- Ganancia finita
- Resistencia de entrada no infinita
- Resistencia de salida no nula
- Offset de salida
- Comportamiento frecuencial
- Slew-rate
- ...

Tema 5. – OPAMP

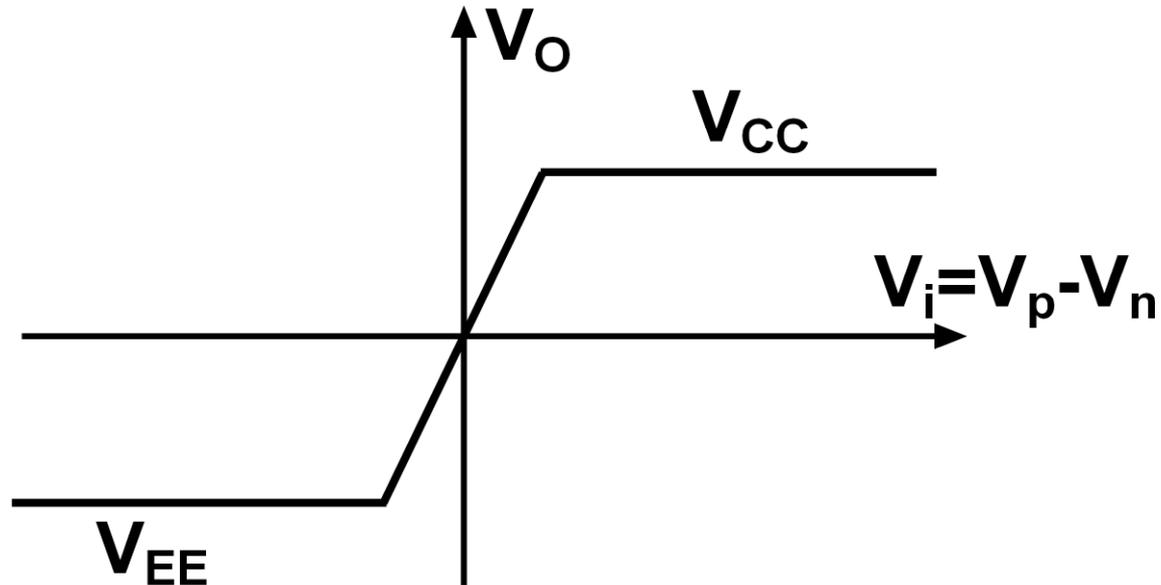
- Introducción
- Funcionamiento ideal
- **Regiones de operación**
- Lazo abierto
- Lazo cerrado

REGIONES DE OPERACIÓN

- En base a las 3 leyes, el comportamiento del A.O. puede aproximarse por una característica $v_o(v_i)$ lineal por tramos, donde $v_i = v_p - v_n$.
- Dicha característica consta de tres regiones:
 - región lineal, representada por un segmento de recta que pasa por el origen
 - región de saturación positiva, representada por un segmento de recta horizontal de ordenada $+V_{cc}$
 - región de saturación negativa, similar a la anterior, pero de ordenada $-V_{cc}$ (Se supone alimentación simétrica)

REGIONES DE OPERACIÓN

1. Región lineal ($V_O = A_V V_i$)
2. Región de saturación positiva ($V_O = V_{CC}$)
3. Región de saturación negativa ($V_O = V_{EE}$)



REGIONES DE OPERACIÓN

- La pendiente en la región lineal es la ganancia en tensión del amplificador
- Idealmente es infinita, en la práctica tiene un valor aproximado de 10^5
- Para una alimentación simétrica típica de $\pm 15\text{V}$, la región lineal está acotada entre valores de la tensión de entrada:

$$\pm 15/10^5 \text{ V} = \pm 150 \mu\text{V}$$

- Por tanto, la región lineal es muy estrecha y en ella se cumple:

$$v_p - v_n \approx 0 \rightarrow v_p \approx v_n$$

- Si el AO está en región lineal, existe un cortocircuito virtual entre los terminales de entrada
 - Cortocircuito porque ambos tienen el mismo voltaje
 - Virtual porque no existe camino entre ellos

Tema 5. – OPAMP

- Introducción
- Funcionamiento ideal
- Regiones de operación
- **Lazo abierto**
- Lazo cerrado

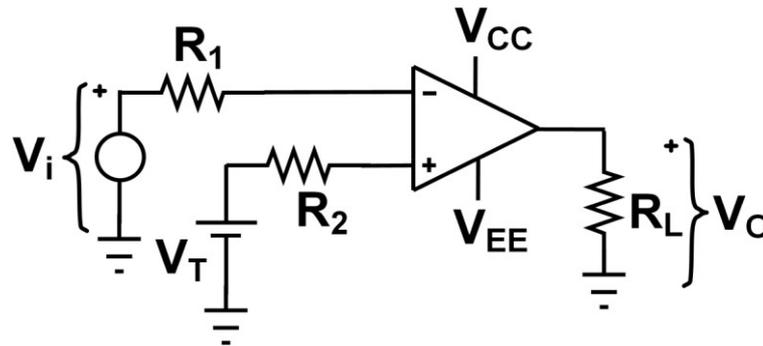
LAZO ABIERTO

- El AO tiende a trabajar en las regiones de saturación, ya que una ligera diferencia en los terminales de entrada lo satura hacia la alimentación positiva o negativa
- La región lineal es tan estrecha que no es visible en la práctica, por lo que modelamos el comportamiento del AO ciñéndonos a las regiones de saturación exclusivamente
- Por tanto, el AO actúa como un comparador

$$V_O = \begin{matrix} V_{CC} & v_p > v_n \\ V_{EE} & v_p < v_n \end{matrix}$$

LAZO ABIERTO

➤ Ejemplo:



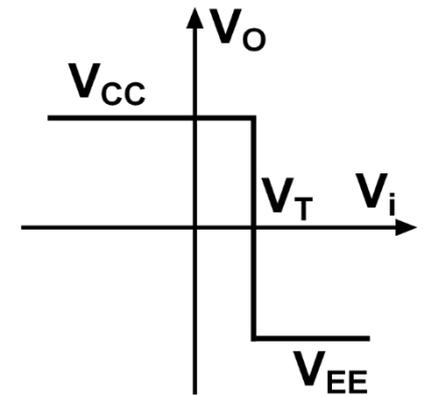
➤ Dado que las corrientes de entrada son nulas:

$$I_n = 0 \rightarrow v_n = V_i$$

$$I_p = 0 \rightarrow v_p = V_T$$

➤ Asumiendo que se comporta como un comparador:

$$V_O = \begin{cases} V_{CC} & V_i < V_T \\ V_{EE} & V_i > V_T \end{cases}$$

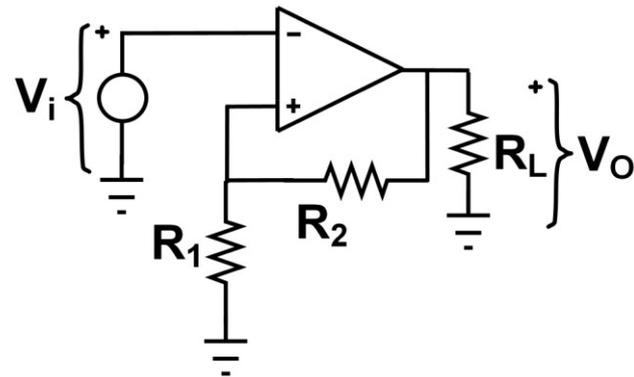
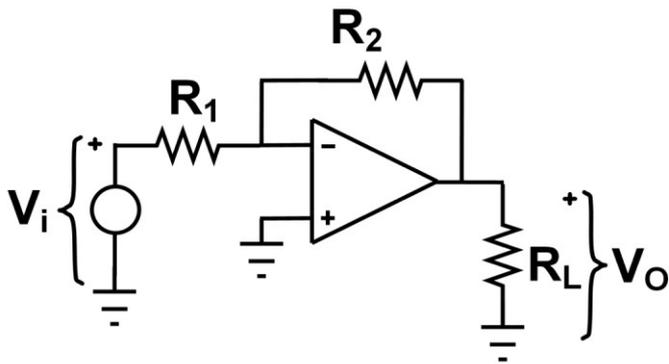


Tema 5. – OPAMP

- Introducción
- Funcionamiento ideal
- Regiones de operación
- Lazo abierto
- Lazo cerrado

REALIMENTACIÓN

- Los circuitos que presentan caminos que conectan la salida con la entrada se denominan circuitos realimentados o en lazo cerrado
- Existen dos tipos de realimentaciones: positiva y negativa
- Ejemplos:



REALIMENTACIÓN POSITIVA

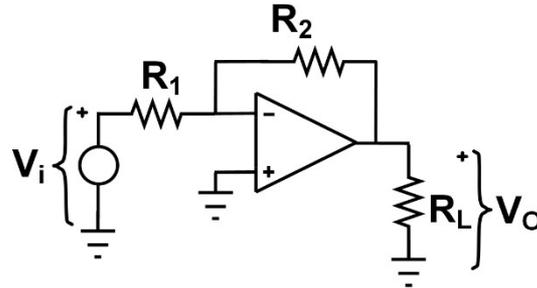
- Los circuitos que conectan su salida al terminal no inversor se dice que tienen realimentación positiva
- Los amplificadores con realimentación positiva tienden a trabajar en las regiones de saturación
- En efecto, si v_o aumenta, la realimentación produce un aumento en v_p , el cual provoca un mayor aumento en v_o ($v_o = A(v_p - v_n)$ en la región lineal). Este efecto encadenado provoca que la salida entre en la región de saturación positiva
- De forma similar, si v_o empieza a disminuir el amplificador entra en saturación negativa

REALIMENTACIÓN NEGATIVA

- Los circuitos que conectan la salida al terminal inversor se dice que tienen una realimentación negativa
- Los amplificadores con realimentación negativa tienden a mantenerse estables en la región lineal
- En efecto, si por alguna circunstancia v_o aumenta, la realimentación produce un aumento de v_n , que a su vez provoca una disminución de v_o que tiende a neutralizar el aumento inicial

REALIMENTACIÓN NEGATIVA

- Ejemplo, basándonos en las tres leyes.



- Dado que las corrientes de entrada al terminal inversor es nula:

$$I_n = 0 \rightarrow I_{R1} = I_{R2} \rightarrow \frac{V_i - v_n}{R_1} = \frac{v_n - V_o}{R_2}$$

- Dado que el voltaje en el terminal no inversor es nulo:

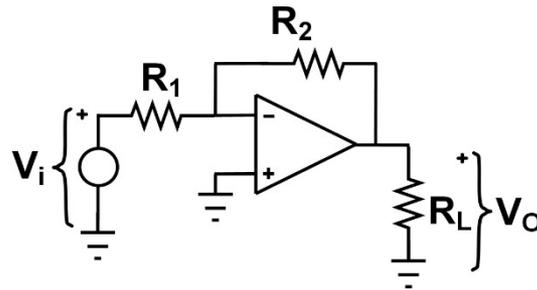
$$v_p = 0 \rightarrow V_o = -A_v v_n$$

- Combinando las expresiones anteriores:

$$\frac{V_i + \frac{V_o}{A_v}}{R_1} = \frac{-\frac{V_o}{A_v} - V_o}{R_2} \rightarrow \frac{V_o}{V_i} = -\frac{A_v R_2}{R_2 + (A_v + 1)R_1}$$

REALIMENTACIÓN NEGATIVA

- Ejemplo, basándonos en el cortocircuito virtual:



- Cortocircuito virtual:

$$v_p = v_n = 0$$

- Dado que las corrientes de entrada al terminal inversor es nula:

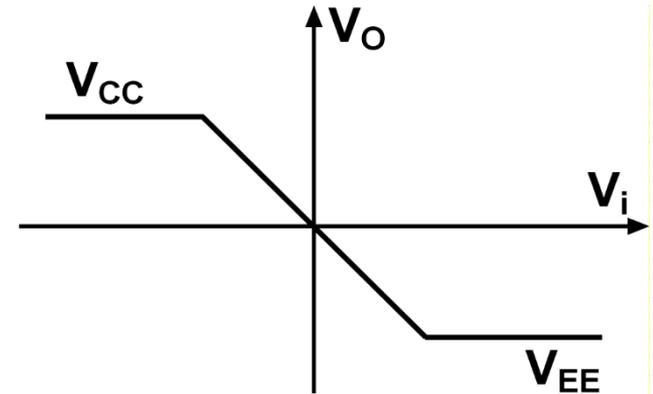
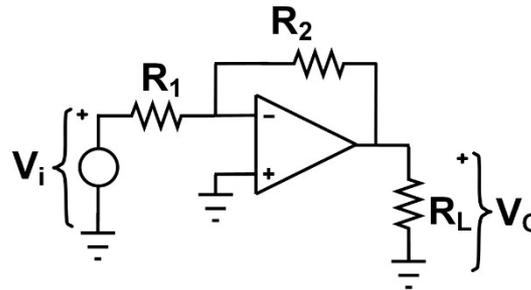
$$I_n = 0 \rightarrow I_{R1} = I_{R2} \rightarrow \frac{V_i}{R_1} = \frac{-V_o}{R_2} \rightarrow \frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_2}{R_1}$$

- Esta expresión coincide con la anterior, asumiendo que la ganancia del amplificador es muy grande:

$$\lim_{A_v \rightarrow \infty} \frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_2}{R_1}$$

REALIMENTACIÓN NEGATIVA

- Ejemplo:



- Hemos determinado la ganancia en región lineal:

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

- También podemos calcular los límites derivados de la alimentación:

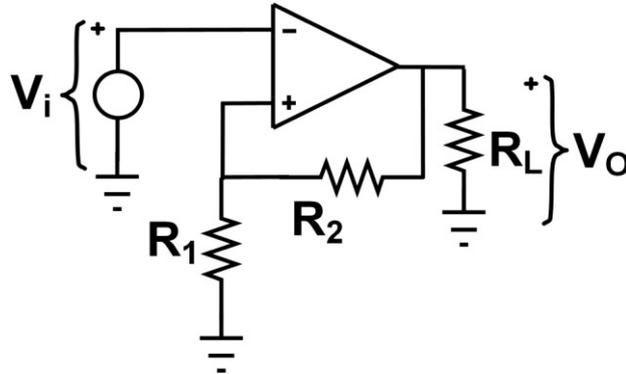
$$V_o = \begin{cases} V_{CC} & V_i < \frac{-V_{CC}R_1}{R_2} \\ V_{EE} & V_i > \frac{-V_{EE}R_1}{R_2} \end{cases}$$

REALIMENTACIÓN NEGATIVA

- Los circuitos basados en amplificadores operacionales con realimentación negativa actúan como amplificadores
- La ganancia NO depende del amplificador operacional, se determina por el resto de los componentes
- El diseño de etapas con una ganancia determinada es infinitamente más sencillo con AO

REALIMENTACIÓN POSITIVA

- Ejemplo:



- La tensión de salida solo puede tomar los valores de saturación:

$$V_o = \begin{cases} V_{CC} & v_p > V_i \\ V_{EE} & v_p < V_i \end{cases}$$

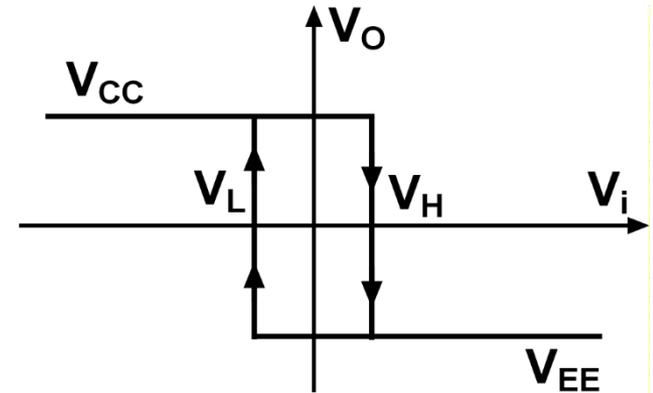
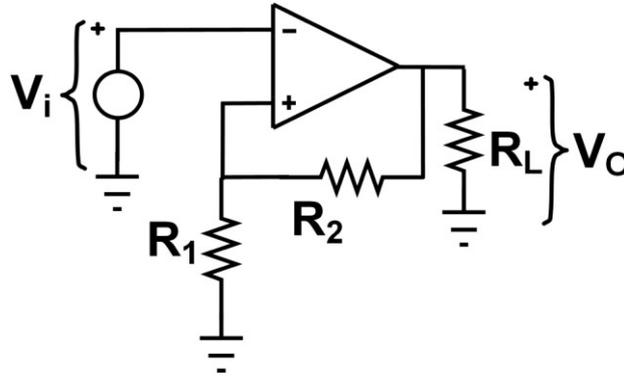
- Dado que la corriente de entrada por el terminal no inversor es nula:

$$I_p = 0 \rightarrow I_{R1} = I_{R2} \rightarrow v_p = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_o$$

- Por tanto, la tensión de salida influye en el punto de cambio

REALIMENTACIÓN POSITIVA

➤ Ejemplo:



➤ Las transiciones de la tensión de salida se producen para:

$$V_O = \begin{cases} V_{CC} \rightarrow V_{EE} & V_H = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{CC} \\ V_{EE} \rightarrow V_{CC} & V_L = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{EE} \end{cases}$$

➤ Los circuitos basados en AO con realimentación positiva se comportan como comparadores con histéresis