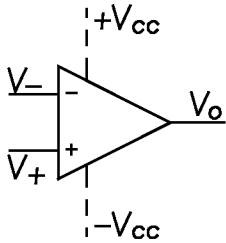


AMPLIFICADOR OPERACIONAL

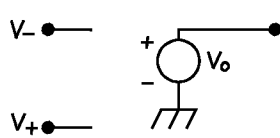


Amplificador Operacional (ideal):

Amplificador Diferencial, $[V_o = A_D (V_+ - V_-)]$
 de gran ganancia, $[A_D \rightarrow \infty]$
 ganancia en modo común igual a cero, $[A_C = 0]$
 de acoplo directo (o de continua), [DC]
 con ancho de banda infinito, $[BW \rightarrow \infty]$
 impedancia de entrada infinita, $[Z_i \rightarrow \infty]$
 impedancia de salida cero, $[Z_o = 0]$
 y tensión de offset de salida cero $[V_{off} = 0]$.

En la siguiente figura, se comparan las características de un amplificador operacional (Amp.Op.) ideal con uno real. Una consecuencia importante de que la impedancia de entrada (Z_i) sea muy alta, es que las intensidades que entran por los terminales inversor (I_-) y no inversor (I_+) son cero (en la práctica son muy pequeñas, pero distintas de cero).

Ideal



$$V_o = A_D (V_+ - V_-)$$

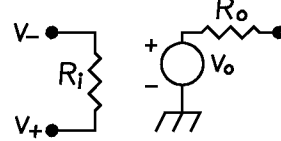
$$A_D \rightarrow \infty$$

$$A_C = 0$$

DC+AC ($BW \rightarrow \infty$)

$$\begin{cases} Z_i \rightarrow \infty \\ Z_o = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} I_+ = 0 \\ I_- = 0 \end{cases}$$

Real



$$V_o = A_D (V_+ - V_-) + A_C \left(\frac{V_+ + V_-}{2} \right) + V_{off}$$

$$A_D \sim 10^5$$

$$A_C \sim 10$$

DC+AC ($BW = 10\text{Hz}$)

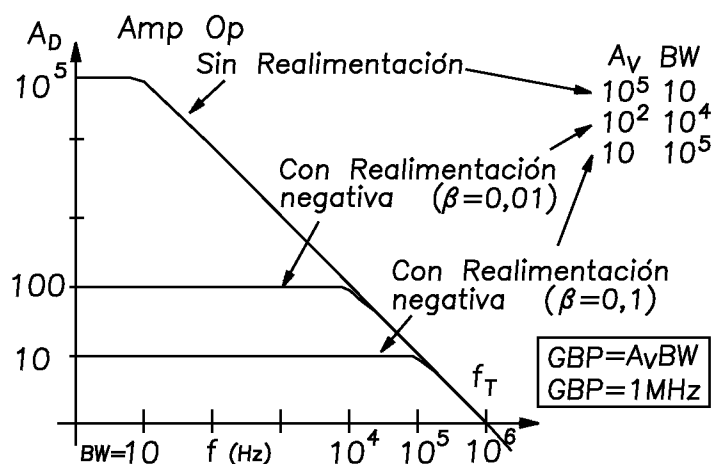
$$R_i \sim 2\text{M}\Omega$$

$$R_o \sim 75\Omega$$

$$CMRR > 80\text{dB} \quad CMRR = 20 \log_{10} \left(\frac{A_D}{A_C} \right)$$

La ganancia diferencial de un Amp.Op. real es muy grande ($A_D \sim 10^5$), demasiado para su uso corriente en amplificadores. En cambio, el ancho de banda ($BW \sim 10\text{ Hz}$) es demasiado pequeño como para amplificar señales habituales. Normalmente se usa realimentación negativa, que aumenta el ancho de banda del circuito amplificador, a costa de perder ganancia. El producto ganancia por ancho de banda del circuito es igual (si se escoge bien la realimentación) al producto de la ganancia (A_D) por el ancho de banda (BW) del Amp.Op. (GBP).

Cuando a un Amp.Op. se le añade una red RC que limita las oscilaciones accidentales del circuito, se dice que el Amp.Op. está "compensado". En los operacionales compensados (como el 741) la frecuencia de ganancia unidad (f_T) es igual al producto ganancia por ancho de banda (GBP).



El Amp.Op. real está limitado por la alimentación de continua ($\pm V_{CC}$), por tanto existen 2 regiones de funcionamiento: Lineal, si V_o no sobrepasa las alimentaciones ($\pm V_{CC}$) y Saturación, si V_o intenta sobrepasarlas.

$$V_o \in [-V_{CC}, +V_{CC}] \Rightarrow \text{LINEAL}$$

$$\left. \begin{array}{l} V_o > +V_{CC} \\ V_o < -V_{CC} \end{array} \right\} \Rightarrow \text{Saturación}$$

Siempre es válida la ecuación $V_o = A_D (V_+ - V_-)$, con $A_D \rightarrow \infty$. En zona lineal, si V_o es finito, de la ecuación se desprende que V_+ es igual a V_- , que llamamos "Tierra Virtual". Para resolver problemas de Amp.Op. funcionando en zona lineal, usaremos "Tierra Virtual". Para resolver problemas de Amp.Op. funcionando en saturación usaremos la ecuación $V_o = A_D (V_+ - V_-)$, con $A_D \rightarrow \infty$.

Para resolver problemas con Amp.Op. en saturación, recordar que su salida sólo puede tomar dos valores ($+V_{CC}$ o $-V_{CC}$).

LINEAL

$$V_o = A_D (V_+ - V_-) \quad A_D \rightarrow \infty$$

$$\Rightarrow [V_+ = V_-] \quad \text{"Tierra Virtual"}$$

Saturación

$$\text{Si ... } \left\{ \begin{array}{l} V_o > +V_{CC} \Rightarrow V_o = +V_{CC} \\ V_o < -V_{CC} \Rightarrow V_o = -V_{CC} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_+ > V_- \Rightarrow V_o \rightarrow +\infty \Rightarrow V_o = +V_{CC} \\ V_+ < V_- \Rightarrow V_o \rightarrow -\infty \Rightarrow V_o = -V_{CC} \end{array} \right.$$

Un Amp.Op. está realimentado negativamente, cuando un aumento de la tensión de salida V_o del Amp.Op. provoca la disminución de la tensión ($V_+ - V_-$). Estaría realimentado positivamente, si provocara un aumento de ($V_+ - V_-$). Un Amp.Op. está sin realimentación, si V_o del Amp.Op. no influye en ($V_+ - V_-$).

Sin Realimentación	}	→	Casi siempre en Saturación Utilizar: $V_o = A_D (V_+ - V_-) \quad A_D \rightarrow \infty$
Con Realimentación Positiva			
Con Realimentación Negativa	→		Casi siempre en Lineal Utilizar: [$V_+ = V_-$] "Tierra Virtual" Si V_o sobrepasa las alimentaciones Utilizar: $V_o = A_D (V_+ - V_-) \quad A_D \rightarrow \infty$

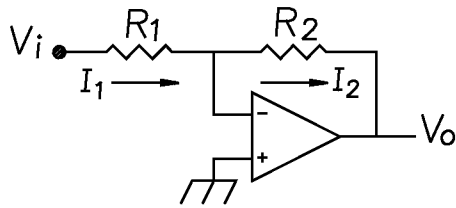
En todos los esquemas anteriores V_o se refiere a la tensión de salida del Amp.Op. y NO a la tensión de salida del circuito en el que esté el Amp.Op.

Cuando el Amp.Op. esté en Saturación, o la tensión de salida (del Amp.Op.) supere las alimentaciones ($\pm V_{CC}$) ¡¡ No es aplicable Tierra Virtual !! Utilizar entonces, la ecuación $V_o = A_D (V_+ - V_-)$, con $A_D \rightarrow \infty$.

En problemas, utilizar siempre el modelo de Amp.Op. ideal. No olvidar que las intensidades que entran por los terminales de entrada son cero ($I_- = I_+ = 0$)

Generalmente se resuelven los problemas planteando ecuaciones de nodo en los terminales de entrada. Generalmente no conviene plantear ecuaciones de nodo en el terminal de salida del Amp.Op., pero si se debe plantear una ecuación en la salida del Amp.Op. no olvidar que en la salida del Amp.Op. la intensidad puede entrar, salir, o bien ser nula.

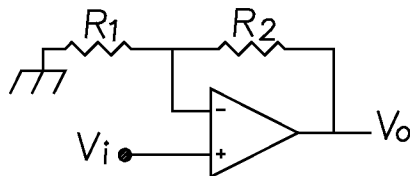
Aplicaciones Lineales del Amplificador Operacional.



Inversora

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

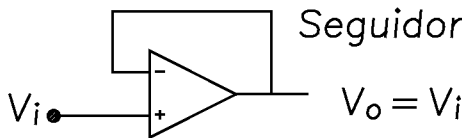
Todos los circuitos de esta página tienen Realimentación Negativa, por tanto es conveniente resolverlos aplicando "Tierra Virtual" ($V_+ = V_-$). Luego se plantea una ecuación de nodo en el terminal V_- del Amp. Op.



No Inversora

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

La configuración no inversora tiene ganancia positiva, pero lo mejor es que la entrada V_i tiene alta impedancia de entrada (la fuente V_i no tiene por qué dar intensidad al circuito).



Seguidor de Tensión

$$V_o = V_i$$

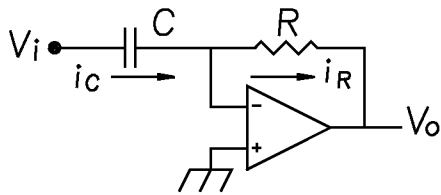
Ventajas del seguidor de tensión:

Alta impedancia de entrada,

$$\sim Z_i \cdot A_D = 2 \text{ M}\Omega \cdot 10^5 = 2 \cdot 10^{11} \Omega$$

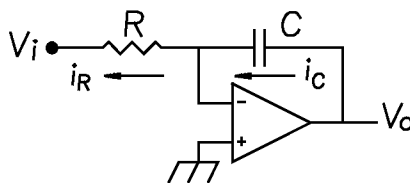
y muy baja impedancia de salida.

$$\sim Z_o / A_D = 75 \Omega / 10^5 = 0,00075 \Omega$$



Derivadora

$$v_o(t) = -RC \frac{dv_i}{dt}$$

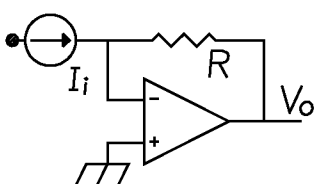


Integradora

$$v_o(t) = -\frac{1}{RC} \int v_i dt$$

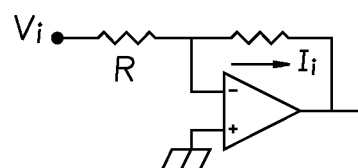
Si V_i tiene una pequeña componente de continua, habrá una corriente que cargará al condensador hasta llevar a V_o a saturación. Además, como la intensidad de polarización del terminal negativo del Amp. Op. no es cero sucederá lo mismo. Por esta razón a veces se le añade una resistencia grande en paralelo al condensador del integrador.

Se muestran dos conversores, uno convierte la señal intensidad I_i en tensión V_o , y el otro convierte la señal V_i en una señal de corriente I_i .



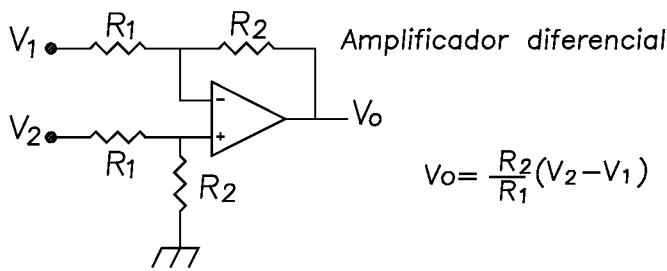
Convertor $I \rightarrow V$

$$V_o = -I_i \cdot R$$

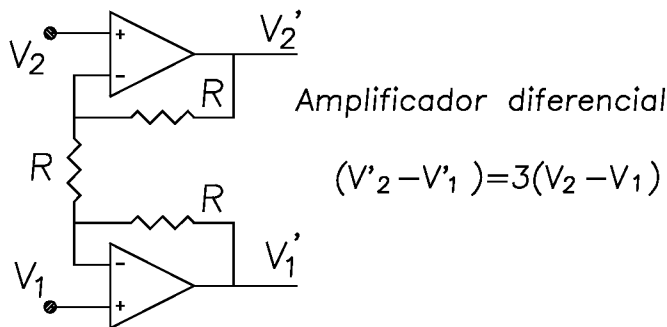


Convertor $V \rightarrow I$

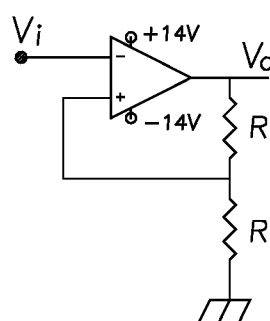
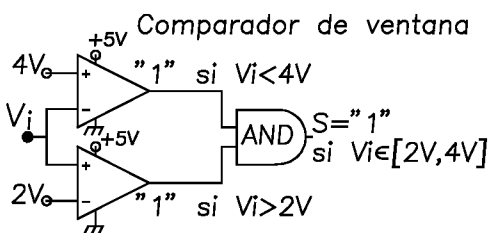
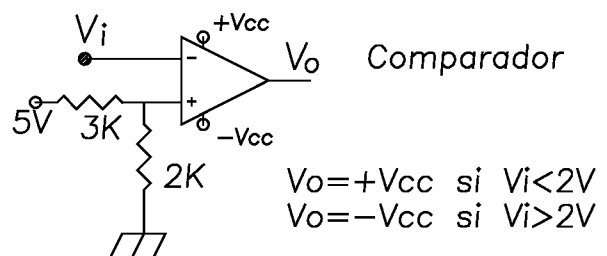
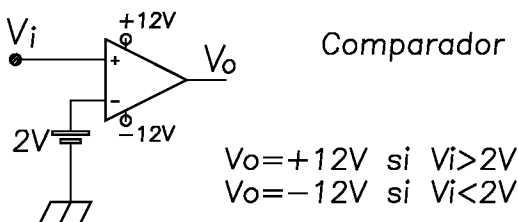
$$I_i = V_i / R$$



Dos variantes de amplificador diferencial. En ellos, la salida depende de la diferencia de las entradas. Para resolver los circuitos, se necesitan dos ecuaciones de nodo por circuito.



Comparadores (Amp.Op. en Saturación).

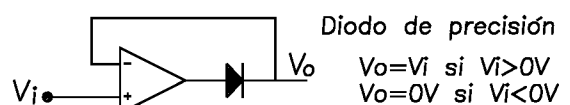
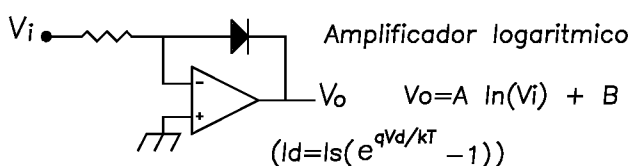


Disparador (Trigger) de Schmitt (con histéresis)

$$V_o = +14V = A_D(V_+ - V_-) \Rightarrow V_i < +7V$$

$$V_o = -14V = A_D(V_+ - V_-) \Rightarrow V_i > -7V$$

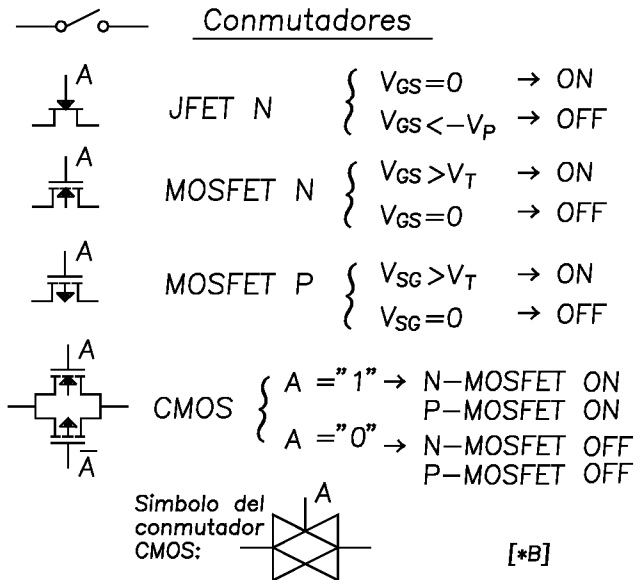
Otras aplicaciones.



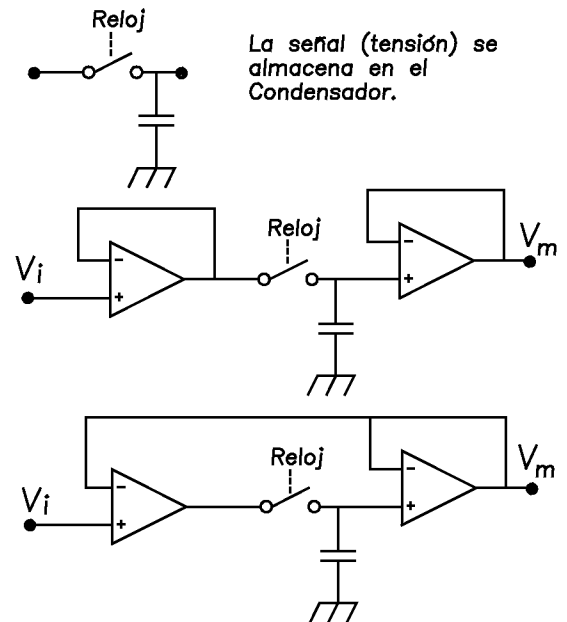
CONVERSION ANALOGICA-DIGITAL

Circuitos Muestreadores (S/H).

Se hacen circuitos conjuntos de muestreo y mantenimiento (sample/hold). Un interruptor cada cierto tiempo prefijado (periodo de muestreo) se cierra para almacenar en un condensador la tensión V_i .

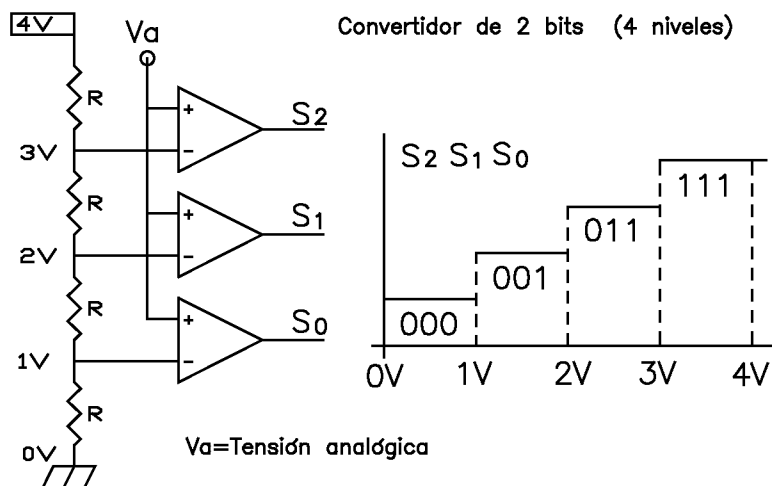


Circuitos Muestreadores



Convertidor analógico-digital (ADC).

De comparador en paralelo



⊕ Convertidor muy rápido (instantáneo frente a otros competidores)

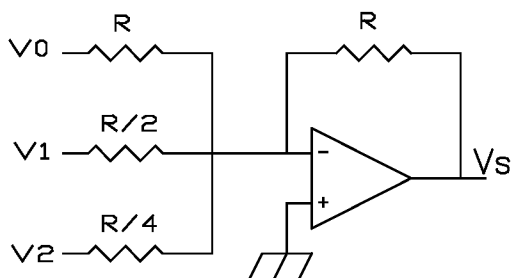
⊖ Convertidor muy caro:

Para 10 bit se necesitan: $2^{10} - 1$ Amp.Op. (~1.000)

Para 16 bit (como un CD): $2^{16} - 1$ Amp.Op. (~65.000 !!!)

Convertidores digital-analógico (DAC).

De resistencias ponderadas



Con altas resoluciones (n° de bits) es muy complicado encontrar resistencias con los valores requeridos y tolerancias pequeñas.

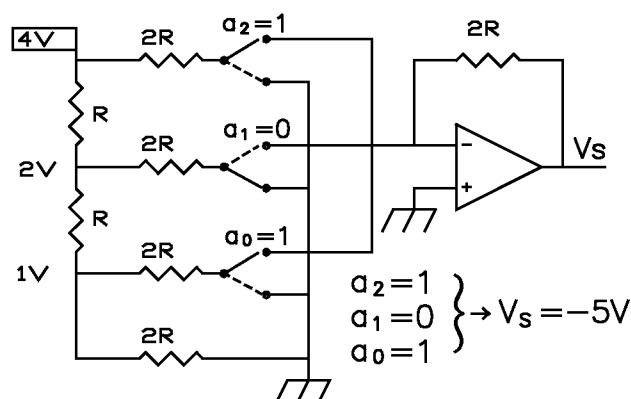
En la figura izda. son 3 bits, la resistencia menor es $R/2^{(3-1)}$

$$\frac{(0-V_S)}{R} = \frac{(V_2-0)}{R/4} + \frac{(V_1-0)}{R/2} + \frac{(V_0-0)}{R}$$

$$\Rightarrow V_S = -[4V_2 + 2V_1 + 1V_0]$$

⊖ Con 16 bits, la resistencia menor sería $R/2^{(16-1)} = R/32.768$. Luego si $R = 1\text{M}\Omega$ (ya problemática para el Amp.Op.) R debe ser $30,5\Omega$ (daría problemas por tener el bit más significativo una impedancia de entrada bajísima). Además la resistencia de $1\text{M}\Omega$ debe tener tolerancia menor de $0,003\%$.

De escalera invertida



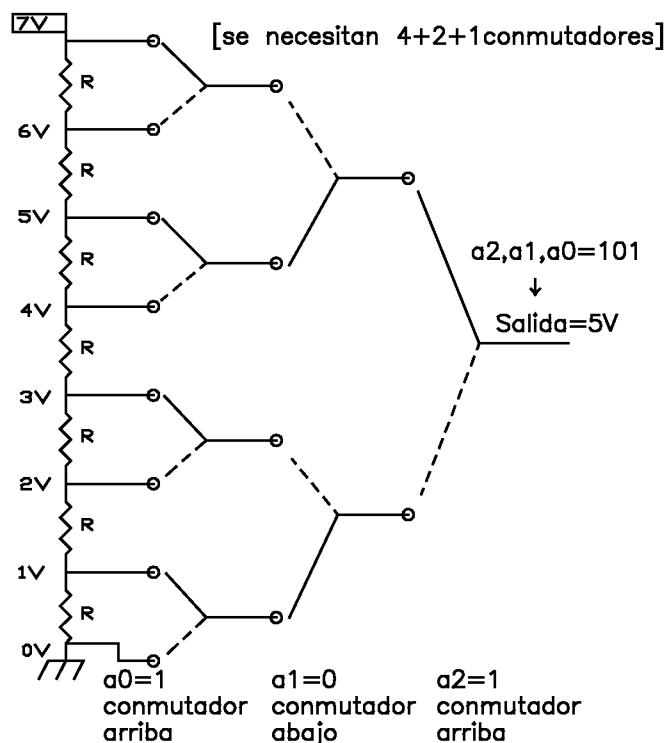
⊕ A cualquier resolución todos los valores de resistencias se reducen a R y $2R$.

⊕ No se producen transitorios, ni palabras digitales falsas a la salida, pues el conmutador siempre está conectado a $0V$ (bien a tierra, o a tierra virtual).

$$V_S = a_2 4V \left(-\frac{2R}{2R} \right) + a_1 2V \left(-\frac{2R}{2R} \right) + a_0 1V \left(-\frac{2R}{2R} \right)$$

$$V_S = -(4a_2 + 2a_1 + 1a_0)$$

De red de conmutadores:



Abajo, se tiene una realización práctica con conmutadores MOS. Sería el conversor digital-analógico de dos bits (A y B). Las tensiones analógicas se pueden obtener con el partidor de tensión representado a la derecha.

