

CIRCUITOS CON AMPLIFICADORES OPERACIONALES

5.1. AMPLIFICADOR INVERSOR

La señal de entrada V_i se introduce por el terminal inversor del A.O.

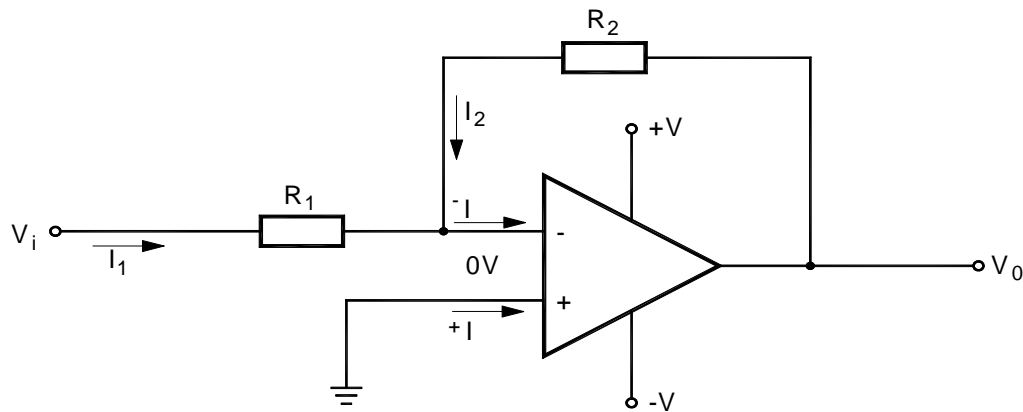


Figura 1

Si se tiene en cuenta que la Z_i (impedancia de entrada) es muy elevada:

$$+I = I = 0$$

Despreciando la corriente que entra por el terminal inversor (I), se tiene:

$$I_1 = -I_2$$

$$I_1 = \frac{V_i}{R_1}$$

Siendo la tensión de salida V_o :

$$V_o = I_2 \cdot R_2$$

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

Existiendo un desfase en la tensión de salida de 180°

Según la ecuación anterior, la tensión de salida es igual a la de entrada, amplificada según el valor de la ganancia en tensión (Δv).

$$\Delta v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{-V_i \cdot R_2}{R_1 \cdot V_i} = -\frac{R_2}{R_1}$$

Para que los dos terminales (inversor y no inversor), vean la misma resistencia de entrada.

$$R_3 = R_1 // R_2$$

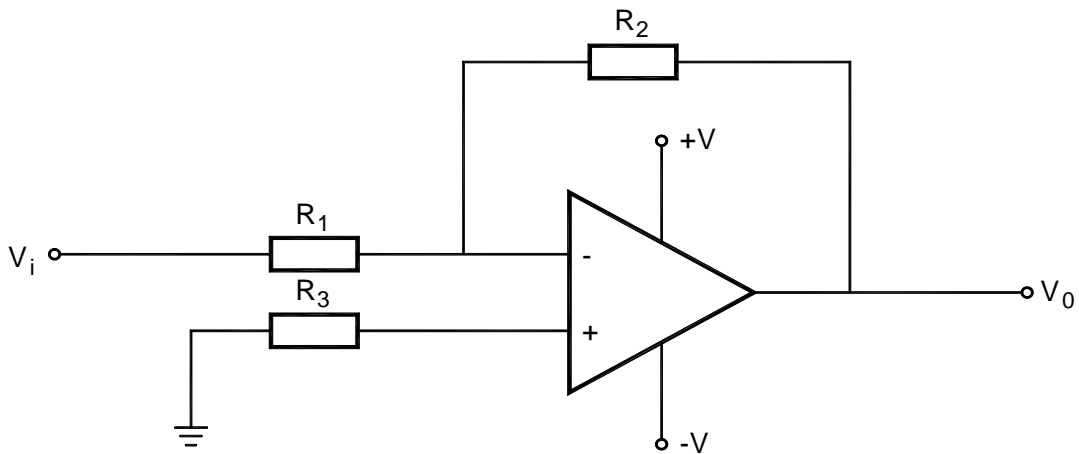
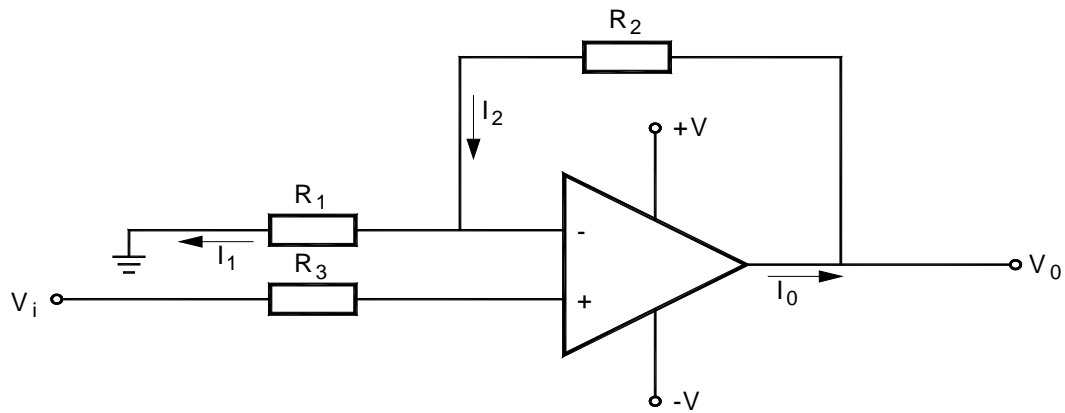


Figura 2

5.2. AMPLIFICADOR NO INVERSOR

- La señal de entrada V_i se aplica al terminal no inversor del A.O.
- La señal de salida V_o , está en fase con la de entrada.

*Figura 3*

Si observamos el circuito determinamos:

$$I_1 = I_2$$

$$I_1 = \frac{V_i}{R_1}$$

$$V_o = I_1 \cdot (R_1 + R_2)$$

Sustituyendo el valor de I_1 :

$$V_o = \frac{(R_1 + R_2)}{R_1} \cdot V_i$$

La ganancia en tensión (Δ_v) viene determinada:

$$\Delta_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{R_1 + R_2}{R_1}$$

De lo que se deduce que no se puede conseguir $\Delta_v = 1$

$$R_3 = R_1 // R_2$$

✚ Conclusiones:

- En la configuración inversora se obtiene un desfase de 180° de la salida respecto a la entrada; pudiéndose conseguir una $\Delta_v = 1$.
- En la configuración no inversora, la salida está en fase con la entrada y $\Delta_v \neq 1$.

5.3. APLICACIONES CON AMPLIFICADORES OPERACIONALES

5.3.1. INTRODUCCIÓN

Las primeras aplicaciones de los A.O., fueron en la realización de operaciones matemáticas: suma, resta, derivación, integración, etc.

5.3.2. SUMADOR INVERSOR Y NO INVERSOR

5.3.2.1 SUMADOR INVERSOR

- Se le llama también *amplificador inversor multicanal*.
- El siguiente circuito constituye un A.O. sumador inversor de 3 canales.

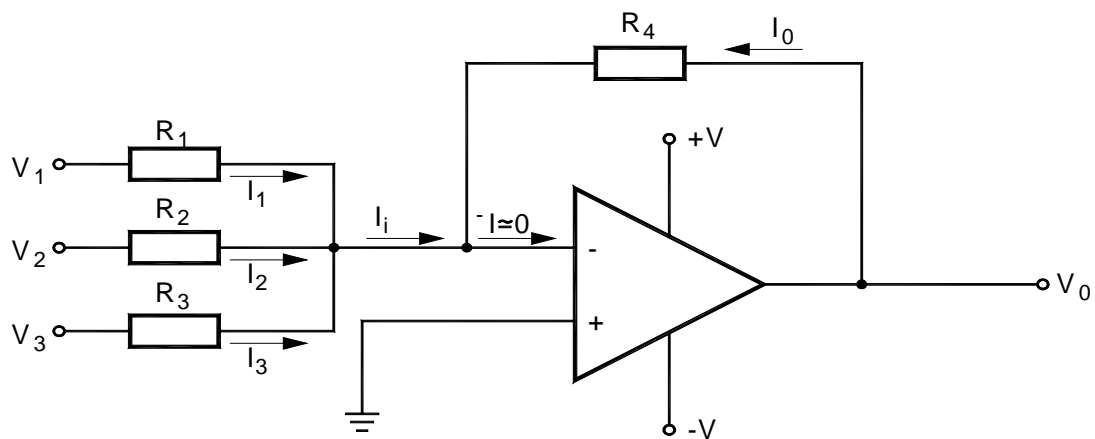


Figura 4

Teniendo en cuenta, las consideraciones vistas hasta ahora y que son 3 inversores:

$$I_i = -I_o$$

$$\Delta_{v1} = -\frac{R_4}{R_1}; \quad \Delta_{v2} = -\frac{R_4}{R_2}; \quad \Delta_{v3} = -\frac{R_4}{R_3}$$

$$\Delta_v = \Delta_{v1} + \Delta_{v2} + \Delta_{v3}$$

$$I_o = -(I_1 + I_2 + I_3)$$

Sustituyendo los valores de las intensidades:

$$I_o = -\left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3}\right)$$

Podemos obtener la tensión de salida:

$$V_o = -R_4 \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} \right)$$

Si: $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$

$$V_o = V_1 + V_2 + V_3$$

$$V_o = -(\Delta_{v1} \cdot V_1 + \Delta_{v2} \cdot V_2 + \Delta_{v3} \cdot V_3)$$

Haciendo:

- $R_1 = R_2 = R_3 = R$
- $R_4 = R / n$ (n: n° de entradas del sumador)

Obteniéndose un circuito que realiza la media aritmética de las señales de entrada.

Conectando un amplificador inversor de ganancia unitaria a la salida del sumador inversor, se obtiene un amplificador sumador no inversor.

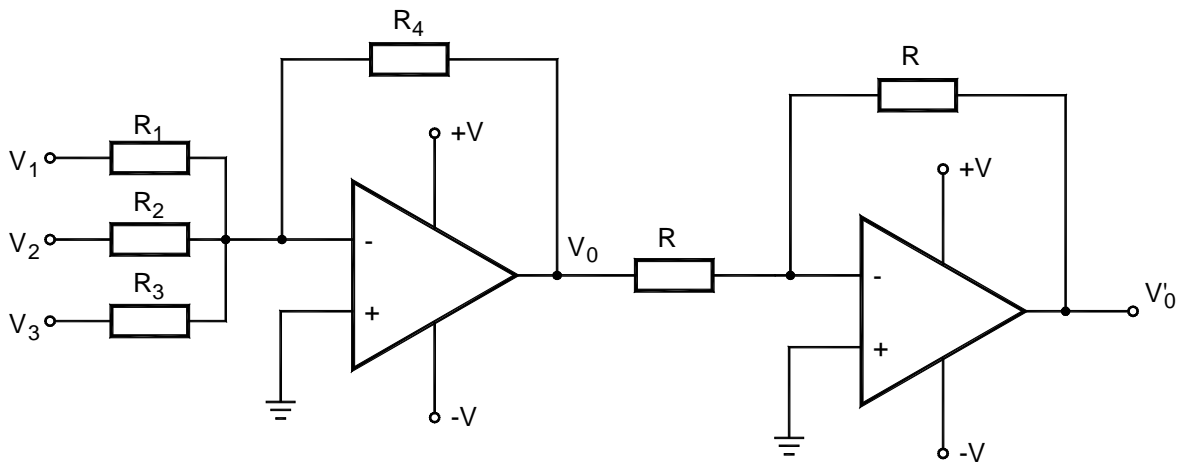


Figura 5

$$V_o = -R_4 \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} \right)$$

$$V'_o = R_4 \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} \right)$$

5.3.2.2 SUMADOR NO INVERSOR

La salida se encuentra en fase con la entrada, pero no se puede obtener ganancia unitaria.

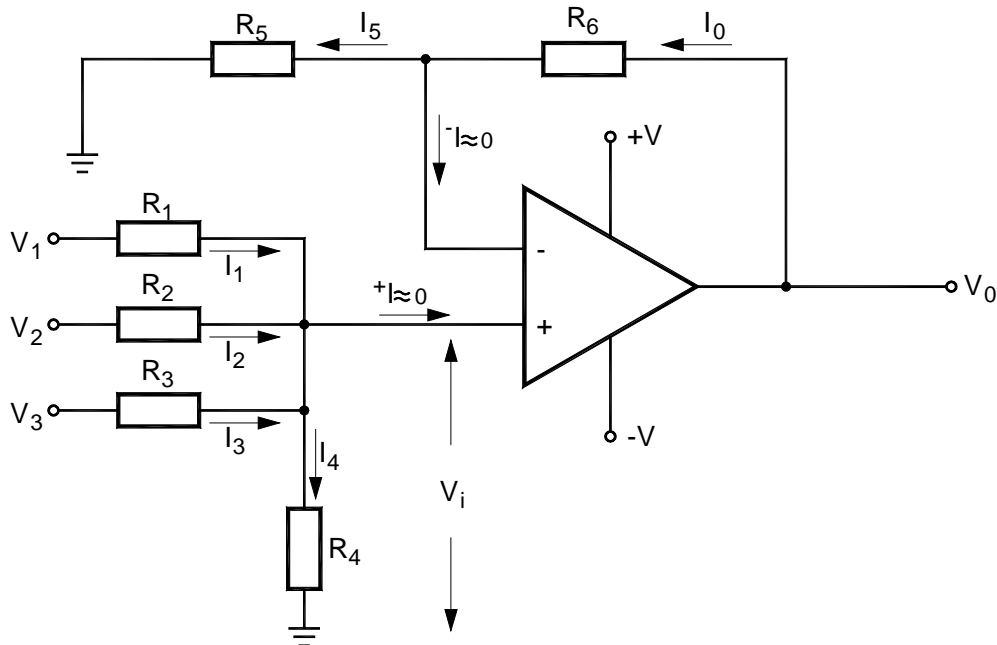


Figura 6

Si se aplican las consideraciones de un amplificador no inversor:

$$I_5 = I_0$$

$$\Delta_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{R_6 + R_5}{R_5}$$

La tensión en el terminal no inversor (V_i) viene determinada por:

$$V_i = R_4 \cdot I_4$$

$$V_i = R_4 (I_1 + I_2 + I_3)$$

$$V_i = R_4 \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} \right)$$

$$V_o = \Delta_v \cdot V_i$$

$$V_o = R_4 \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} \right) \cdot \left(\frac{R_6 + R_5}{R_5} \right)$$

5.3.3. AMPLIFICADOR DIFERENCIAL (RESTADOR)

- Realiza la resta o diferencia entre las dos señales de entrada.
- El A.O. funciona como inversor y no inversor.
- Aprovechando el desfase del inversor se puede realizar la resta o diferencia entre las dos señales de entrada.

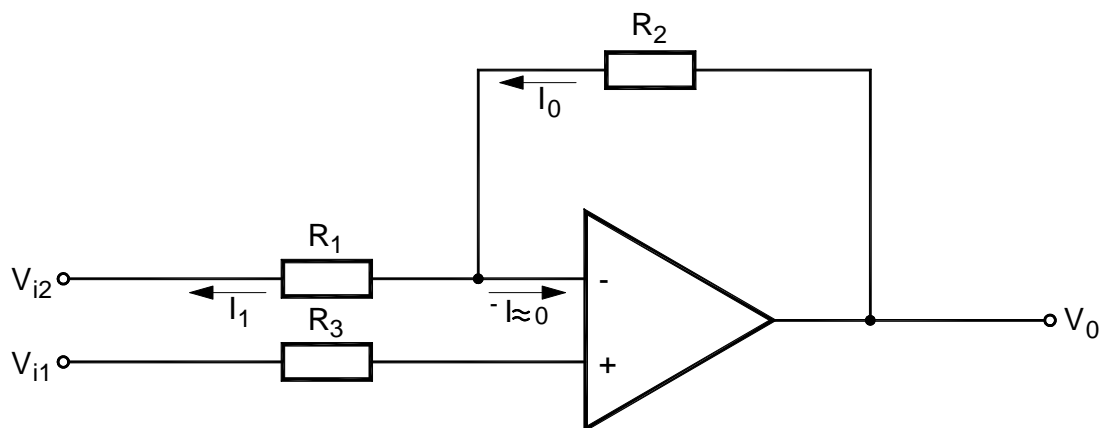


Figura 7

$$V_o = V_{o1} + V_{o2}$$

V_{o1} : salida proporcionada por el terminal no inversor.

V_{o2} : salida proporcionada por el terminal inversor.

$$V_{o1} = \Delta_{v1} \cdot V_{i1} = \left(\frac{R_2 + R_1}{R_1} \right) \cdot V_{i1}$$

$$V_{o2} = \Delta_{v2} \cdot V_{i2} = -\frac{R_2}{R_1} \cdot V_{i2}$$

$$V_o = (\Delta_{v1} \cdot V_{i1}) - (\Delta_{v2} \cdot V_{i2})$$

$$V_o = \left[\left(\frac{R_2 + R_1}{R_1} \right) \cdot V_{i1} \right] - \left(\frac{R_2}{R_1} V_{i2} \right)$$

- El inconveniente del circuito anterior, es que no se obtiene exclusivamente la diferencia de las dos señales de entrada. Intervienen Δ_{v1} y Δ_{v2} .
- Para que la salida sea solo la diferencia de las dos señales de entrada se tiene que cumplir que:

$$\Delta_{v1} = \Delta_{v2} = 1$$

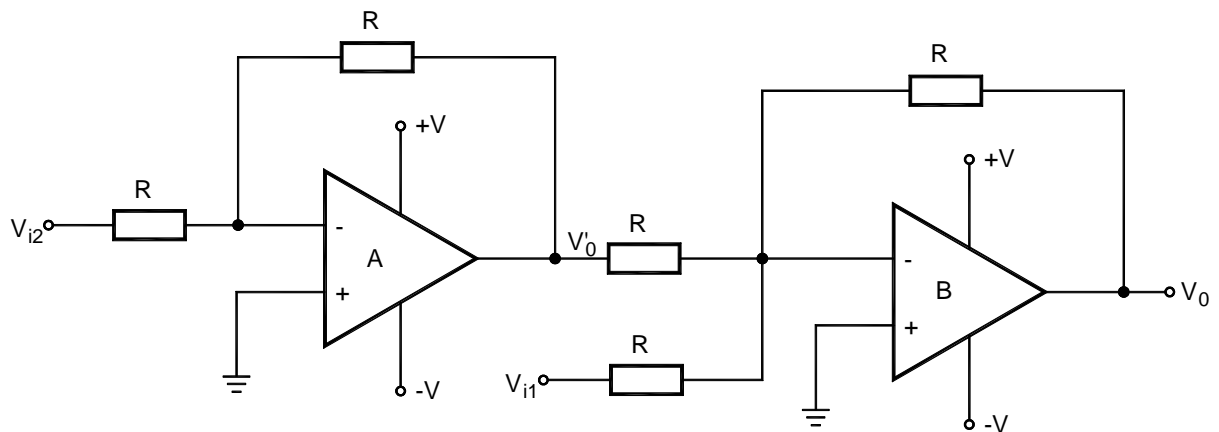


Figura 8

Amplificador A \Rightarrow inversor.

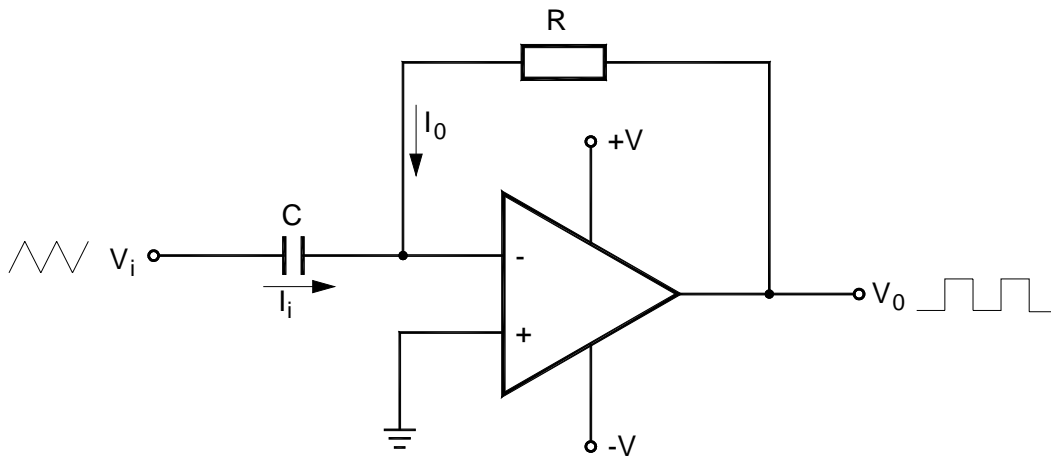
Amplificador B \Rightarrow sumador inversor.

$$V_o' = -V_{i2}$$

$$V_o = V_{i2} - V_{i1}$$

5.3.4. DERIVADOR E INTEGRADOR**5.3.4.1. DERIVADOR**

- En la salida (V_o) se obtiene la derivada de la señal de entrada (V_i), respecto al tiempo, multiplicada por una constante.
- El circuito se basa en un inversor, en el que R_1 se ha sustituido por un condensador.

*Figura 9*

Como $I_C = I_i$

$$I_C = C \frac{dV_C}{dt}$$

$$I_C = -I_o$$

$$V_C = V_i$$

La tensión de salida (V_o) será:

$$V_o = I_C \cdot R$$

$$V_o = -RC \frac{dV_C}{dt} = -RC \frac{dV_i}{dt}$$

5.3.4.2. INTEGRADOR

La salida es el producto de una constante por la integral de la señal de entrada.

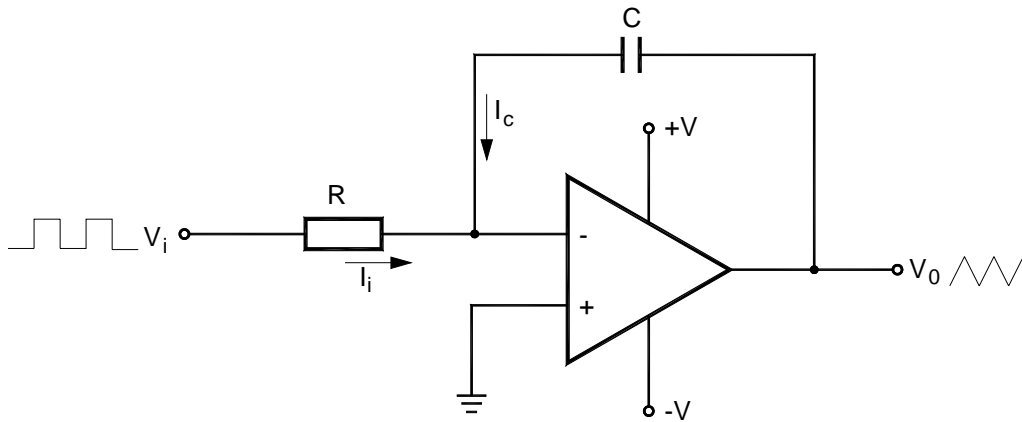


Figura 10

Para obtener la salida, hay que tener en cuenta la carga (Q) almacenada, entre las placas del condensador.

$$Q = \int I_C dt$$

Al ser $I_i = -I_C$

$$Q = \int -I_i dt$$

Definiendo la carga (Q) en función del voltaje (V_C) y la capacidad (C) del condensador:

$$Q = V_C \cdot C$$

$$V_C = \frac{Q}{C} = -\frac{1}{C} \int I_i dt$$

$$I_i = V_i / R_i$$

$$V_C = V_o = -\frac{1}{CR} \int V_i dt$$

5.3.5. AMPLIFICADOR LOGARÍTMICO

- Su salida es no lineal, es proporcional al logaritmo neperiano de la señal de entrada.
- Se basa en la relación exponencial existente entre la corriente y la tensión en una unión PN.

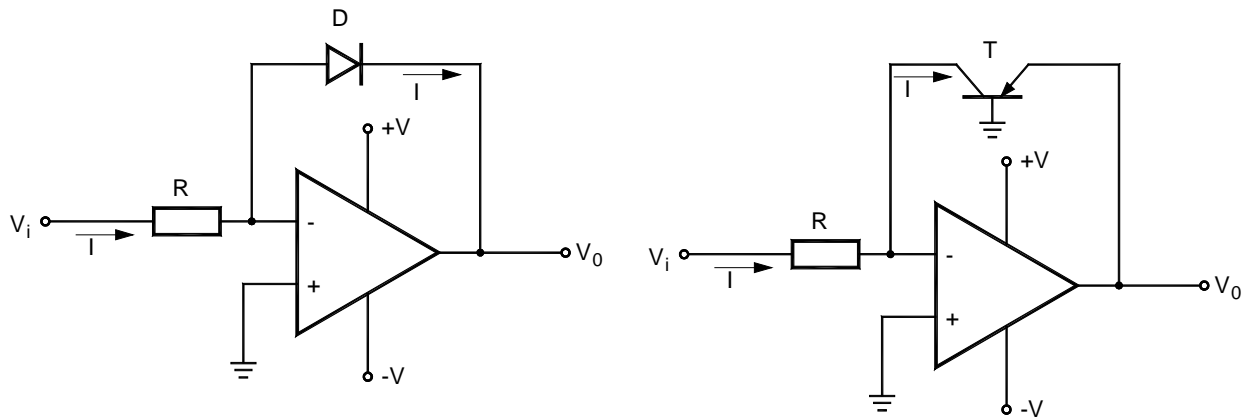


Figura 11

Relación exponencial:

$$I = I_o \left(e^{V/V_T} - 1 \right)$$

I_o : corriente inversa de saturación.

V_T : KT/q [K: cte de Boltzman ($1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K), T : temperatura absoluta en grados Kelvin,

q : carga del electrón ($1,602 \cdot 10^{-19}$ C)].

V: caída de tensión entre ánodo y cátodo.

$$I = I_o \left(e^{V_o/V_T} - 1 \right)$$

$$e^{V_o/V_T} \gg 1$$

Tomando logaritmo neperiano:

$$\ln \frac{I}{I_o} = \frac{V_o}{V_T}$$

Si: $I = V_i / R$.

$$V_o = V_T \ln \frac{V_i}{I_o R}$$

En cuanto al circuito utilizando un transistor:

$$I = I_o \left(e^{V_{BE}/V_T} - 1 \right)$$

La ventaja de utilizar un transistor, es su propiedad amplificadora.

Para conseguir el **amplificador antilogarítmico** (figura 12), se intercambia el diodo por la resistencia y viceversa.

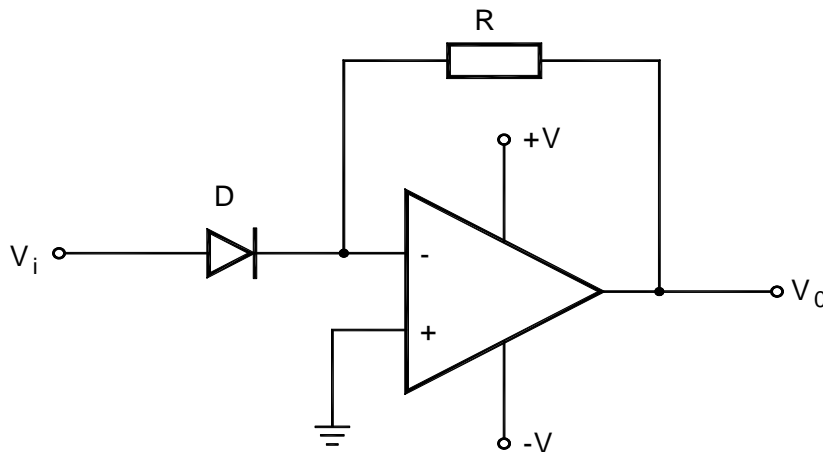


Figura 12

$$V_o = -I_o \cdot R \cdot \exp\left(\frac{V_i}{V_T}\right) = -I_o \cdot R \cdot e^{\frac{V_i}{V_T}}$$

5.3.6. MULTIPLICADOR Y DIVISOR

Hay que basarse en las propiedades que cumplen los logaritmos.

5.3.6.1. MULTIPLICADOR

$$\ln A + \ln B = \ln(AB)$$

$$\text{anti log}[\ln(AB)] = AB$$

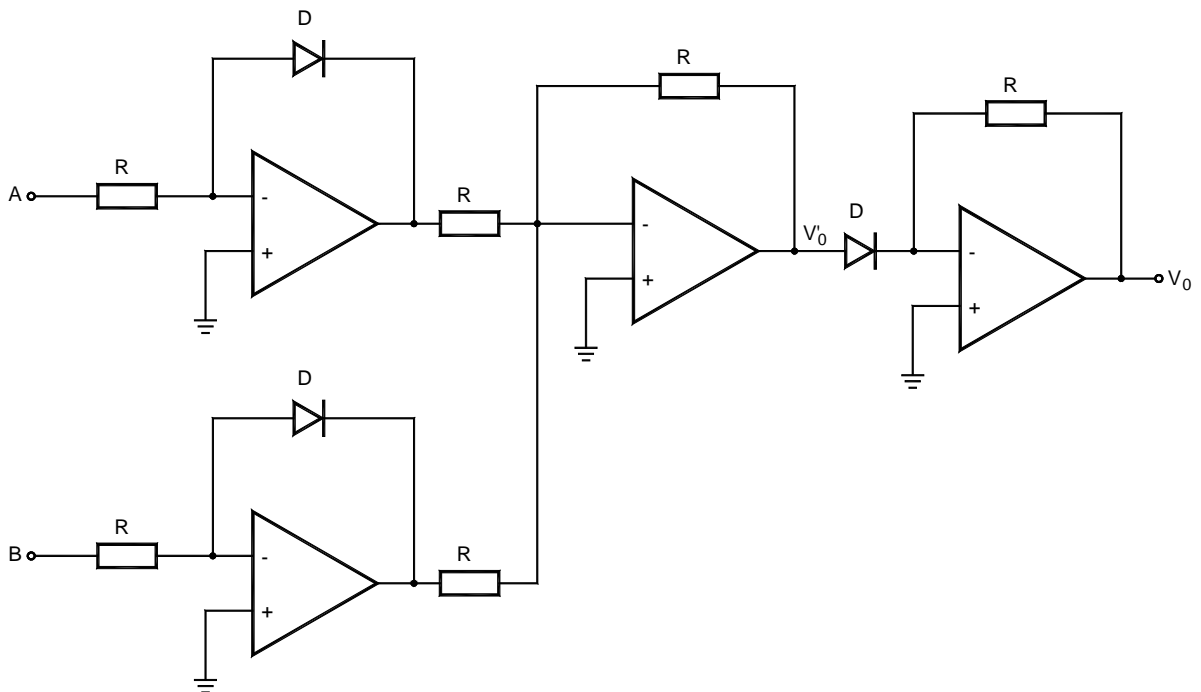


Figura 13

5.3.6.2. DIVISOR

$$\ln A - \ln B = \ln \frac{A}{B}$$

$$\text{anti log} \left(\ln \frac{A}{B} \right) = \frac{A}{B}$$

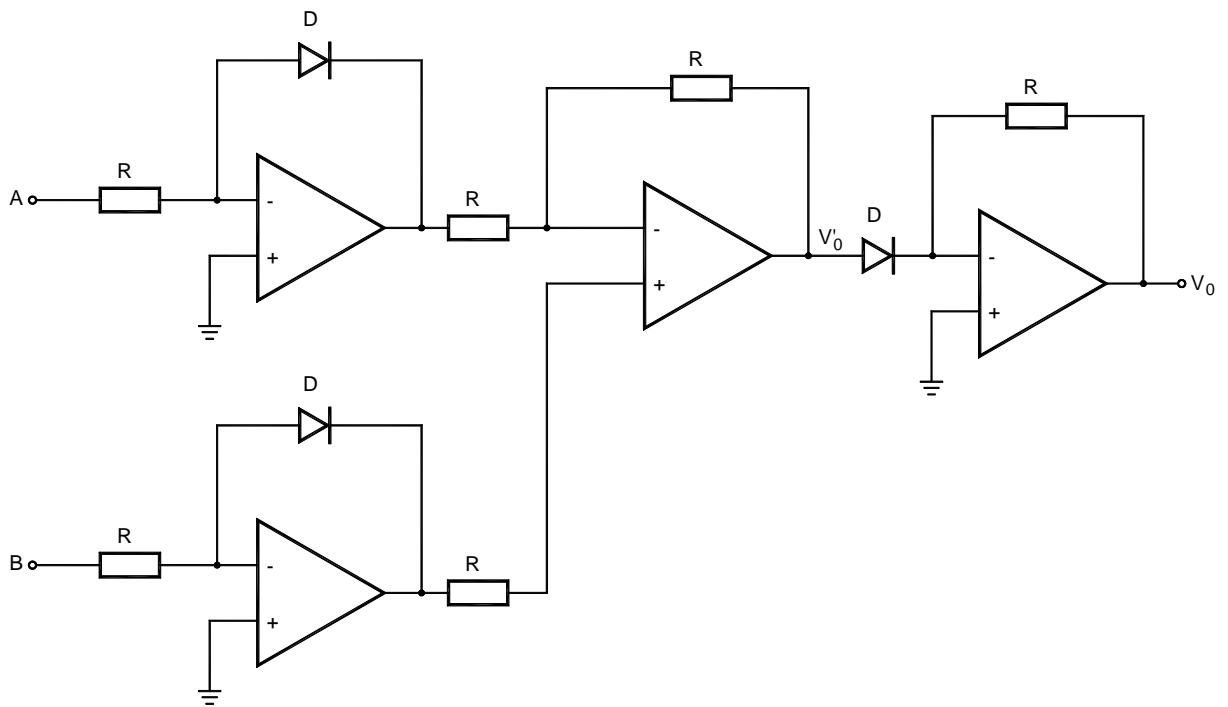


Figura 14

5.3.7. POTENCIACIÓN Y RADICACIÓN

5.3.7.1. POTENCIACIÓN

$$\text{Ln}(A^n) = n \cdot \text{Ln}A$$

$$\text{anti log}[\text{Ln}(A^n)] = A^n$$

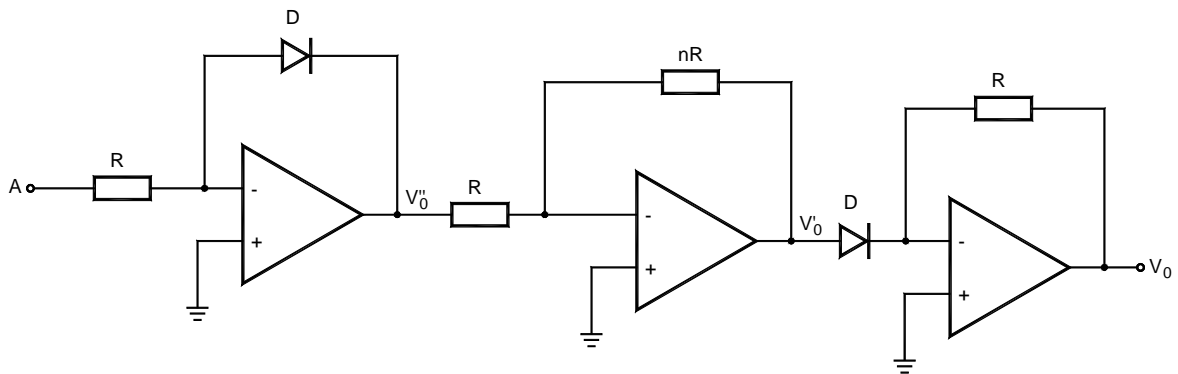


Figura 15

5.3.7.2. RADICACIÓN

$$\text{Ln}(\sqrt[n]{A}) = \frac{\text{Ln}A}{n}$$

$$\text{anti log}[\text{Ln}(\sqrt[n]{A})] = \sqrt[n]{A}$$

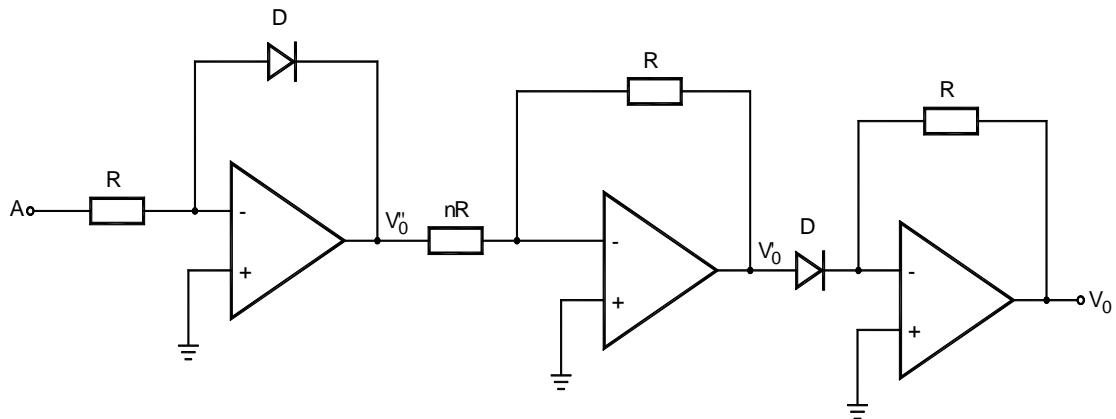


Figura 16

5.4. COMPARADOR DE TENSION

- Se basa en un A.O. sin lazo de realimentación, al que se le aplica una señal en cada entrada.
- Utiliza alimentación simétrica ($+V$, $-V$). Saturándose el amplificador, a los valores que se apliquen a estos terminales.

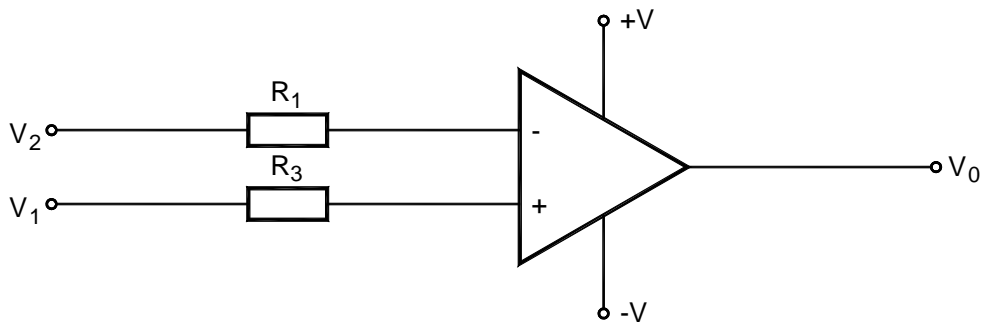


Figura 17

Suponiendo una alimentación simétrica de $\pm 15\text{v}$ ($+V = 15\text{v}$, $-V = -15\text{v}$), la salida V_0 tomaría los siguientes valores:

- $V_1 > V_2$ ($V_0 = +V = +15\text{V}$) (Salida saturada positivamente).
- $V_1 < V_2$ ($V_0 = -V = -15\text{V}$) (Salida saturada negativamente).

Un ejemplo práctico de esta configuración es el **detector inversor de cruce por cero** (figura 18).

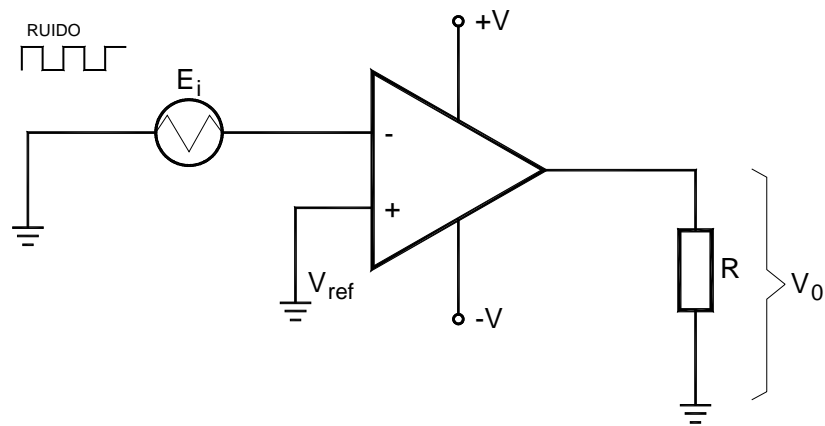


Figura 18

Se puede comprobar que el A.O. es muy sensible al ruido y esto es un grave problema en los A.O. que trabajan como comparadores .

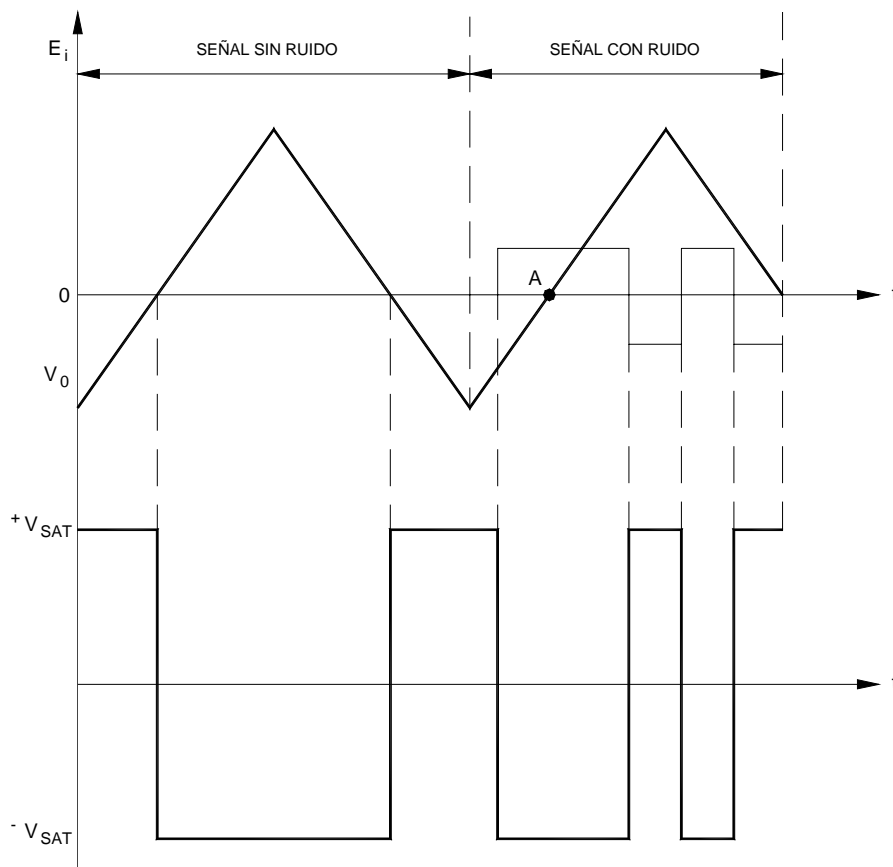


Figura 19

5.4.1. COMPARADOR REGENERATIVO (BÁSCULA DE SCHMITT)

- Coge una fracción del voltaje de salida (V_o) para crear un voltaje de referencia (V_R) dependiente de la salida.
- Utiliza realimentación positiva.

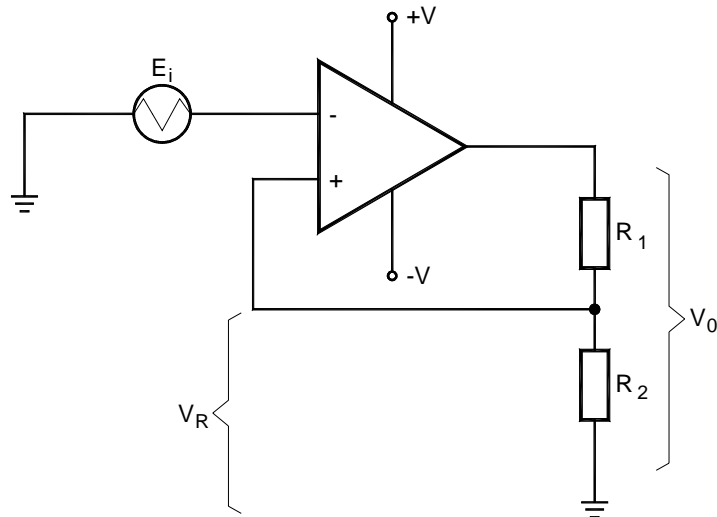


Figura 20

Su funcionamiento se basa en llevar la salida del A.O. a saturación positiva ($+V_{SAT}$) y negativa ($-V_{SAT}$).

$$\triangleright +V_{SAT} = +V.$$

$$\triangleright -V_{SAT} = -V.$$

- $V_O = +V_{SAT}$, el voltaje realimentado \Rightarrow Umbral superior de voltaje (V_{HT}) \Rightarrow positivo respecto a masa.

$$V_{HT} = \frac{+V_{SAT} \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

- $V_O = -V_{SAT}$, el voltaje realimentado \Rightarrow Umbral inferior de voltaje (V_{LT}) \Rightarrow negativo respecto a masa.

$$V_{LT} = \frac{-V_{SAT} \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

Al ser los voltajes de umbral más grandes que los voltajes de pico de ruido \Rightarrow eliminación de las transiciones falsas de salida.

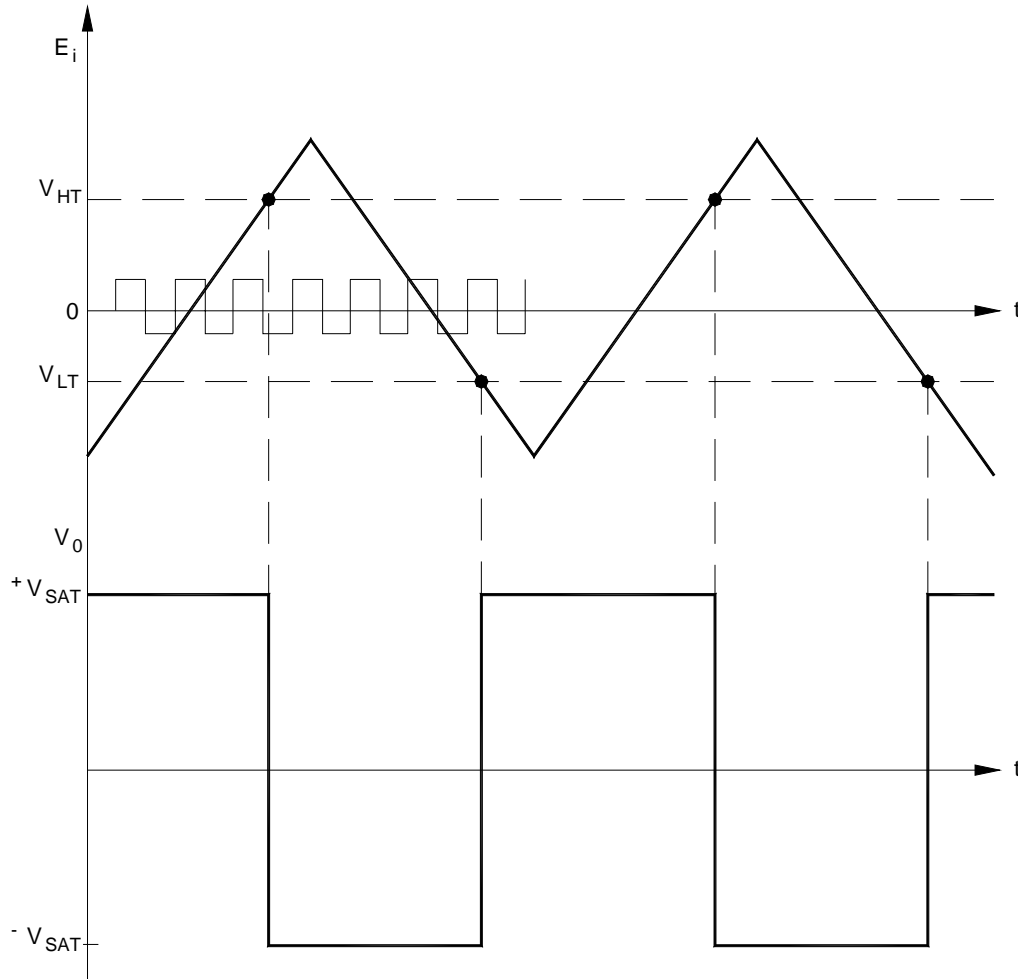


Figura 21

El funcionamiento de un comparador, se puede representar de forma gráfica mediante el *ciclo de histéresis*.

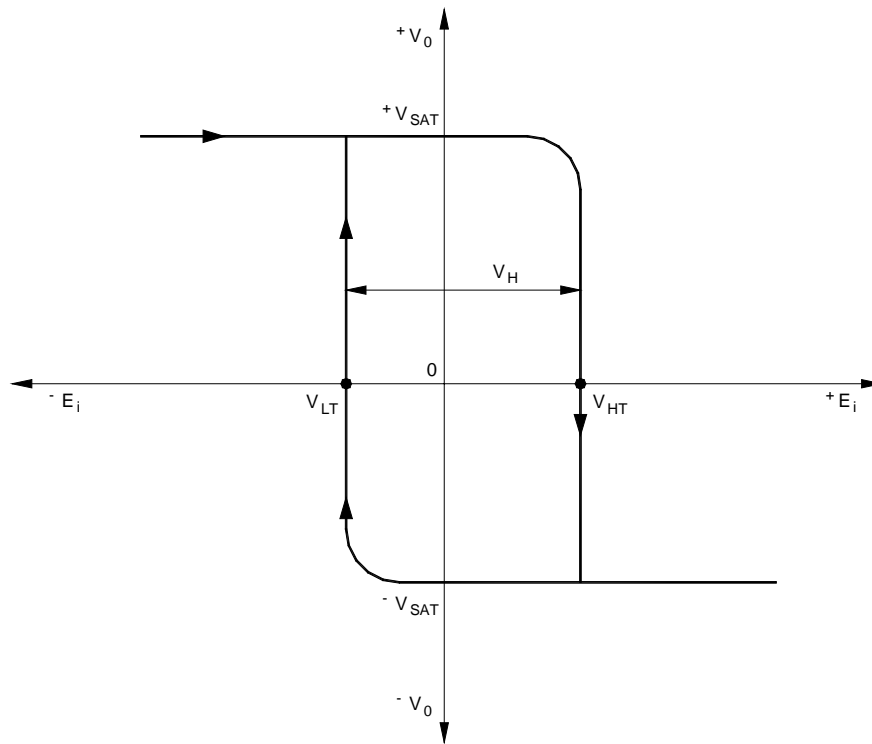


Figura 22: Ciclo de Histéresis

Observando la gráfica:

- $V_O = +V_{SAT} \Leftrightarrow E_i > V_{HT}$ para que $V_O = -V_{SAT}$.
- $V_O = -V_{SAT} \Leftrightarrow E_i < V_{LT}$ para que $V_O = +V_{SAT}$.

El voltaje de histéresis (V_H) viene definido como:

$$V_H = V_{HT} - V_{LT}$$

V_H : ruido pico a pico que puede soportar el circuito.

5.5. RECTIFICADORES DE PRECISIÓN DE MEDIA ONDA Y ONDA COMPLETA

5.5.1. MEDIA ONDA

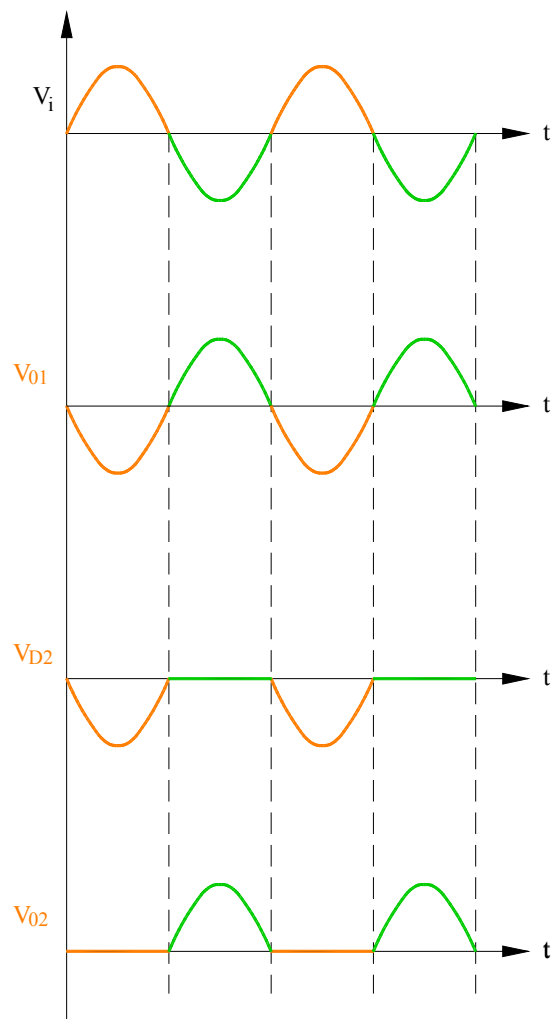
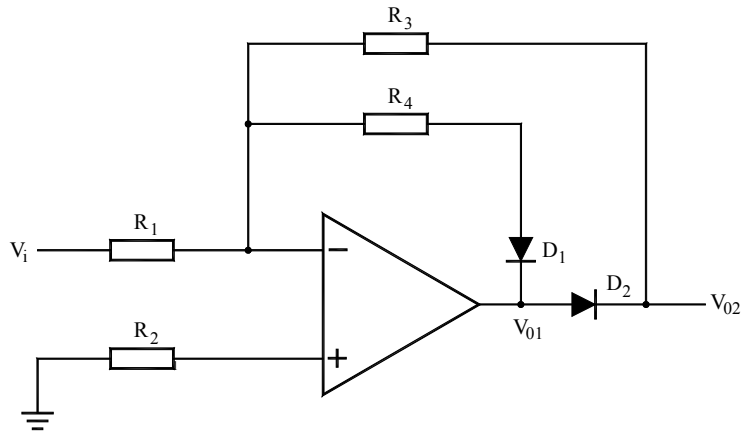


Figura 23

5.5.2. ONDA COMPLETA

- Rectificador de media onda, a la que se le añade un sumador.
- Para aumentar la tensión continua de salida \Leftrightarrow aumentar ganancia.

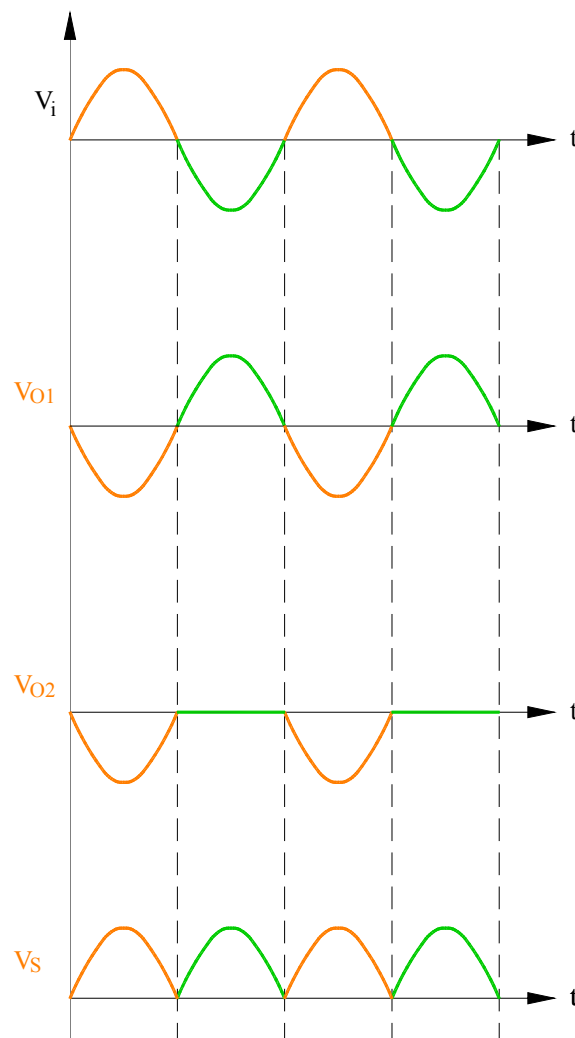
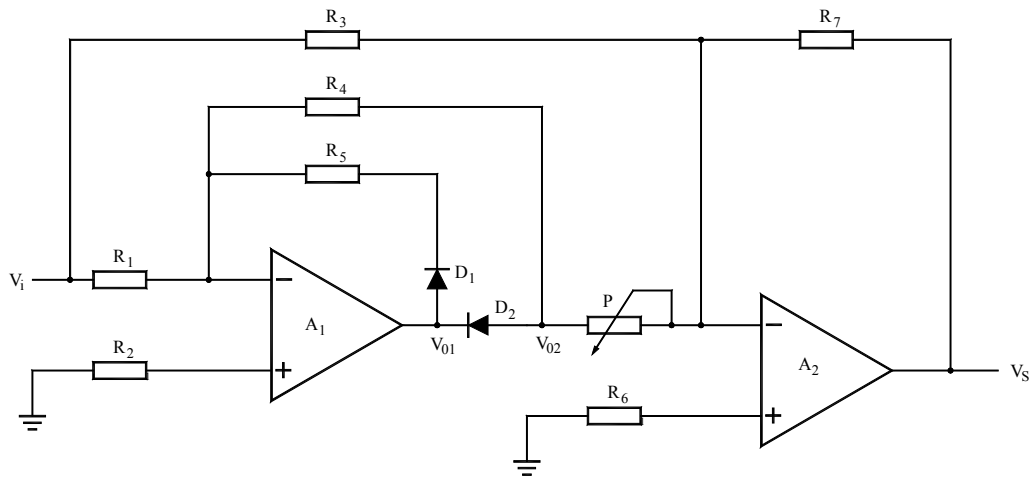


Figura 24

5.6. CONVERTIDORES

5.6.1. CORRIENTE A VOLTAJE

- $A_1 \Rightarrow$ etapa convertora.
- $A_2 \Rightarrow$ produce cambio de signo y ganancia adicional.

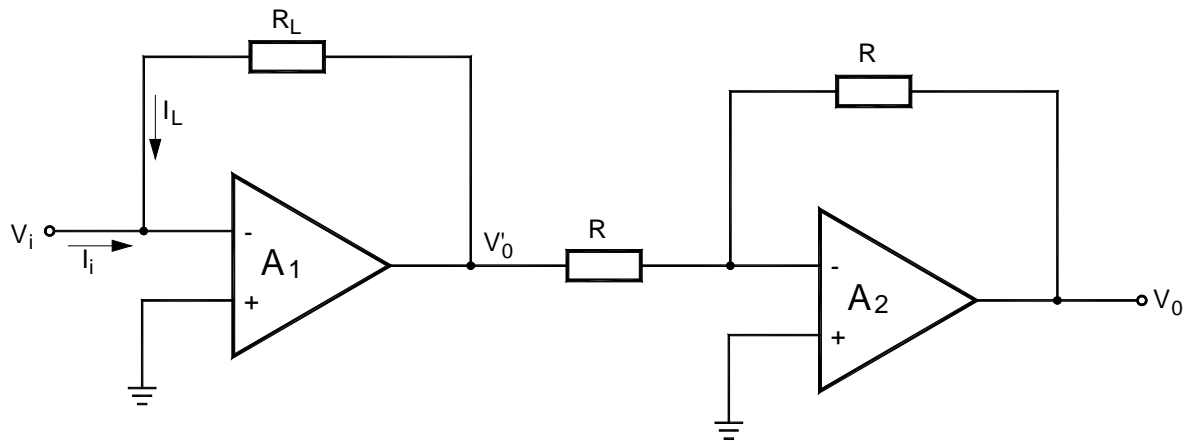


Figura 25

$$V_O = (-R_L \cdot I_i) \frac{-R}{R} = R_L \cdot I_i$$

R_L : constante de traducción.

5.6.2. VOLTAJE A CORRIENTE

Utiliza realimentación negativa y positiva.

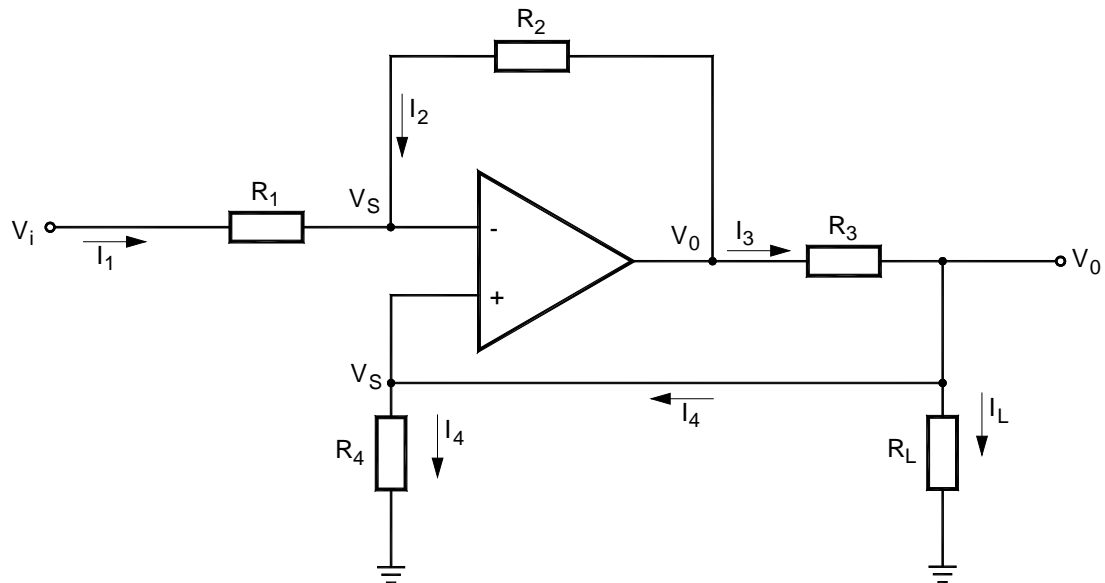


Figura 26

$$I_1 = \frac{V_i - V_s}{R_1}$$

$$I_3 = \frac{V_o - V_s}{R_3}$$

$$I_2 = \frac{V_o - V_s}{R_2}$$

$$I_4 = \frac{V_s}{R_4}$$

Teniendo en cuenta que:

$$I_L = I_3 - I_4 = \frac{V_o - V_s}{R_3} - \frac{V_s}{R_4} \quad (\text{ecuación 1})$$

$$I_1 = -I_2$$

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

$$V_s - V_o = \frac{R_2}{R_1} (V_i - V_s)$$

Multiplicando por (-1):

$$V_o - V_s = \frac{R_2}{R_1}(V_s - V_i)$$

Sustituyendo en la ecuación 1:

$$I_L = \frac{(V_s - V_i)R_2}{R_1 R_3} - \frac{V_s}{R_4} = V_s \left(\frac{R_2}{R_1 R_3} - \frac{1}{R_4} \right) - \frac{V_i R_2}{R_1 R_3}$$

Haciendo:

$$R_1 = R_2$$

$$R_3 = R_4$$

$$I_L = V_s \left(\frac{R_2}{R_4 R_2} - \frac{1}{R_4} \right) - \frac{V_i R_2}{R_2 R_4}$$

$$\boxed{I_L = -V_i \frac{1}{R_4}}$$

$$\frac{1}{R_4} = \text{cte de conversión}$$

5.6.3. ANALÓGICO/DIGITAL

- Transforman la señal analógica, en una señal digital de amplitud constante y discontinua en el tiempo.

Diagrama de bloques:

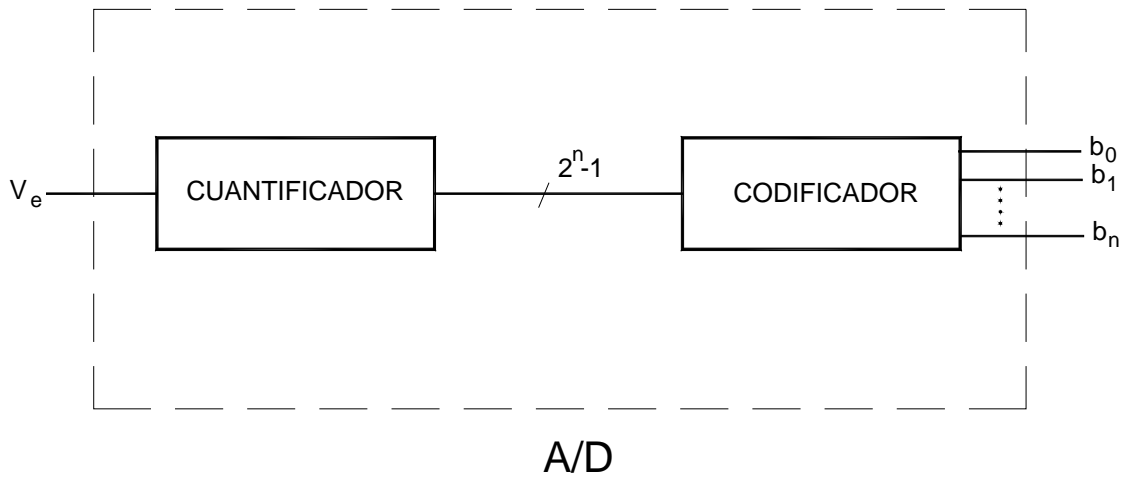


Figura 27

🚦 CUANTIFICADOR:

- Transforma la señal de entrada analógica, en escalones cuantificados.
- Cada escalón viene definido:

$$V_{escalon} = \frac{V_{e\max} - V_{e\min}}{2^n}$$

V_e = señal de entrada analógica.
 n = número de bits.

🚦 CODIFICADOR:

- Necesita señales de entrada cuantificadas (en escalones).
- Sus salidas son las del convertidor A/D \Rightarrow binarias.

Diseño de un A/D de 3 bits, que digitalice una señal de entrada analógica de 0 a 4 vóltios.

Valor del bit menos significativo (LSB) o de cada escalón:

$$LSB = \frac{4-0}{2^3} = 0,5 \text{ vóltios}$$

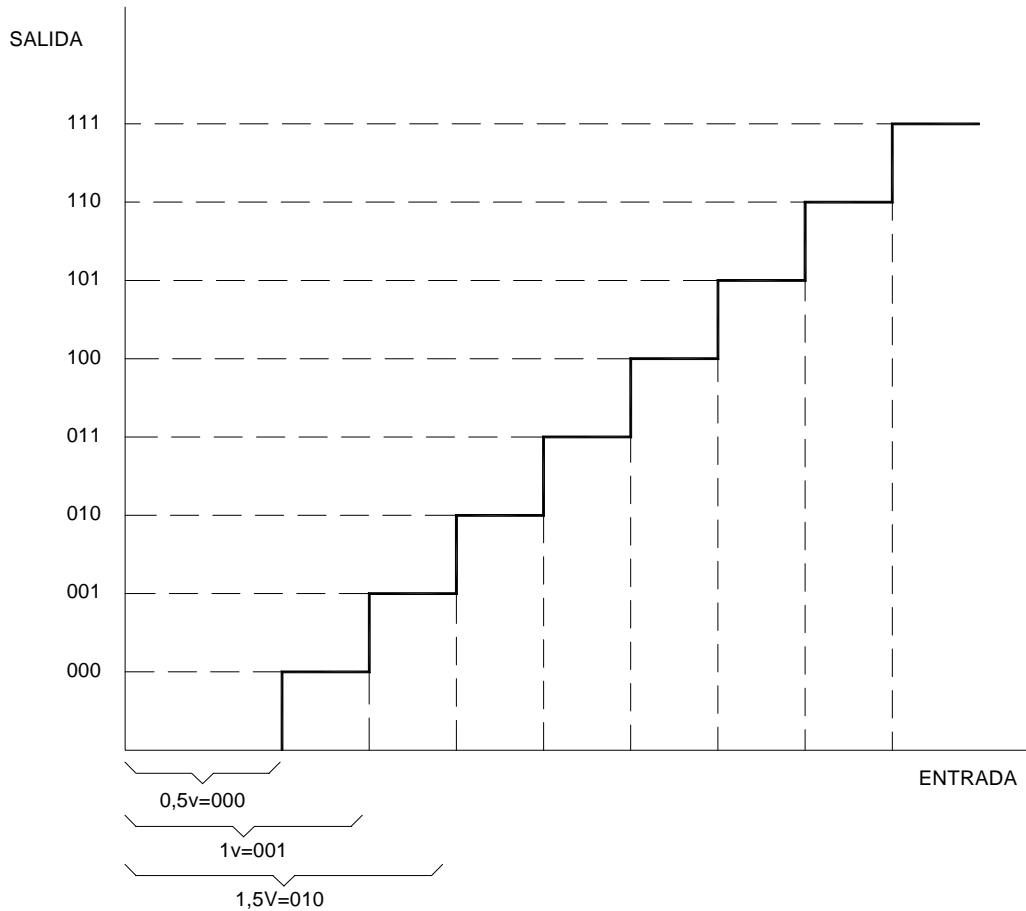


Figura 28

Márgenes de tensión, para cada combinación binaria:

000:	$0 < V_e < 0,5$
001:	$0,5 < V_e < 1$
010:	$1 < V_e < 1,5$
011:	$1,5 < V_e < 2$
100:	$2 < V_e < 2,5$
101:	$2,5 < V_e < 3$
110:	$3 < V_e < 3,5$
111:	$3,5 < V_e < 4$

Quedando el diseño del convertidor A/D siguiente:

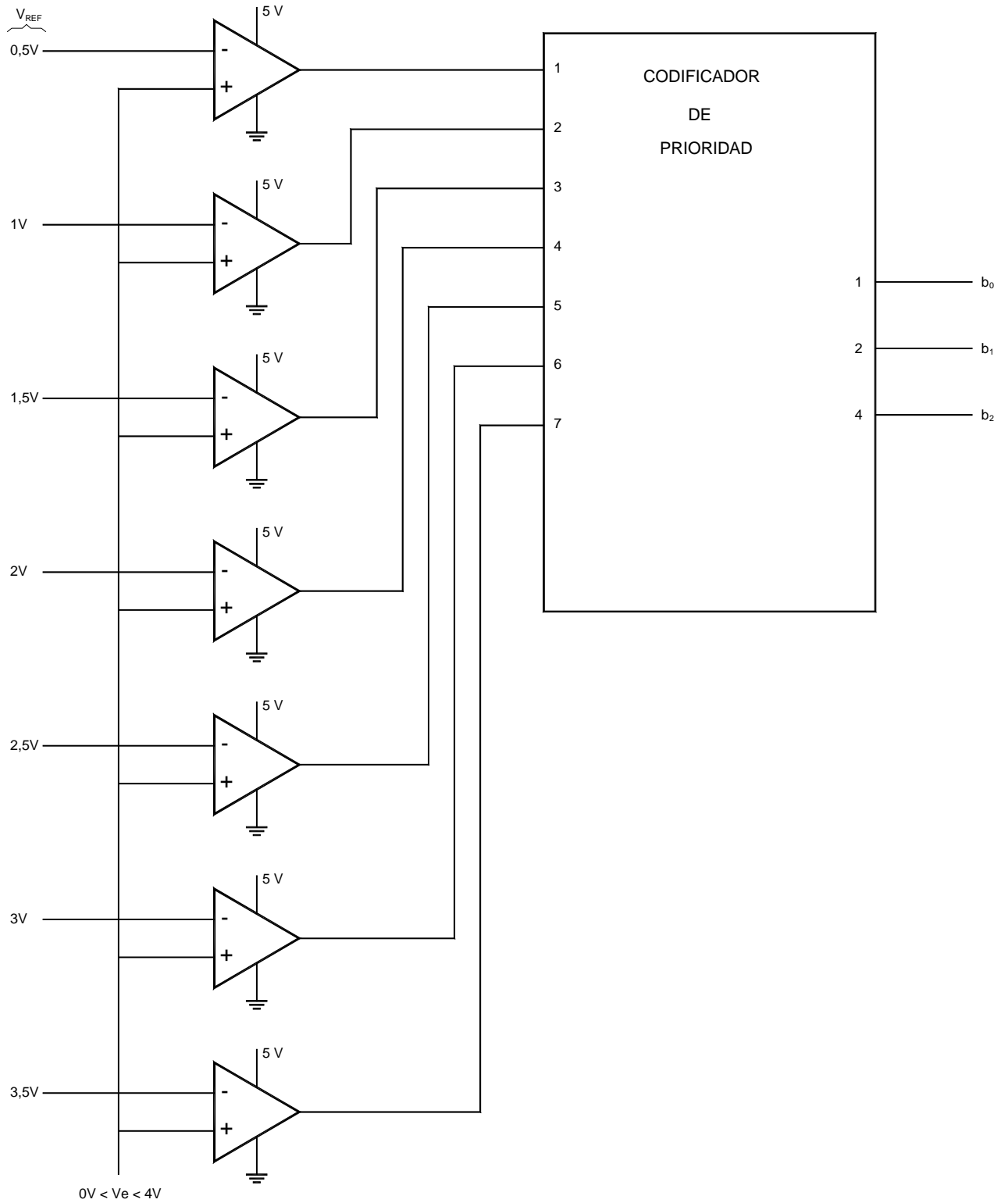


Figura 29

5.6.4 DIGITAL/ANALÓGICO

- Muy utilizados en el proceso y tratamiento de señales digitales.
- Reciben una palabra digital de “n” bits y la transforman en una señal analógica.
- La entrada digital viene representada en binario o cualquier código BCD.
- 2^n combinaciones de entrada $\Rightarrow 2^n$ niveles discretos en la salida.
- Ecuación que define un D/A de cualquier tamaño:

$$V_o = \frac{1}{2^n - 1} (V_1 + 2V_2 + 4V_3 + \dots + 2^{n-1}V_{n-1})$$

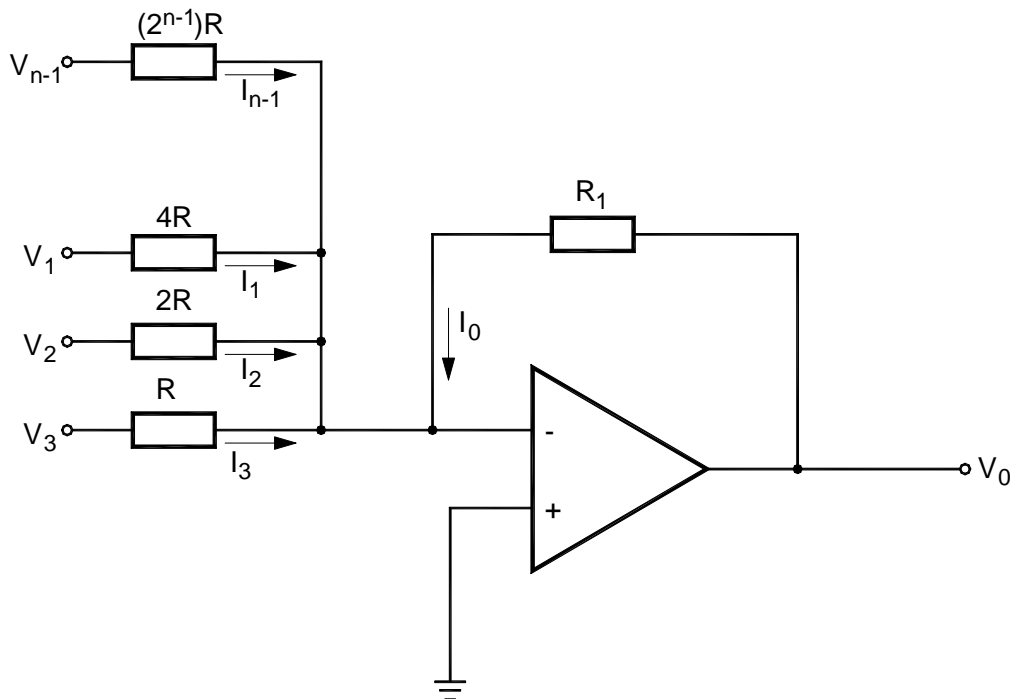


Figura 30

Diseño de un D/A de 3 bits con entradas TTL

- Los valores de las resistencias pueden ser:
 - $R = 10 \text{ K}\Omega$ (normalizado).
 - $2R = 20 \text{ K}\Omega$ (no normalizado).
 - $4R = 40 \text{ K}\Omega$ (no normalizado).

Los valores “no normalizados”: resistencias variables.

- Ecuación del convertidor de 3 bits:

$$V_o = \frac{1}{7}(4V_3 + 2V_2 + V_1)$$

- Al ser lógica TTL:
 - Nivel ALTO “1”: 5V.
 - Nivel BAJO “0”: 0V (masa).

<i>Nº binario</i>	<i>Operaciones</i>	<i>V_o</i>
000:	$1/7 (4 \cdot 0 + 2 \cdot 0 + 1 \cdot 0)$	0 : 0V.
001	$1/7 (4 \cdot 0 + 2 \cdot 0 + 1 \cdot 5)$	5/7: 0,71V.
010	$1/7 (4 \cdot 0 + 2 \cdot 1 + 1 \cdot 0)$	2/7: 1,43V
011	$1/7 (4 \cdot 0 + 2 \cdot 1 + 1 \cdot 1)$	3/7: 2,14V.
100	$1/7 (4 \cdot 1 + 2 \cdot 0 + 1 \cdot 0)$	4/7: 2,86V.
101	$1/7 (4 \cdot 1 + 2 \cdot 0 + 1 \cdot 1)$	5/7: 3,57V.
110	$1/7 (4 \cdot 1 + 2 \cdot 1 + 1 \cdot 0)$	6/7: 4,28V.
111	$1/7 (4 \cdot 1 + 2 \cdot 1 + 1 \cdot 1)$	7/7: 5V.