

eman ta zabal zazu



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea



Ingeniaritza Goi Eskola Teknikoa
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Bilbao

electrónica general

EL AMPLIFICADOR OPERACIONAL

tema 3

DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA

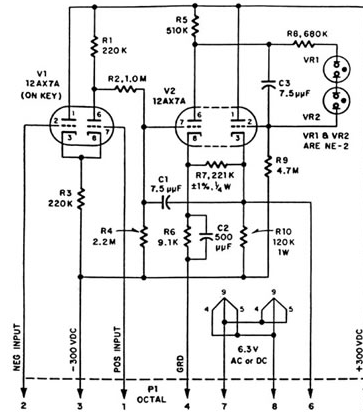
EL AMPLIFICADOR OPERACIONAL

- 1.- Introducción.
 - 1.1.- Símbolos y terminales del amplificador operacional.
 - 1.2.- El amplificador operacional como amplificador de tensión.
 - 1.3.- Conceptos básicos de realimentación.
 - 1.4.- El amplificador operacional realimentado.

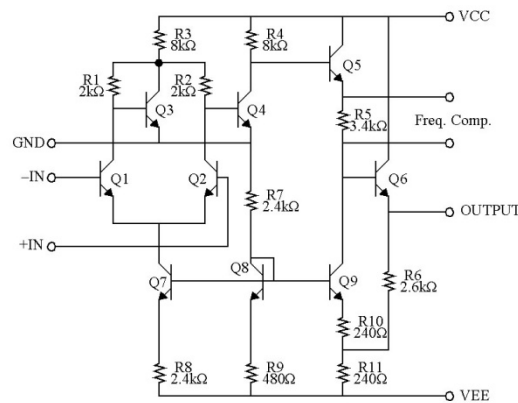
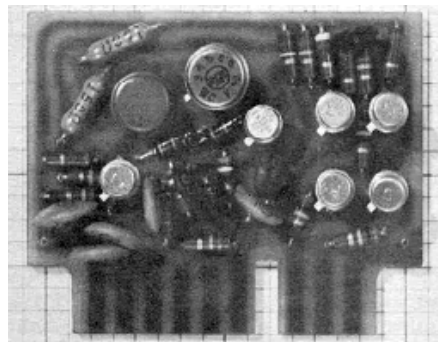
- 2.- El amplificador operacional ideal.
 - 2.1.- Características del amplificador operacional ideal.
 - 2.2.- Resolución de circuitos con amplificadores operacionales ideales.
 - 2.3.- Circuitos típicos con amplificadores operacionales ideales.

- 3.- Ejemplos de amplificadores operacionales.

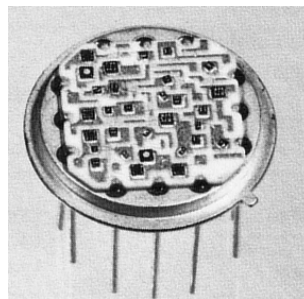
1.- Introducción



Uno de los primeros amplificadores operacionales realizados con válvulas



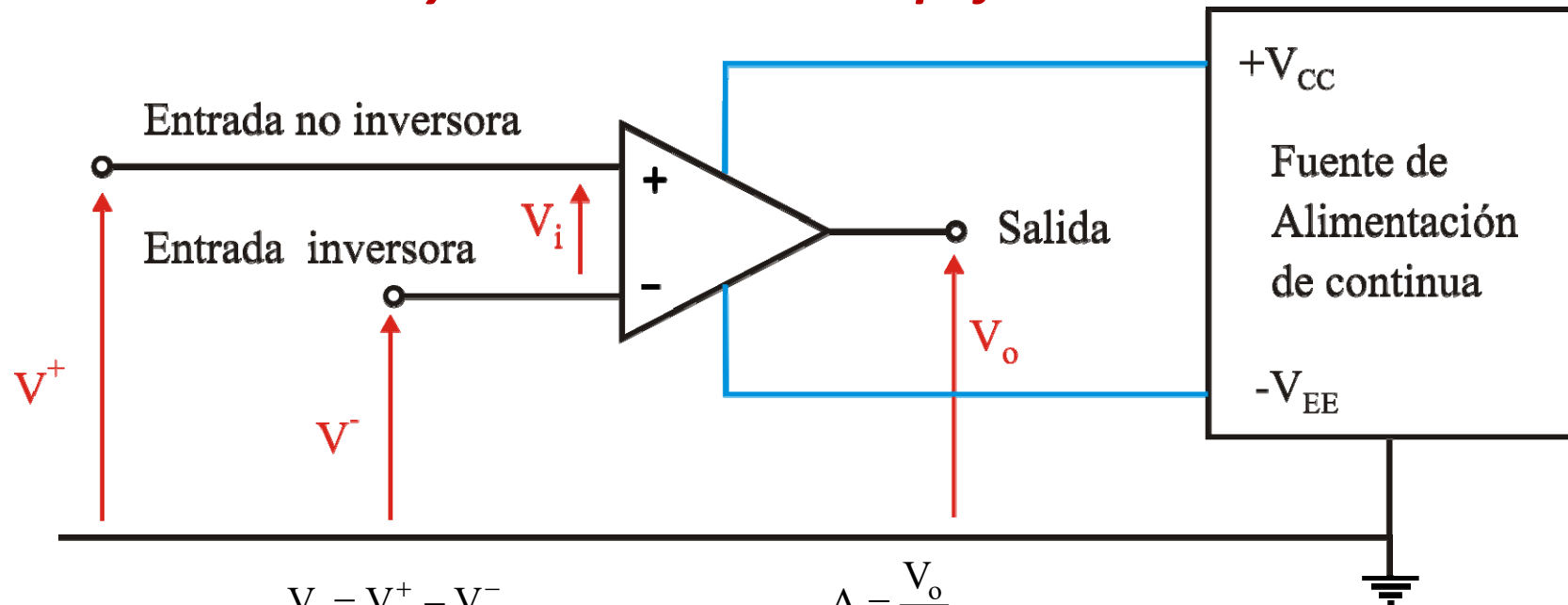
Circuito del primer amplificador operacional comercial, el $\mu A702$, diseñado por Bob Widlar y comercializado por Fairchild en 1964



Primer operacional de alta velocidad con cápsula del 741

1.- Introducción

1.1.- Símbolos y terminales del amplificador.

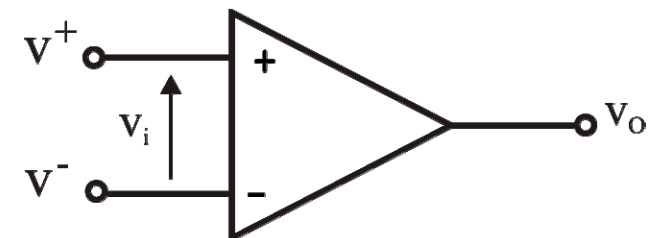


$$V_i = V^+ - V^-$$

$$A = \frac{V_o}{V_i}$$

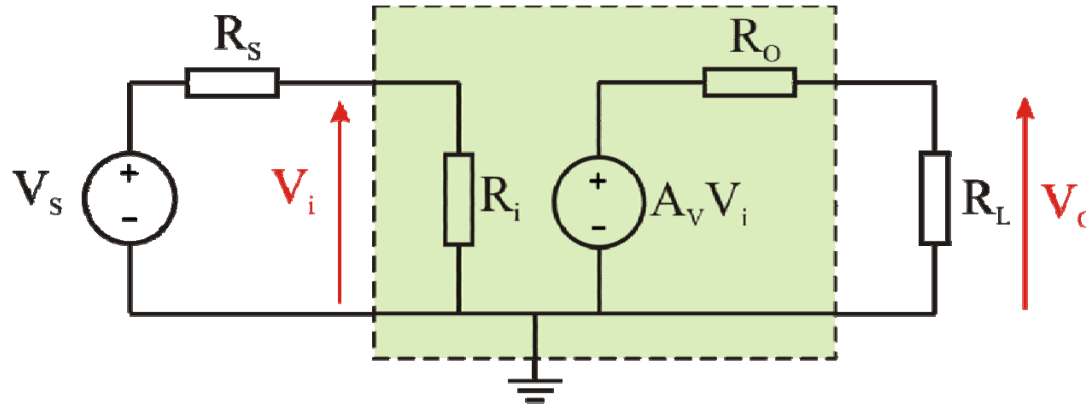
$$V_o = A \cdot V_i = A(V^+ - V^-)$$

Entrada no inversora	Entrada inversora
Si $V^+ = \text{cte}$ $\begin{cases} V^- \uparrow \Rightarrow V_o \downarrow \\ V^- \downarrow \Rightarrow V_o \uparrow \end{cases}$	Si $V^- = \text{cte}$ $\begin{cases} V^+ \uparrow \Rightarrow V_o \uparrow \\ V^+ \downarrow \Rightarrow V_o \downarrow \end{cases}$



1.- Introducción

1.2.- El amplificador operacional como amplificador de tensión.



$$\left. \begin{aligned} V_i &= \frac{R_i}{R_i + R_s} V_s \\ V_o &= \frac{R_L}{R_o + R_L} A_v \cdot V_i \end{aligned} \right\} V_o = \frac{R_L}{R_o + R_L} \cdot \frac{R_i}{R_i + R_s} \cdot A_v \cdot V_s$$

$$\left. \begin{aligned} R_o \ll R_L &\Rightarrow \frac{R_L}{R_o + R_L} \simeq 1 \\ R_i \gg R_s &\Rightarrow \frac{R_i}{R_i + R_s} \simeq 1 \end{aligned} \right\} \Rightarrow V_o = A_v \cdot V_s$$

En un amplificador de tensión interesa:
Baja R_o
Alta R_i
Alta A_v

1.- Introducción

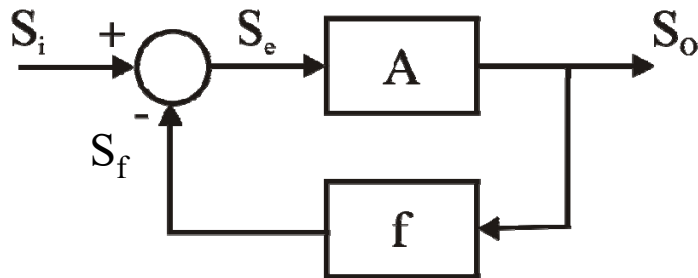
1.3.- Conceptos básicos de realimentación.

Amplificador no realimentado



$$A = \frac{S_o}{S_i}$$

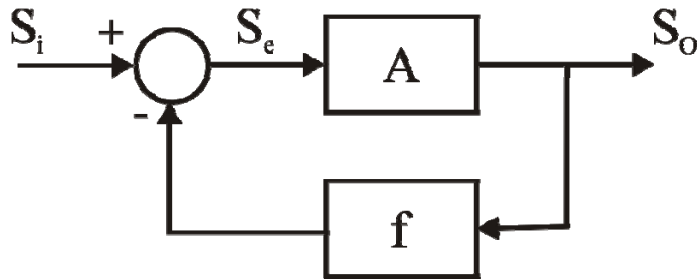
Amplificador realimentado



$$\left. \begin{array}{l} S_o = A \cdot S_e \\ S_e = S_i - S_f \\ S_f = f \cdot S_o \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} S_o = A(S_i - f \cdot S_o) \\ S_o(1 + A \cdot f) = A \cdot S_i \end{array} \right.$$

$$A_f = \frac{S_o}{S_i} = \frac{A}{1 + A \cdot f}$$

1.- Introducción



$$A_f = \frac{S_o}{S_i} = \frac{A}{1 + A \cdot f}$$

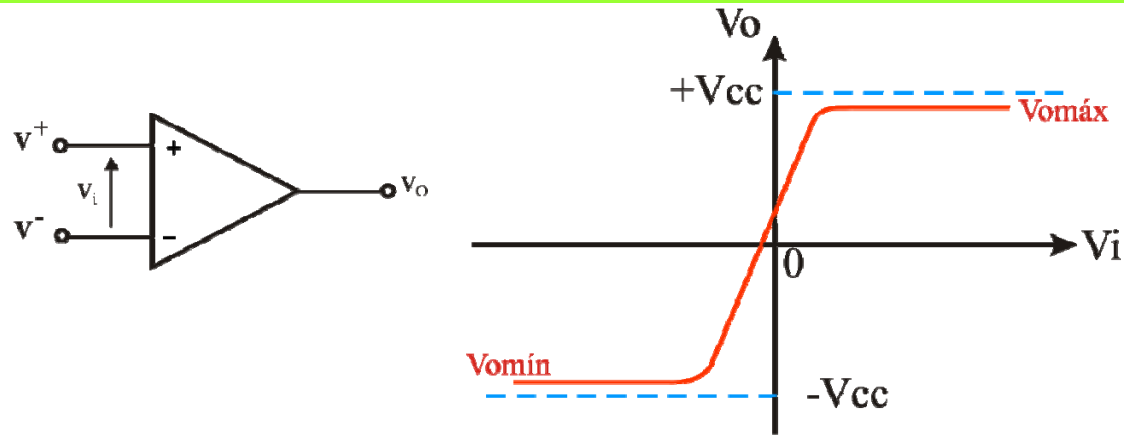
Si $A \cdot f > 0 \rightarrow$ Realimentación negativa

- Estabiliza
- Disminuye la ganancia

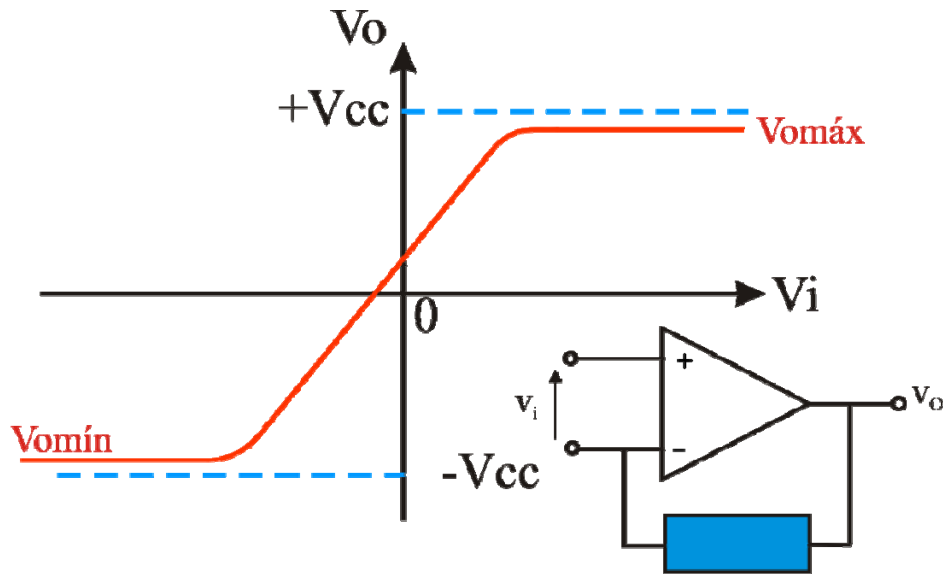
Si $A \cdot f < 0 \rightarrow$ Realimentación positiva

- Inestabiliza
- Aumenta la ganancia

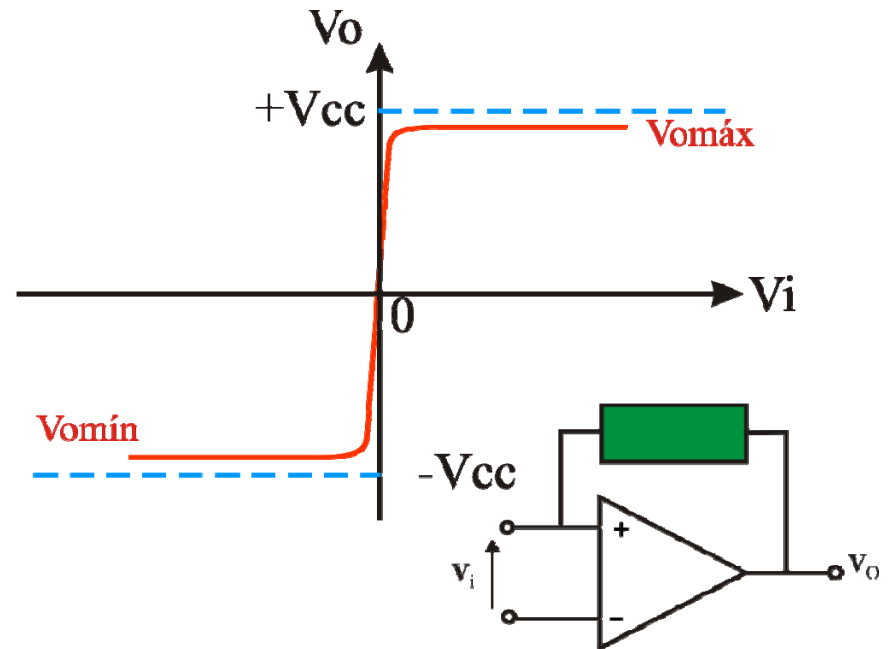
1.- Introducción



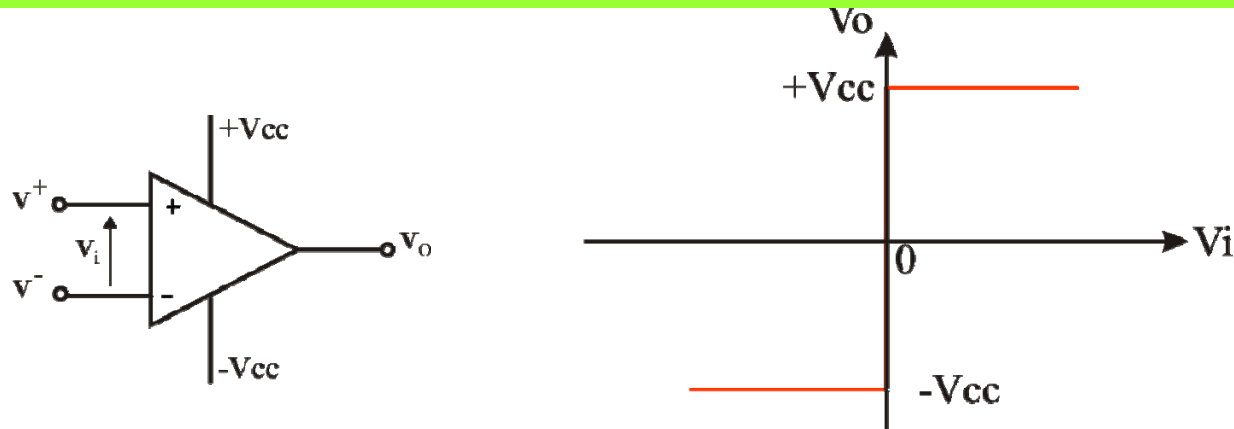
Realimentación negativa



Realimentación positiva



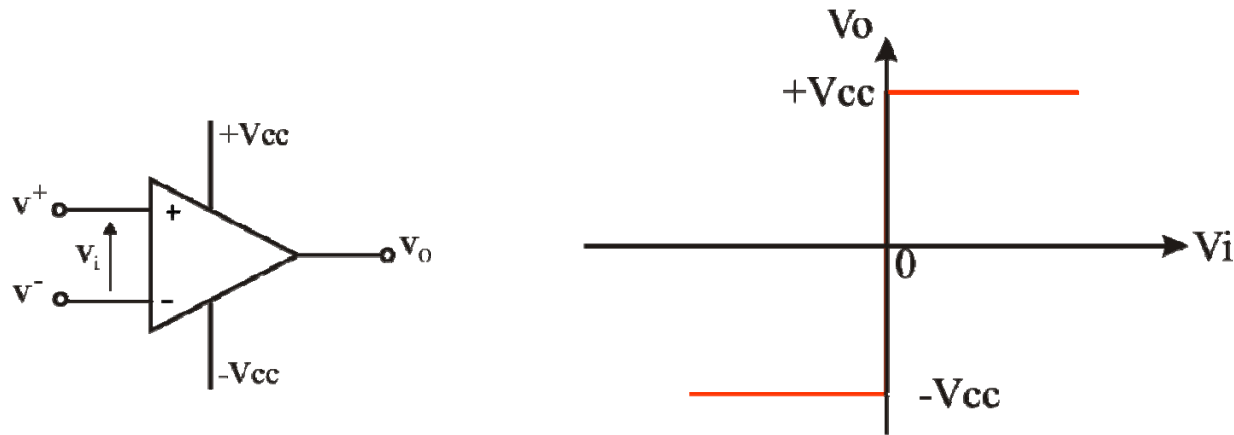
2.- El Amplificador Operacional Ideal



Características principales:

- Impedancia de entrada infinita $R_i = \infty$
- Impedancia de salida nula $R_o = 0$
- Ganancia diferencial infinita $A_V = \infty$
- Margen dinámico $\pm V_{cc}$
- CMRR infinito

2.- El Amplificador Operacional Ideal



Características secundarias:

- Anchura de banda infinita
- Tensión de offset nula
- Corrientes de polarización nulas
- Ruido nulo
- Tiempo de conmutación nulo

2.- El Amplificador Operacional Ideal

2.2.- Resolución de circuitos.

Realimentación negativa

$$A_V = \infty$$

$$v_O = A_V (V^+ - V^-) \Rightarrow V^+ - V^- = \frac{v_O}{A_V}$$

$$\left. \begin{array}{l} v_O = \text{valor finito} \\ A_V = \infty \end{array} \right\} \Rightarrow V^+ - V^- = 0$$

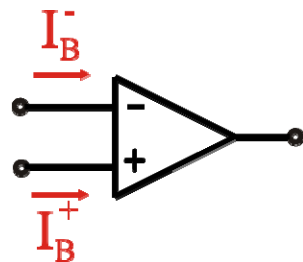
$$V^+ = V^-$$

Entrada en cortocircuito virtual

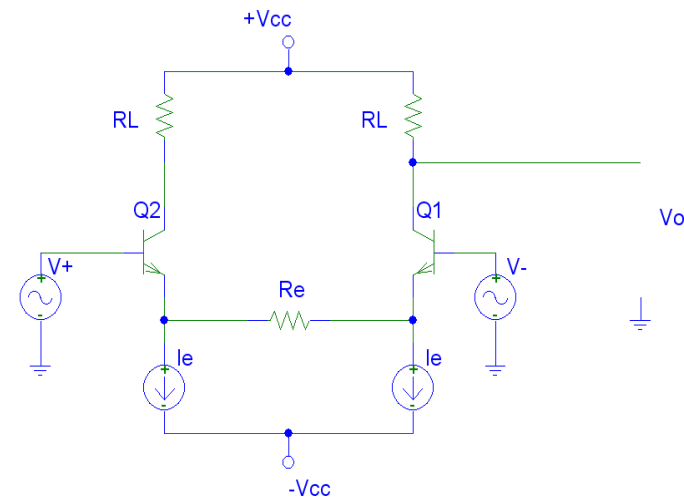


Hipótesis válida únicamente en la zona lineal (AmOp no saturado)

$$R_i = \infty$$



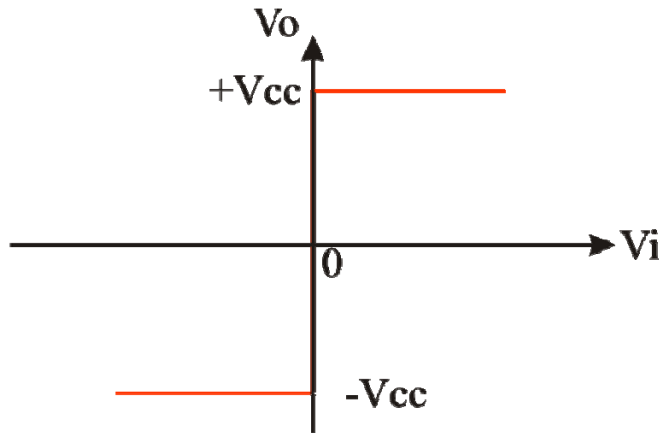
$$I_B^+ = I_B^- = 0$$



2.- El Amplificador Operacional Ideal

2.2.- Resolución de circuitos.

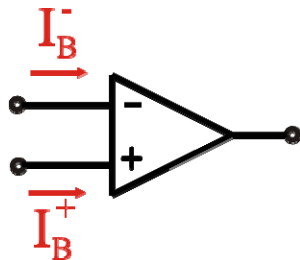
Realimentación positiva o amplificador sin realimentar



La tensión de salida V_o sólo puede adoptar dos valores

$$V_o = \begin{cases} +V_{cc} \\ -V_{cc} \end{cases}$$

$$R_i = \infty$$

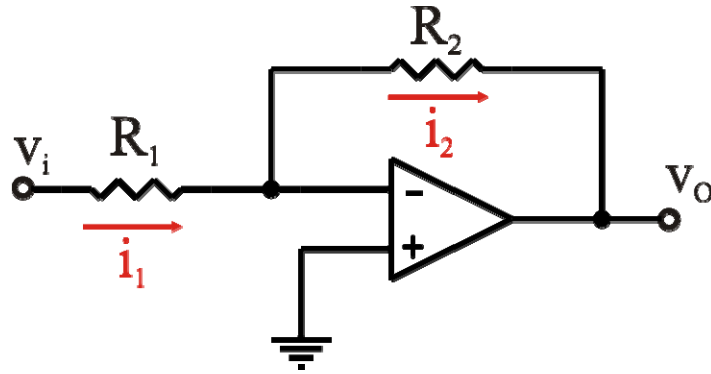


$$I_B^+ = I_B^- = 0$$



2.- El Amplificador Operacional Ideal

2.2.- Circuitos típicos con AO ideales: Amplificador de tensión inversor



$$v^+ = v^- \Rightarrow v^- = 0$$

$$i_B^+ = i_B^- = 0 \Rightarrow i_1 = i_2$$

$$\left. \begin{aligned} i_1 &= \frac{v_i - 0}{R_1} = \frac{v_i}{R_1} \\ i_2 &= \frac{0 - v_o}{R_2} = \frac{-v_o}{R_2} \end{aligned} \right\} i_1 = i_2 \Rightarrow \frac{v_i}{R_1} = \frac{-v_o}{R_2}$$

$$v_o = -\frac{R_2}{R_1} v_i$$

Características como Amplificador de tensión:

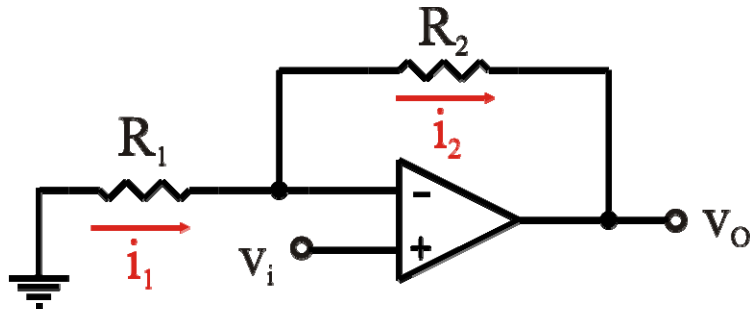
$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{R_2}{R_1}$$

$$Z_i = \frac{v_i}{i_1} = R_1$$

$$Z_o = 0$$

2.- El Amplificador Operacional Ideal

2.2.- Circuitos típicos con AO ideales: Amp. de tensión no inversor



$$v^+ = v^- \quad \Rightarrow \quad v^- = v_i$$

$$i_B^+ = i_B^- = 0 \quad \Rightarrow \quad i_1 = i_2$$

$$\left. \begin{aligned} i_1 &= \frac{0 - v_i}{R_1} = \frac{-v_i}{R_1} \\ i_2 &= \frac{v_i - v_O}{R_2} \end{aligned} \right\} i_1 = i_2 \quad \Rightarrow \quad \frac{v_i}{R_1} = \frac{v_i - v_O}{R_2}$$

$$v_O = \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) v_i$$

Características como Amplificador de tensión:

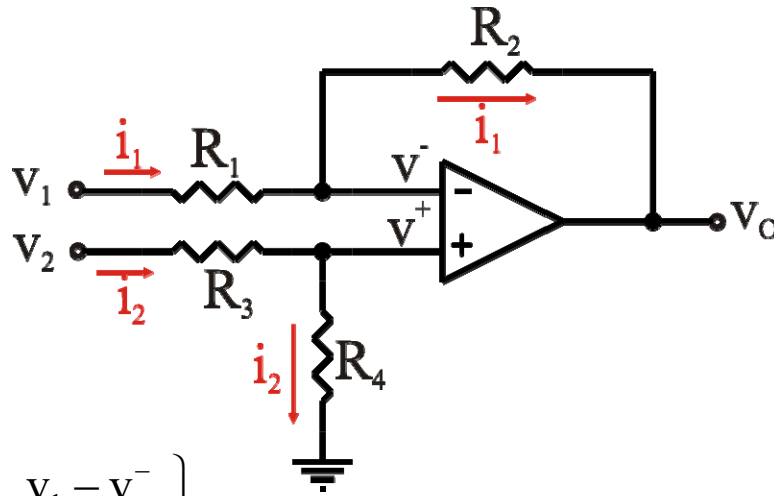
$$A_v = \frac{v_O}{v_i} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

$$Z_i = \frac{v_i}{i_B^+} = \frac{v_i}{0} = \infty$$

$$Z_o = 0$$

2.- El Amplificador Operacional Ideal

2.2.- Circuitos típicos con AO ideales: Amp. de tensión diferencial



$$\left. \begin{aligned} i_1 &= \frac{v_1 - v^-}{R_1} \\ i_1 &= \frac{v^- - v_O}{R_2} \end{aligned} \right\}$$

$$\Rightarrow \frac{v_1 - v^-}{R_1} = \frac{v^- - v_O}{R_2} \Rightarrow v^- = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot v_1 + \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot v_O$$

$$v^+ = v^-$$

$$i_B^+ = i_B^- = 0$$

$$\left. \begin{aligned} v^+ &= R_4 \cdot i_2 \\ i_2 &= \frac{v_2}{R_3 + R_4} \end{aligned} \right\} \Rightarrow v^+ = \frac{R_4}{R_3 + R_4} v_2$$

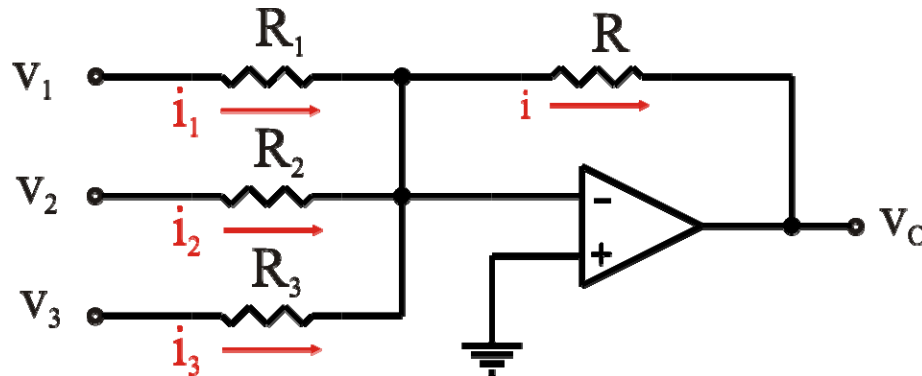
$$v^+ = v^- \Rightarrow v_O = \frac{1 + \frac{R_2}{R_1}}{1 + \frac{R_3}{R_4}} \cdot v_2 - \frac{R_2}{R_1} \cdot v_1$$

Si se cumple $\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3}$

$$v_O = \frac{R_2}{R_1} \cdot (v_2 - v_1)$$

2.- El Amplificador Operacional Ideal

2.2.- Circuitos típicos con AO ideales: sumador inversor



$$\begin{aligned}v^+ = v^- &\Rightarrow v^- = 0 \\i_B^+ = i_B^- = 0 &\Rightarrow i = i_1 + i_2 + i_3\end{aligned}$$

$$\left. \begin{aligned}i_1 &= \frac{V_1}{R_1} \\i_2 &= \frac{V_2}{R_2} \\i_3 &= \frac{V_3}{R_3} \\i &= \frac{-V_O}{R}\end{aligned} \right\} \begin{aligned}i = i_1 + i_2 + i_3 &\Rightarrow \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} = -\frac{V_O}{R} \\V_O &= -\left(\frac{R}{R_1} \cdot V_1 + \frac{R}{R_2} \cdot V_2 + \frac{R}{R_3} \cdot V_3 \right)\end{aligned}$$

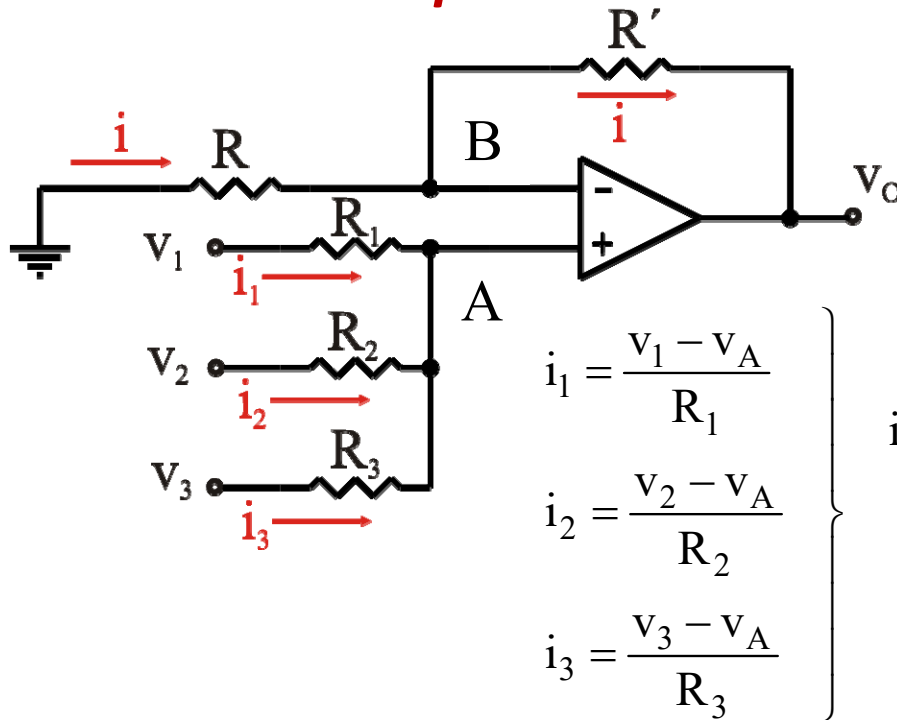
La tensión de salida es una combinación lineal de las tensiones de entrada.

En el caso particular que $R = R_1 = R_2 = R_3$

$$V_O = -(V_1 + V_2 + V_3)$$

2.- El Amplificador Operacional Ideal

2.2.- Circuitos típicos con AO ideales: sumador no inversor



$$v^+ = v^- \Rightarrow v_B = v_A$$

$$i_B^+ = i_B^- = 0 \Rightarrow i_1 + i_2 + i_3 = 0$$

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0 \Rightarrow \frac{v_1 - v_A}{R_1} + \frac{v_2 - v_A}{R_2} + \frac{v_3 - v_A}{R_3} = 0$$

$$\frac{v_1}{R_1} + \frac{v_2}{R_2} + \frac{v_3}{R_3} = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) v_A$$

$$\frac{v_1}{R_1} + \frac{v_2}{R_2} + \frac{v_3}{R_3} = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) \cdot \frac{R}{R + R'} v_O$$

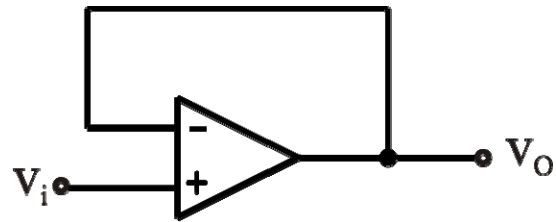
$$v_B = \frac{R}{R + R'} v_O$$

Si $\begin{cases} R_1 = R_2 = R_3 = R'' \\ R' = 2R \end{cases}$ $\frac{1}{R''} [v_1 + v_2 + v_3] = \frac{3}{R''} \cdot \frac{R}{3R} v_O$

$$v_O = v_1 + v_2 + v_3$$

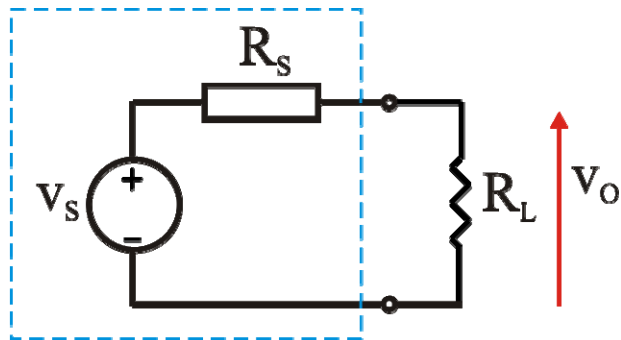
2.- El Amplificador Operacional Ideal

2.2.- Circuitos típicos con AO ideales: seguidor de tensión



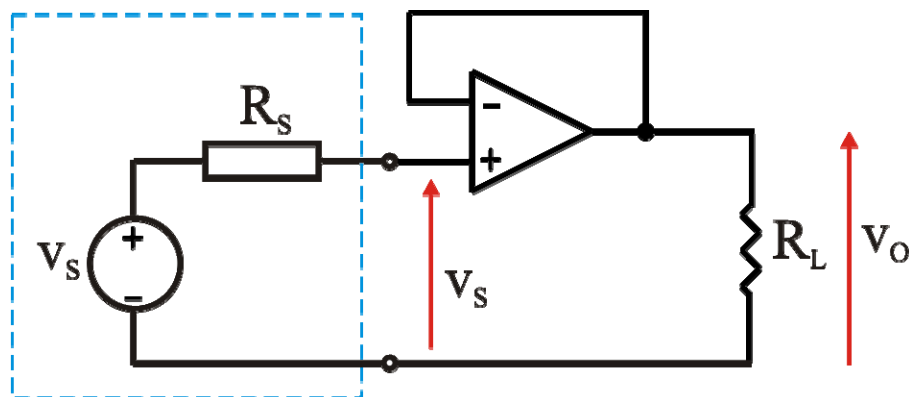
$$v^+ = v^- \Rightarrow \boxed{V_O = V_i}$$

Ejemplo de aplicación



$$v_O = \frac{R_L}{R_L + R_S} v_S \rightarrow v_O = \frac{1}{1 + \frac{R_S}{R_L}} v_S \Rightarrow v_O < v_S$$

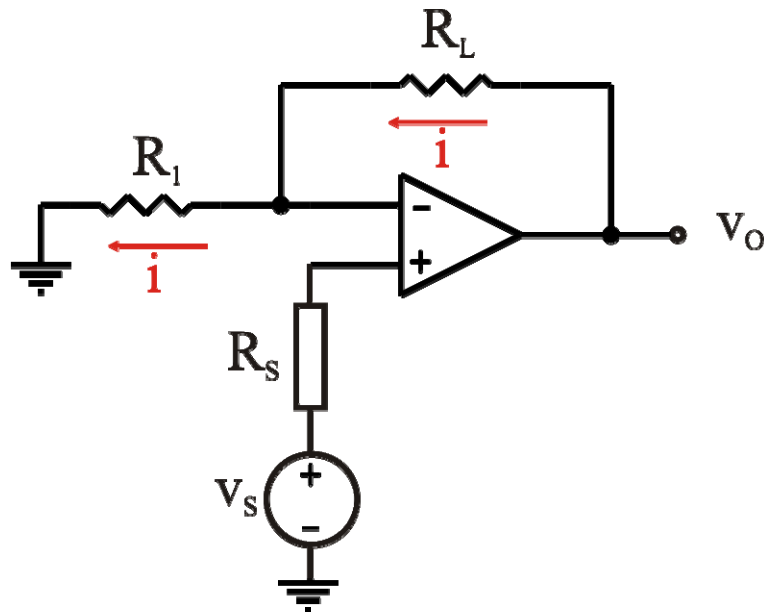
$$\text{Si } R_S \ll R_L \Rightarrow v_O = v_S$$



$$v_O = v_S$$

2.- El Amplificador Operacional Ideal

2.2.- Circuitos típicos con AO ideales: convertidor tensión-corriente



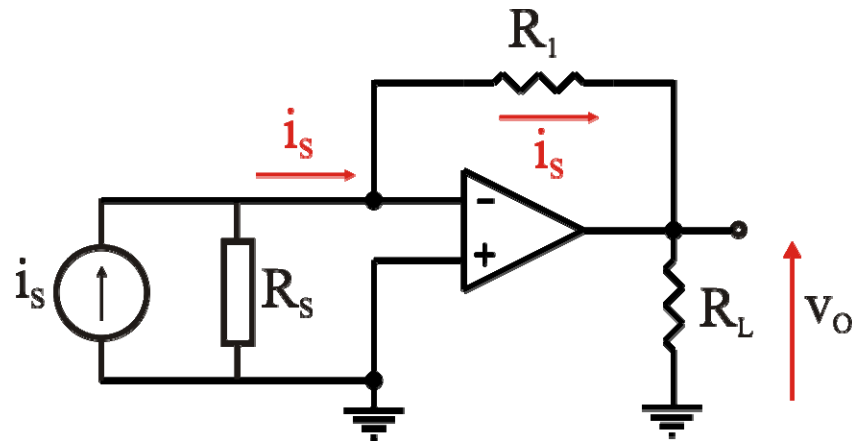
$$\left. \begin{array}{l} v^+ = v^- \\ i_B^+ = i_B^- = 0 \end{array} \right\} \Rightarrow v^+ = v^- = v_S$$

$$i = \frac{v^-}{R_1} = \frac{v_S}{R_1} \neq f(R_L)$$

La corriente por la resistencia es independiente del valor de la misma.

2.- El Amplificador Operacional Ideal

2.2.- Circuitos típicos con AO ideales: convertidor corriente-tensión

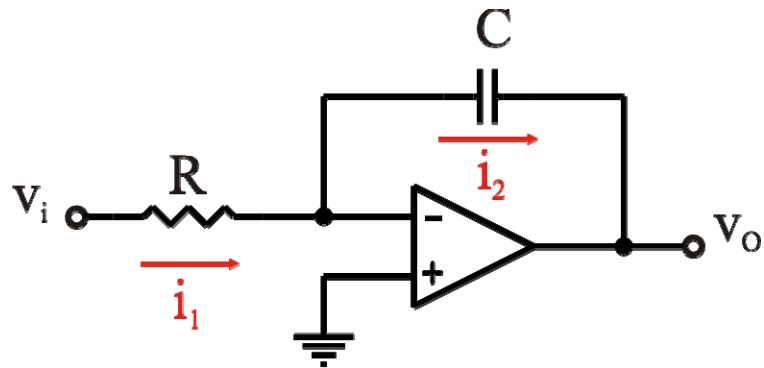


$$\left. \begin{array}{l} v^+ = v^- \\ i_B^+ = i_B^- = 0 \end{array} \right\} \Rightarrow v_O = -R_1 \cdot i_s$$

La tensión en la resistencia es independiente del valor de la misma.

2.- El Amplificador Operacional Ideal

2.2.- Circuitos típicos con AO ideales: integrador

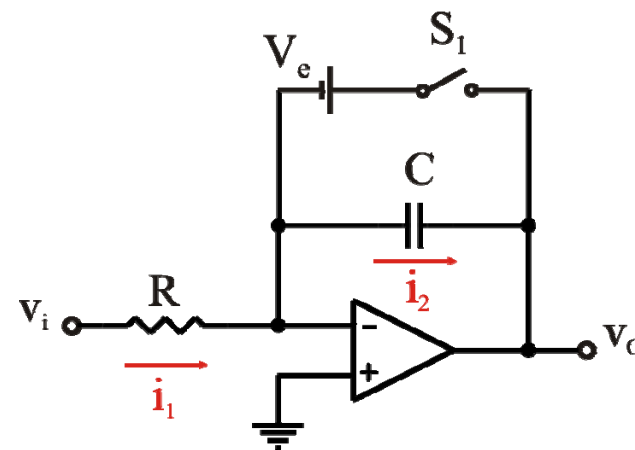


$$\left. \begin{array}{l} v^+ = v^- \Rightarrow v^- = 0 \\ I_B^- = 0 \Rightarrow i_1 = i_2 \end{array} \right\} \begin{array}{l} i_1 = \frac{v_i}{R} \\ i_2 = -C \cdot \frac{dv_o}{dt} \end{array}$$

$$\frac{v_i}{R} = -C \frac{dv_o}{dt} \Rightarrow dv_o = -\frac{1}{RC} v_i dt$$

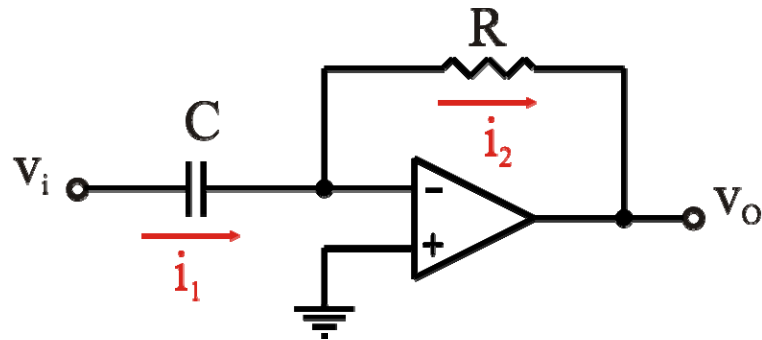
$$v_o = v_o(0) - \frac{1}{RC} \int_0^t v_i dt$$

Para establecer las condiciones iniciales:



2.- El Amplificador Operacional Ideal

2.2.- Circuitos típicos con AO ideales: diferenciador



$$\left. \begin{array}{l} v^+ = v^- \Rightarrow v^- = 0 \\ I_B^- = 0 \Rightarrow i_1 = i_2 \end{array} \right\}$$

$$\left. \begin{array}{l} i_1 = C \frac{dv_i}{dt} \\ i_2 = \frac{-v_o}{R} \end{array} \right\}$$

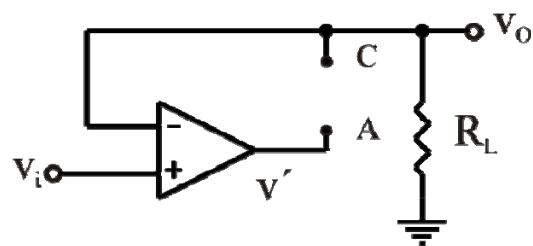
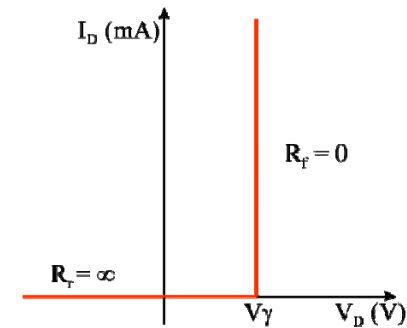
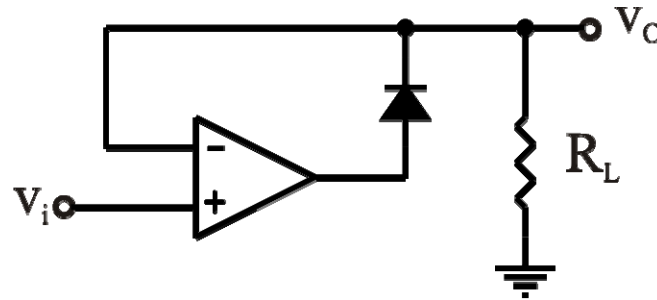
$$\frac{v_o}{R} = -C \frac{dv_i}{dt} \Rightarrow v_o = -RC \cdot \frac{dv_i}{dt}$$

$$v_o = -RC \cdot \frac{dv_i}{dt}$$

2.- El Amplificador Operacional Ideal

2.2.- Circuitos típicos con AO ideales: diodo de precisión

Diodo en corte

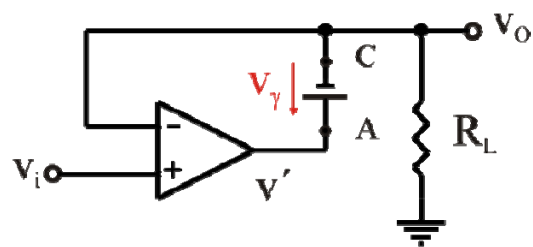


$$I_B^- = 0 \Rightarrow \boxed{v_O = 0}$$

$$\left. \begin{array}{l} v_D \leq V_\gamma \\ v_D = v_A - v_C \end{array} \right\} \left. \begin{array}{l} v_A = v' = A(v_i - v_O) \\ v_C = v_O \end{array} \right\} Av_i \leq V_\gamma$$

$$v_i \leq \frac{V_\gamma}{A} \xrightarrow{A \rightarrow \infty} \boxed{v_i \leq 0}$$

Diodo en conducción



$$v^+ = v^- \Rightarrow \boxed{v_O = v_i}$$

$$\left. \begin{array}{l} i \geq 0 \\ i = \frac{v_O}{R_L} \end{array} \right\} \frac{v_O}{R_L} \geq 0 \Rightarrow v_O \geq 0 \Rightarrow \boxed{v_i \geq 0}$$

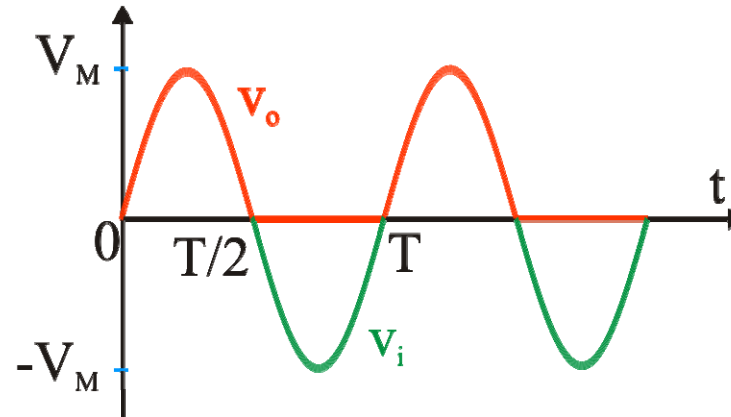
2.- El Amplificador Operacional Ideal

2.2.- Circuitos típicos con AO ideales: diodo de precisión

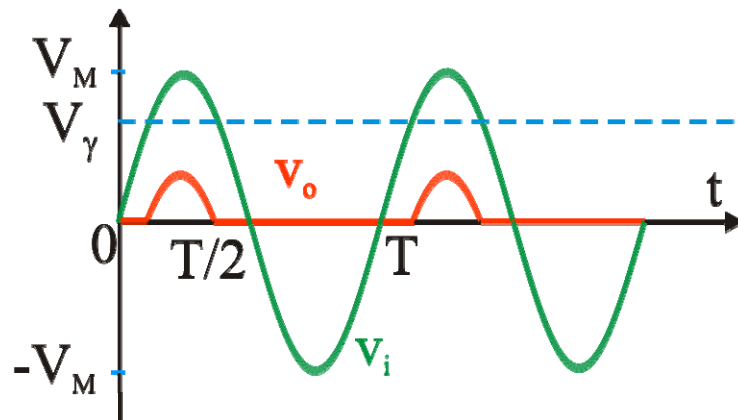
En resumen

$$\text{Si } v_i \leq 0 \quad v_O = 0$$

$$\text{Si } v_i \geq 0 \quad v_O = v_i$$



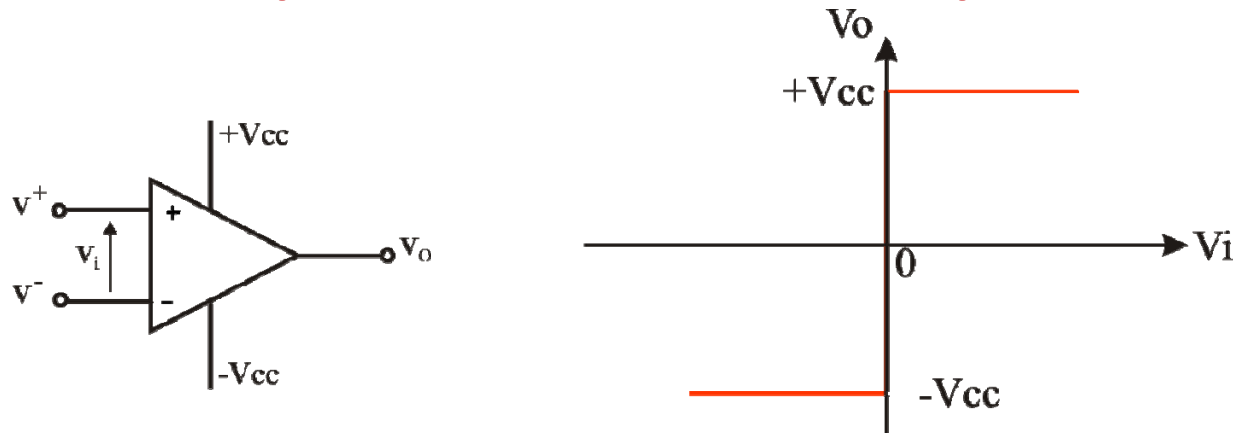
Diodo de precisión



Diodo normal

2.- El Amplificador Operacional Ideal

2.2.- Circuitos típicos con AO ideales: comparador



Es un circuito sin realimentación

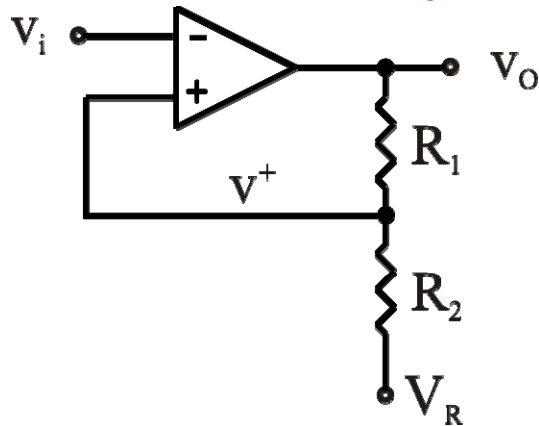
$$V_O = \begin{cases} +V_{CC} \\ -V_{CC} \end{cases}$$

$$\text{Si } v_i > 0, \quad V^+ > V^- \Rightarrow v_o = +V_{CC}$$

$$\text{Si } v_i < 0, \quad V^+ < V^- \Rightarrow v_o = -V_{CC}$$

2.- El Amplificador Operacional Ideal

2.2.- Circuitos típicos con AO ideales: disparador (Trigger) de Schmitt



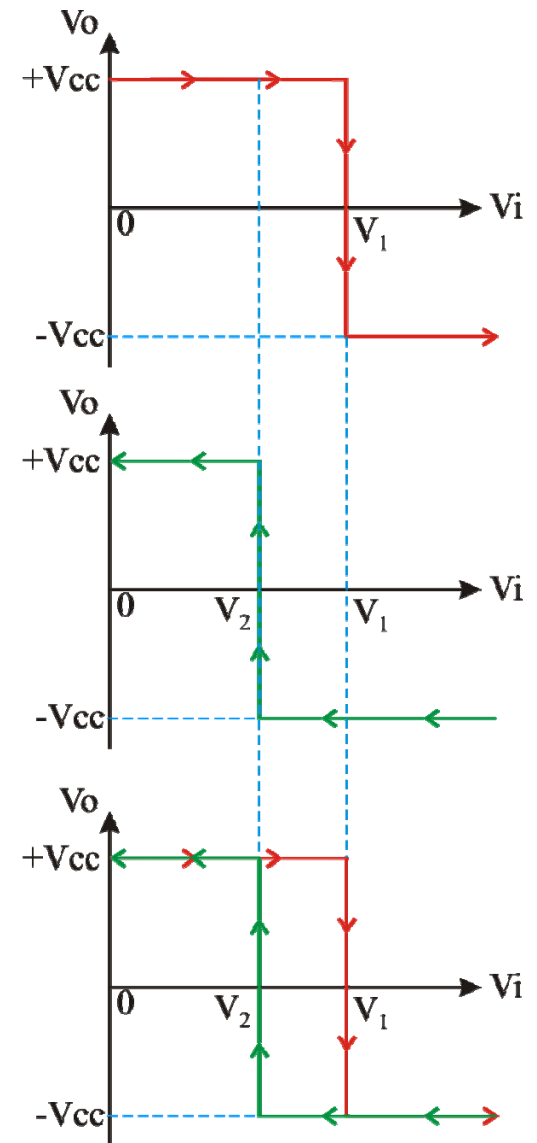
$$\text{Si } v_i > v^+ \Rightarrow v_o = -V_{CC}$$

$$\text{Si } v_i < v^+ \Rightarrow v_o = +V_{CC}$$

$$v^+ = V_R + \frac{R_2}{R_2 + R_1} (v_o - V_R)$$

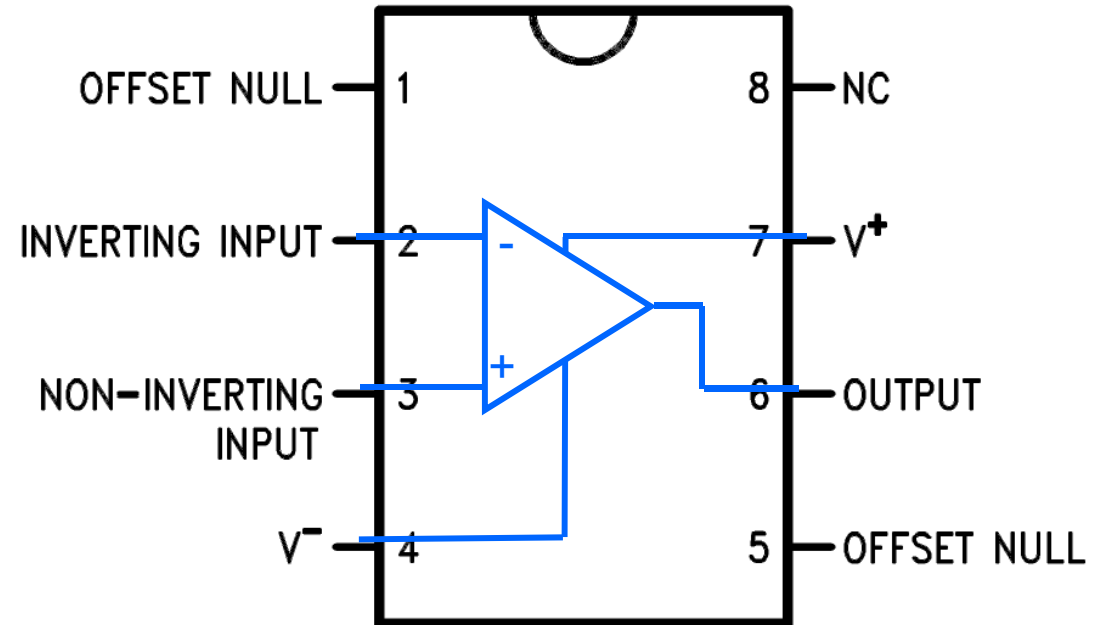
$$\text{Si } v_o = +V_{CC} \Rightarrow v^+ = V_R + \frac{R_2}{R_2 + R_1} (V_{CC} - V_R) = V_1$$

$$\text{Si } v_o = -V_{CC} \Rightarrow v^+ = V_R - \frac{R_2}{R_2 + R_1} (V_{CC} + V_R) = V_2$$



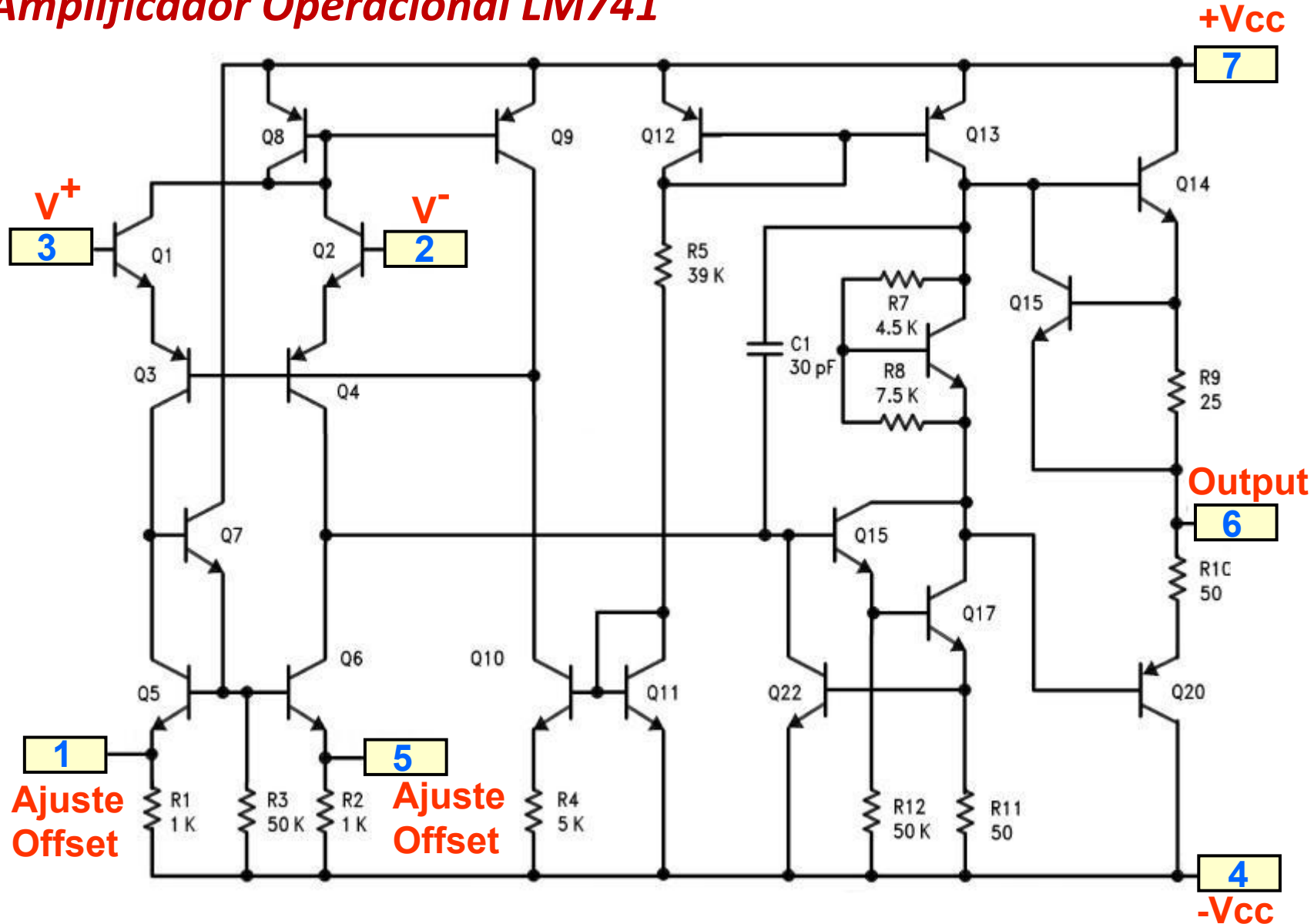
3.- Ejemplo de Amplificadores Operacionales

Amplificador Operacional LM741



3.- Ejemplo de Amplificadores Operacionales

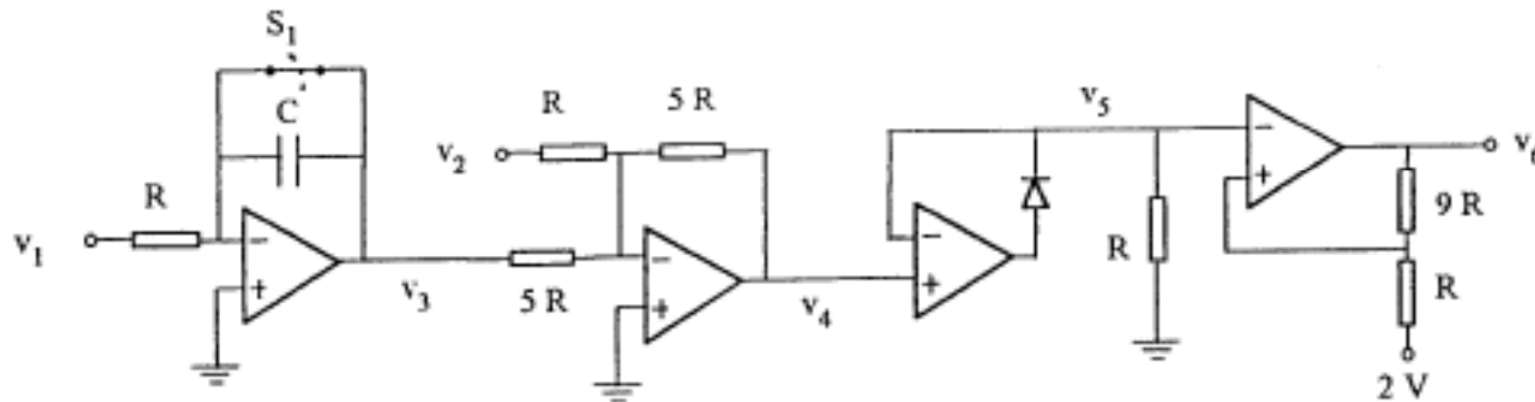
Amplificador Operacional LM741



4.- Problemas con AO

En el circuito de la figura 1 los amplificadores operacionales son ideales y están alimentados entre -10 y +10 voltios. $RC = 10^{-3}$ s. v_1 es una onda cuadrada de 50 Hz. Para $t = 0$ s, $v_1 = 1$ V. v_2 es una tensión continua de 1 V. Para $t = 0$, el interruptor S_1 se abre.

- ¿Qué condiciones de partida utilizas en la resolución de cada uno de los operacionales?. ¿Por qué?.
- Indicar qué función realiza cada uno de los amplificadores operacionales del circuito. (No hay que hacer las demostraciones si no son necesarias).
- Dibujar cómo varían en función del tiempo v_3 , v_4 , v_5 y v_6 . Dibujar como mínimo 40 ms. Debe quedar claro los valores en los que las curvas cortan al eje de los tiempos, valores máximos y unidades.



4.- Problemas con AO

Sea el circuito de la figura 3. Los amplificadores operacionales son ideales y están alimentados entre -12 y $+12$ voltios.
 $RC = 1 \mu\text{s}$. El interruptor S_1 está cerrado y se abre para $t = 0$ s. v_1 es una onda cuadrada entre -1 V y $+1$ V, de frecuencia $125/3$ KHz; para $t = 0$ s, $v_1 = 1$ V.
 V_2 y V_3 son dos ondas triangulares de frecuencia $125/9$ KHz, de 6 V de valor de pico y están en fase.

- A.- Indicar qué función realiza cada uno de los amplificadores operacionales del circuito.
- B.- Dibujar cómo varían en función del tiempo v_4 , v_5 y v_6 . Dibujar como mínimo $72 \mu\text{s}$. Debe quedar claro los valores en los que las curvas cortan al eje de los tiempos, valores máximos y unidades.
- NO HAY QUE HACER LAS DEMOSTRACIONES SI NO SON NECESARIAS.**

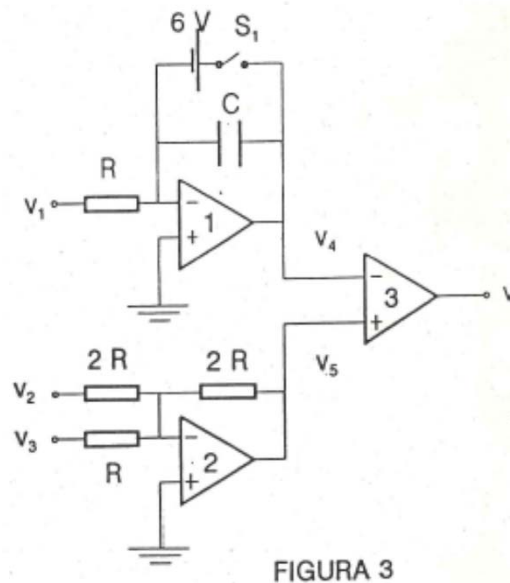


FIGURA 3