

Tema 6. Circuitos electrónicos básicos

6.1. El amplificador operacional: Aplicaciones

- Configuración inversora
- Configuración no inversora
- Sumador
- Derivador
- Integrador
- Comparador

6.2. Conversion Digital Analógica Analógica Digital

Conversión D/A (Digital/Analógica)

Conversor en escalera R-2R

Conversión A/D(Analógico/Digital)

Proceso de conversión

Teorema de Shannon

Convertidores A/D

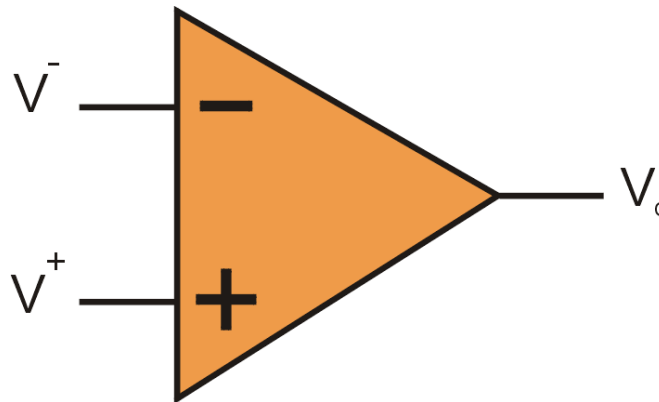
Convertidores en lazo abierto

Convertidores realimentados

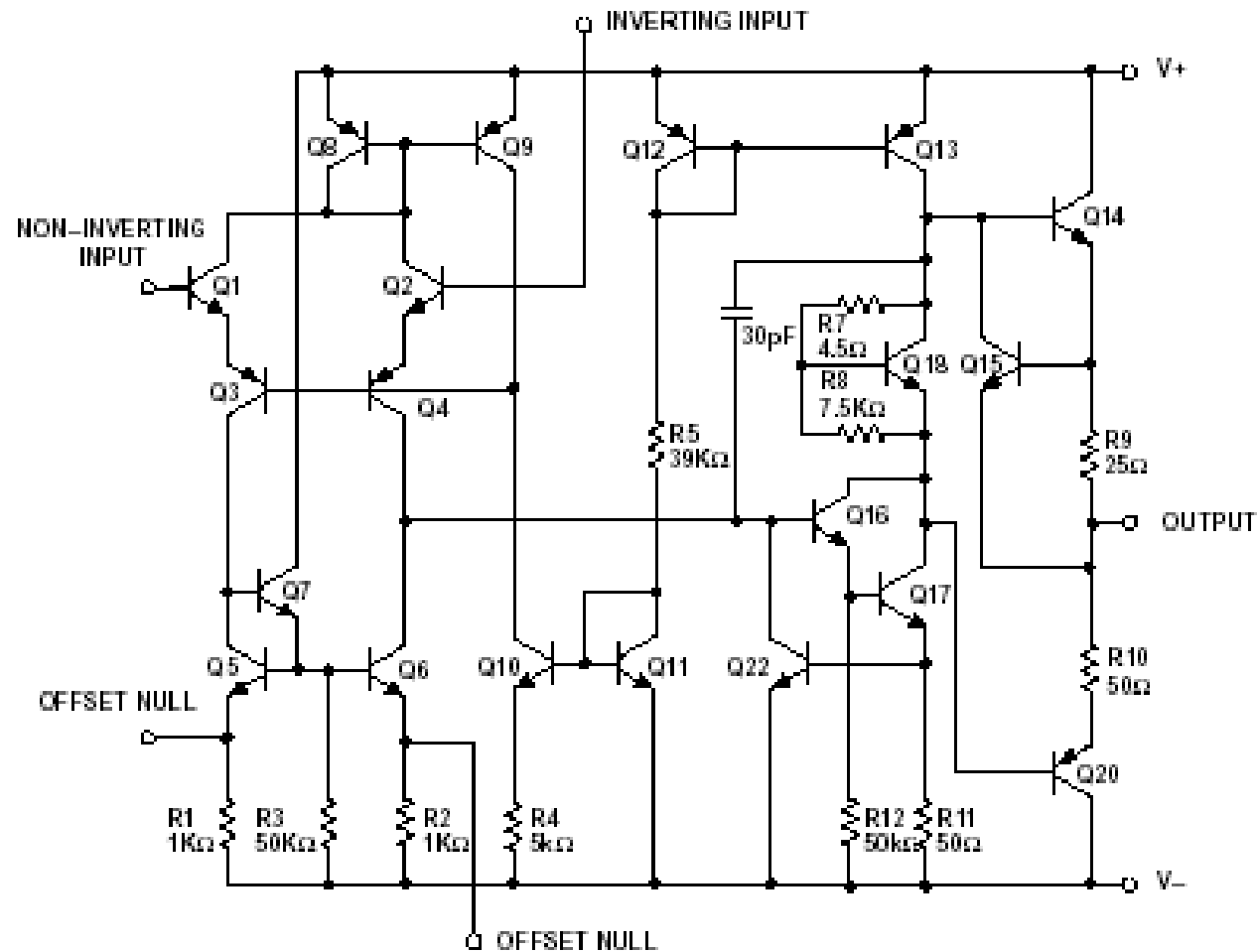
6.1. El amplificador operacional.

El Amplificador Operacional (AOP) es un amplificador de gran ganancia, utilizado para realizar operaciones lineales y no lineales sin más que cambiar los elementos externos tales como resistencias, condensadores, diodos, etc.

Circuito integrado básico:



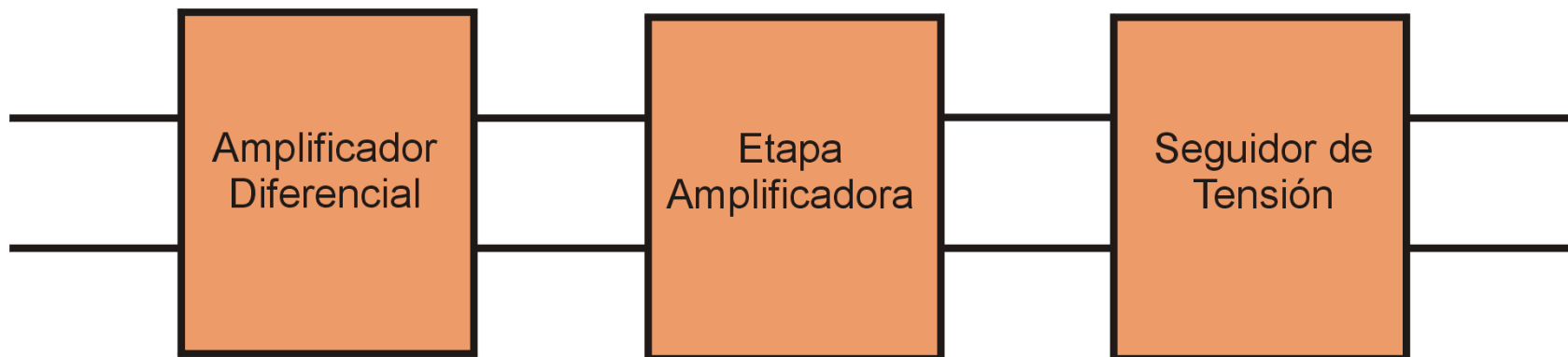
Esquema del Amplificador Operacional 741



Etapas del amplificador operacional

El AOP está constituido básicamente por tres etapas:

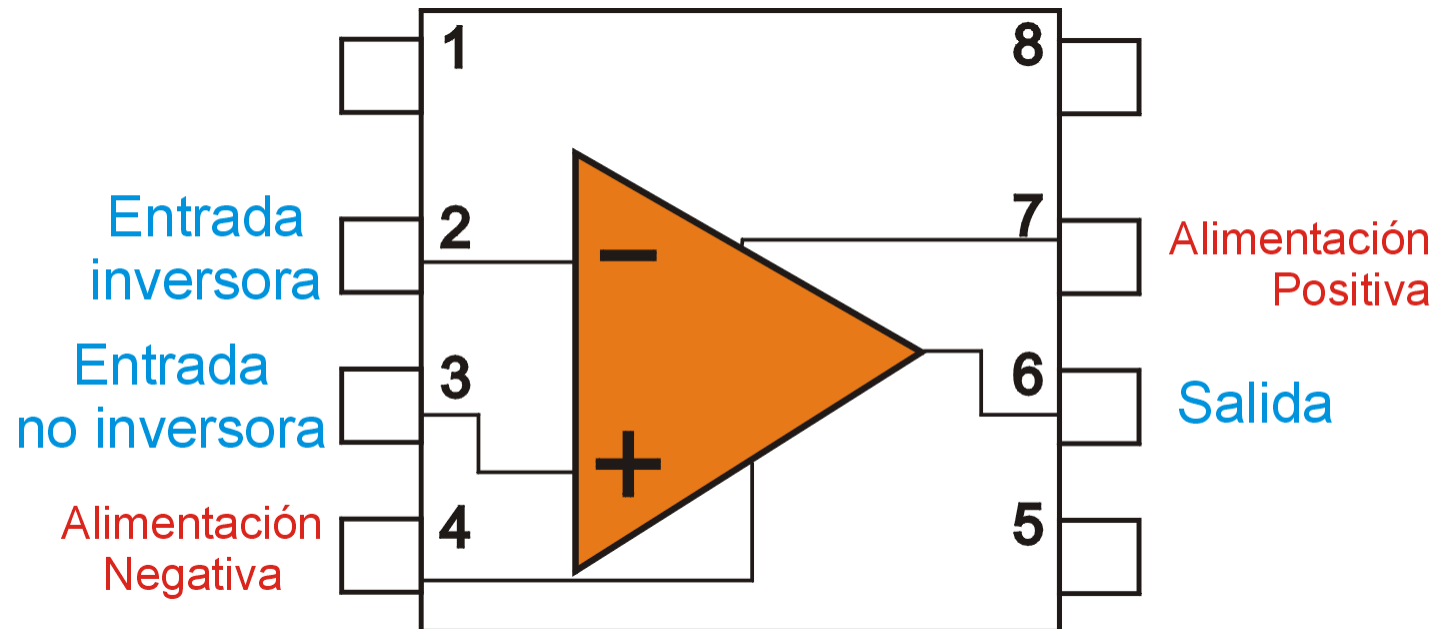
- Etapa de entrada
- Etapa amplificadora
- Etapa en seguidor de tensión



Chip

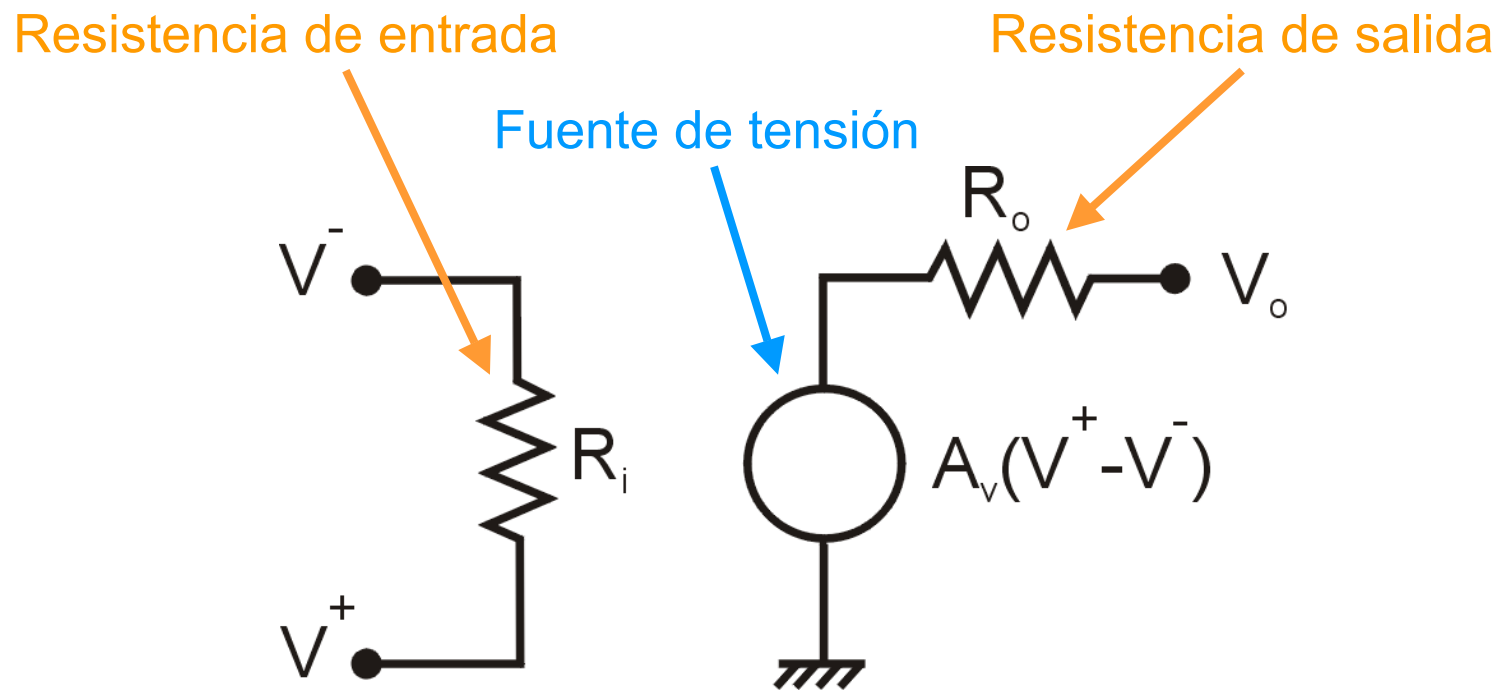
El operacional está compuesto por muchos transistores

Trabajaremos con un chip, por ejemplo el $\mu A741$

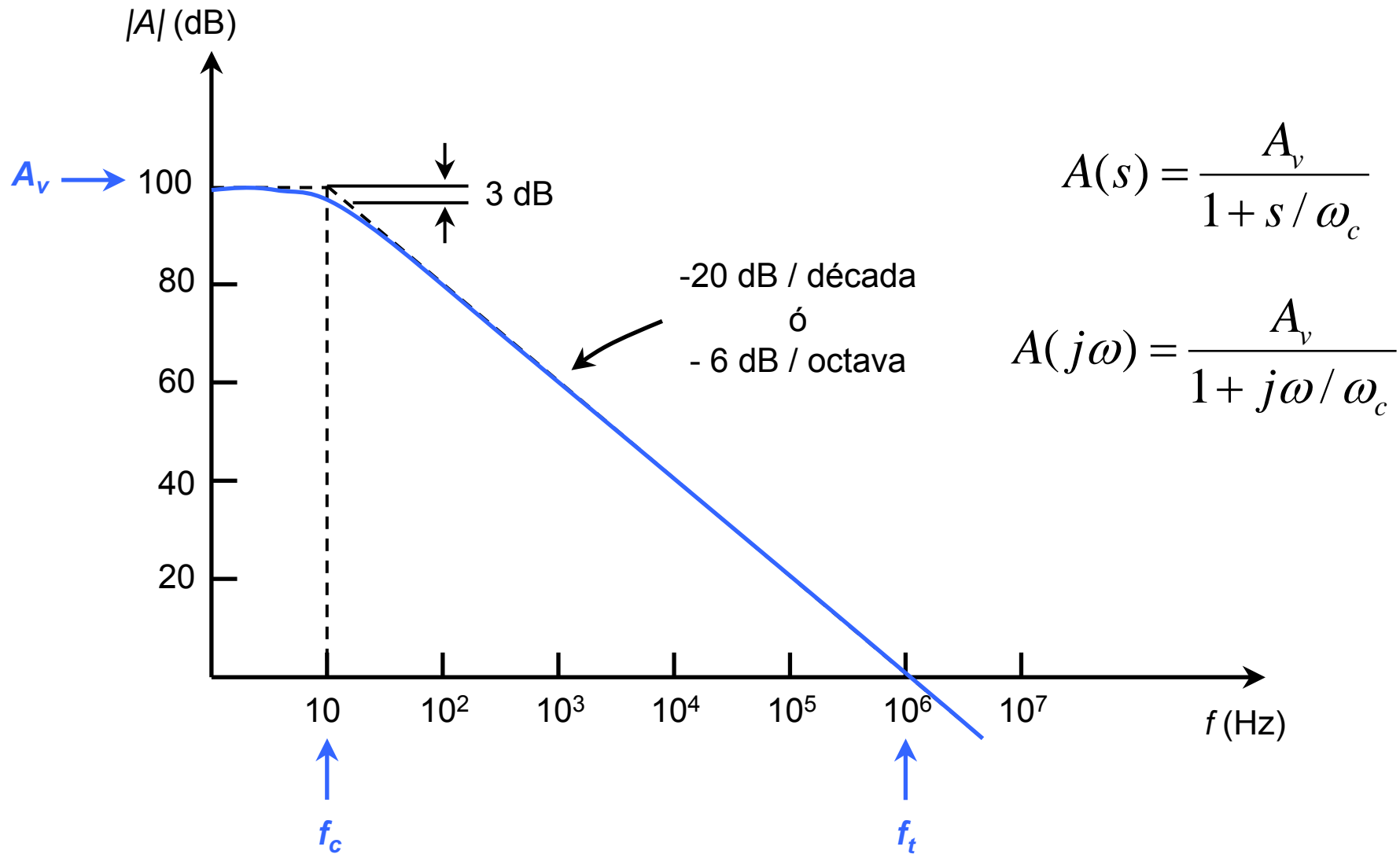


Modelo lineal del amplificador operacional

Cuando el comportamiento del AOP es lineal, se puede sustituir por el siguiente modelo lineal:

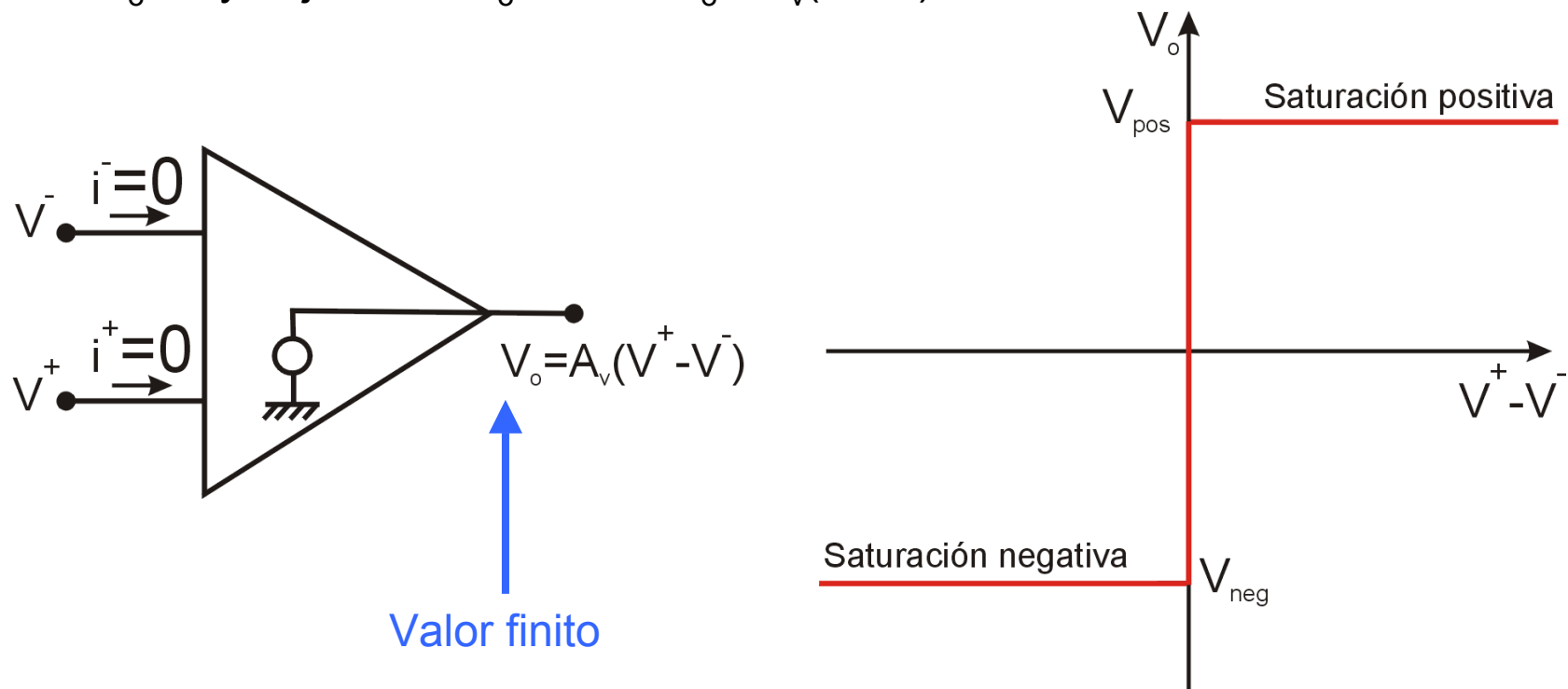


Respuesta en frecuencia de un AOP típico a circuito abierto



Aproximación ideal del amplificador operacional

- Los límites de saturación son los voltajes de alimentación (V_{pos} y V_{neg})
- A_v muy alta $\Rightarrow A_v \rightarrow \infty$
- R_i muy alta $\Rightarrow R_i \rightarrow \infty \quad V^+ = V^-$
- R_o muy baja $\Rightarrow R_o \rightarrow 0 \quad V_o = A_v(V^+ - V^-)$

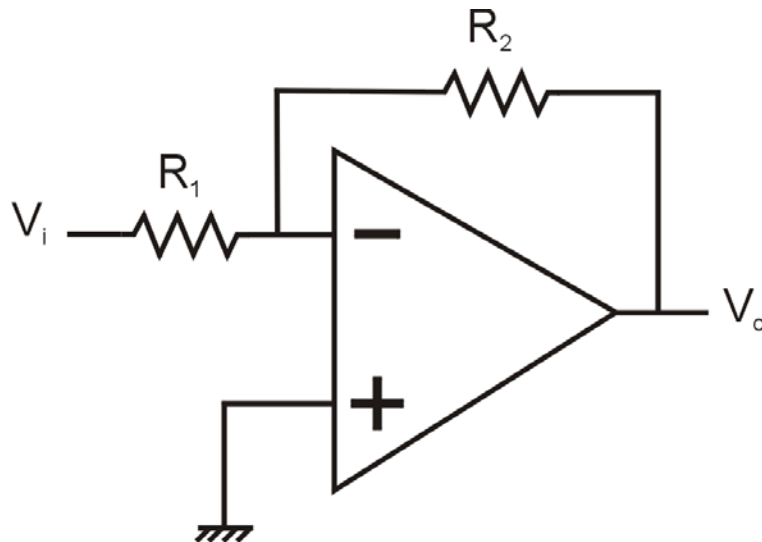


Realimentación

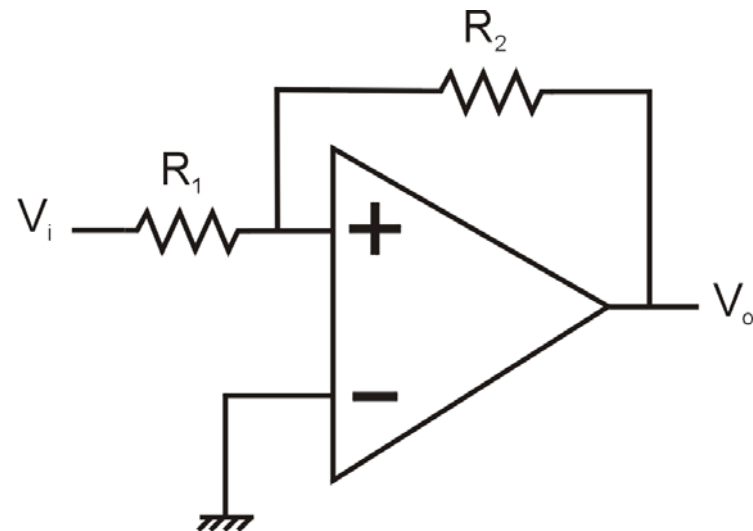
Se establece una conexión entre la entrada y la salida.

Hay dos tipos de realimentación:

Negativa



Positiva



Realimentación positiva:

$$V^- > V^+ \Rightarrow (V^+ - V^-) < 0 \Rightarrow V_o \downarrow \Rightarrow V^+ \downarrow \Rightarrow (V^+ - V^-) \downarrow \Rightarrow V_o \downarrow \quad V_o \text{ se limita a } -V_{cc}$$

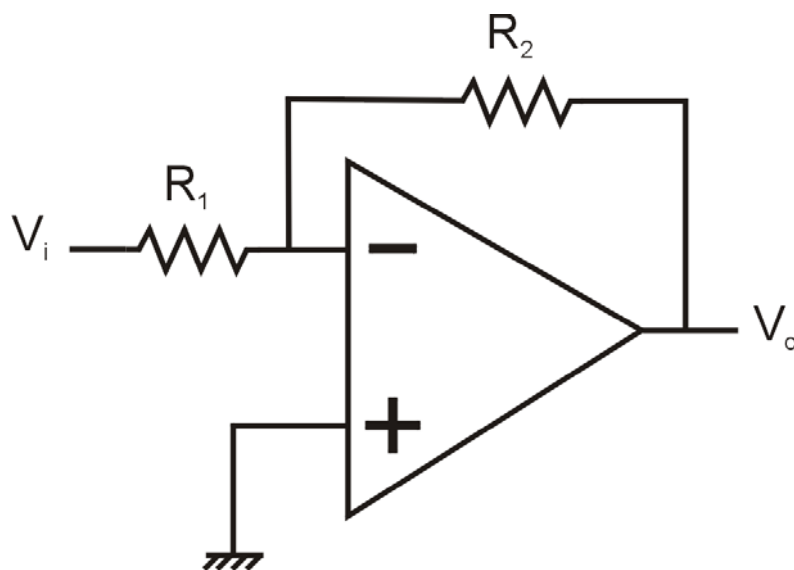
$$V^- < V^+ \Rightarrow (V^+ - V^-) > 0 \Rightarrow V_o \uparrow \Rightarrow V^+ \uparrow \Rightarrow (V^+ - V^-) \uparrow \Rightarrow V_o \uparrow \quad V_o \text{ se limita a } +V_{cc}$$

Realimentación negativa:

$$V^- > V^+ \Rightarrow (V^+ - V^-) < 0 \Rightarrow V_o \downarrow \Rightarrow V^- \downarrow \Rightarrow (V^+ - V^-) \uparrow \Rightarrow V_o \uparrow \quad \text{equilibrio } V^- = V^+$$

$$V^- < V^+ \Rightarrow (V^+ - V^-) > 0 \Rightarrow V_o \uparrow \Rightarrow V^- \uparrow \Rightarrow (V^+ - V^-) \downarrow \Rightarrow V_o \downarrow \quad \text{equilibrio } V^- = V^+$$

Configuración inversora

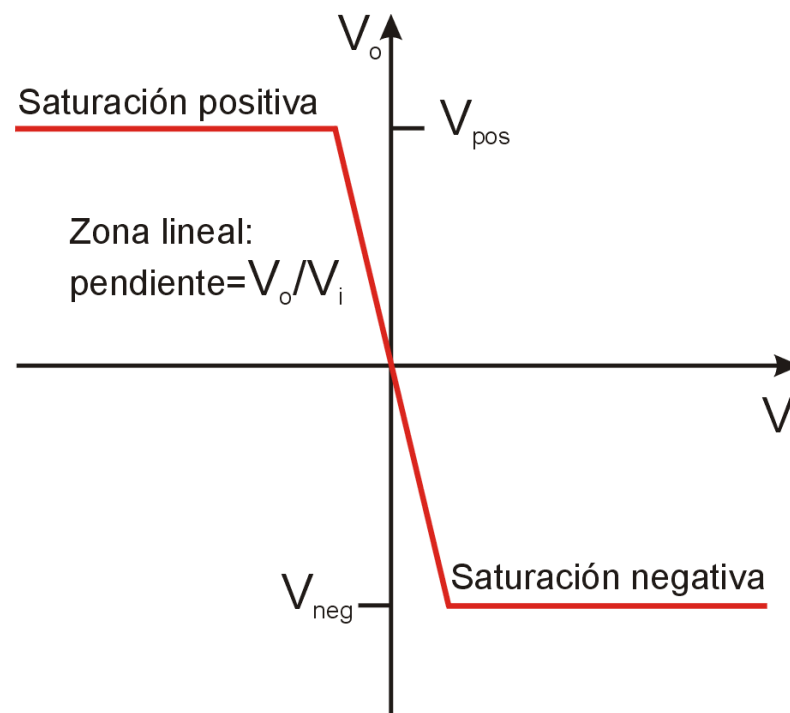


Función de transferencia:

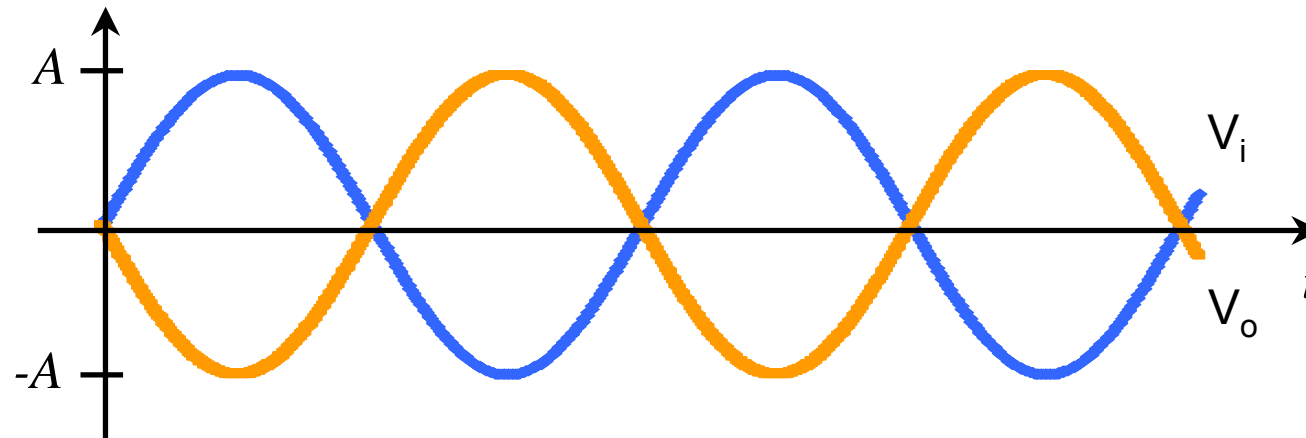
$$\frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_2}{R_1}$$

Leyes de Kirchhoff:
$$\frac{V_i - V^-}{R_1} = \frac{V^- - V_o}{R_2}$$

Condiciones ideales: $V^- = V^+ = 0$



Ejemplo 1:

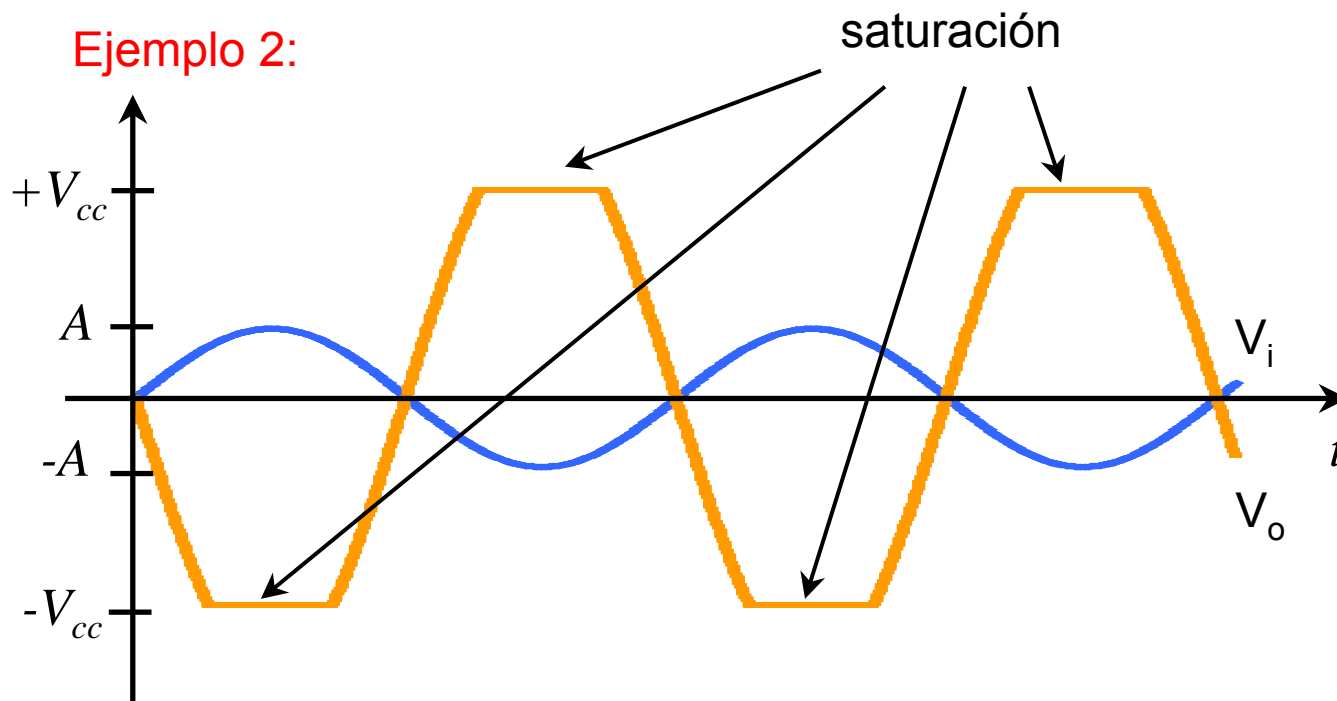


$$V_i = A \sin(\omega t)$$

$$A = 5$$

$$R_1 = R_2$$

Ejemplo 2:

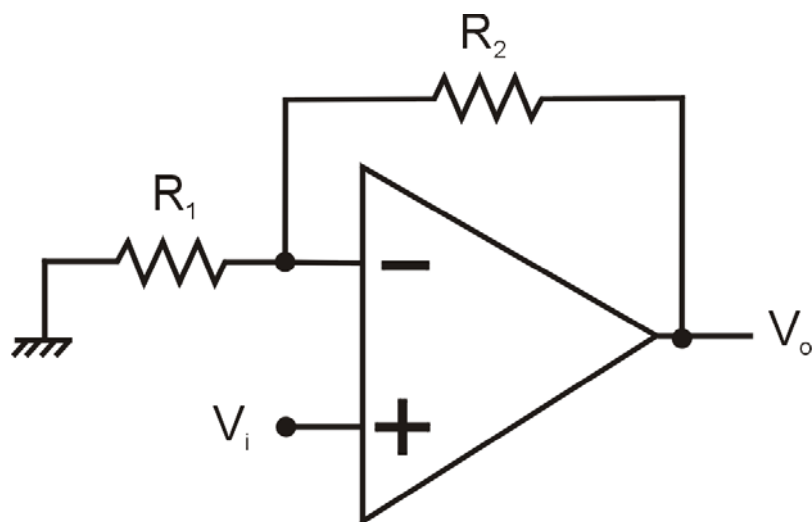


$$V_i = A \sin(\omega t)$$

$$A = 5$$

$$R_2 = 4R_1$$

Configuración no inversora

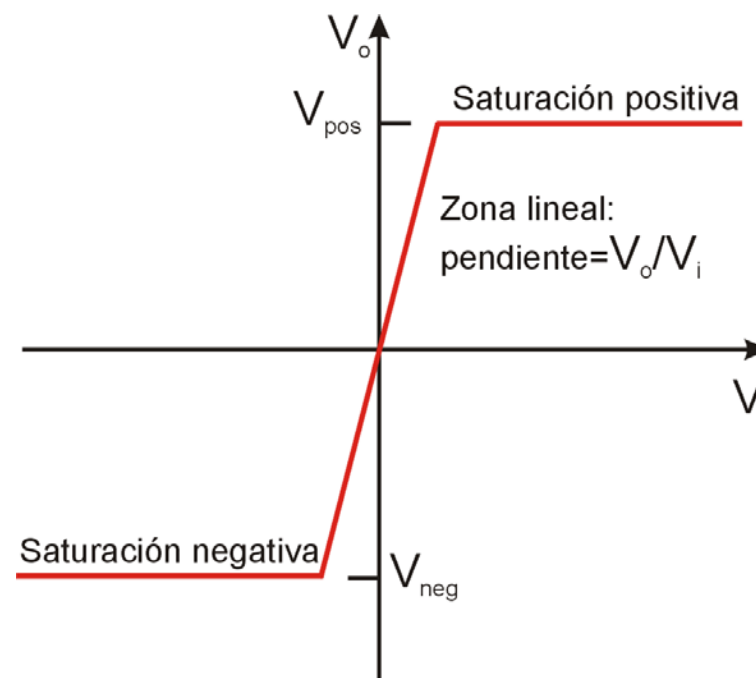


Función de transferencia:

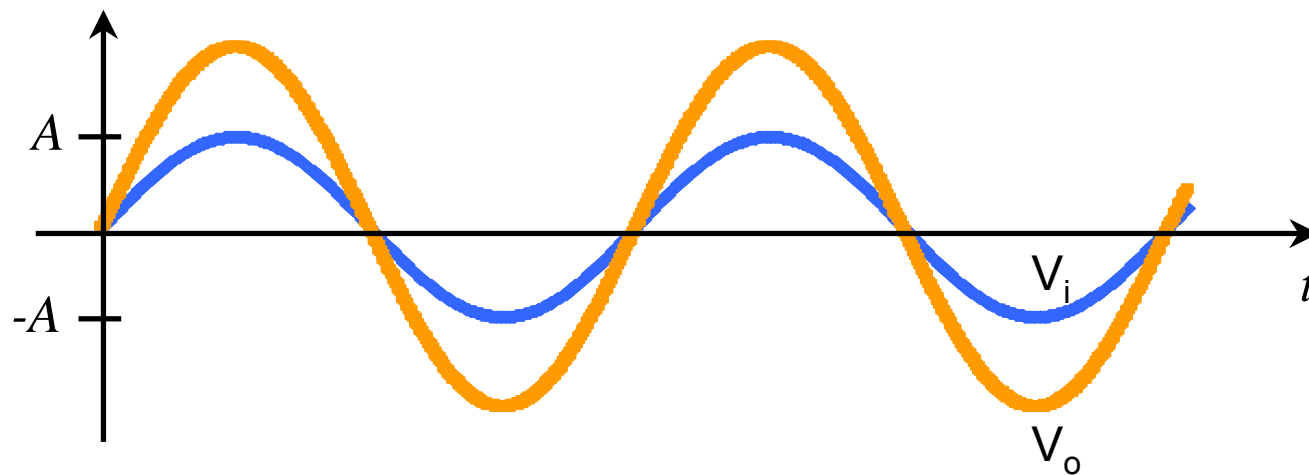
$$\frac{V_o}{V_i} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$

Leyes de Kirchoff: $\frac{0 - V^-}{R_1} = \frac{V^- - V_o}{R_2}$

Condiciones ideales: $V^- = V^+ = V_i$



Ejemplo 1:

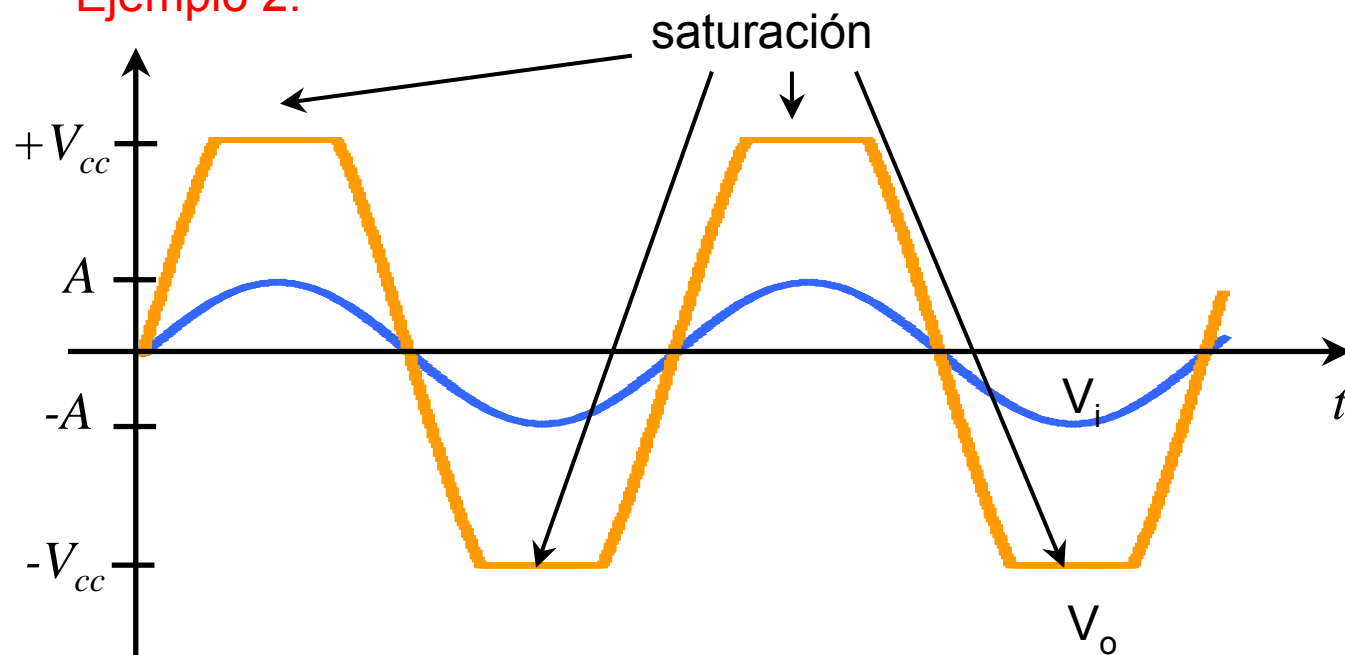


$$V_i = A \sin(\omega t)$$

$$A = 5$$

$$R_2 = R_1$$

Ejemplo 2:

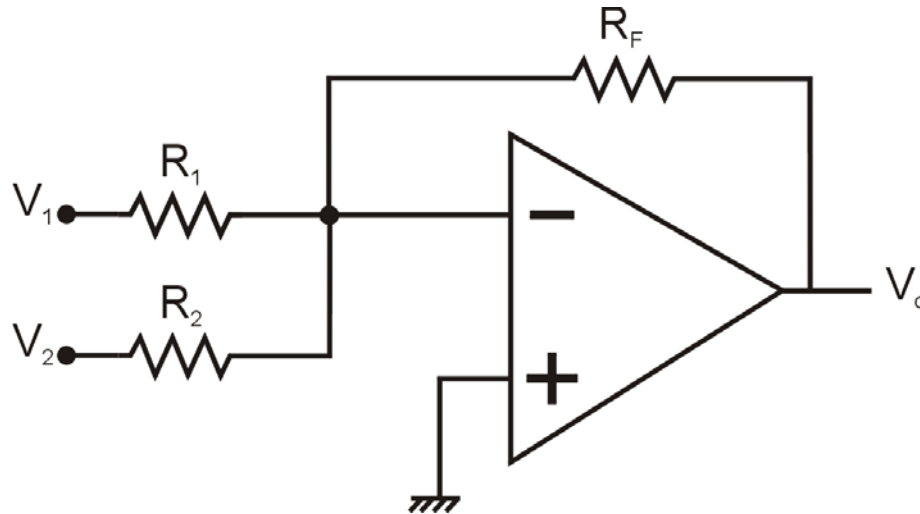


$$V_i = A \sin(\omega t)$$

$$A = 5$$

$$R_2 = 3R_1$$

Sumador inversor



Leyes de Kirchhoff:

$$\frac{V_1 - V^-}{R_1} + \frac{V_2 - V^-}{R_2} = \frac{V^- - V_o}{R_F}$$

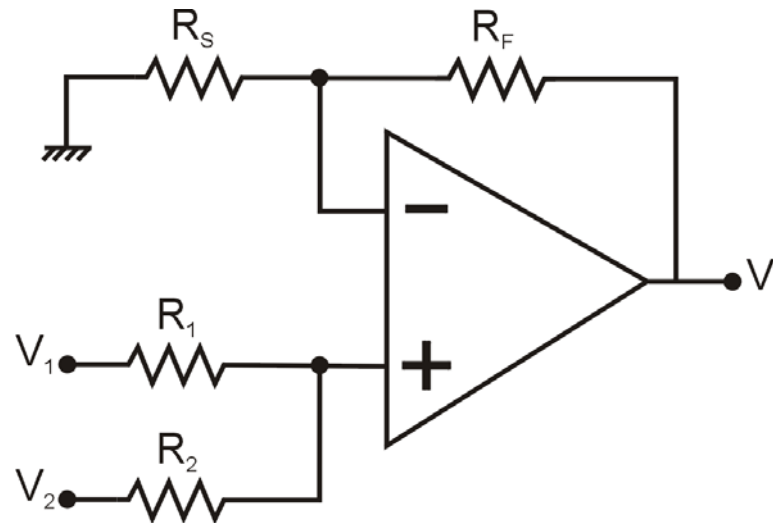
Condiciones ideales:

$$V^- = V^+ = 0$$

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

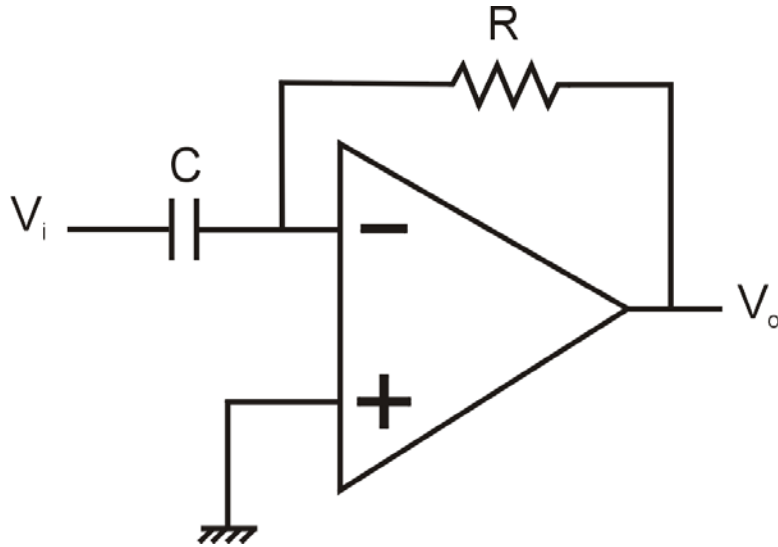
$$R_1 = R_2 = R_F \quad \Rightarrow \quad V_o = -(V_1 + V_2)$$

* Ejercicio: sumador no inversor



- Analizar este circuito
- Obtener su función de transferencia

Derivador



Condiciones ideales:

$$V^- = V^+ = 0$$

$$i_c(t) = C \frac{dV_i(t)}{dt}$$

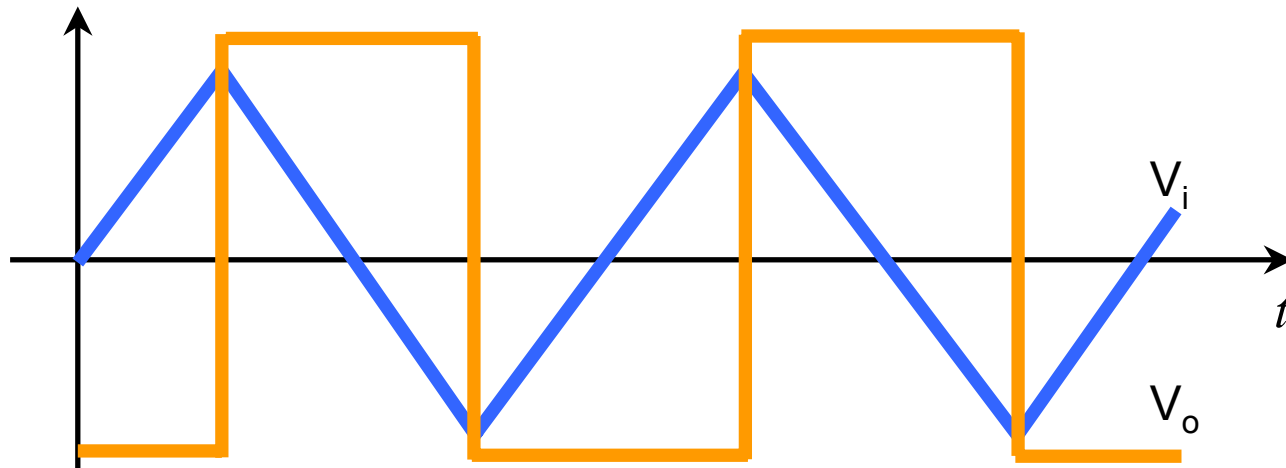
$$V_o(t) = -RC \frac{dV_i(t)}{dt}$$

La señal de salida es la derivada de la señal de entrada

$$V_o(s) = -RCsV_i(s)$$

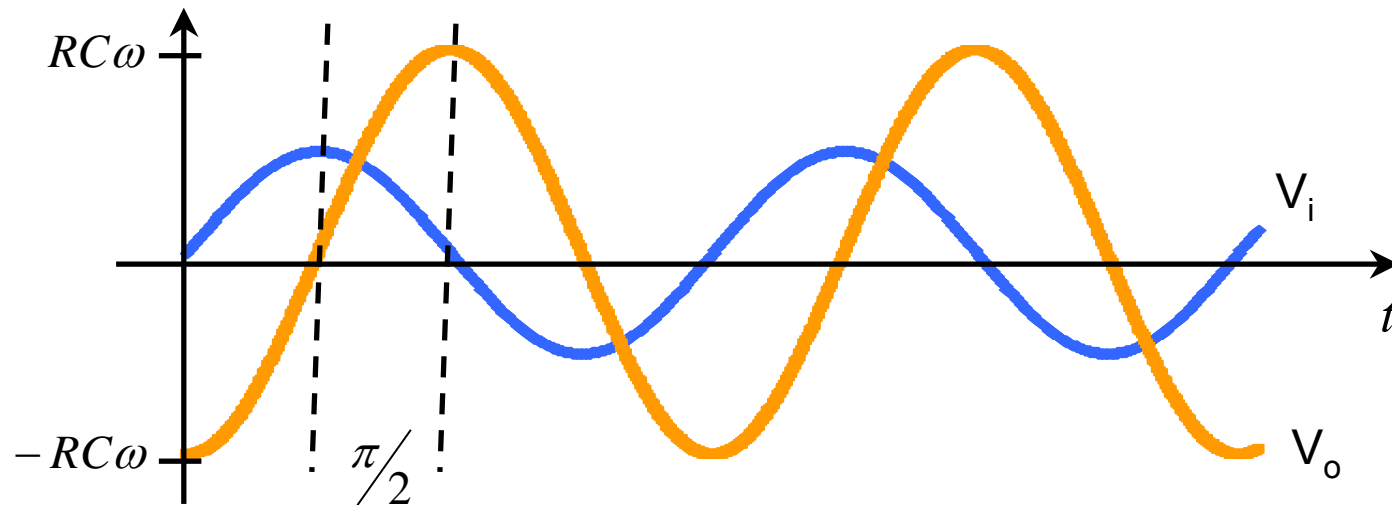
En el dominio de la frecuencia

Ejemplo 1:



V_i señal triangular

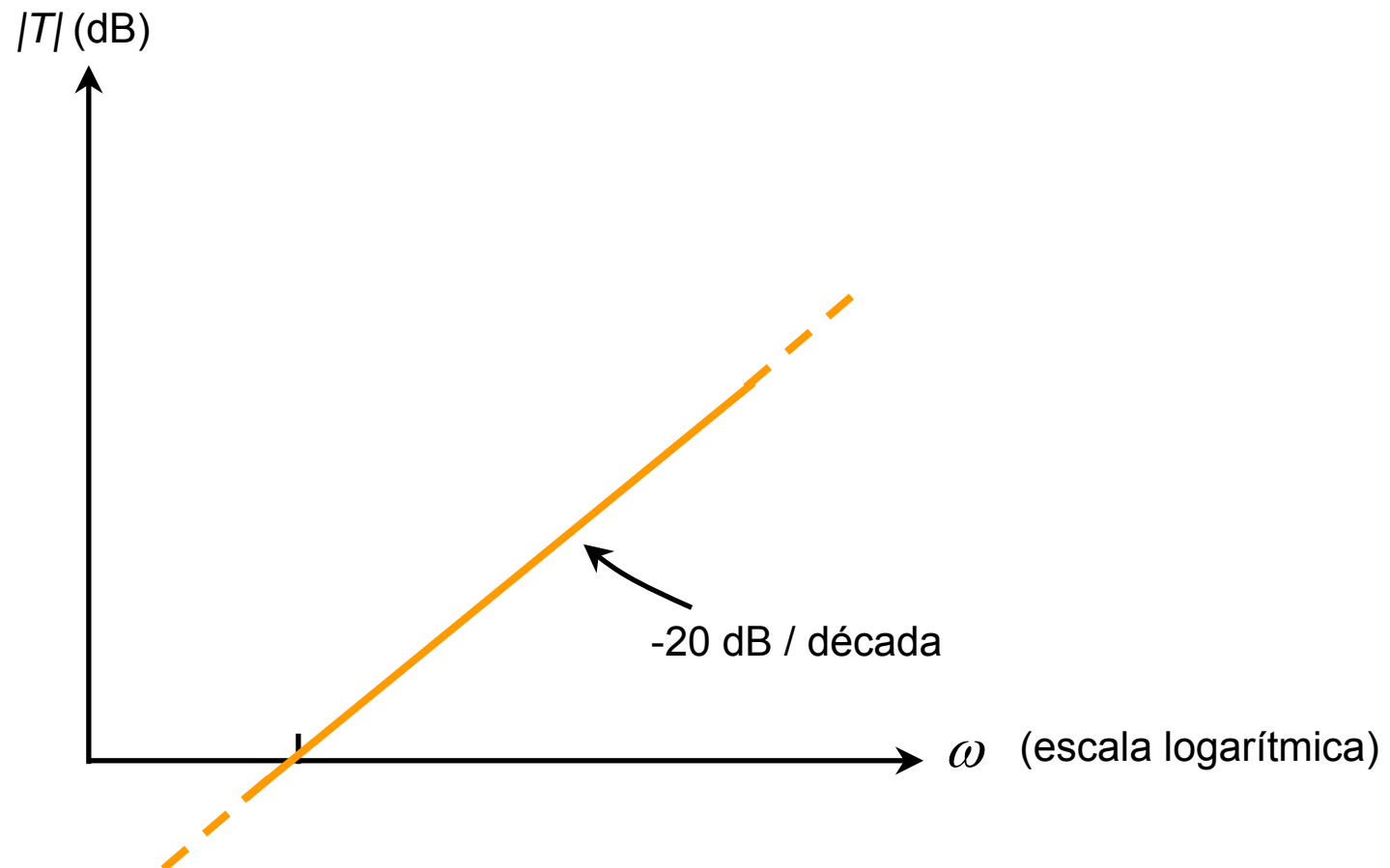
Ejemplo 2:



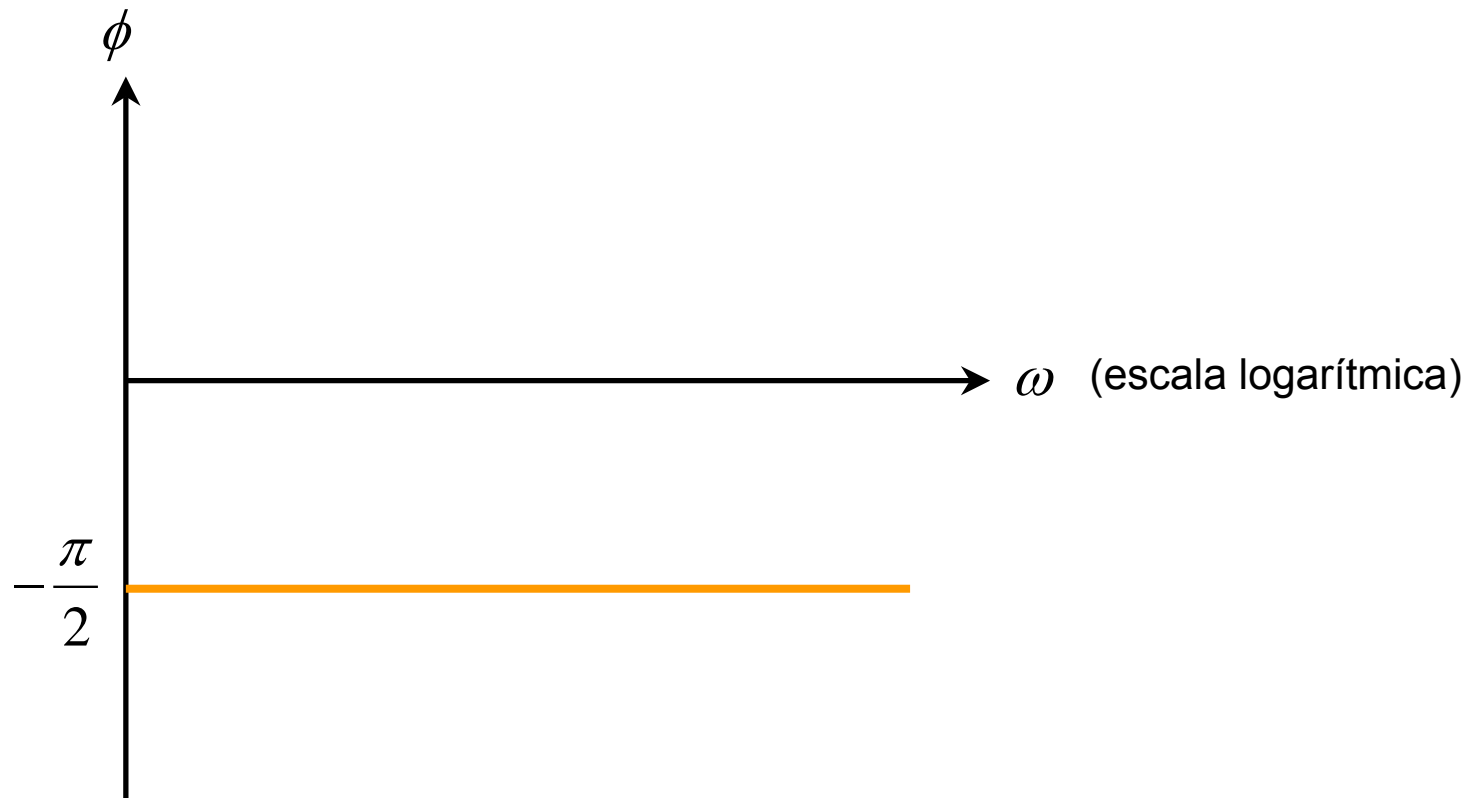
$$V_i = \sin \omega t$$

$$V_o = -RC\omega \cos \omega t$$

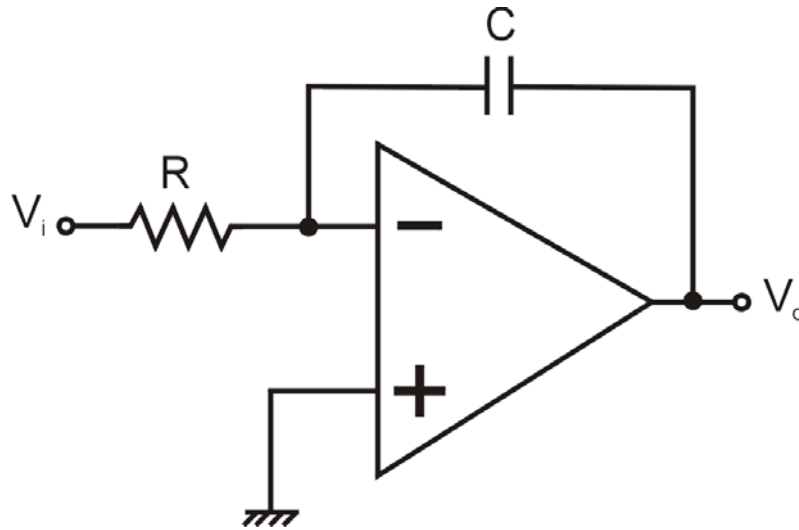
- **Amplitud:** $|T(j\omega)| = RC\omega$



- **Fase:** $\phi(\omega) = \operatorname{tg}^{-1}(\infty) = -\frac{\pi}{2}$



Integrador



Condiciones ideales:

$$V^- = V^+ = 0$$

$$V_i = -RC \frac{dV_o}{dt}$$

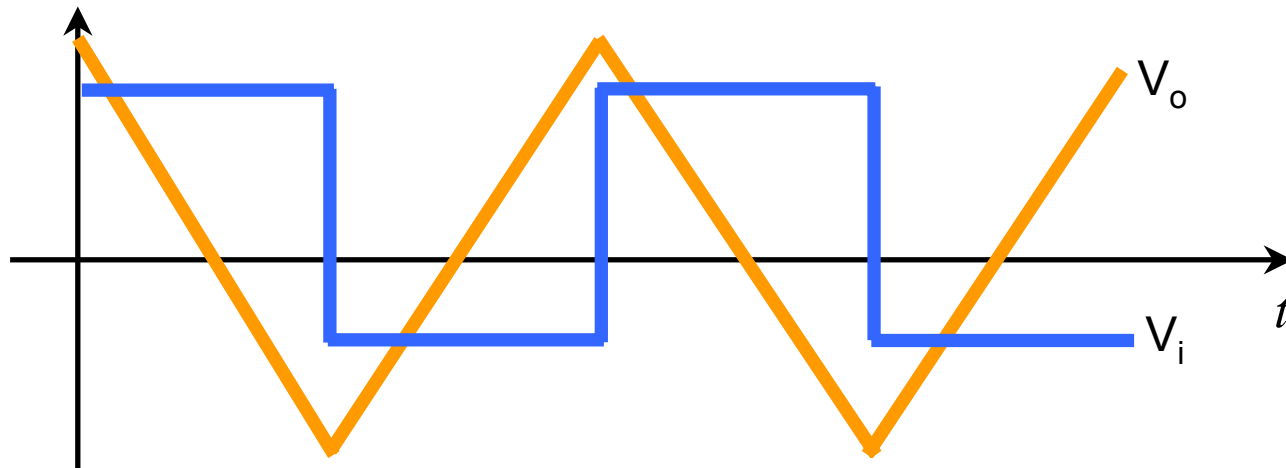
$$V_o = -\frac{1}{RC} \int V_i dt$$

La señal de salida es la integral de la señal de entrada

$$V_o(s) = -\frac{1}{RCs} V_i(s)$$

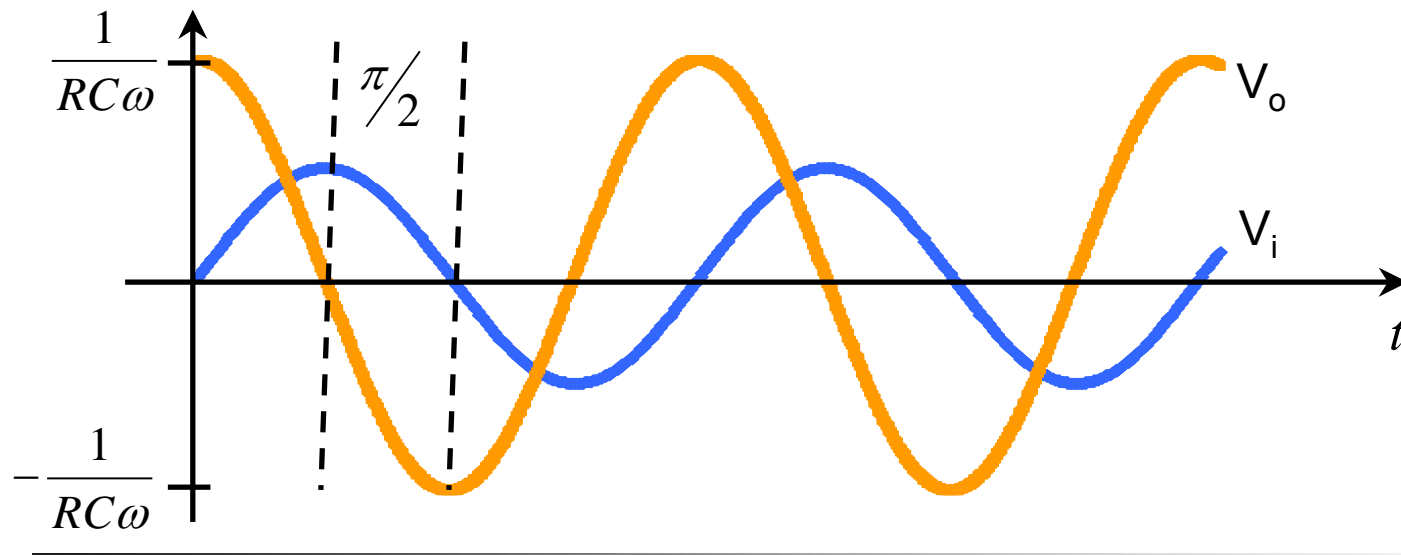
En el dominio de la frecuencia

Ejemplo 1:



V_i señal cuadrada

Ejemplo 2:



$$V_i = \sin \omega t$$

$$V_o = \frac{1}{RC\omega} \cos \omega t$$

Problema de estabilidad: en continua el condensador se comporta como un circuito abierto y no hay realimentación negativa. Cualquier pequeña componente de continua en V_i teóricamente produce una salida infinita.

$$V_i = k + \text{sen } \omega t$$

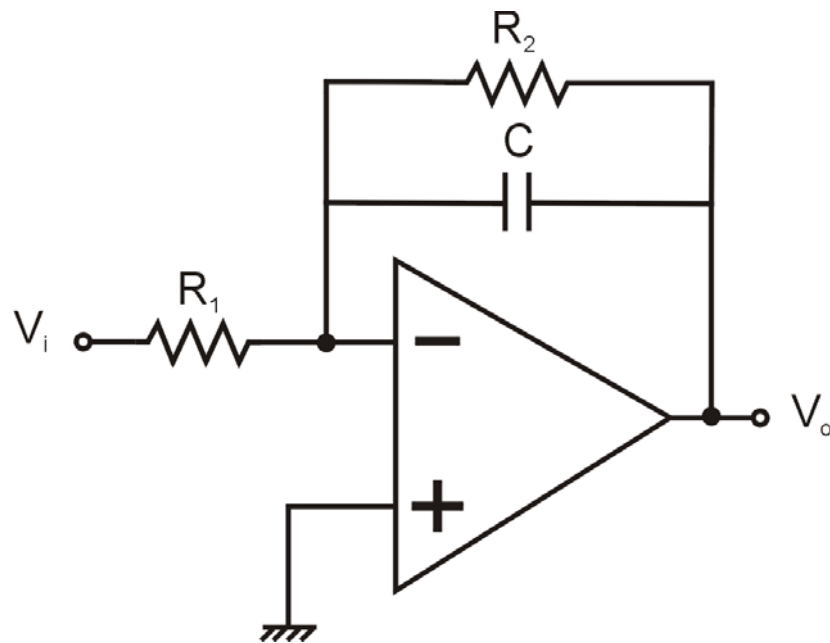
$$V_o = -\frac{1}{RC} \int (k + \text{sen } \omega t) dt$$

$$V_o = -\frac{1}{RC} \left(kt - \frac{1}{\omega} \cos \omega t + V_o(0) \right)$$

En la práctica la salida del amplificador se satura a un voltaje cercano +Vcc o -Vcc, dependiendo de la polaridad de la señal de entrada.

Integrador

El problema de ganancia muy alta de cd del integrador se resuelve al conectar R_2 . La resistencia cierra el circuito de realimentación y proporciona una ganancia finita de cd de $-R_2/R_1$.



$$\frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_2}{R_1} \frac{1}{1 + R_2 C s}$$

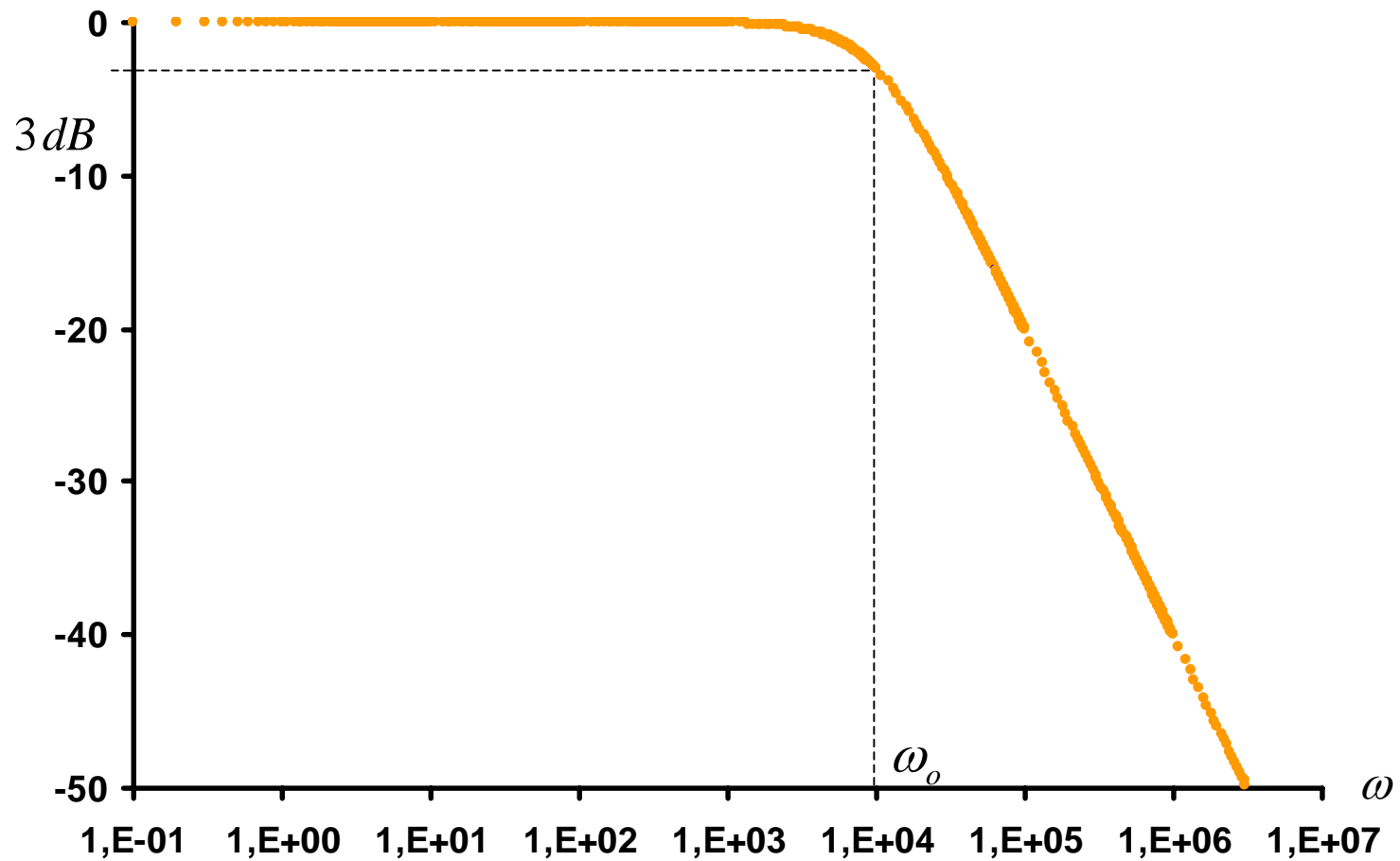
Filtro paso-bajo
frecuencia de corte $\omega_o = (R_2 C)^{-1}$

$$\omega > \omega_o \Rightarrow \frac{V_o}{V_i} \approx -\frac{1}{R_1 C s}$$

El integrador resultante ya no es ideal, pero se puede reducir al mínimo la imperfección seleccionando una R_2 tan grande como sea posible.

- **Amplitud:** $|T(j\omega)| = \frac{R_2}{R_1} \frac{1}{\sqrt{1 + (R_2 C \omega)^2}}$

$20\log|T(j\omega)| \text{ (dB)}$



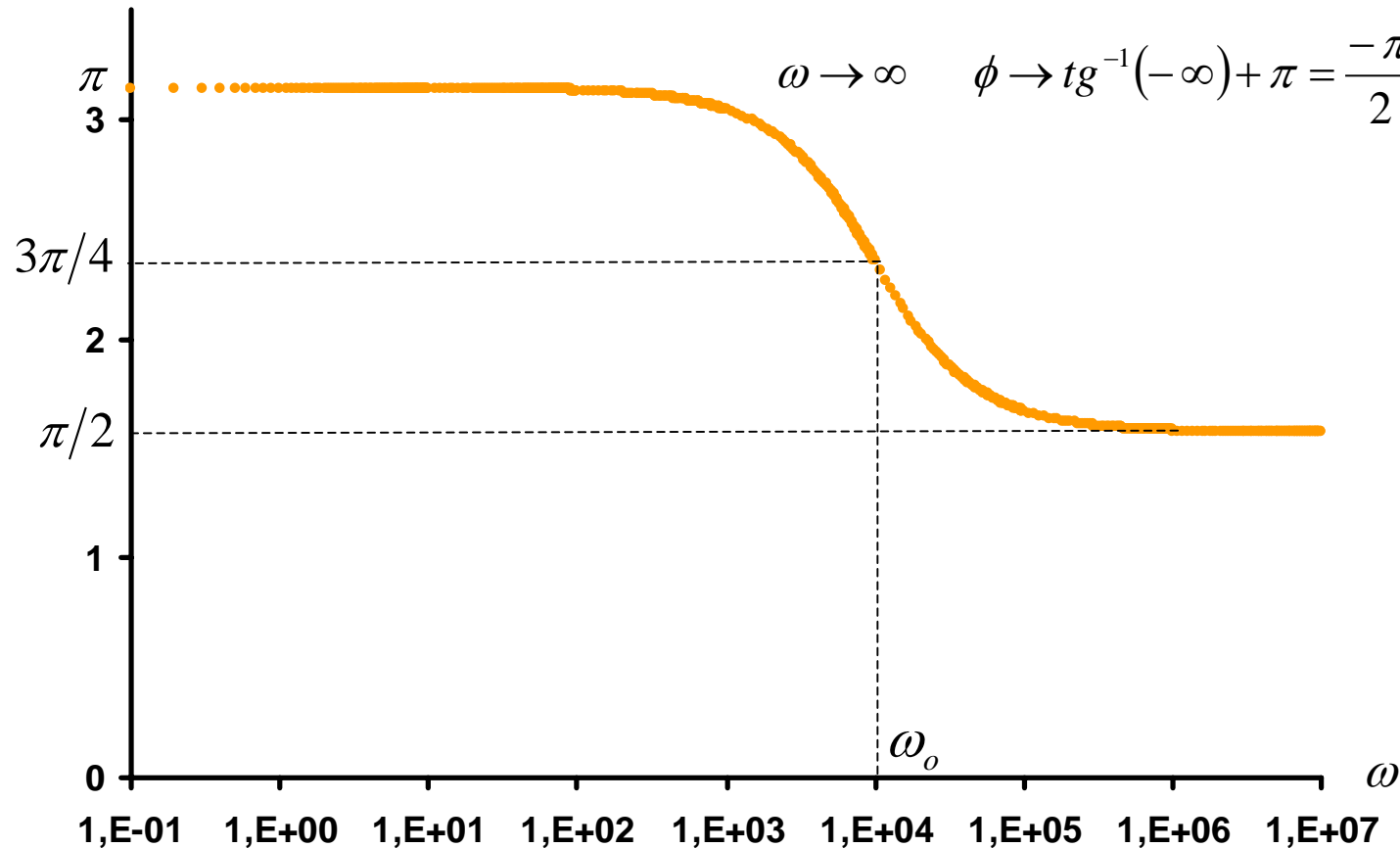
- **Fase:** $\phi(\omega) = \operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{\omega R_2 C}{-1}\right) + \pi$

$\omega \rightarrow 0 \quad \phi \rightarrow \operatorname{tg}^{-1}(0) + \pi = \pi$

$\omega \rightarrow \omega_o \quad \phi \rightarrow \operatorname{tg}^{-1}(-1) + \pi = \frac{-\pi}{4} + \pi = \frac{3\pi}{4}$

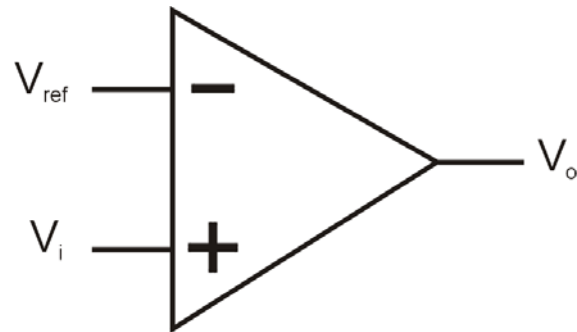
$\omega \rightarrow \infty \quad \phi \rightarrow \operatorname{tg}^{-1}(-\infty) + \pi = \frac{-\pi}{2} + \pi = \frac{\pi}{2}$

$20\log|T(j\omega)| \text{ (dB)}$



Circuitos comparadores

Comparador básico

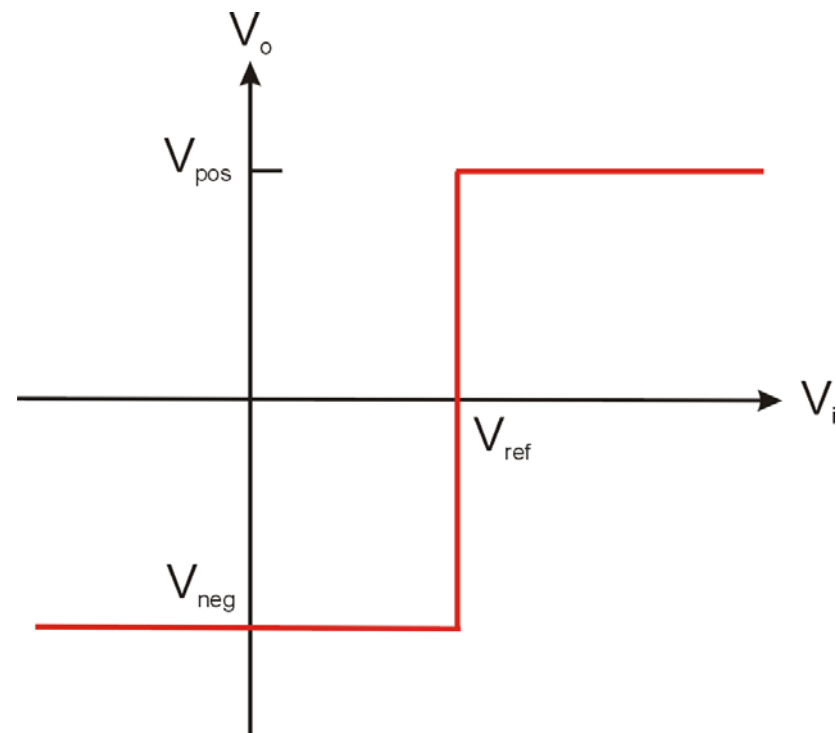


$$V_{in} > V_{ref} \Rightarrow (V_{in} - V_{ref}) > 0 \Rightarrow V_o = V_{pos}$$

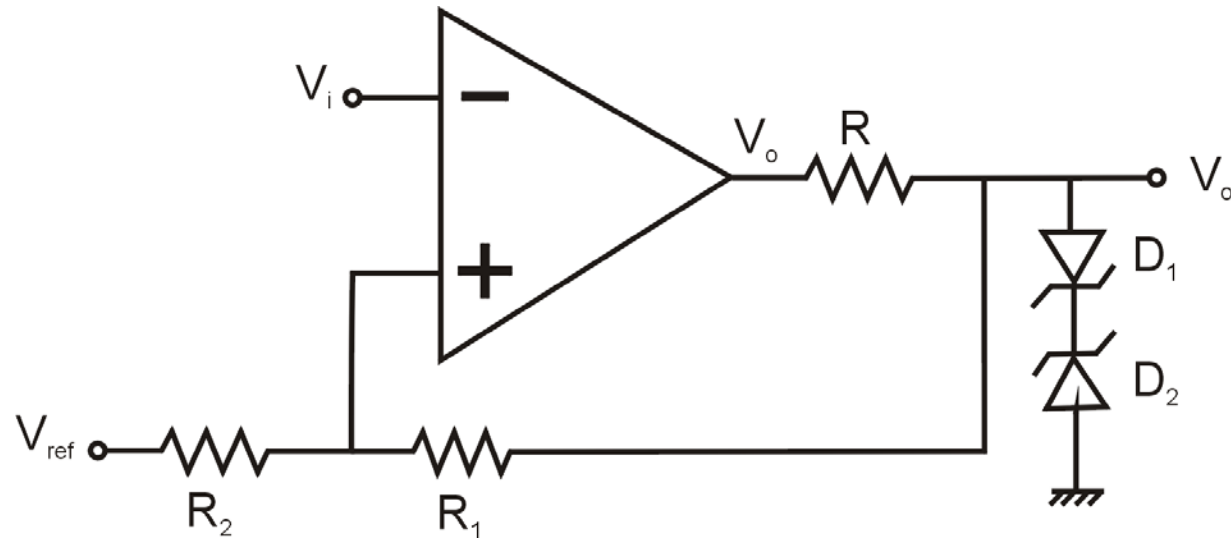
$$V_{in} < V_{ref} \Rightarrow (V_{in} - V_{ref}) < 0 \Rightarrow V_o = V_{neg}$$

Problemas:

- rapidez
- niveles de salida
- oscilaciones a la salida



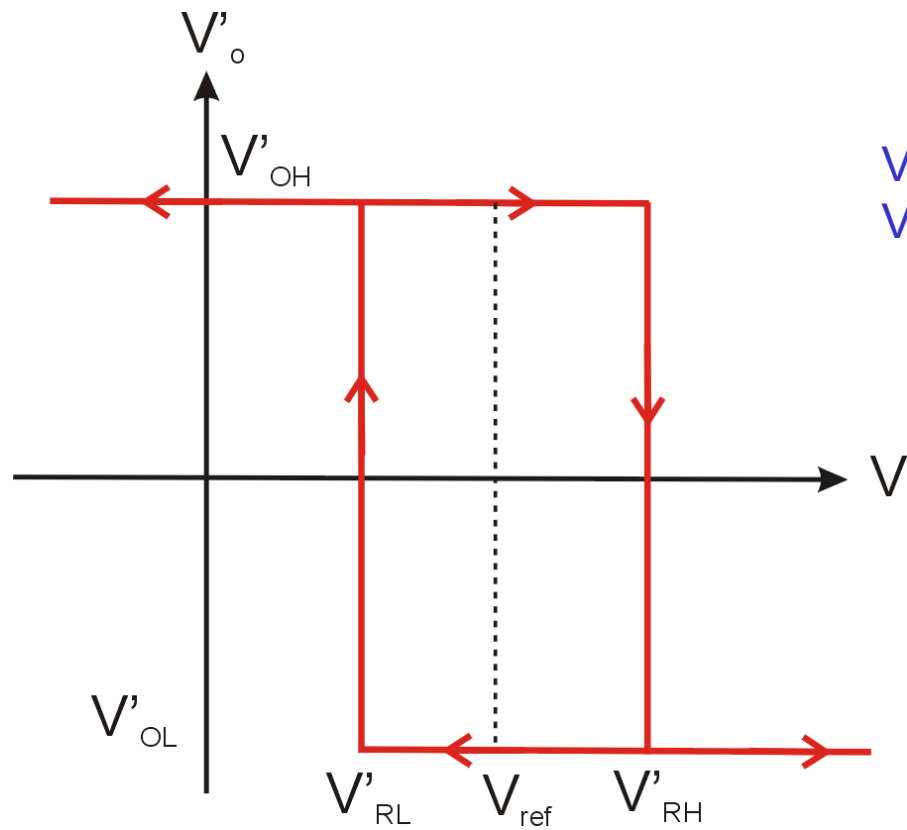
Disparador de Schmitt



$$V_i \ll V_{ref} \Rightarrow V^- < V^+ \Rightarrow V'_o = V_{OH} \Rightarrow V'_o = (V_1 + |V_{Z2}|)$$

$$\frac{V^+ - V_{ref}}{R_2} = \frac{V'_{OH}}{R_1} \Rightarrow \frac{(R_1 + R_2)V^+}{R_1 R_2} = \frac{R_1 V_{ref} + R_2 V'_{OH}}{R_1 R_2}$$

$$V^+ = \frac{R_1 V_{ref} + R_2 V'_{OH}}{R_1 + R_2} = V_{ref H}$$



$$V_i = V^- > V_{RH} \Rightarrow V^- > V^+ \Rightarrow V_o = V_{OL} \Rightarrow V'_o = V'_{OL} = -(V_2 + |V_{Z1}|)$$

$$V^+ = \frac{R_1 V_{ref} + R_2 V'_{OL}}{R_1 + R_2} = V_{RL}$$

$$V_i = V^- > V_{RL} \Rightarrow V^- < V^+ \Rightarrow V_o = V_{OH} \Rightarrow V'_o = V'_{OH} = (V_1 + |V_{Z2}|)$$

6.2 Conversion Digital Analógica Analógica Digital

- A lo largo de la asignatura hemos trabajado con dos tipo de datos: Analógico y Digitales.

- **Analógicos:**

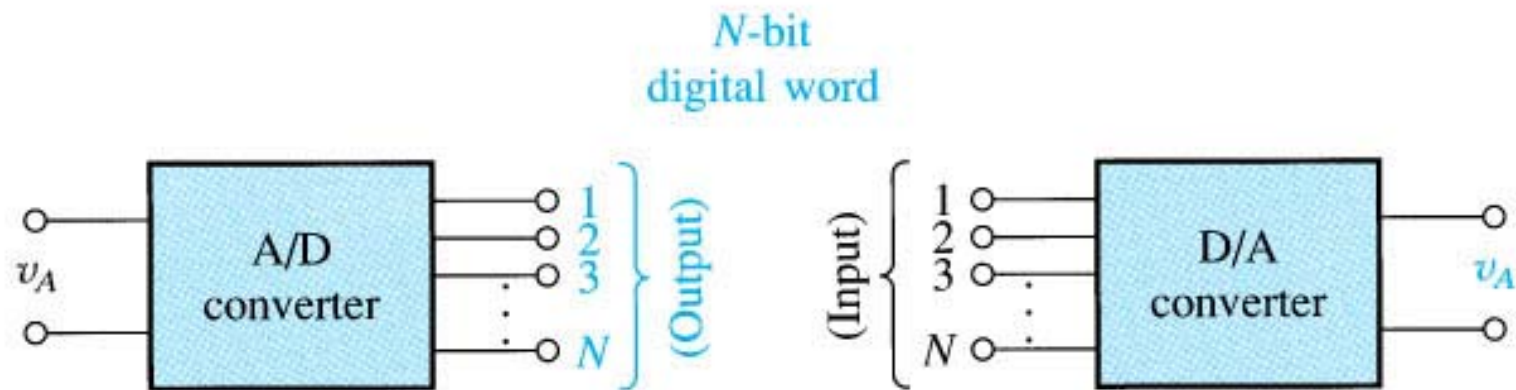
- pueden tomar cualquier valor entre un rango continuo
- no sólo nos interesa el estado de los dispositivos

- **Digitales:**

- formados por una palabra con unos “1” y ceros “0”
- nos interesa el estado de los dispositivos, ON u OFF

- Dentro de los circuitos analógicos tenemos a los amplificadores, derivadores, osciladores, generadores de señal, ... Con respecto a los digitales tenemos puertas lógicas, memorias, ALUs, ...

- A veces interesa “convertir” un valor digital a uno analógico. Los conversores son circuitos que convierten un valor analógico a un valor digital o viceversa.



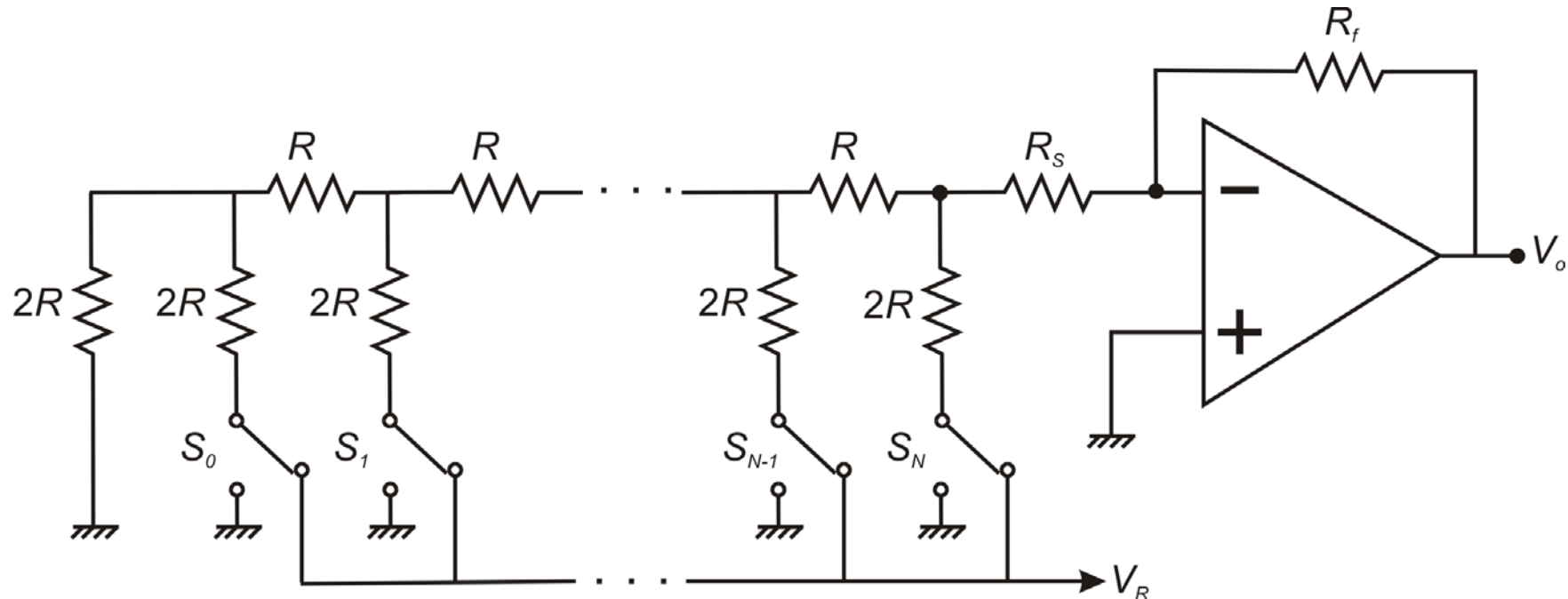
Convertidores Digital/Analógico



- Si la palabra digital es : $S_N S_{N-1} \dots S_1 S_0$ su valor analógico será
$$K [S_N 2^N + S_{N-1} 2^{N-1} + \dots + S_1 2^1 + S_0]$$
- Estudiaremos dos tipos de conversores D/A
 - ✓ Sumador analógico
 - ✓ Convertidor en escalera R-2R

Convertidor en Escalera R-2R

Debido a la pequeña dispersión en valores de resistencia, esta red suele preferirse sobre el esquema anterior, especialmente para $N > 4$.



$$I_1 = \frac{S_1 V_R - V_{th0}}{4R} \quad R_{th1} = 2R \parallel 2R = R$$

$$V_{th1} = S_1 V_R - I_1 2R = S_1 V_R - \frac{(S_1 V_R - V_{th0})}{4R} 2R$$

$$V_{th1} = \frac{S_1 V_R}{2} + \frac{V_{th0}}{2} = \frac{S_1 V_R}{2} + \frac{S_0 V_R}{4}$$

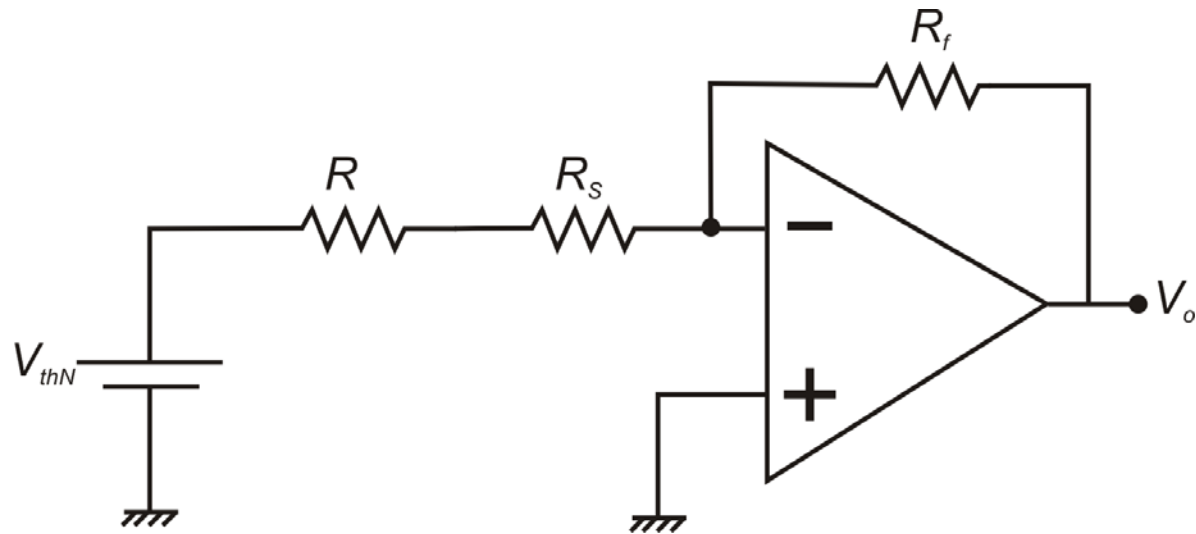
.

.

.

$$V_{thn} = \frac{S_n V_R}{2} + \frac{S_{n-1} V_R}{4} + \dots + \frac{S_0 V_R}{2^{n+1}}$$

$$\begin{cases} V_{thn} = \frac{V_R}{2^{n-1}} (S_0 + 2S_1 + 4S_2 \dots + 2^n S_n) \\ R_{thn} = R \end{cases}$$



$$\frac{V_{thn}}{R + R_s} = \frac{-V_o}{R_f} \Rightarrow V_o = \frac{-R_f}{R + R_s} V_{thn}$$

$$V_o = \frac{-R_f}{R + R_s} \frac{V_R}{2^{n+1}} [S_0 + 2S_1 + \dots + 2^n S_n]$$

Conversión A/D(Analógico/Digital)

Proceso de conversión

Muestro

Mantenimiento

Cuantización

Codificación

Circuitos de Muestreo y mantenimiento.

Teorema de Shannon

Convertidores A/D

Convertidores en lazo abierto

Convertidores realimentados

Convertidor Contador

Convertidor en aproximaciones sucesivas

Proceso de conversión

- En este tema, complementando el anterior, vamos a estudiar la conversión analógica/digital (A/D).



- Cuatro fases:
 - ✓ Muestreo
 - ✓ Mantenimiento
 - ✓ Cuantificación
 - ✓ Codificación

1) Muestreo

Se toma periódicamente el valor de la señal analógica.

2) Mantenimiento

Durante el tiempo que se tarda en transformar la señal analógica a digital se mantiene el valor de la señal muestreada.

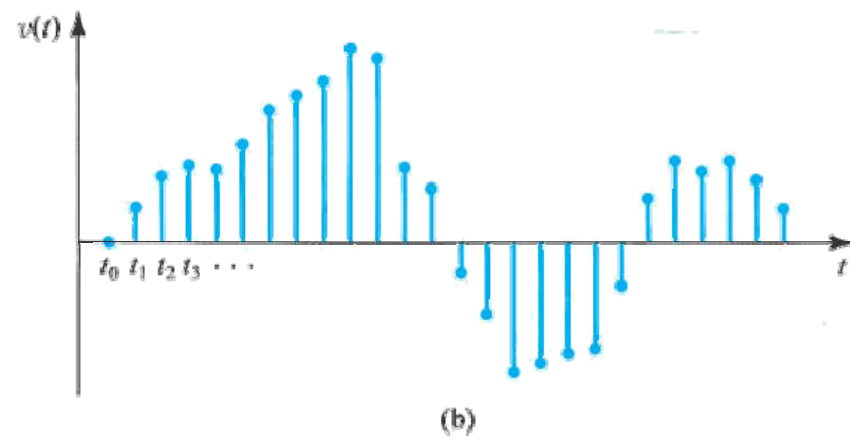
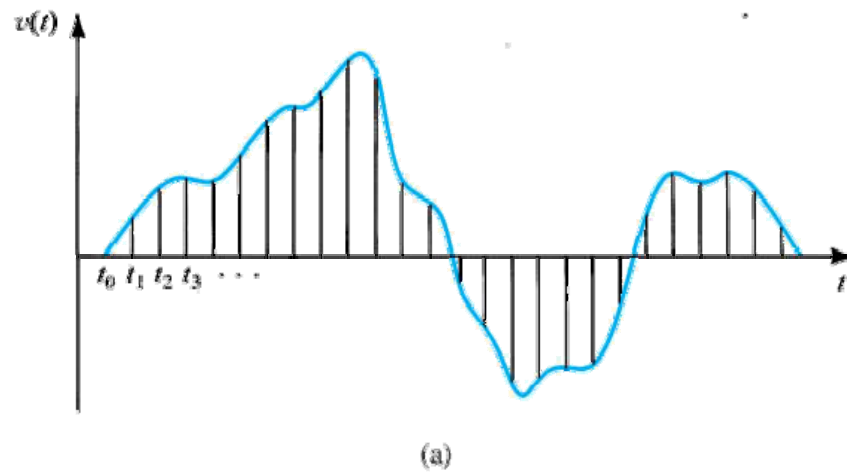
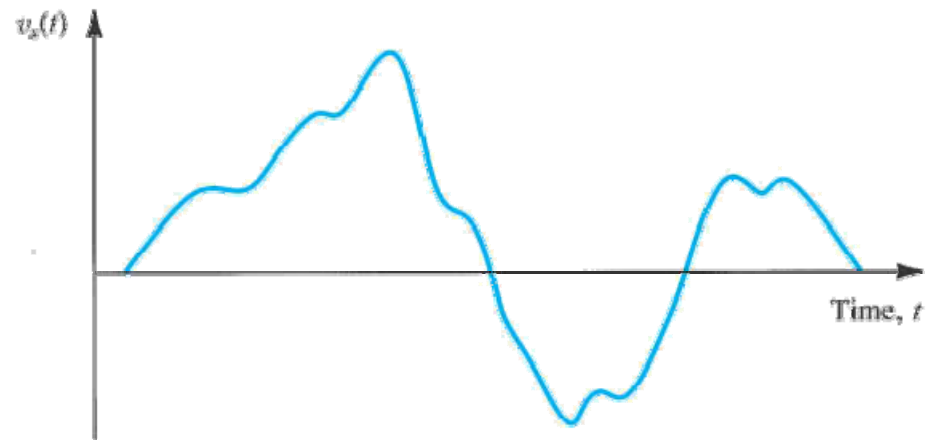
3) Cuantificación

Consiste en aproximar el valor mantenido a un múltiple entero de una cantidad asociada con la resolución del convertidor, la sensibilidad del convertidor.

4) Codificación

Consiste en el paso del número de nivel a valor binario o al código deseado

MUESTREO



CUANTIFICACIÓN

Características de un convertidor A/D

- a) **Número de bits:** N , determina el número de posibles salidas, 2^N .
- b) **Rango de entrada:** V_R , rango de tensión de entrada que el conversor es capaz de analizar.

Ejemplo:

Rango $[0, 5]$ V interesa que la señal a convertir sea entre 0V y 5V, si fuera una señal entre 0V y 0.5V estaríamos desaprovechando el conversor. Tendríamos primero que amplificar la señal para ajustarla al rango.

c) **Tiempo de conversión:** T_C , tiempo que se tarda en convertir la señal analógica a la palabra digital. Conviene que este tiempo sea lo más pequeño posible y debe ser menor que el periodo de muestreo.

d) **Sensibilidad:** Δ , mínimo incremento de la entrada capaz de apreciar el conversor A/D:
$$\Delta = \frac{V_R}{2^N - 1}$$

Ejemplo:

Rango $[0, 5] \Rightarrow V_R = 5V$

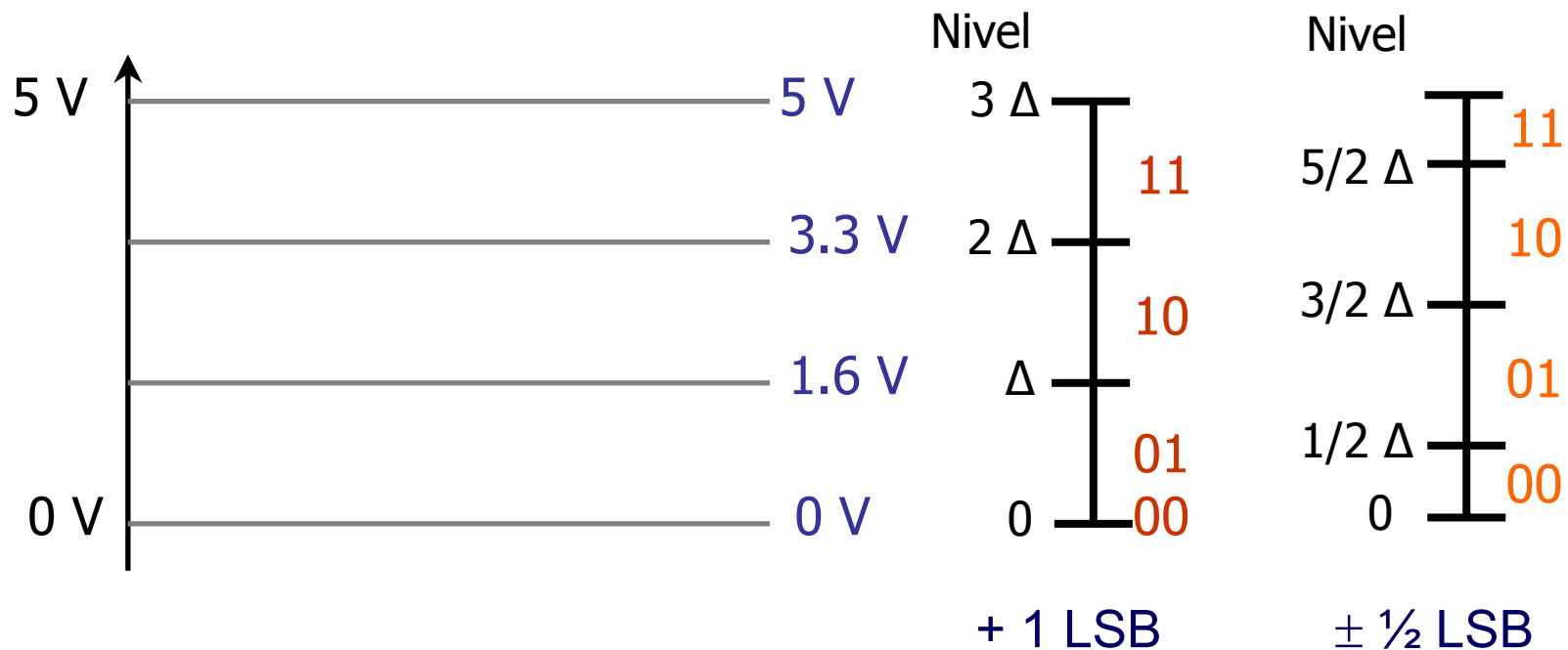
$N = 10$ bits $\Delta = 5/1023 \cong 5 \text{ mV}$

Aproximación + 1 LSB, $\pm \frac{1}{2}$ LSB

Ejemplo:

$V \in [0, 5] \Rightarrow N=2$, número de niveles: $2^N = 4$

$2^2-1 = 3$ intervalos $\Delta = 5/(2^2-1) = 1.66$ V/interv



+ 1 LSB

$$V_a = 0 V \quad \rightarrow \text{Nivel 0} \rightarrow 00$$

$$0 V < V_a \leq \Delta \quad \rightarrow \text{Nivel 1} \rightarrow 01$$

$$\Delta \leq V_a < 2\Delta \quad \rightarrow \text{Nivel 2} \rightarrow 10$$

$$2\Delta \leq V_a < 3\Delta \quad \rightarrow \text{Nivel 3} \rightarrow 11$$

$\pm \frac{1}{2}$ LSB

$$0 V \leq V_a \leq \frac{1}{2}\Delta \quad \rightarrow \text{Nivel 0} \rightarrow 00$$

$$\frac{1}{2}\Delta \leq V_a \leq \frac{3}{2}\Delta \quad \rightarrow \text{Nivel 1} \rightarrow 01$$

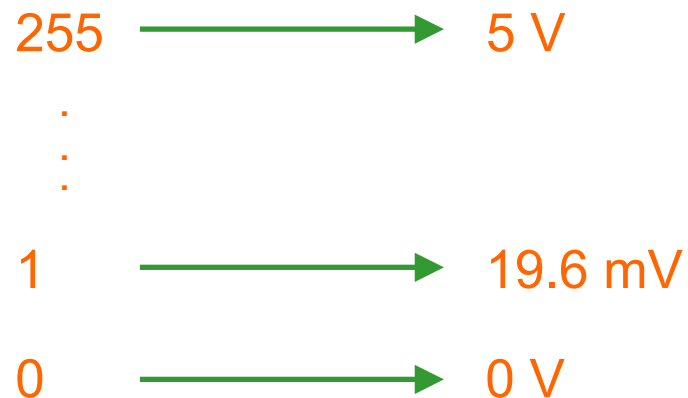
$$\frac{3}{2}\Delta \leq V_a < \frac{5}{2}\Delta \quad \rightarrow \text{Nivel 2} \rightarrow 10$$

$$\frac{5}{2}\Delta \leq V_a < 5 V \quad \rightarrow \text{Nivel 3} \rightarrow 11$$

Ejemplo:

Convertidor de 8 bits, $N = 8$, rango entre 0 V y 5 V, $V_R = 5V$.

Tenemos $2^8 = 256$ niveles. Sensibilidad $\Delta = 5/255 = 19.6 \text{ mV}$.



Suponemos una señal analógica de 3.38 V, corresponde al nivel

$$3.38 \text{ V} / 19.6 \text{ mV} = 195.408:$$

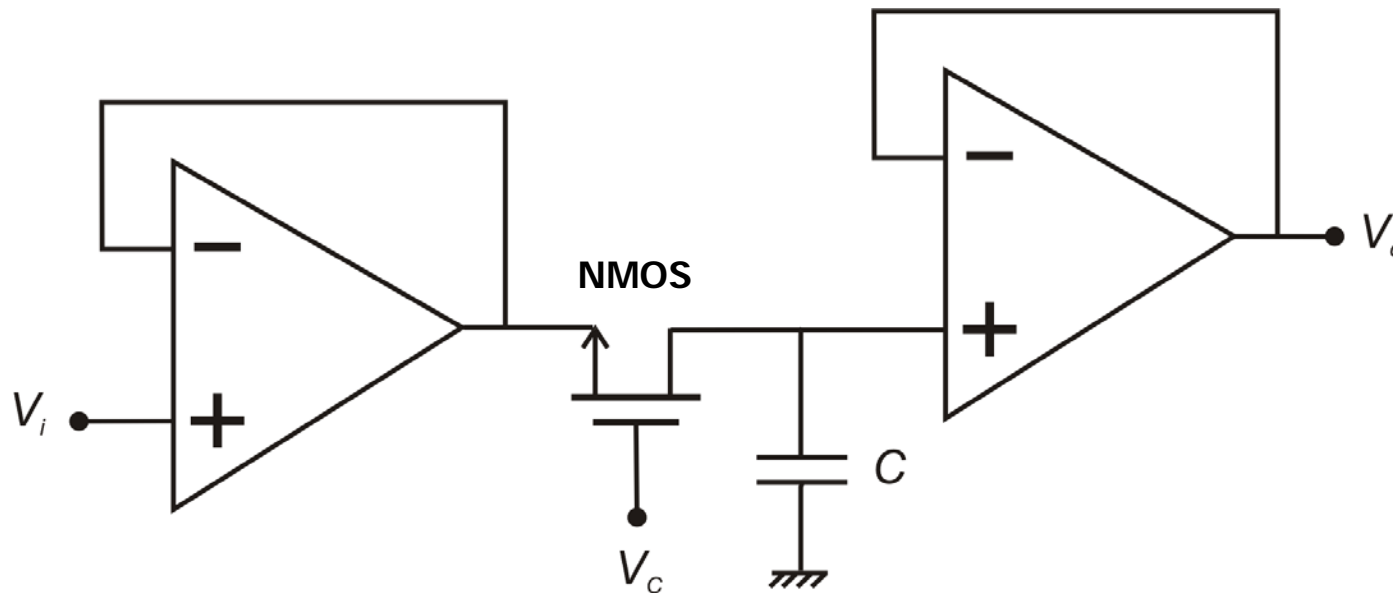
→ $196 + 1 \text{ LSB}$ Codificación → 11000100

→ $195 \pm \frac{1}{2} \text{ LSB}$ Codificación → 11000011

Circuitos de muestreo y mantenimiento

Teorema de Shannon

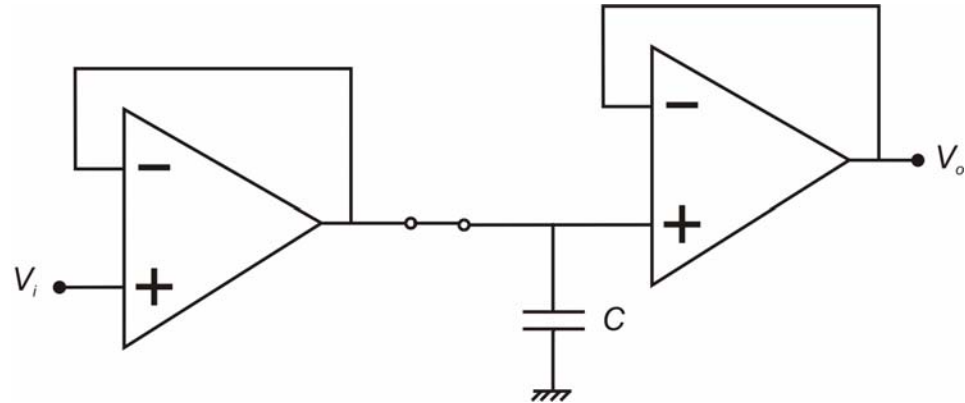
- El siguiente circuito es el que se suele utilizar como muestreador-retenedor.
- Consiste en dos seguidores de tensión con una puerta de paso y un condensador.



- El transistor o la puerta de paso hace las funciones de interruptor:

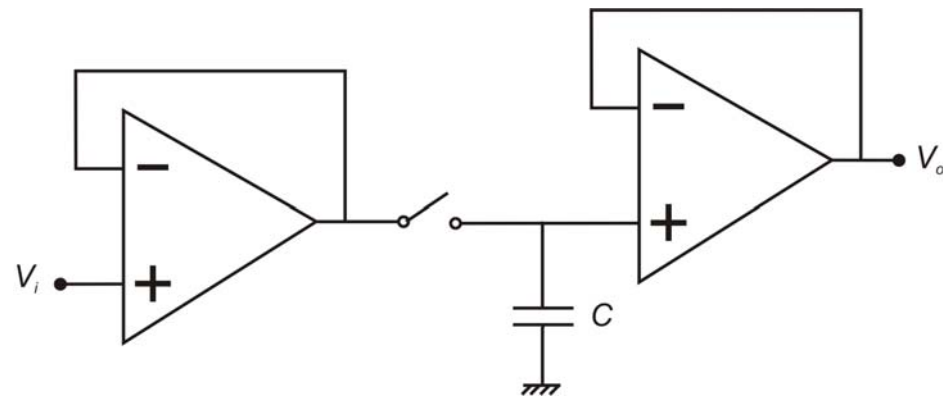
- Si $V_c=1 \Rightarrow C$ se carga al valor V_i

Muestreo



- Si $V_c=0 \Rightarrow C$ mantiene el voltaje V_i

Mantenimiento



- Problema grave:

¿Con qué frecuencia debemos muestrear?

Teorema de Shannon:

La frecuencia de muestreo debe ser dos veces mayor que la frecuencia máxima de la señal de entrada:

$$f_{\text{muestreo}} \geq 2f_{\text{max}}$$

- Consecuencia:

Una señal que no esté limitada en banda no se va a poder muestrear sin que se pierda información. Lo que se hace con una señal de este tipo es pasarla primero por un filtro paso-baja de manera que limitemos la frecuencia máxima.

Convertidores A/D

Convertidor en lazo abierto

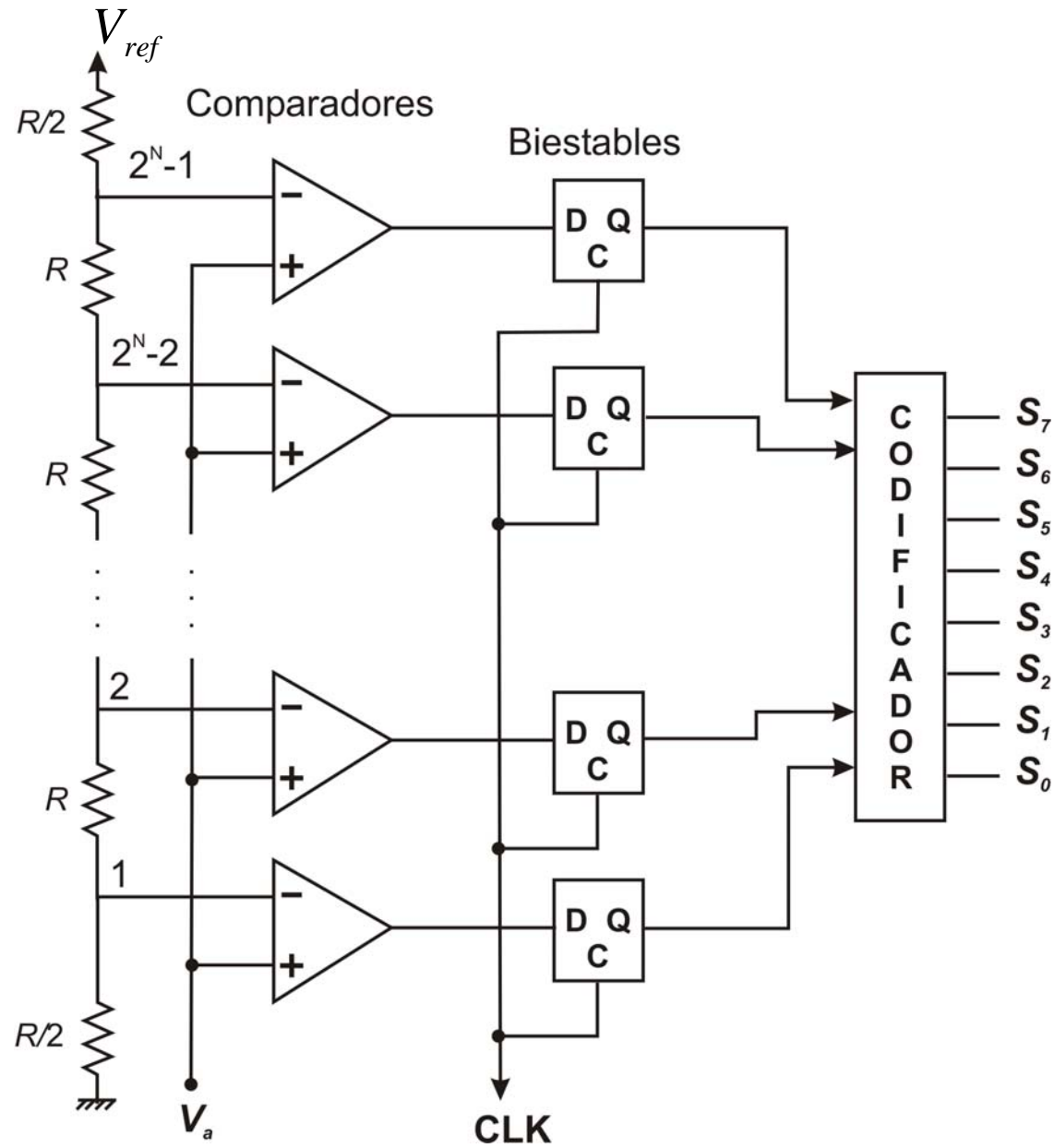
Ejemplo: convertidor A/D de 8 bits.

$$N \text{ de } 1 \text{ a } 255 \rightarrow V_N = \frac{V_{ref}}{255 R} \left[\frac{R}{2} + (N-1)R \right]$$

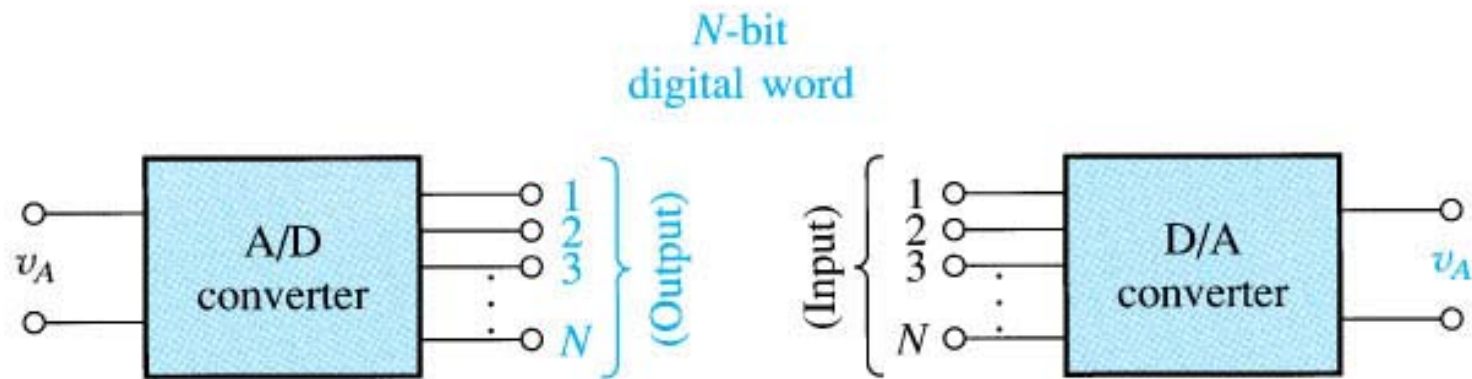
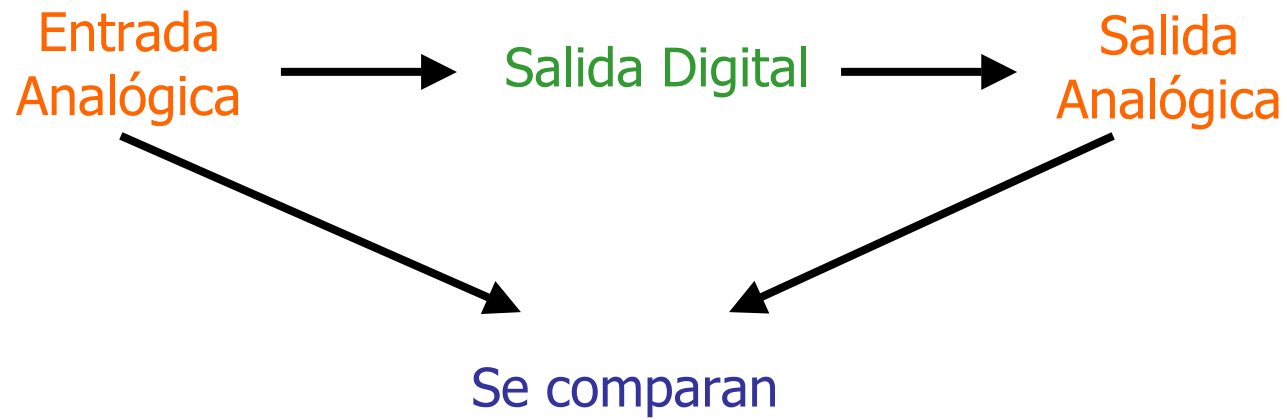
Si la tensión de entrada V_a está comprendida entre V_{N-1} y V_N desde el comparador 1 hasta el $N-1$ dan salida “1” y la de los otros comparadores es “0”.

- **Ventaja:** rápido $T_c = 1$ ciclo de reloj.
- **Inconveniente:** mucha circuitería.

Se utiliza si el numero de bits no es demasiado grande.



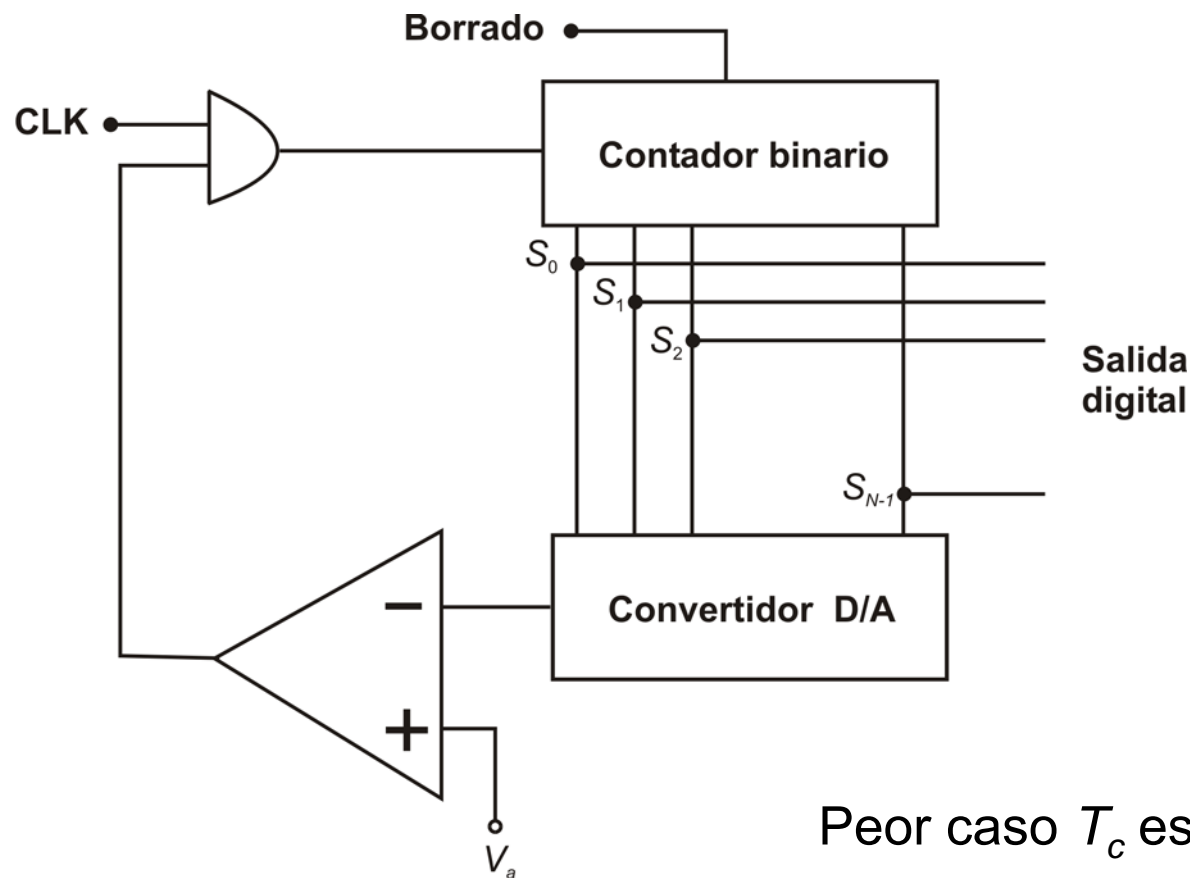
Convertidores realimentados



Convertidor en lazo cerrado

Convertidor Contador

El contador inicia una cuenta desde 000...0 hasta que la salida digital convertida a analógica supera a V_a , en ese momento se para la cuenta.



Peor caso T_c es 2^N pulsos de reloj

Convertidor en aproximaciones sucesivas

Mejora el tiempo de conversión del anterior.

Pasos:

- 1) Se coloca un registro de longitud N (número de bits) y se pone inicialmente a 000...0.
- 2) Se hace 1 el bit más significativo.
- 3) Se compara el valor analógico correspondiente a 100...0 con el valor V_a de entrada.

Si $V_a >$ \Rightarrow El bit 1 se mantiene

Si $V_a <$ \Rightarrow El bit 1 se transforma en 0

Se repite el proceso para los N bits, primero con el segundo bit más significativo y así con todos. Se tardan $N+2$ pulsos de reloj, 1 por cada bit, 1 para el inicio y otro para pasar la palabra digital a la salida.