



Electrónica

Tema 1: Amplificadores Operacionales.

El A.O. Ideal. (1/2)





Sección 1: El A.O. Ideal



1. Amplificadores Operacionales
 - El A.O. ideal: símbolo, propiedades y zonas de funcionamiento. Función de transferencia.
 - Concepto de realimentación.
2. Configuraciones básicas del AO en Zona Lineal
 - Seguidor de tensión
 - Inversor
 - No-Inversor
 - Sumador inversor
3. Configuraciones básicas del AO en No Zona Lineal
 - Comparador
 - Comprador con histéresis
 - 555



Referencias



- ❑ Material de estudio:
 - Malik, capítulo 2, secciones:
 - De 2.2 a 2.3.4; de 2.5.1 a 2.5.10; y 2.6
 - Sedra-Smith, capítulo 2, secciones:
 - De 2.1 a 2.6; y 2.9
 - Hambley, capítulo 2.
 - En todos los casos:
 - *excluidas las dependencias internas con la frecuencia y el trabajo en “gran señal”.*
- ❑ Gráficas extraídas de los textos y secciones detallados.



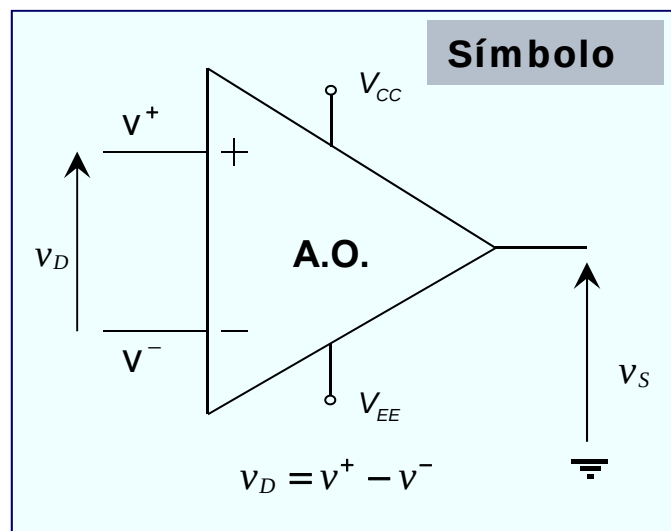
Sección 1: El A.O. Ideal



1. Amplificadores Operacionales
 - El A.O. ideal: símbolo, propiedades y zonas de funcionamiento. Función de transferencia.
 - Concepto de realimentación.



1. A.O. Ideal: símbolo, modelo y F. de T.

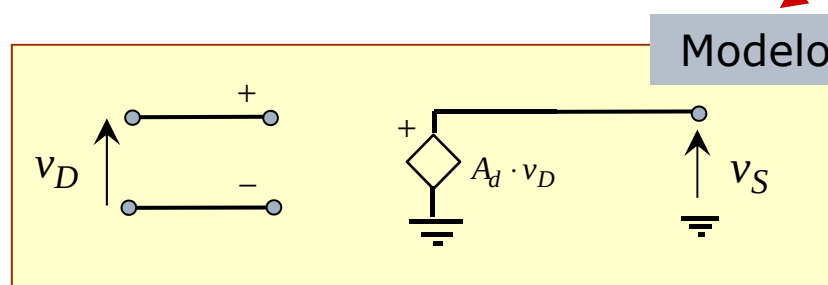


Amplificador integrado (C.I.).

Gran versatilidad:

- Muchos tipos y aplicaciones
- Configuraciones típicas sencillas de analizar y diseñar

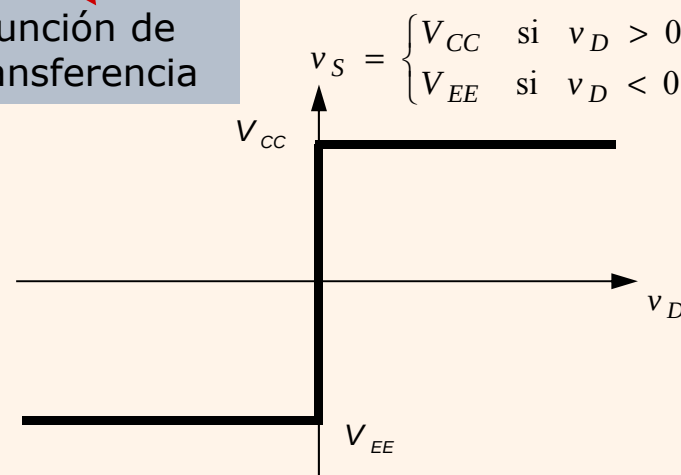
1ª aproximación: el A.O. ideal



Es un amplificador diferencial ideal:

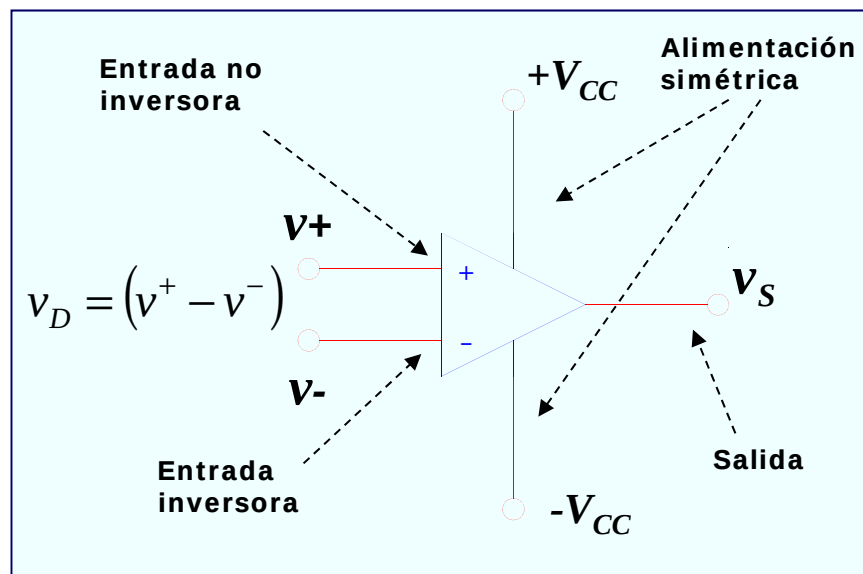
$$\begin{cases} A_d \rightarrow \infty \\ Z_e \rightarrow \infty, Z_s \rightarrow 0 \\ CMRR \rightarrow \infty \end{cases}$$

Función de Transferencia

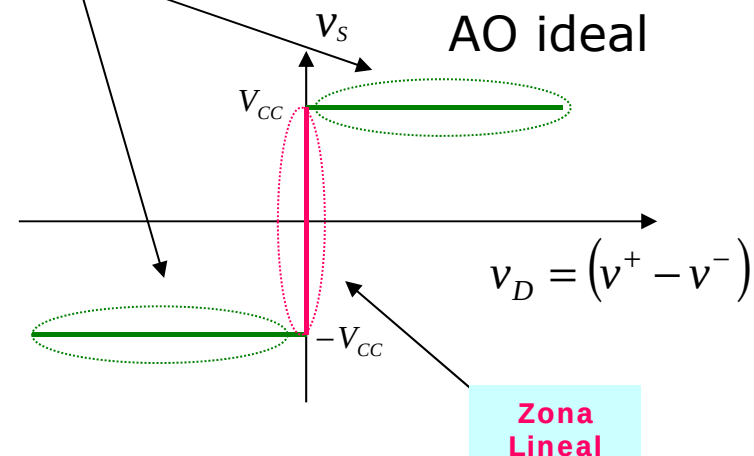




1. A.O. Ideal: símbolo, modelo y F. de T. (ii)



Zona
No Lineal



Zona lineal: v_S proporcional a $v_D = (v^+ - v^-)$

Para estar en la zona lineal: $v_D = (v^+ - v^-) = 0$

$$v_S = A_d \cdot v_D = A_d \cdot (v^+ - v^-)$$
$$-V_{CC} < v_S < +V_{CC}$$

En ambas: Corrientes de entrada nulas

$$i^+ = i^- = 0$$

Zona no lineal: saturación

La salida es cte. (alta o baja):

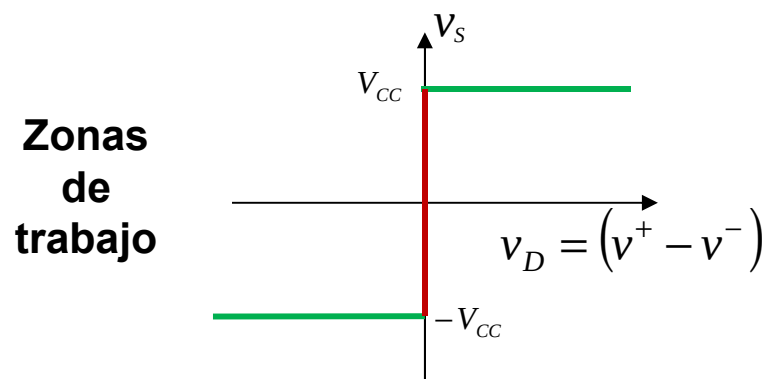
- 1) $v_S = +V_{CC}$ (si $v_D > 0$)
y
- 2) $v_S = -V_{CC}$ (si $v_D < 0$)



1. A.O. Ideal: fijando la zona de trabajo



- ❑ ¿Cómo se logra fijar la zona de trabajo del A.O.?
 - Mediante el uso (o no) de redes externas que devuelven parte de la señal en la salida de vuelta a la entrada → **Realimentación (Re)**
 - Es un tema fundamental y será estudiado con detalle en su momento.
 - Para mantener al AO en **Z. Lineal**, se necesita **Re** negativa (**Re⁻**)
 - Si no hay **Re** o es contraria (positiva) el AO pasa a **Z. No Lineal**.



$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Zona } \underline{\text{LINEAL}} \Rightarrow v_s = A_d \cdot v_D = \infty \cdot v_D \rightarrow \text{¿solución?} \Rightarrow v_D = 0 \end{array} \right.$$

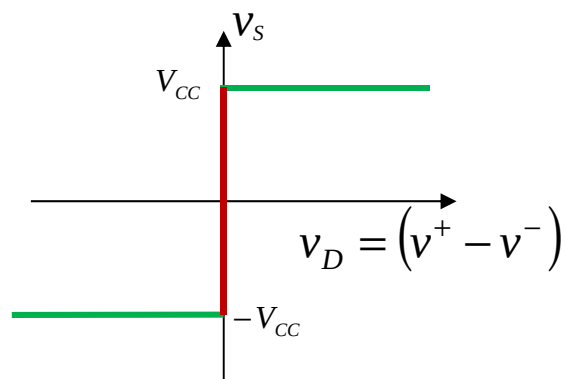
Con **Re⁻**

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Zona } \underline{\text{NO LINEAL}} \Rightarrow \text{Saturado, } v_D > 0 \rightarrow v_s = +V_{CC} \Leftrightarrow v_D < 0 \rightarrow v_s = -V_{CC} \end{array} \right.$$

Sin **Re**, o
con **Re⁺**



1. A.O. Ideal: fijando la zona de trabajo



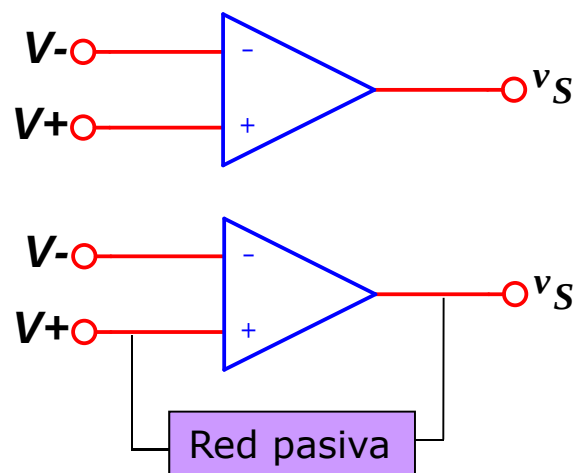
❑ ¿Cómo sabemos el tipo(*) de **Re**?

■ Observando la existencia o no de redes pasivas conectando salida con entrada:

■ Si se derivan al terminal (v^-) será **Re⁻**

■ Si se derivan al terminal (v^+) será **Re⁺**

A.O. en Zona No Lineal

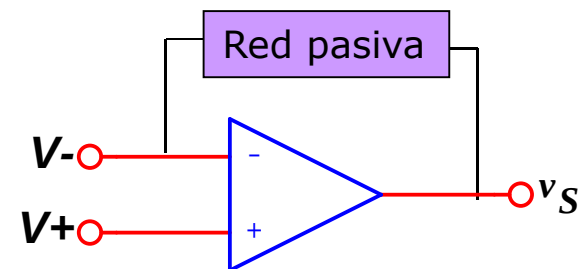


Si $v_s \uparrow \Rightarrow V^+ \uparrow \Rightarrow v_s = A_d(V^+ - V^-) \uparrow$

Sin **Re**, o
con **Re⁺**

A.O. en Zona Lineal

Con **Re⁻**



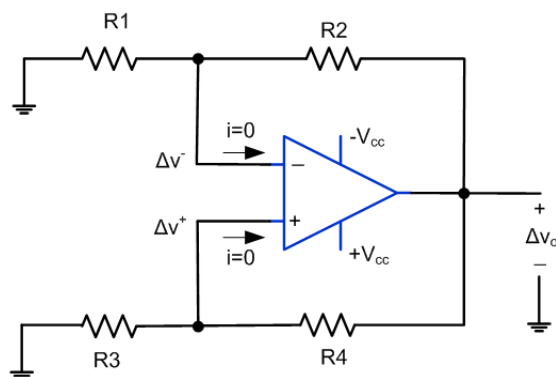
Si $v_s \uparrow \Rightarrow V^- \uparrow \Rightarrow v_s = A_d(V^+ - V^-) \downarrow$

(*) **Ojo:** si la red de **realimentación** fuese activa, más complicada o dependiente con la frecuencia (L, C,...) es necesario estudiar en detalle el sentido de la **Re**.



1. A.O. Ideal: fijando la zona de trabajo

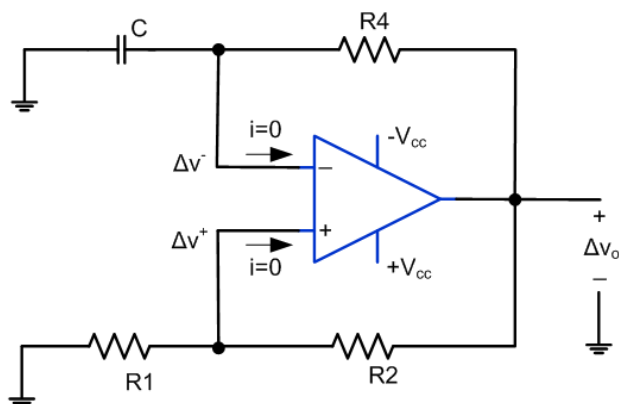
Ejemplos para ilustrar el tipo de realimentación



$$\Delta v_o(t) \Rightarrow \begin{cases} \Delta v^-(t) = \frac{\Delta v_o(t) \cdot R_1}{R_1 + R_2} \\ \Delta v^+(t) = \frac{\Delta v_o(t) \cdot R_3}{R_3 + R_4} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \text{Si } \Delta v^-(t) > \Delta v^+(t) \Rightarrow \frac{R_1}{R_1 + R_2} > \frac{R_3}{R_3 + R_4} \Rightarrow \text{Re}^- \\ \text{Si } \Delta v^-(t) < \Delta v^+(t) \Rightarrow \frac{R_1}{R_1 + R_2} < \frac{R_3}{R_3 + R_4} \Rightarrow \text{Re}^+ \\ \text{Si } \Delta v^-(t) = \Delta v^+(t) \Rightarrow \frac{R_1}{R_1 + R_2} = \frac{R_3}{R_3 + R_4} \Rightarrow \text{No Re} \end{cases}$$

$\text{Re}^- \equiv$ Realimentación negativa

$\text{Re}^+ \equiv$ Realimentación positiva



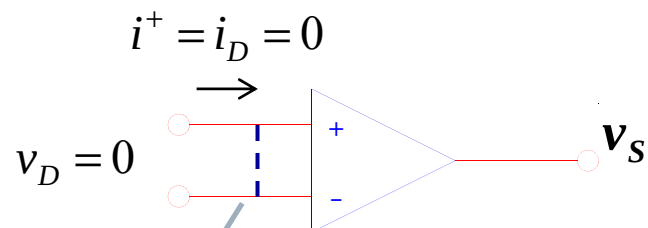
$$\Delta v_o(t) \Rightarrow \begin{cases} \Delta v^-(t) = 0 \\ \Delta v^+(t) = \frac{\Delta v_o(t) \cdot R_1}{R_1 + R_2} \end{cases} \Rightarrow \text{Como } \Delta v^-(t) < \Delta v^+(t) \Rightarrow \text{Re}^+$$

$$v_o = \begin{cases} +V_{CC} & (v^- < v^+) \\ -V_{CC} & (v^- > v^+) \end{cases}$$

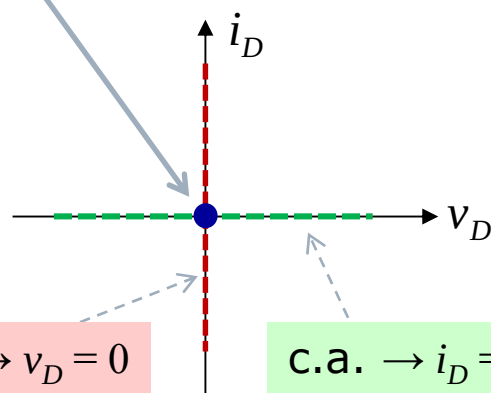


1. Aplicaciones en Zona Lineal

A.O. en Zona Lineal



Corto. virtual



c.c. $\rightarrow v_D = 0$

c.a. $\rightarrow i_D = 0$

Condición necesaria **Re**

En estas condiciones

- La v de entrada al AO es nula: $v_D = (v^+ - v^-) = 0$
- Además, en el AO ideal las corrientes en las entradas son nulas: $i^+ = i^- = 0$

Se tiene que la entrada del AO en Z.L. se comporta como un **cortocircuito virtual**:

- Al **mismo tiempo** es cortocircuito ($v=0$)...
- ...y circuito abierto ($i=0$).
- Esta característica es exclusiva del AO ideal
- Si trazamos su curva ($i-v$) de entrada, se tiene **un punto** (la intersección de un c.c. con un c.a.): $(i_D, v_D) = (0,0)$

Esto simplifica **mucho** el trabajo con AO's



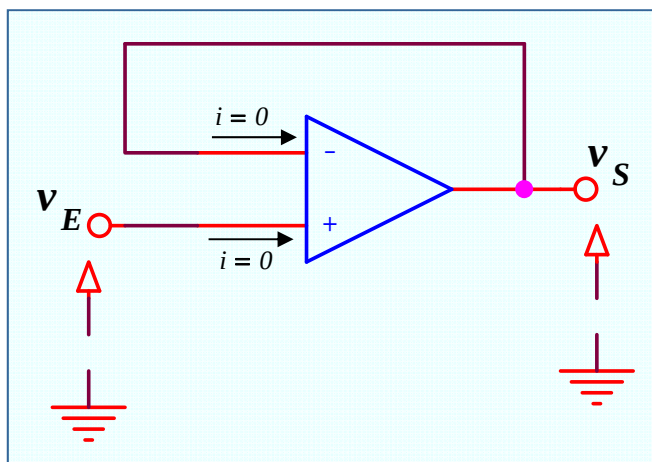
Sección 1: El A.O. Ideal



1. Amplificadores Operacionales
 - El A.O. ideal: símbolo, propiedades y zonas de funcionamiento. Función de transferencia.
 - Concepto de realimentación.
2. Configuraciones básicas del AO en Zona Lineal
 - Seguidor de tensión
 - Inversor
 - No inversor
 - Sumador



2.1. Amplificador seguidor: $v_S = v_E$



$$\left. \begin{aligned} \text{Re}^- \rightarrow v^- = v^+ \\ v^+ = v_E \\ v_S = v^- \end{aligned} \right\}$$

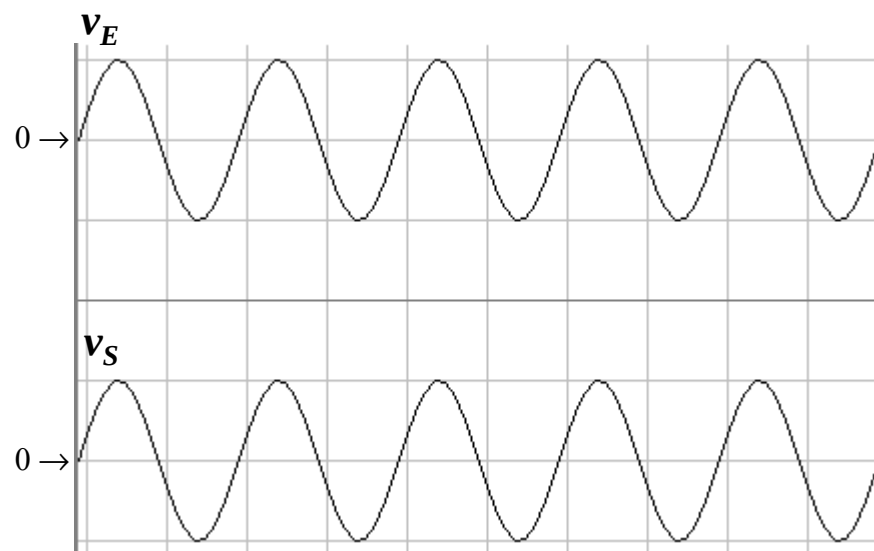
$$v_S = v_E$$

$$\text{Impedancias} \left\{ \begin{aligned} Z_e &= \left. \frac{v_E}{i_E} \right|_{i_E=i=0} = \frac{v_E}{0} \rightarrow \infty \\ Z_s &= \left. \frac{v_S}{i_S} \right|_{v_E=0} = \frac{0}{i_S} = 0 \end{aligned} \right.$$

Amplificador de tensión ideal ($A_V = 1$)

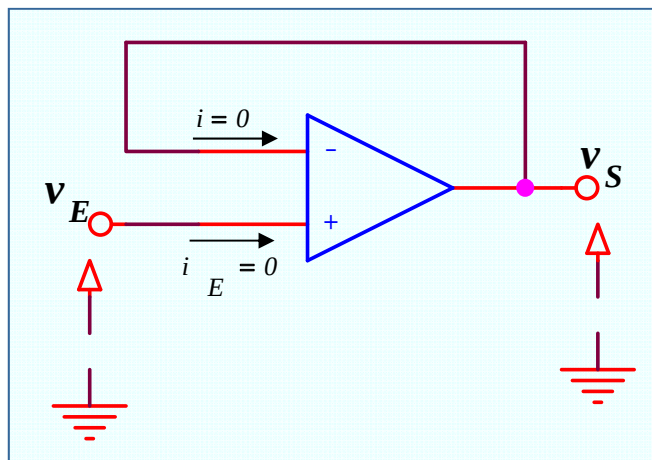
Señal de salida igual a la de entrada

Permite adaptar impedancias entre dos circuitos, ya que la impedancia de entrada es muy grande y la de salida muy pequeña.





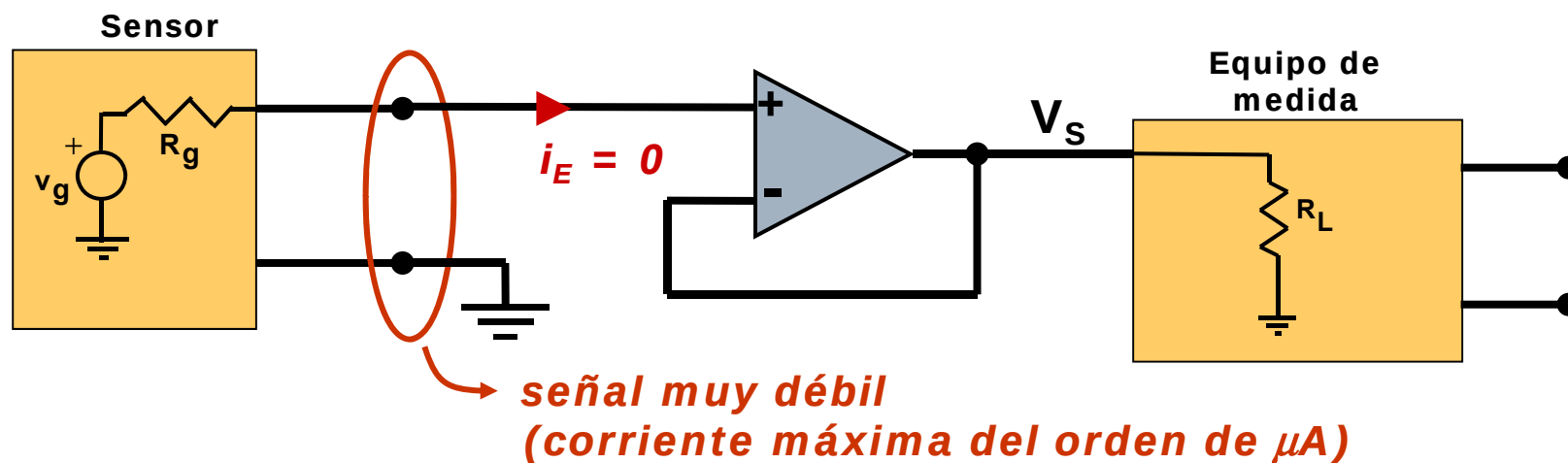
2.1. Amplificador seguidor: aplicación típica



Adaptación entre un sensor y el circuito de medida: permite que la señal del sensor no se vea afectada por el equipo de medida.

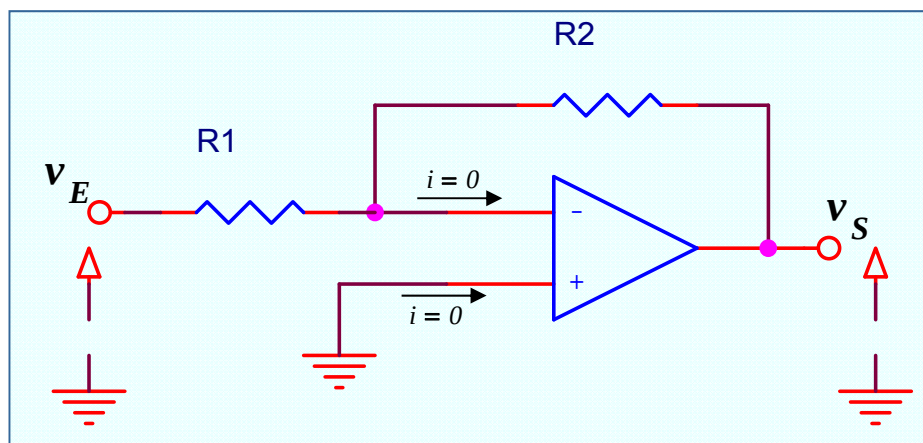
Como la impedancia de entrada del seguidor es muy alta (∞), la corriente suministrada por el sensor es cero (no depende de R_g).

Además v_s tampoco depende de R_L ya que la Z_s del operacional es cero.

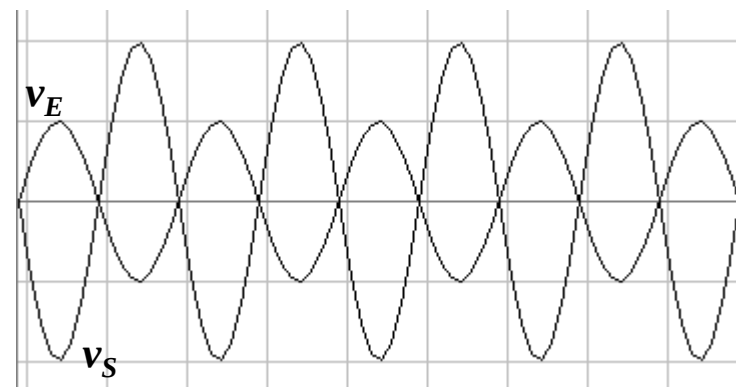




2.2. Amplificador inversor: $v_S = -k \cdot v_E$



Amplificador de tensión inversor



3 ecuaciones y 3 incógnitas(v_S , V^+ , V^-)

$$\left. \begin{aligned} v^+ &= v^- \\ v^+ &= 0 \rightarrow v^- = 0 \\ \frac{v_E - v^-}{R_1} &= \frac{v^- - v_S}{R_2} \end{aligned} \right\} v_S = -\frac{R_2}{R_1} \cdot v_E$$

$$R_1 = 1 \text{ K}\Omega, R_2 = 5 \text{ K}\Omega$$

$$t \rightarrow 0,5 \text{ ms / div}$$

$$v_E \rightarrow 2 \text{ V / div}$$

$$v_S \rightarrow 5 \text{ V / div}$$

- El módulo de la ganancia de este amplificador es igual a la relación R_2/R_1 .
- La señal de salida está invertida con respecto a la entrada

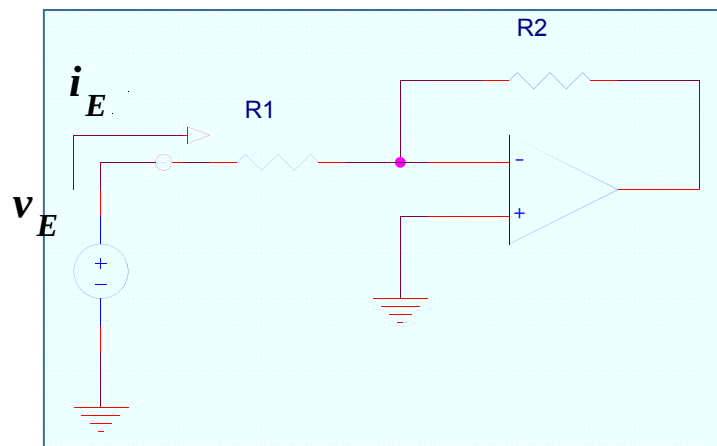


2.2. Amp. inversor: impedancias terminales.



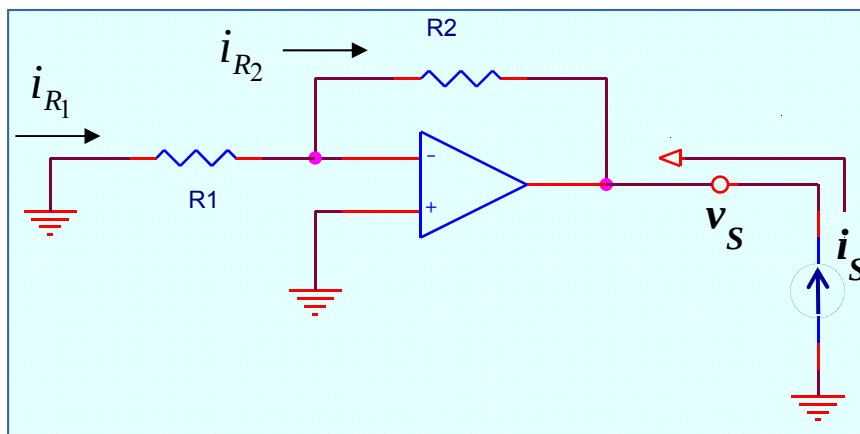
Para la estimación de las impedancias, aplicamos las técnicas ya estudiadas en Análisis de Circuitos:

Impedancia de entrada



$$\left. \begin{array}{l} \mathbf{Re}^- \rightarrow v^- = v^+ \\ v^+ = 0 \end{array} \right\} Z_e = \frac{v_E}{i_E} = \frac{v_E}{\frac{v_E - v^-}{R_1}} = \frac{v_E}{v_E / R_1} = R_1$$

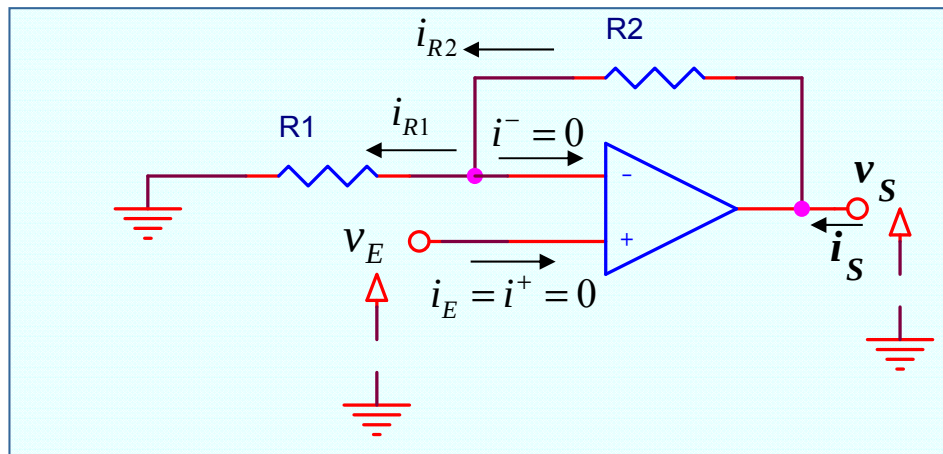
Impedancia de salida



$$\left. \begin{array}{l} \mathbf{Re}^- \rightarrow v^- = v^+ = 0 \\ i_{R1} = i_{R2} = \frac{v_E}{R_1} = 0 \\ v_S = -R_2 \cdot i_{R2} = 0 \end{array} \right\} Z_s = \frac{v_S}{i_S} = \frac{0}{i_S} = 0$$



2.3. Amplificador no-inversor: $v_S = +k \cdot v_E$

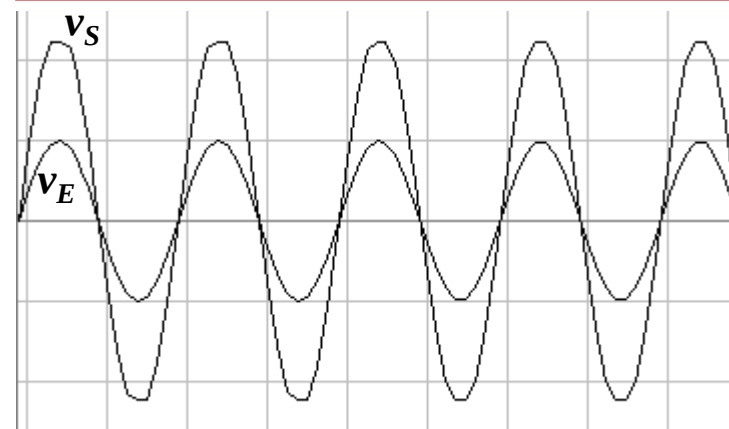


Analizamos el cto., usando las propiedades del A.O.

$$\left. \begin{aligned} v^- &\rightarrow v^+ = v^- = v_E \\ v_E &= i_{R1} \cdot R_1 \\ i_{R2} &= i_{R1} = i \\ v_S &= i \cdot (R_1 + R_2) \end{aligned} \right\} \rightarrow G_V = \frac{v_S}{v_E} = \frac{R_1 + R_2}{R_1}$$

$$\left\{ \begin{aligned} Z_e &= \left. \frac{v_E}{i_E} \right|_{i_E=0} = \frac{v_E}{0} = \infty \\ Z_s &= \left. \frac{v_S}{i_S} \right|_{v_E=0} = \frac{0}{i_S} = 0 \end{aligned} \right.$$

Amplificador de tensión no inversor ideal



$$R_1 = 1 \text{ K}\Omega, R_2 = 5 \text{ K}\Omega$$

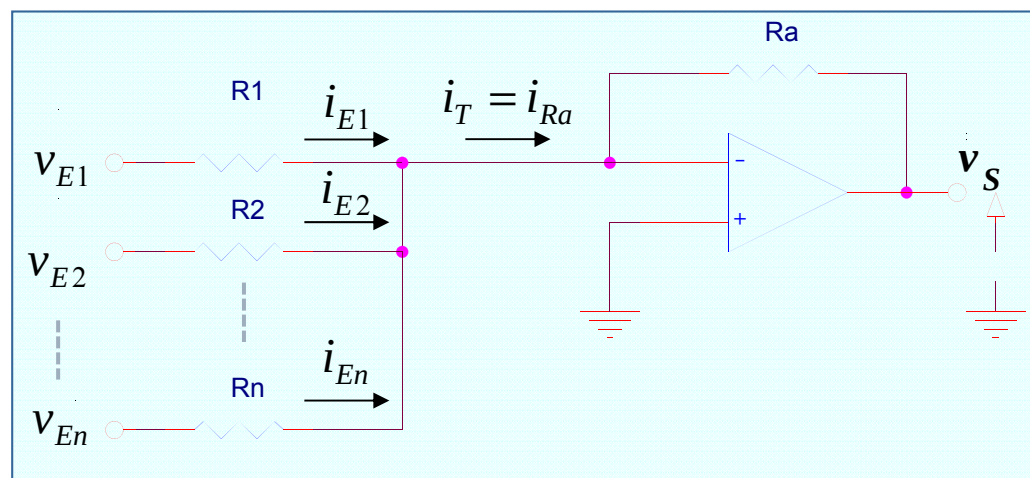
$$t \rightarrow 0,5 \text{ ms/div}, V_e \rightarrow 2 \text{ V/div}, V_s \rightarrow 5 \text{ V/div}$$

- El módulo de la ganancia de este amplificador es igual a $(1 + R_2/R_1)$
- Señal de salida no invertida respecto a la entrada.

Inconveniente (leve): k sólo puede ser > 1 .



2.4. Sumador (*inversor*): $v_S = -k_i \cdot \sum v_{Ei}$



Se obtiene una señal de salida que es proporcional a la **suma ponderada**, en la relación R_a/R_i , de las diferentes tensiones de entrada.

El resultado de dicha suma está **invertida**.

La impedancia de entrada es diferente para cada entrada del sumador, si las diferentes R_i lo son.

$$\left. \begin{array}{l} \text{AO ideal} \rightarrow i^+ = i^- = 0 \\ \text{AO con Re}^- \rightarrow v^+ = v^- \end{array} \right\} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} i_{E1} = \frac{v_{E1}}{R_1}; \quad i_{E2} = \frac{v_{E2}}{R_2} \quad \dots \quad i_{En} = \frac{v_{En}}{R_n} \\ i_T = i_{E1} + i_{E2} + \dots + i_{En} = \sum_1^n i_{Ei} \quad v_S = -i_T \cdot R_a \end{array} \right\} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow v_S = - \left(\frac{R_a}{R_1} \cdot v_{E1} + \frac{R_a}{R_2} \cdot v_{E2} + \dots + \frac{R_a}{R_n} \cdot v_{En} \right) = - \sum_1^n k_n \cdot v_{En}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Z_{ei} = R_i \\ Z_S = 0 \end{array} \right.$$



Sección 1: El A.O. Ideal



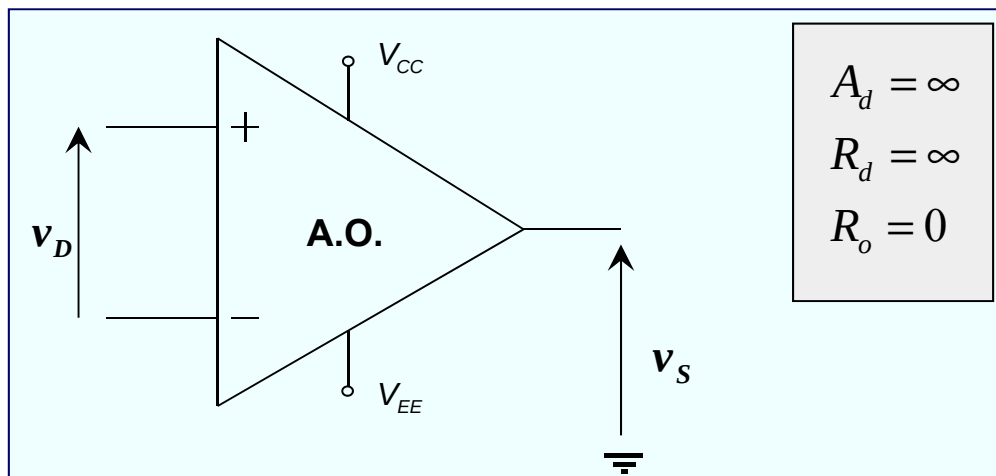
1. Amplificadores Operacionales
 - El A.O. ideal: símbolo, propiedades y zonas de funcionamiento. Función de transferencia.
 - Concepto de realimentación.
2. Configuraciones básicas del AO en Zona Lineal
 - Seguidor de tensión
 - Inversor
 - No-Inversor
 - Sumador inversor
3. Configuraciones básicas del AO en No Zona Lineal
 - Comparador
 - Comprador con histéresis
 - 555



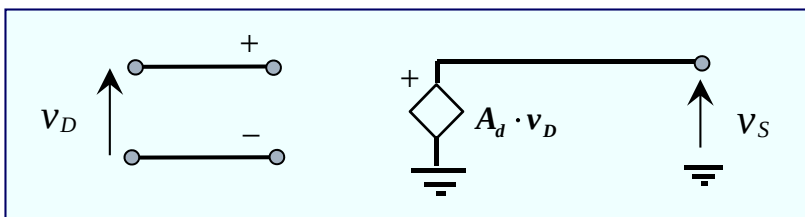
3. Aplicaciones en Zona No Lineal



Consideraremos el A.O. ideal

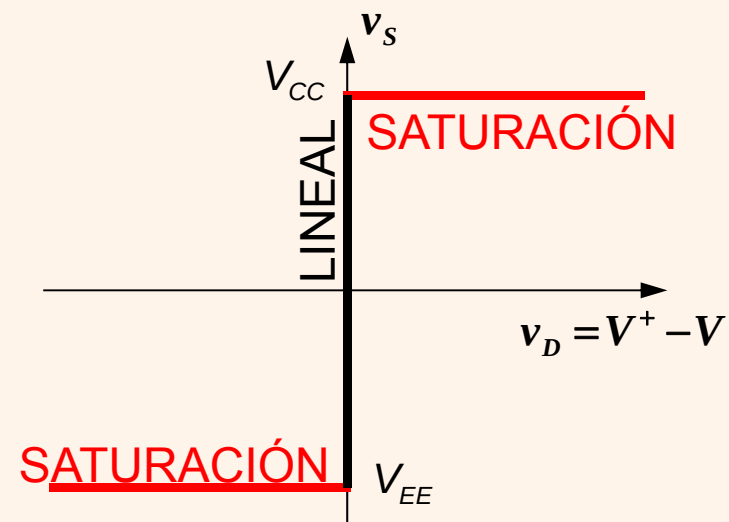


$$\begin{aligned} A_d &= \infty \\ R_d &= \infty \\ R_o &= 0 \end{aligned}$$



R → Realimentación
R⁻ → Realimentación negativa
R⁺ → Realimentación positiva

Función de transferencia



□ ZONA LINEAL (R⁻)

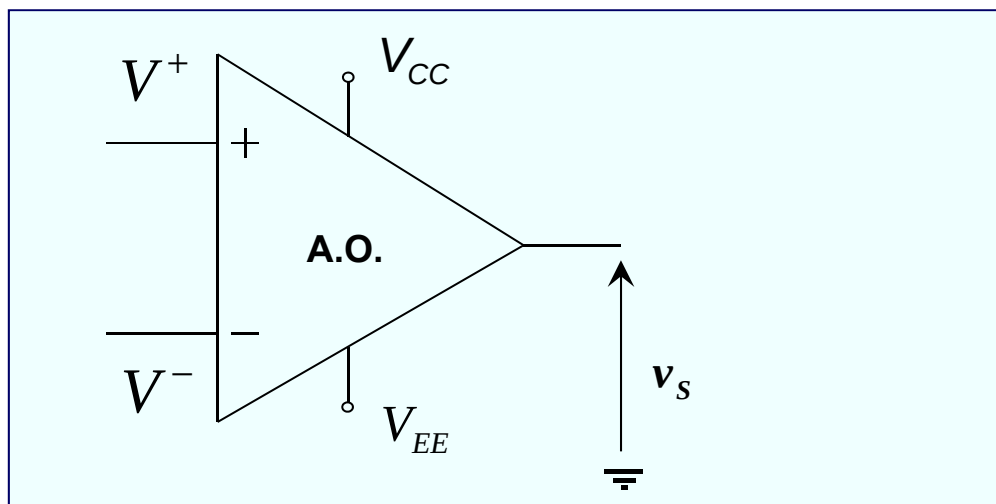
□ SATURACIÓN (sin R. y con R⁺)

✓ $v_S = V_{CC}$ si $V^+ > V^-$ ($v_D > 0$)

✓ $v_S = V_{EE}$ si $V^- > V^+$ ($v_D < 0$)



3. Aplicaciones en Zona No Lineal



A.O. sin R. → Saturación

$$v_s = \begin{cases} V_{CC} & \text{si } V^+ > V^- \\ V_{EE} & \text{si } V^- > V^+ \end{cases}$$

Conmutación $V^+ = V^-$

APLICACIONES:

❑ COMPARADOR

❑ CAMBIADOR DE FORMA DE ONDA (a salida cuadrada de niveles V_{CC} y V_{EE})

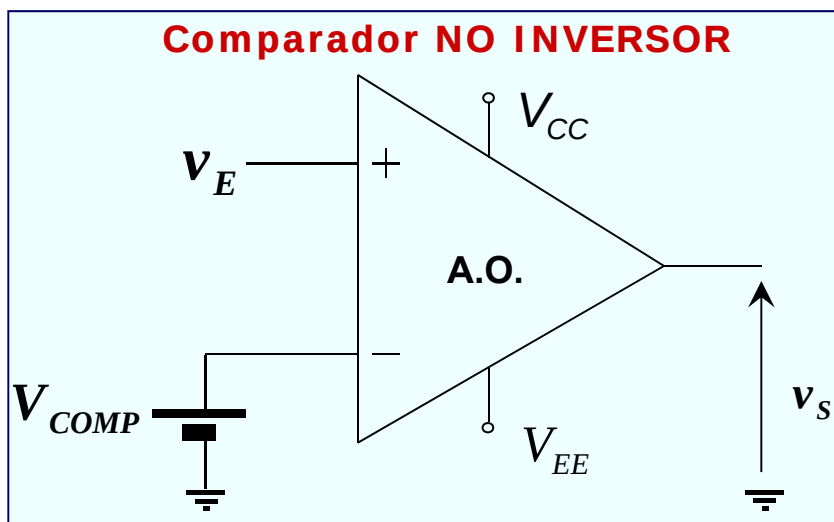


3. Aplicaciones en Zona No Lineal

3.1 Comparador



Comparador NO INVERSOR

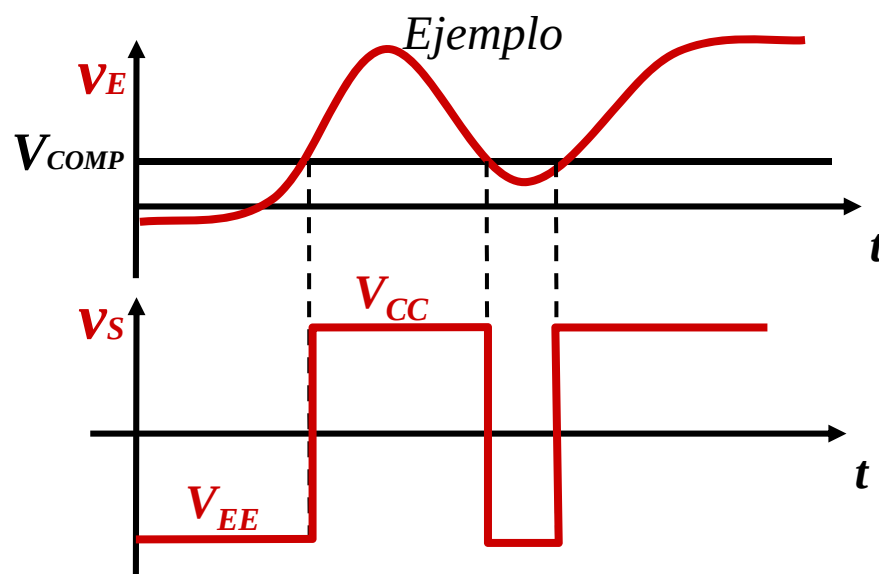


A.O. sin R. → Saturación

$$v_S = \begin{cases} V_{CC} & \text{si } V^+ > V^- \\ V_{EE} & \text{si } V^- > V^+ \end{cases}$$

$V_E > V_{COMP}$

$V_{COMP} > v_E \quad (v_E < V_{COMP})$



Si $v_E \gg V_{COMP}$, $v_S = V_{CC}$

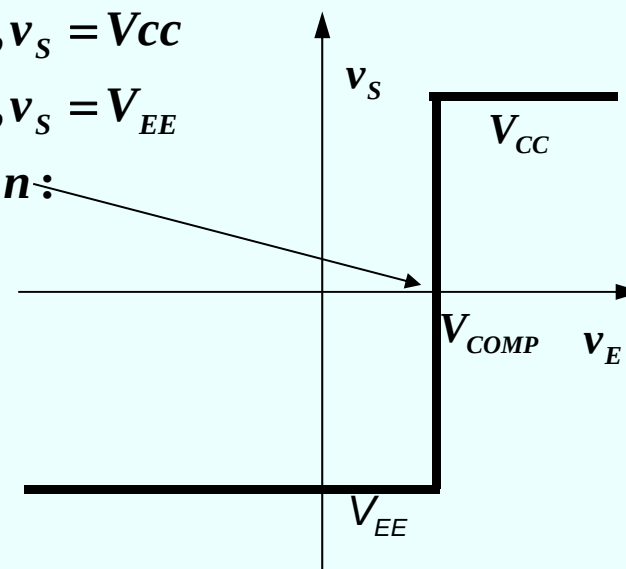
Si $v_E \ll V_{COMP}$, $v_S = V_{EE}$

Conmutación:

$$V^+ = V^-$$

↓

$$v_E = V_{COMP}$$



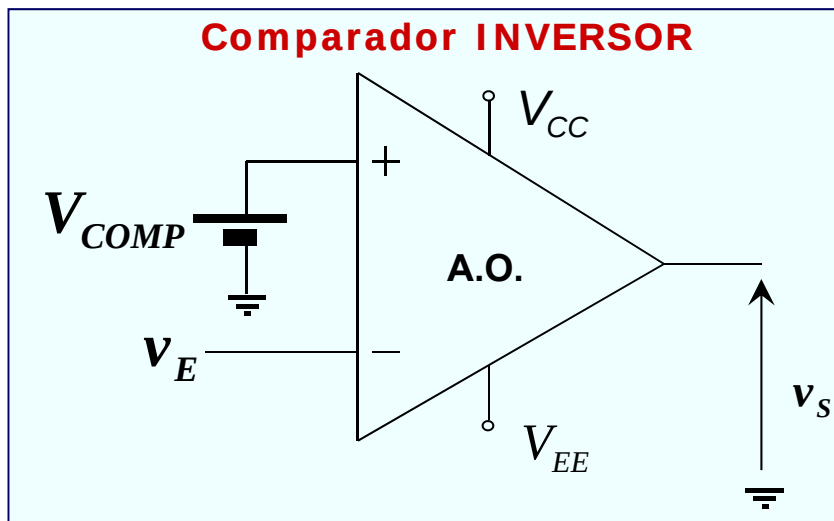


3. Aplicaciones en Zona No Lineal

3.1 Comparador



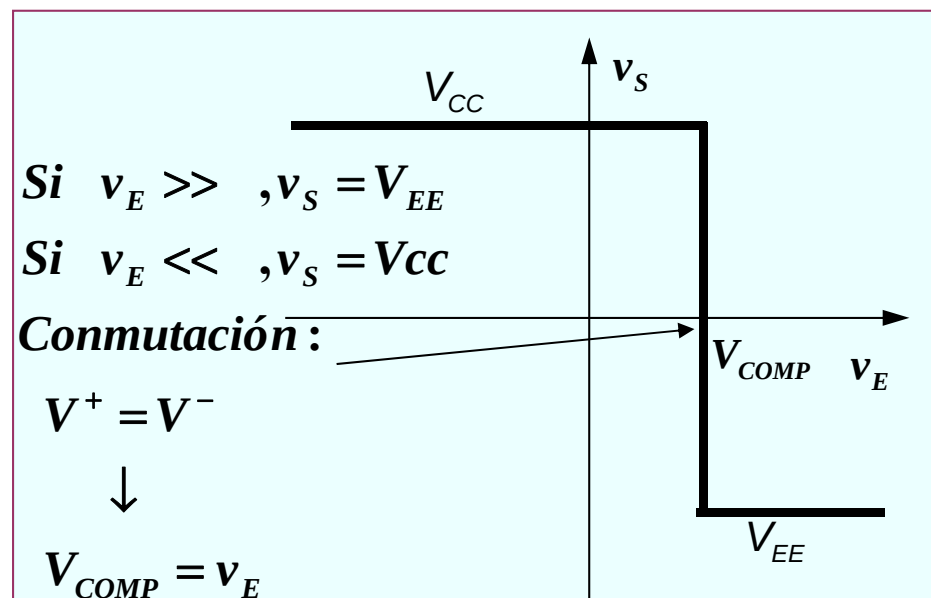
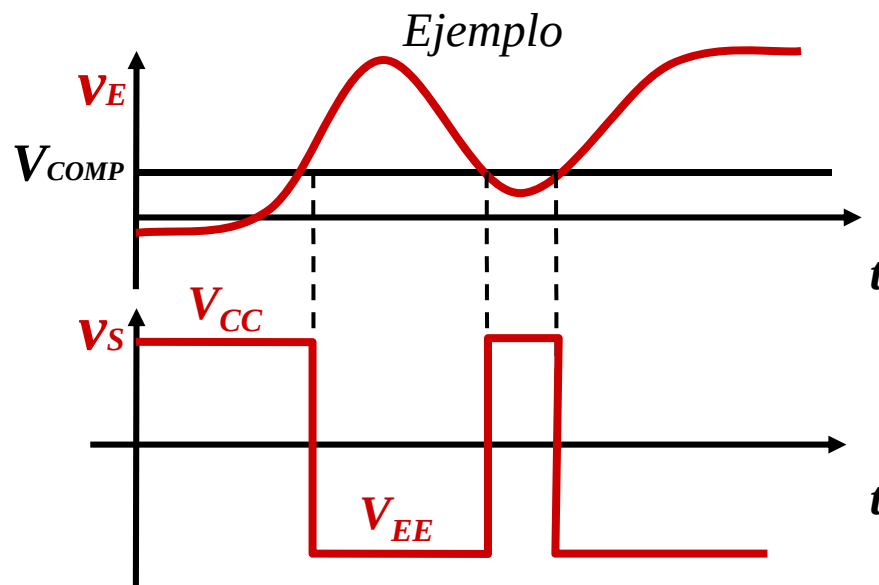
Comparador INVERSOR



A.O. sin R. $\rightarrow$ Saturación

$$v_S = \begin{cases} V_{CC} & \text{si } V^+ > V^- \\ V_{EE} & \text{si } V^- > V^+ \end{cases} \quad \begin{matrix} V_{COMP} > v_E \quad (v_E < V_{COMP}) \\ v_E > V_{COMP} \end{matrix}$$

Ejemplo



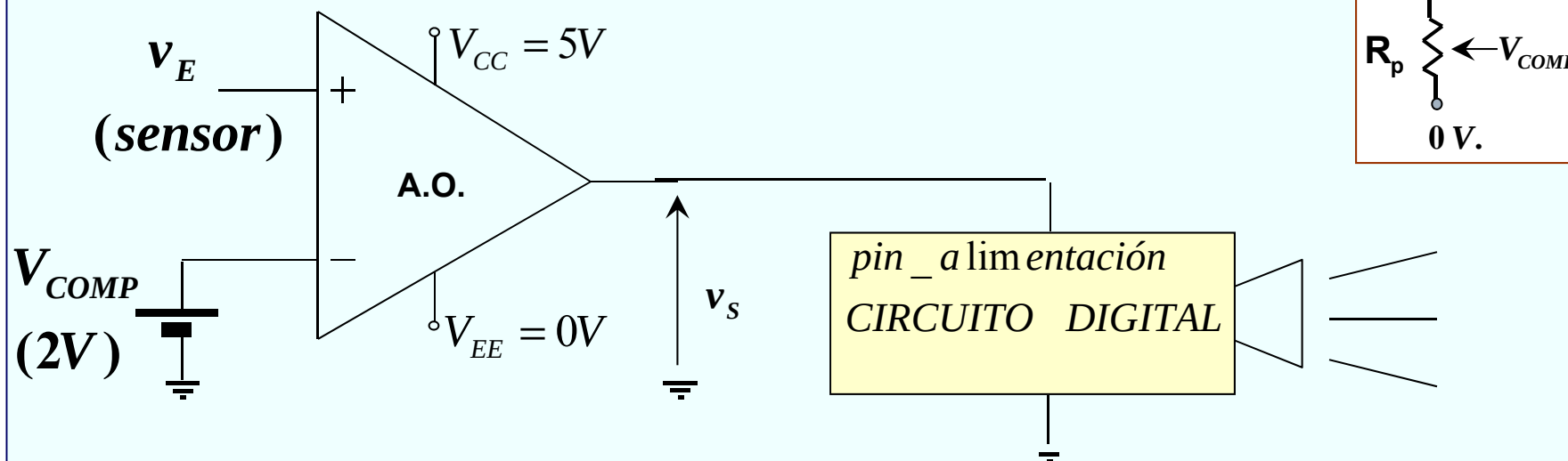


3. Aplicaciones en Zona No Lineal Comparador



Ejemplo: Activar una alarma, alimentando a 5V el circuito digital emisor de señal acústica sonora, cuando la señal v_E proveniente del sensor sea mayor de 2V

Comparador NO INVERSOR

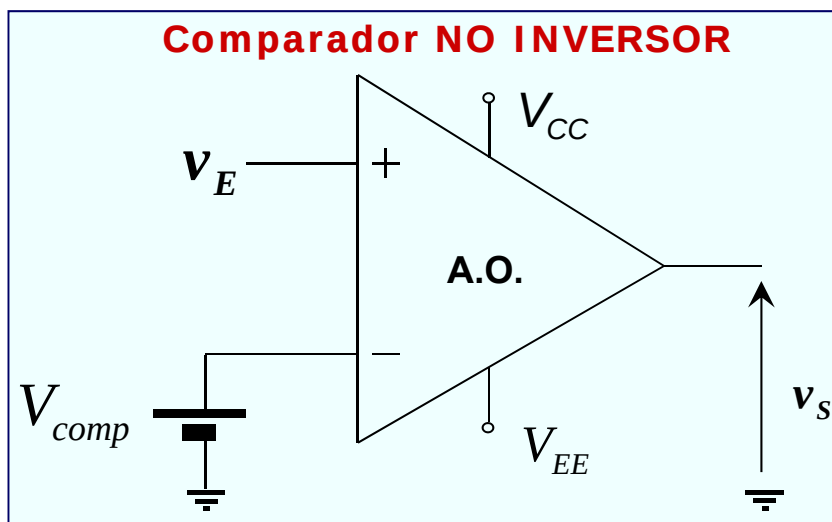




3. Aplicaciones en Zona No Lineal Comparador



Comparador NO INVERSOR



Si $v_E \gg V_{comp}$, $v_S = V_{CC}$

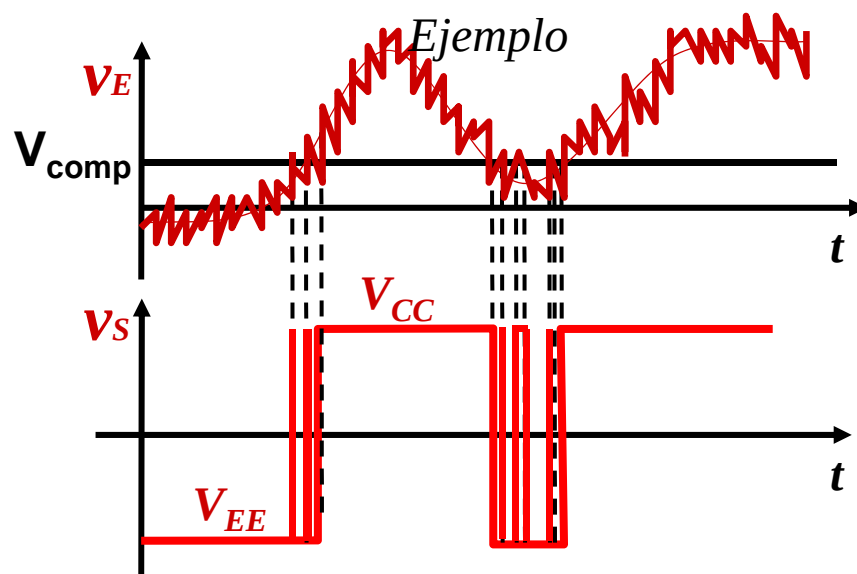
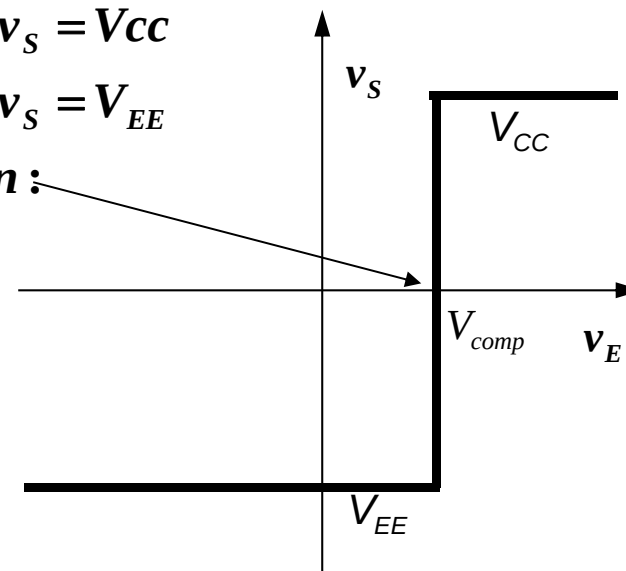
Si $v_E \ll V_{comp}$, $v_S = V_{EE}$

Conmutación:

$$V^+ = V^-$$

↓

$$v_E = V_{comp}$$



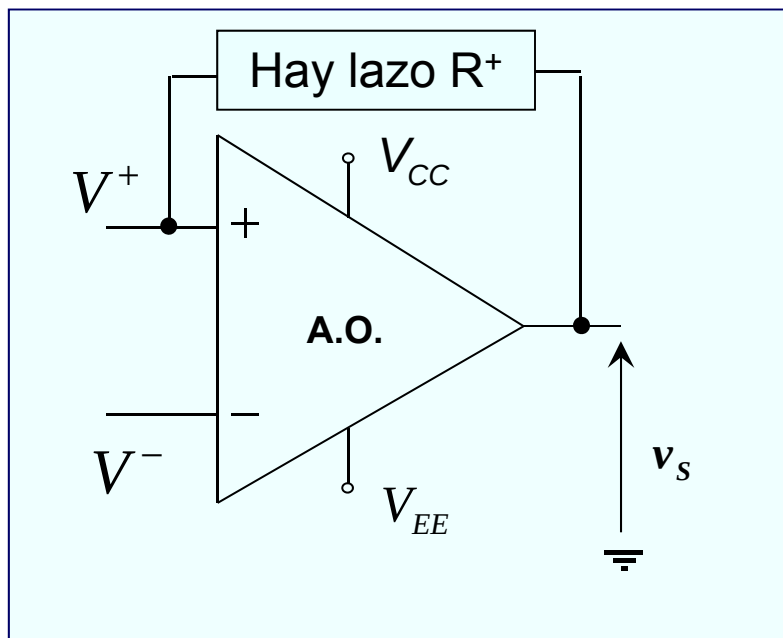
PROBLEMÁTICA DEL RUIDO

Señal v_E con ruido produce conmutaciones indeseadas (rebotes)
¿cómo solucionar este problema? R⁺



3. Aplicaciones en Zona No Lineal

3.2 Comparador con histéresis



A.O. con R^+ $\rightarrow$ Saturación

$$v_s = \begin{cases} V_{CC} & \text{si } V^+ > V^- \\ V_{EE} & \text{si } V^- > V^+ \end{cases}$$

Conmutación :

$$V^+ = V^-$$

Además por la R^+ :

$$V^+ = f(v_s)$$

2 niveles

conmutación

□- CIRCUITOS CON A.O CON R^+ , PILAS Y R 's :

COMPARADORES CON HISTÉRESIS

□- CIRCUITOS CON A.O CON R^+ , PILAS, R 's, C 's....:

GENERADORES DE FORMA DE ONDA

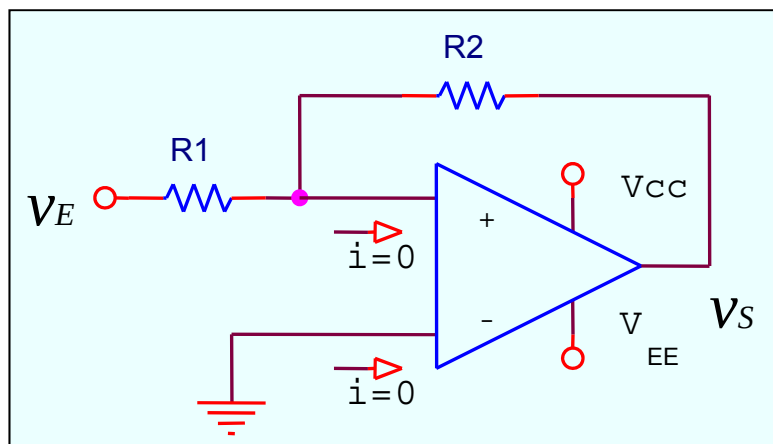
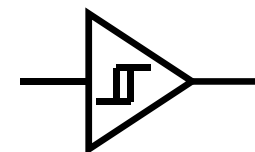


3. Aplicaciones en Zona No Lineal

3.2 Comparador con histéresis



Comparador con histéresis NO INVERSOR



Si $v_E \gg V_S$, $v_S = V_{CC}$

Si $v_E \ll V_S$, $v_S = V_{EE}$

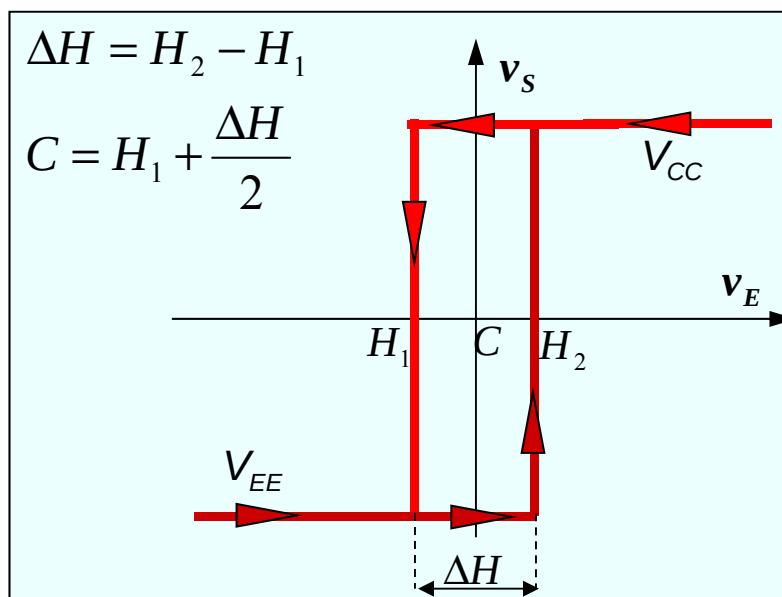
Conmutación:

$$V^+ = V^-$$

↓ (Halla V^+ y V^-)

A.O. con R^+

↓
Saturación



$$\left. \begin{aligned} \frac{v_E - V^+}{R_1} + \frac{v_S - V^+}{R_2} &= 0 \\ V^- &= 0 \end{aligned} \right\} V^+ = \frac{R_2 v_E}{R_1 + R_2} + \underbrace{\frac{R_1 v_S}{R_1 + R_2}}_{\text{depende de } v_S}$$

Igualando V^+ y V^- , resulta que esto ocurre en:

$$v_E = -v_S \frac{R_1}{R_2} \left\{ \begin{aligned} \text{Si } v_S = V_{CC}, \text{ conmuta en } v_E &= \frac{-V_{CC} R_1}{R_2} = H_1 \\ \text{Si } v_S = V_{EE}, \text{ conmuta en } v_E &= \frac{-V_{EE} R_1}{R_2} = H_2 \end{aligned} \right.$$

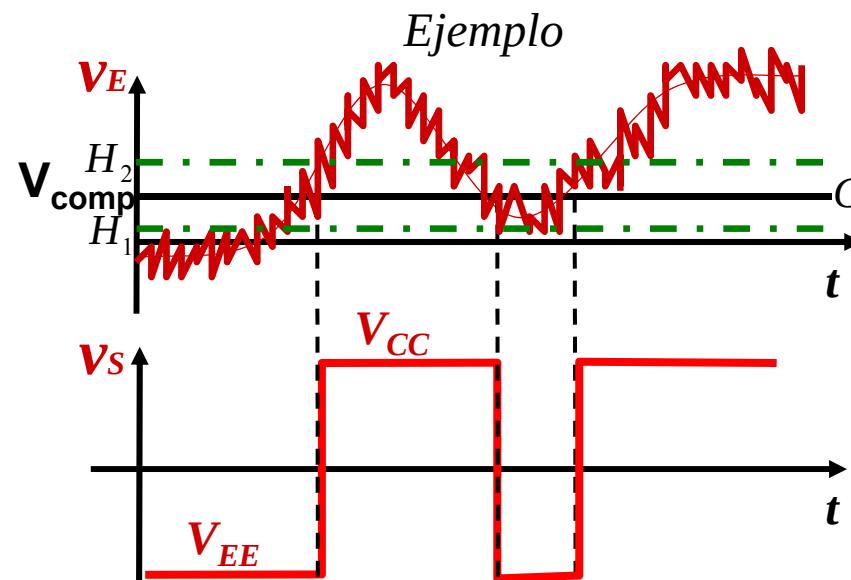
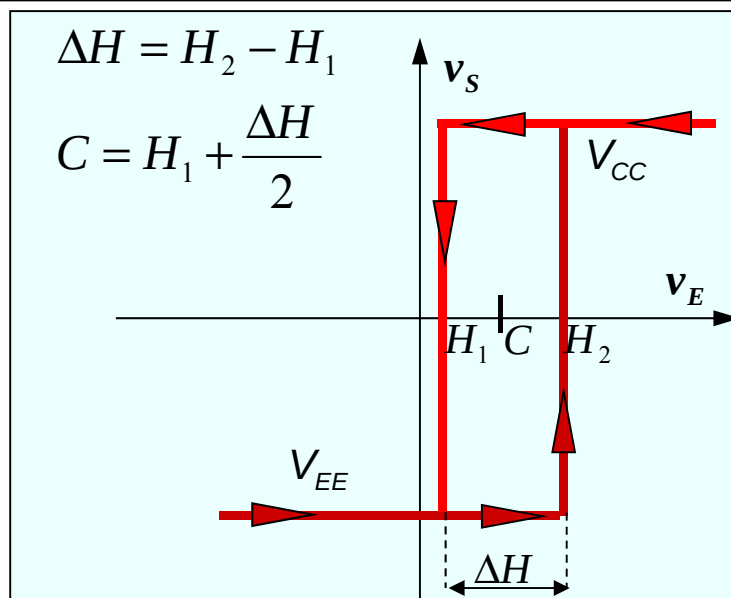
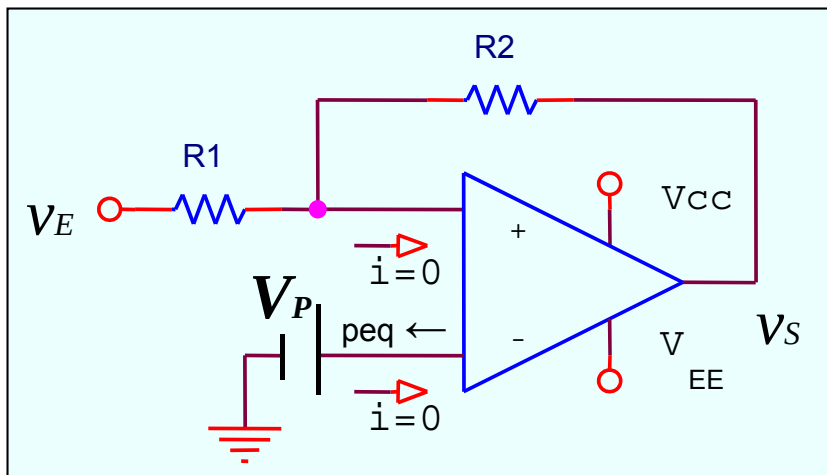


3. Aplicaciones en Zona No Lineal

3.2 Comparador con histéresis



Comparador NO INVERSOR con desplazamiento del centro de la zona histéresis



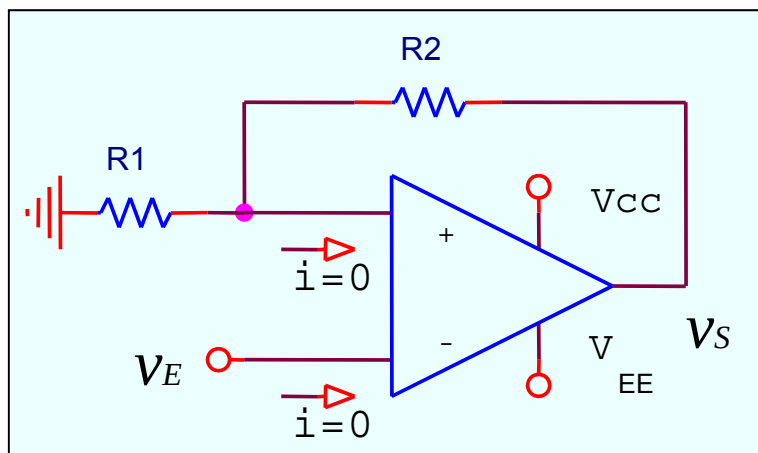
**La R^+ elimina las conmutaciones indeseadas (rebotes) ante:
señal V_E con ruido**



Aplicaciones no lineales del A.O. A.O. con realimentación positiva (R^+)



Comparador con histéresis INVERSOR



Si $v_E \gg V_{EE}$, $v_S = V_{EE}$

Si $v_E \ll V_{CC}$, $v_S = V_{CC}$

Conmutación:

$$V^+ = V^-$$

↓ (Hallar V^+ y V^-)

$$\left. \begin{aligned} \frac{0 - V^+}{R_1} + \frac{v_S - V^+}{R_2} &= 0 \\ V^- &= v_E \end{aligned} \right\} V^+ = \frac{R_1 v_S}{R_1 + R_2}$$

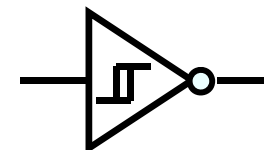
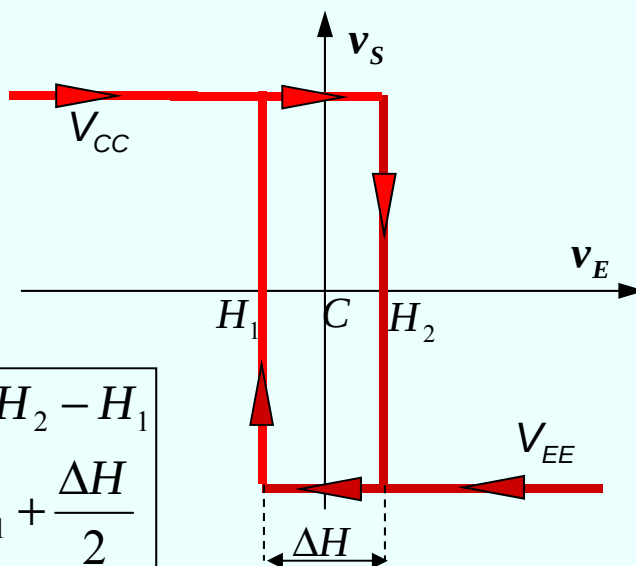
depende de v_S

Iguando V^+ y V^- , resulta que esto ocurre en:

$$v_E = \frac{R_1 v_S}{R_1 + R_2} \left\{ \begin{aligned} \text{Si } v_S = V_{CC}, \text{ conmuta en } v_E &= \frac{R_1 V_{CC}}{R_1 + R_2} = H_2 \\ \text{Si } v_S = V_{EE}, \text{ conmuta en } v_E &= \frac{R_1 V_{EE}}{R_1 + R_2} = H_1 \end{aligned} \right.$$

$$\Delta H = H_2 - H_1$$

$$C = H_1 + \frac{\Delta H}{2}$$



A.O. con R^+



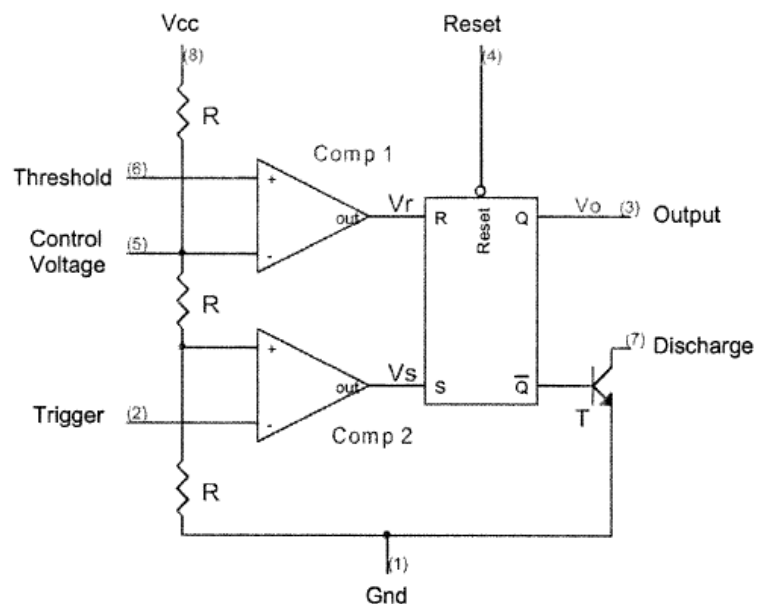
Saturación



Temporizador 555



Diagrama de bloques del 555



Alimentación (8) = $V_{CC} = 5V$ (1) = $GND = 0V$

$RESET$ (4) = 0 (Reset) = V_{CC} (inactivo)

CONTROL (5)

$$V_{(5)} = \frac{2}{3} V_{CC} = V_{comp1}^-$$

$$V_{comp2}^+ = \frac{V_{CC}}{3}$$

$$V_{comp1}^- = V_{(5)}$$

$$V_{comp2}^+ = \frac{V_{(5)}}{2}$$



Temporizador 555



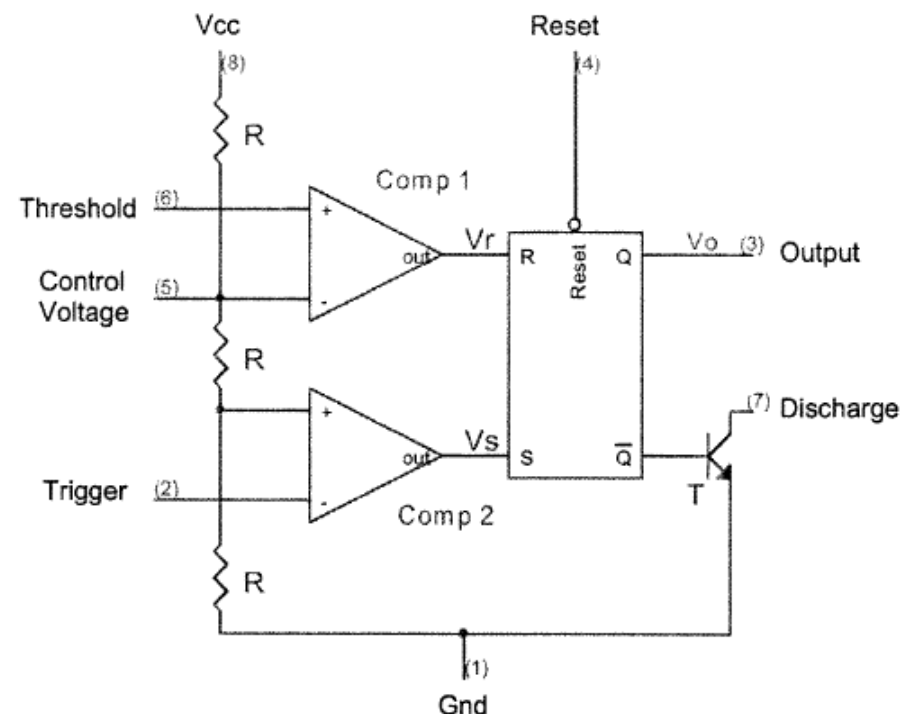
Comparadores:

Comp1 $V^+ > V^-$ $V_R = V_{cc}$ (RESET)
 $V^- > V^+$ $V_R = 0$ (HOLD)

Comp2 $V^+ > V^-$ $V_S = V_{cc}$ (SET)
 $V^- > V^+$ $V_S = 0$ (HOLD)

Biestable:

V_R	V_S	V_Q^t	$V_{\bar{Q}}^t$	
0	0	V_Q^{t-1}	$V_{\bar{Q}}^{t-1}$	(HOLD)
V_{cc}	0	0	V_{cc}	(RESET)
0	V_{cc}	V_{cc}	0	(SET)
V_{cc}	V_{cc}	?	?	(No deseado)



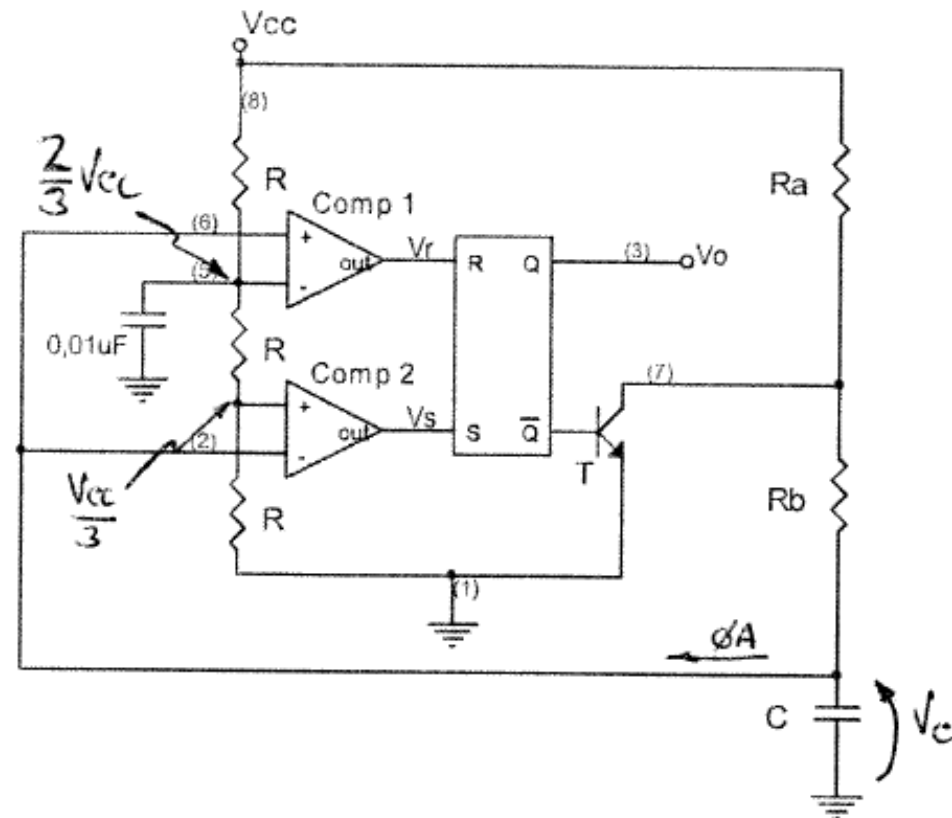
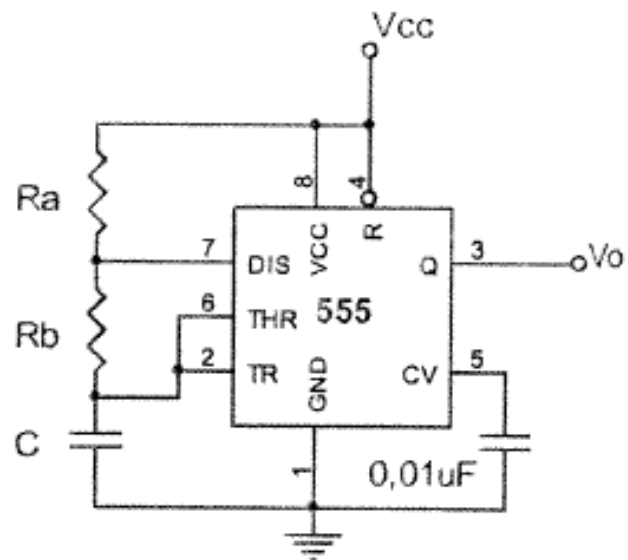
Transistor de descarga:

Si $V_Q^t = 0$ trans. cortado (circuito abierto)

Si $V_Q^t = V_{cc}$ trans. saturado (cortocircuito)



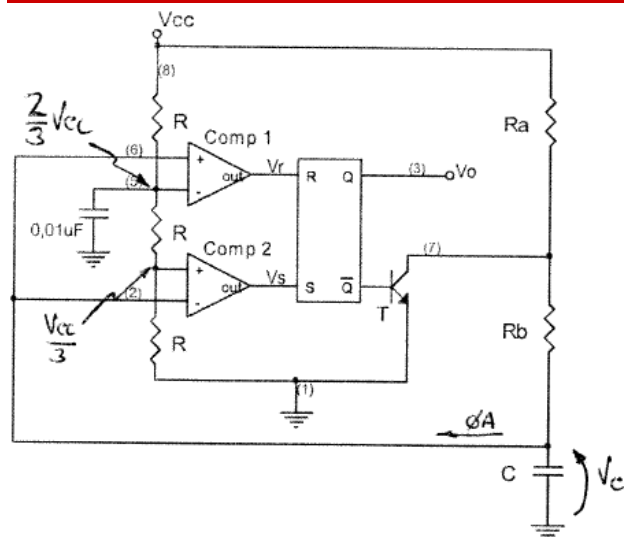
Temporizador 555 Configuración ASTABLE



Comp1 $V^+ > V^-$ $V_R = V_{CC}$ (RESET)
 $V^- > V^+$ $V_o = 0$ (HOLD)



Temporizador 555 Configuración ASTABLE

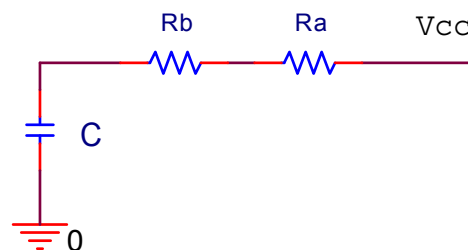
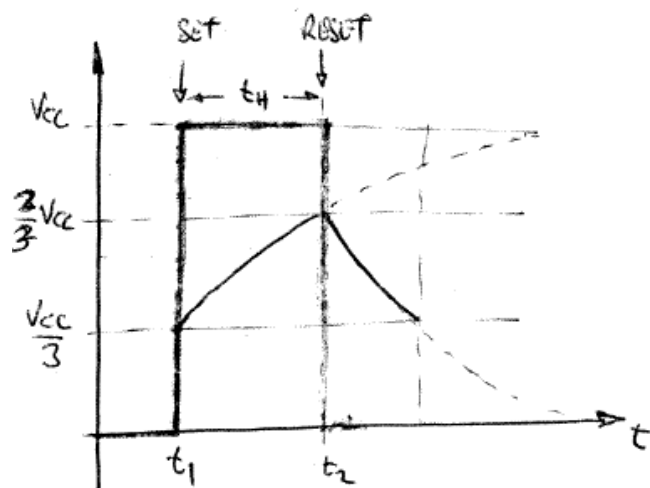


$$t_1) \quad \left. \begin{array}{l} \text{Comp2} \quad V^+ = \frac{V_{cc}}{3} \\ V^- = \frac{V_{cc}}{3} = V_{(2)} = V_{(6)} \quad V_{(2)} = V_C(t) \end{array} \right\} V_S = V_{cc} \text{ (SET)}$$

$$\text{Comp1} \quad \left. \begin{array}{l} V^+ = \frac{V_{cc}}{3} \\ V^- = \frac{2V_{cc}}{3} \end{array} \right\} V^+ > V^- \quad V_R = 0$$

$$V_O = V_{cc} \quad V_{\bar{Q}} = 0 \quad T \text{ (cortado)}$$

$$V_C(t) = V_f + (V_i - V_f)e^{\frac{-t}{\tau}}$$



$$\left\{ \begin{array}{l} V_i = \frac{V_{cc}}{3} \\ V_f = V_{cc} \\ \tau_1 = C(Ra + Rb) \ln 2 \end{array} \right.$$

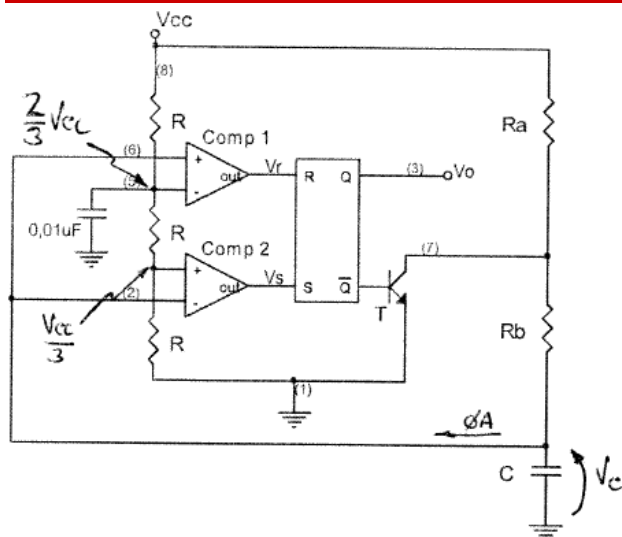
$$V_C(t) = V_{cc} + \left(\frac{V_{cc}}{3} - V_{cc} \right) e^{\frac{-t}{\tau_1}}$$

$$V_C(t_H) = V_{cc} \left(1 - \frac{2}{3} e^{\frac{-t_H}{\tau_1}} \right) = \frac{2}{3} V_{cc}$$

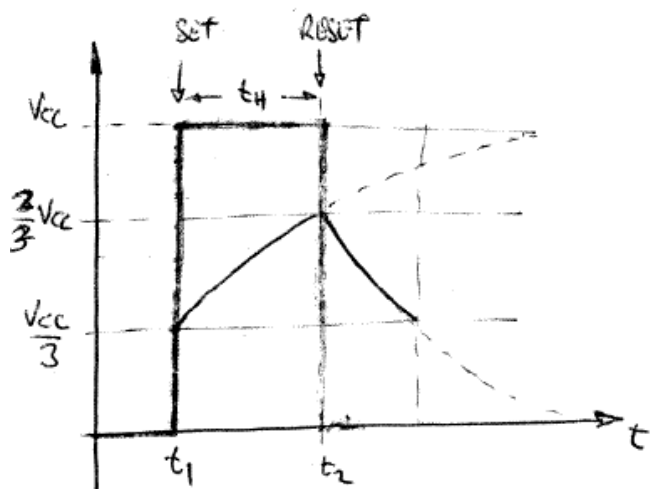
$$t_H = \tau_1 \ln 2$$



Temporizador 555 Configuración ASTABLE



$$V_C(t) = V_f + (V_i - V_f)e^{\frac{-t}{\tau}}$$



t_2)

Comp1

$$V^+ = \frac{2V_{cc}}{3}$$

$$V^- = \frac{2V_{cc}}{3}$$

$V_R = V_{cc}$ (RESET)

Comp2

$$V^+ = \frac{V_{cc}}{3}$$

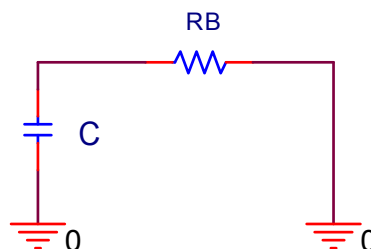
$$V^- = \frac{2V_{cc}}{3}$$

$V^- > V^+ \quad V_S = 0$

$$V_o = 0$$

$$V_Q = V_{cc}$$

T (saturado)



$$\begin{cases} V_i = \frac{2V_{cc}}{3} \\ V_f = 0 \\ \tau_2 = CR_b \end{cases}$$

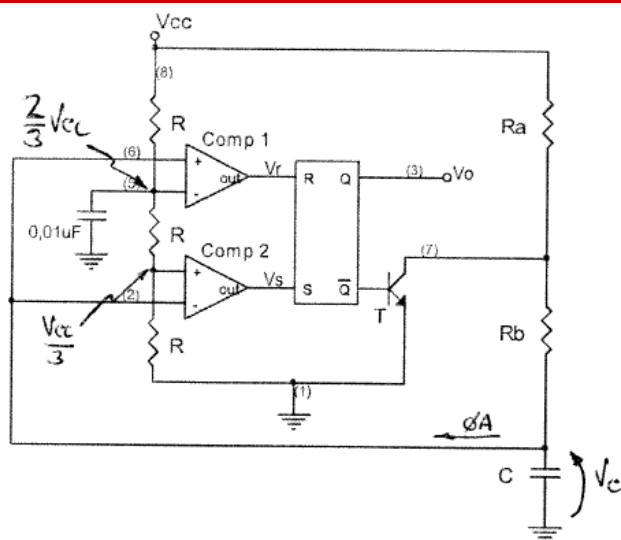
$$V_C(t) = 0 + \left(\frac{2V_{cc}}{3} - 0 \right) e^{\frac{-t}{\tau_2}}$$

$$t_L = \tau_1 \ln 2$$

$$V_C(t_L) = \frac{2}{3} V_{cc} e^{\frac{-t_L}{\tau_2}} = \frac{V_{cc}}{3}$$



Temporizador 555 Configuración ASTABLE



Ciclo de trabajo

$$D = \frac{t_H}{T} = \frac{C(Ra + Rb) \ln 2}{C(Ra + 2Rb) \ln 2} = \frac{(Ra + Rb)}{(Ra + 2Rb)}$$

$$0,5 \leq D \leq 1$$

$$V_c(t) = V_f + (V_i - V_f) e^{\frac{-t}{\tau}}$$

$$T = t_L + t_H = C(Ra + Rb) \ln 2 + CRb \ln 2 = C(Ra + 2Rb) \ln 2$$