

## CONVERSIÓN DE DATOS

Los sistemas digitales, principalmente aquellos basados en microprocesadores, poseen una gran capacidad de cálculo y procesamiento de datos. Estos sistemas intervienen en el control de diversas maquinarias, automóviles, equipos de medición, etc. Estas aplicaciones requieren la entrada de cantidades o variables físicas tales como temperatura, fuerza, voltaje, en forma de datos en tiempo real que pueden o no variar en el tiempo de manera continua. Por otra parte, los sistemas digitales también requieren convertir los datos del mundo digital al mundo real. Por todo esto, el proceso de conversión de señales es esencial en la interconexión de dispositivos o componentes analógicos y digitales.

Los circuitos de conexión entre componentes que procesan diferentes señales son denominados en forma general circuitos o sistemas de interfaz. La tarea específica de convertir señales analógicas en digitales es realizada por los convertidores de señal analógica a digital (A/D), abreviado ADC (Analogue to Digital Converter), mientras que los convertidores de señal digital a analógica (D/A) o DAC, efectúan la tarea inversa.

Se puede pensar que el uso de sistemas electrónicos de computo o cualquier otro sistema digital presenta una alta exactitud y precisión, esto de hecho no es así; tal como la precisión de una medida depende de la escala del instrumento de medición, la exactitud o apreciación (resolución) del sistema digital depende del número de bits o tamaño de las palabras digitales con que el sistema represente las cantidades que procesa. Por tanto, la cantidad de bits de la conversión A/D y D/A y su principio de funcionamiento conllevan la exactitud de un sistema digital en relación con el mundo real.

### 6.1. CONVERTIDORES D/A

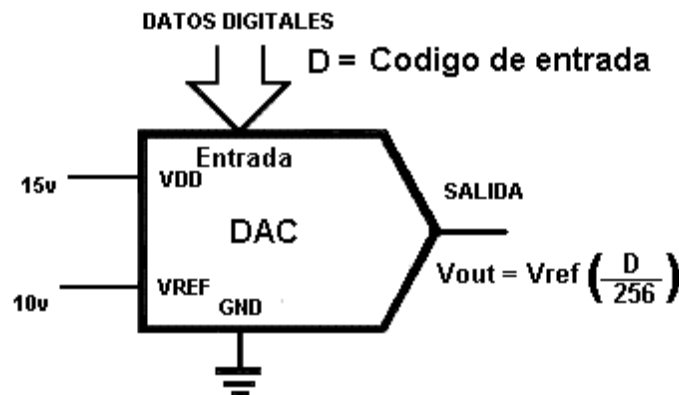
Un convertidor digital a analógico o DAC, es un dispositivo que convierte los datos digitales en señales de corriente o de tensión analógica. Los DAC se utilizan en los reproductores de discos compactos (CD), en los reproductores de sonido y de cintas de vídeo digitales, y en los equipos de procesamiento de señales digitales de sonido y de vídeo.

La mayoría de los DAC utilizan alguna forma de red resistiva. Los datos digitales que se aplican a la red varían la conexión de resistencias en proporciones definidas

de tal manera que el flujo de corriente o el voltaje en la salida esté directamente relacionado con el valor binario recibido.

### 6.1.1.PRINCIPIOS DE LA CONVERSIÓN D/A

En la figura 6-1 se muestra el símbolo típico del convertidor D/A, en este caso de 8 bits. Como se mencionó, un convertidor D/A genera una salida analógica (voltaje o corriente) que es proporcional a una señal binaria o palabra digital.



**Figura 6-1 Símbolo del Convertidor D/A (8 bits)**

La función de transferencia ideal de un convertidor D/A debería ser una línea recta con un infinito número de escalones o pasos, pero en la práctica es un conjunto de puntos sobre la línea recta ideal, tal como se indica en la figura 6-2. La conversión D/A representa la correspondencia (dominio y rango) de un limitado número de códigos o palabras binarias (entradas discretas) con un número específico de valores analógicos (salidas discretas). Por tanto, la función de transferencia de un DAC es la que se esboza en la figura 6-2.

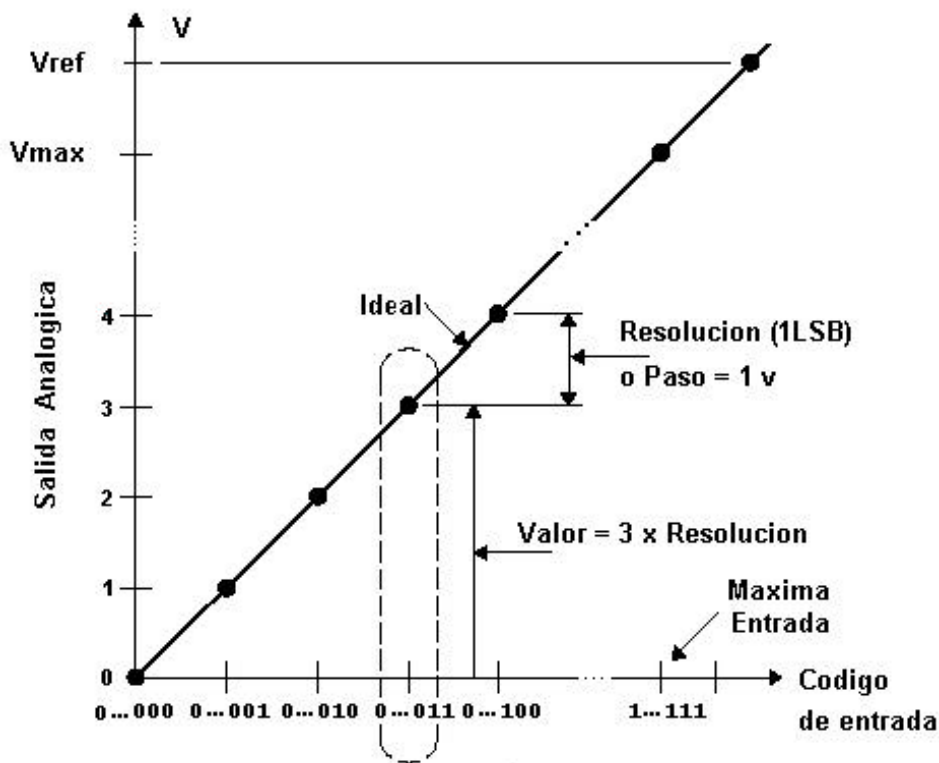


Figura 6-2 Función de transferencia de un DAC

### 6.1.2.TERMINOLOGÍA DE LA CONVERSIÓN D/A

En los convertidores D/A, **1 LSB** se conoce como el **valor analógico** que corresponde al bit menos significativo y corresponde a la altura o diferencia de un escalón entre sucesivas salidas analógicas. Este valor analógico se denomina **resolución** o paso del convertidor.

El voltaje **VFS** o **FS** es el denominado voltaje a máxima escala (full scale analog voltage) y corresponde al voltaje de salida de la máxima entrada digital, siendo el máximo voltaje real de salida del dispositivo o **Vmax**.

El voltaje **Vref** es la referencia utilizada por el DAC para generar la salida analógica, este voltaje debe ser preciso y estable. Se debe notar que:

$$VFS = VREF - \text{Resolución.}$$

En la práctica, la salida de un DAC en respuesta a una entrada se aparta del valor ideal; y se espera que se aproxime al valor analógico ideal en  $\pm 1/2 \text{ LSB}$  o menos, lo cual corresponde a la exactitud de la conversión. [5]

### 6.1.3.FUNCIONAMIENTO DE UN DAC

Como lo indica la figura 6-2, se puede ver a un DAC como un dispositivo multiplicador que posee la función de transferencia:

$$V_{out} = G_v \times D, \quad \text{o bien:} \quad I_{out} = G_i \times D$$

Donde la ganancia (G) es la pendiente de la curva (amplitud entre el número de pasos). El dato o valor binario puede ser un valor entero o fracción presentándose entonces formulas diferentes para la salida.

Entonces, si el dato es un número entero:

$$V_{out} = \frac{VFS}{(2^n - 1) \text{ pasos}} (D)_{10}, \quad I_{out} = \frac{IFS}{(2^n - 1) \text{ pasos}} (D)_{10}$$

Donde la entrada es el valor de la palabra o dato binario D en el sistema numérico decimal y VFS o IFS los valores máximos de la salida correspondiente a la máxima entrada.

También se puede expresar la salida como:

$$V_{out} = \frac{V_{ref}}{2^n} (D)_{10}$$

La resolución o paso corresponde al valor de salida para el LSB:

$$Resolución = V_{out}(1) - V_{out}(0)$$

$$Resol = (1/2^n) \times V_{ref}$$

Entonces:

$$V_{out} = Resolución \times (D)_{10}$$

Esto indica que el voltaje máximo de salida es una resolución menor al voltaje de referencia, es decir:

$$V_{out \text{ max}} = VFS = V_{ref} - Resolución.$$

$$V_{max} = \frac{2^n - 1}{2^n} V_{ref}$$

En el caso de una entrada expresada como fracción, la salida será simplemente:

$$V_{out} = D \times V_{ref}$$

Donde la entrada D está en forma de fracción.

La tabla 6-1 muestra los diferentes valores del voltaje de salida de un DAC de 8 bits.

ENTRADA DEL DAC (BIN)	VOLTAJE DE SALIDA ANALOGICO(v)
11111111	+VREF (255 / 256)
10000001	+VREF (129 / 256)
10000000	+VREF (128 / 256)
01111111	+VREF (127 / 256)
00000001	+VREF (1 / 256)
00000000	0 V

**Tabla 6-1 Salida de un DAC de 8 bits**

### EJEMPLO 6-1

Sea el voltaje de referencia de un DAC de 8 bits 10,24 voltios. Determine la resolución, la salida máxima y la salida a "media escala" cuando  $D = (10000000)_2$ .

Solución:

La salida puede ser representada como:

$$V_{out} = (V_{ref}/256) \times D.$$

$$\text{Resolución} = V_{ref} / 256.$$

$$\text{Resolución} = 40 \text{ mv}.$$

Si la entrada es máxima  $D = (11111111)_2$  o  $(D)_{10} = (255)_{10}$ , entonces:

$$V_{out \text{ max}} = V_{out}(255) = (255)_{10} \times (V_{ref}/256).$$

$$V_{out \text{ max}} = 40\text{mv} (255) = 10,2 \text{ v}.$$

Cuando  $D = (10000000)_2$  o  $(D)_{10} = (128)_{10}$ , entonces:

$$V_{out}(128) = (128)_{10} \times 40 \text{ mv} = 5,12 \text{ v}.$$

### EJEMPLO 6-2

Se realizará el ejemplo 6-1 expresando los datos en forma de fracción.

La resolución corresponde al valor de salida para el LSB, es decir:

$$\text{LSB: } D = (0,00000001)_2 \text{ o } D = (1/256)_{10}:$$

$$\text{Resolución} = (1/256) \times V_{ref}.$$

La salida máxima. corresponde a la entrada máxima, la cual es en este caso:

$$D = (0,11111111)_2.$$

$$V_{out\ max} = (0,11111111) V_{ref} \text{ o } V_{out\ max} = (255 / 256) V_{ref}.$$

La salida a "media escala" corresponde a la entrada en fracción:

$$D = (0,10000000) \text{ o } D = (128/256)_{10}$$

$$V_{out} = (0,10000000) V_{ref} \text{ o } V_{out} = (128 / 256) 10,24 = 5,12v$$

### 6.1.4.CONVERTIDOR D/A CON RED BINARIA

En la figura 6-3 se esboza el circuito básico (8 bits) de un DAC tipo red binaria. Cada una de las resistencias posee un valor o peso fijo que es potencia en base 2. La resistencia de valor  $R$  corresponde al bit más significativo MSB, mientras que la resistencia del bit LSB posee el valor de  $2^{n-1}R$ . Aunque no se muestra, cada bit del dato de entrada determina la posición del interruptor correspondiente, de manera que al tomar el bit el valor de uno la resistencia asociada es conectada al voltaje de referencia incrementando así la salida.

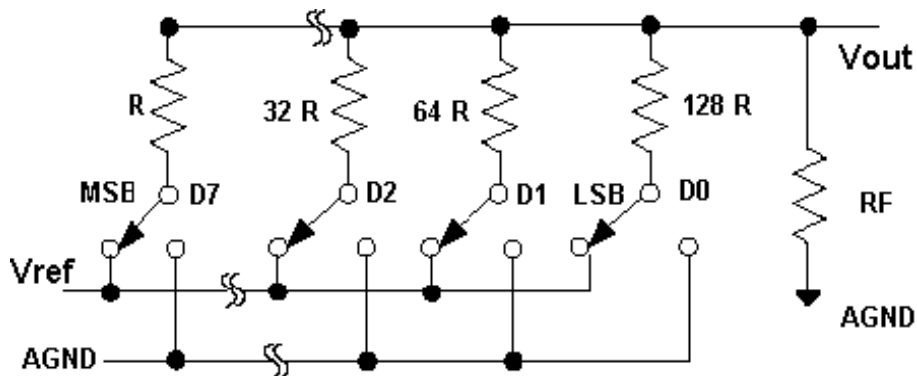


Figura 6-3 Convertidor D/A de red binaria *Fuente: Maxim Integrated Products*

Se puede demostrar que la salida analógica es en general: [7]

$$V_{out} = \frac{V_{ref}}{2^{n-1} \frac{R}{RF} + 2^n - 1} (D)$$

Donde  $n$  es el número de bits de la entrada digital y  $D$  la entrada en decimal.

El voltaje de salida es proporcional al número binario expresado en el sistema decimal.

En el caso  $R_F = 2^{n-1}R$  tenemos la ecuación de salida del DAC:

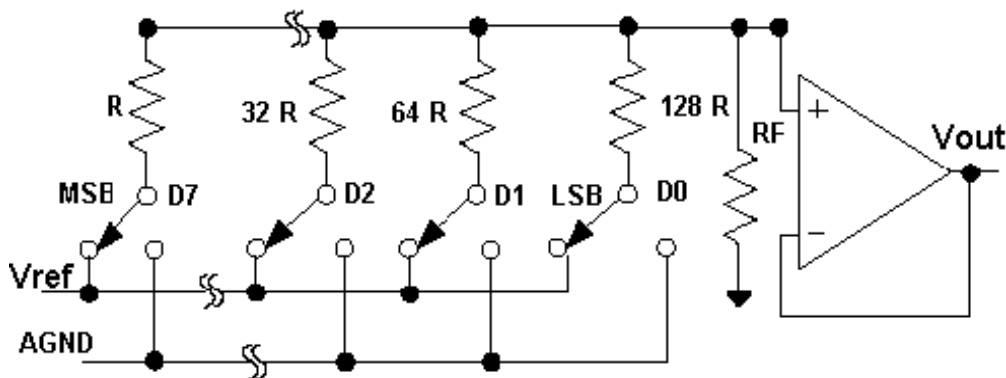
$$V_{out} = \frac{(D)}{2^n} V_{ref}$$

En la figura 6-4 se muestra un DAC práctico de 8 bits. Si la entrada digital es:

$$D = (D7 D6 D5 D4 D3 D2 D1 D0)_2$$

La salida será:

$$V_{out} = V_{ref} \left( \frac{D7}{2} + \frac{D6}{4} + \frac{D5}{8} + \frac{D4}{16} + \frac{D3}{32} + \frac{D2}{64} + \frac{D1}{128} + \frac{D0}{256} \right)$$



**Figura 6-4 Convertidor D/A de red binaria práctico (8 bits)**

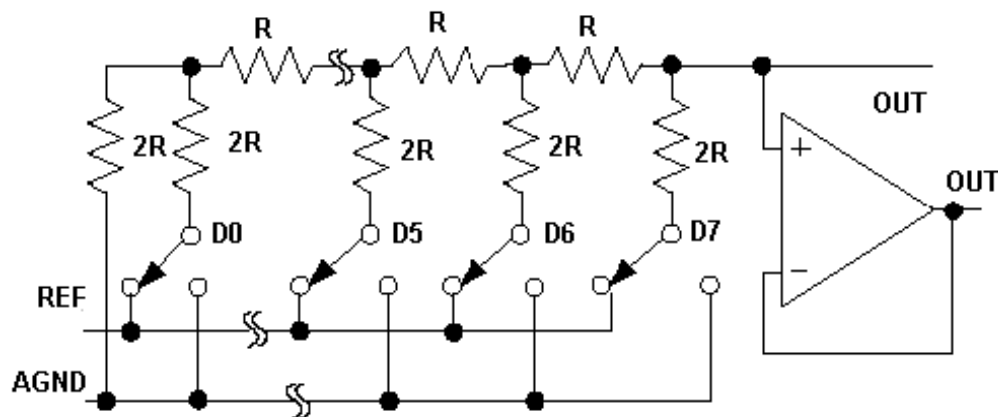
El amplificador operacional del circuito de la figura 6-4 permite una baja impedancia de salida y el aislamiento de la red de resistencias lo que evita problemas de acoplamiento y una mayor rapidez de cambio en la salida. Las ventajas del circuito son la simplicidad y facilidad de calibración.

Para obtener una exactitud menor de  $(+/-) 1/2$  LSB la menor resistencia de la red (MSB) debe ser la más exacta y deberá tener una exactitud de  $(+/-) R (1/2^{n+1})$ . La mayor desventaja de este convertidor es que los valores de resistencia se extienden en un rango muy amplio. Por ejemplo, para un DAC de 12 bits el rango de resistencias podría ir desde  $10K\Omega$  ( $R$ ) hasta  $40M\Omega$  ( $4096R$ ), lo cual no es práctico en la fabricación de circuitos integrados debido a problemas de exactitud en las resistencias.

### 6.1.5.CONVERTIDOR D/A CON RED R-2R

El convertidor D/A basado en la denominada red escalera R-2R, tal como se muestra en la figura 6-5, evita las desventajas del convertidor de resistencias binarias. Debido a que las resistencias R y 2R tienen un valor cercano, estas tendrán coeficientes de temperatura similares y lo más importante, el rango de resistencias 1:2 es fácil de fabricar en procesos de elaboración de circuitos integrados.

Las desventajas de este tipo de circuito es la mayor cantidad de resistencias y la menor respuesta dinámica en comparación con la de red binaria.



**Figura 6-5 Convertidor D/A de red escalera R-2R Fuente: Maxim Integrated Products**

La salida se puede calcular teniendo en cuenta la estructura repetitiva de la red. Cada resistencia R ve a su izquierda una resistencia de igual valor R, estas forman una resistencia de valor  $2R$  que aparece en paralelo con una resistencia  $2R$  para dar así una resistencia equivalente a  $R$ . La resistencia de salida de la red es, por tanto, de valor  $R$ .

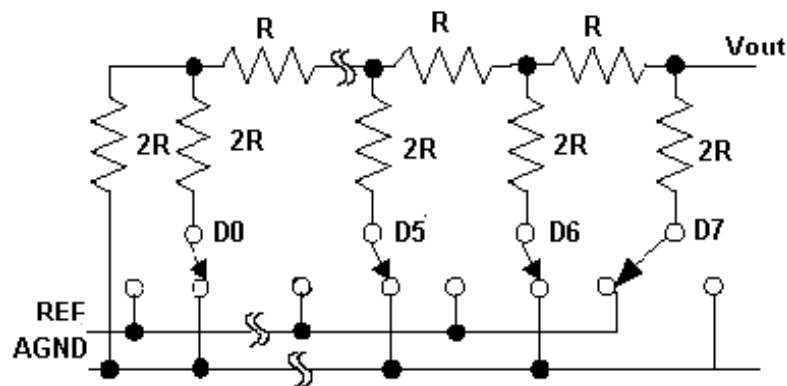
Calculando, a modo de ejemplo, la contribución en la salida debida al interruptor del bit D7 (MSB) tenemos que el circuito es el indicado en la figura 6-6. Puesto que la red es lineal se puede aplicar superposición y tener en cuenta el efecto en la salida de cada uno de los interruptores:

$$V(\text{MSB}) = V_{\text{out}}(128) = V_{\text{ref}}/2$$

Lo cual es consistente, ya que con  $n = 8$  bits y  $D = (10000000)_2$  se tiene de la formula general de un DAC:

$$V_{\text{out}}(\text{MSB}) = V_{\text{out}}(128) = V_{\text{ref}} (128/256) = V_{\text{ref}}/2$$





**Figura 6-6 Convertidor D/A R-2R con  $D = (10000000)_2$**

La resolución o paso del DAC está dada por el valor analógico del bit LSB:

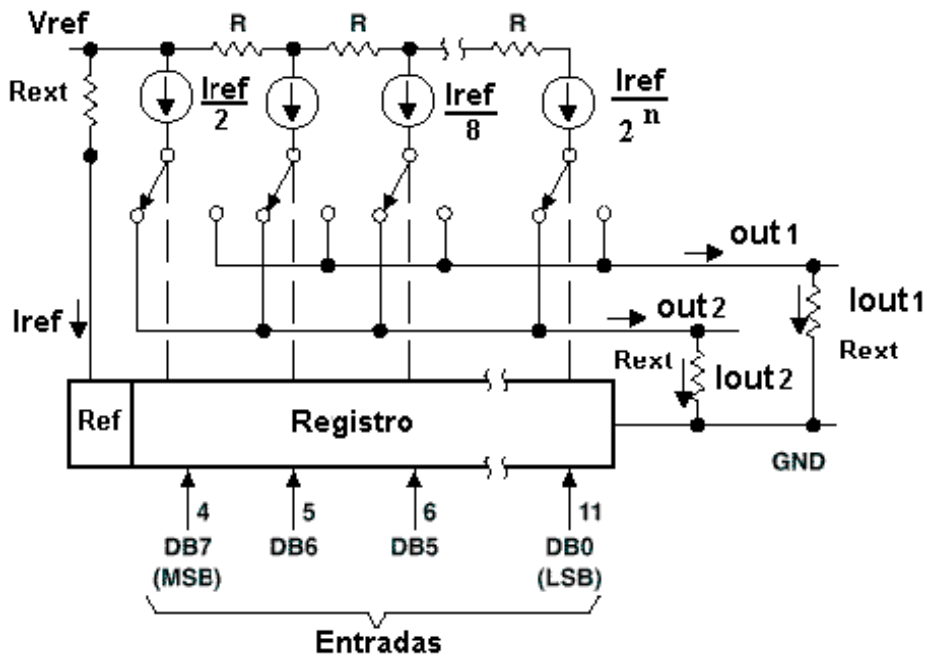
$$V_{LSB} = V_{out}(1) = V_{ref}/256$$

Algunos DAC combinan el principio de red binaria con el de red R-2R eliminando la necesidad de resistencias con valores de hasta  $2^{n-1}R$ . En este método la red básica es una red binaria de 4 resistencias ( $R$ ,  $2R$ ,  $4R$  y  $8R$ ) que se conecta con otras redes idénticas a través de resistencias.

## 6.1.6.CONVERTIDORES D/A CON SALIDA DE CORRIENTE

### *Convertidor con fuentes de corriente*

Existen convertidores D/A cuya salida es en corriente, en la figura 6-7 se presenta el circuito base de este tipo de DAC. El convertidor consta de fuentes de corriente, ocho en este caso, un registro para mantener los datos de entrada, interruptores análogos accionados por los bits de la entrada y dos salidas OUT1 y OUT2. Puesto que el circuito genera corriente hacia las salidas, es necesario conectar estas a tierra con el fin de obtener corrientes o voltajes de salida. Cuando el bit de entrada es uno el interruptor asociado conduce la corriente hacia la salida OUT1; caso de ser cero, la conduce a la salida OUT2.



**Figura 6-7 Convertidor D/A con salida de corriente**

Las fuentes de corriente son fuentes dependientes y su valor es función de la corriente de referencia  $I_{ref}$  a través de la entrada de referencia. Por ser esta entrada una tierra virtual  $I_{ref}$  está dada por:

$$I_{ref} = V_{ref} / R_{ext}$$

El valor de corriente de cada una de las fuentes es una fracción (peso binario) de la corriente de referencia de forma tal que la corriente en la salida OUT1 es:

$$I_{out1} = I_{ref} \left( \frac{D7}{2} + \frac{D6}{4} + \frac{D5}{8} + \frac{D4}{16} + \frac{D3}{32} + \frac{D2}{64} + \frac{D1}{128} + \frac{D0}{256} \right) = \frac{(D)_{10}}{256} I_{ref}$$

En general:

$$I_{out1} = \frac{(D)_{10}}{2^n} I_{ref}$$

La resolución del circuito es:

$$Res = \frac{1}{2^n} \left[ \frac{V_{ref}}{R_{ext}} \right] = \frac{I_{ref}}{2^n}$$

y

$$I_{out1} = Resolución \times (D)_{10}$$

Si denominamos  $I_{max}$  a la suma de todas las corrientes tenemos que:

$$I_{max} = \frac{2^{n-1}}{2^n} I_{ref}$$

Puesto que la suma de todas las corrientes debe ser igual a la suma de las corrientes en las dos salidas, se tiene:

$$I_{out2} = I_{max} - I_{out1}$$

En la figura 6-8 se observa el símbolo utilizado en la representación de un DAC con salida de corriente. En la literatura a veces se denota  $I_{out1}$  como  $I_{out}$ , mientras que  $I_{out2}$  se denomina  $\overline{I_{out}}$ .

La cualidad más importante de este tipo de convertidor es su velocidad, esto es debido a que las fuentes de corriente no cambian su magnitud sino la carga a través de la cual drenan al común; este cambio o desviación puede efectuarse a alta velocidad.

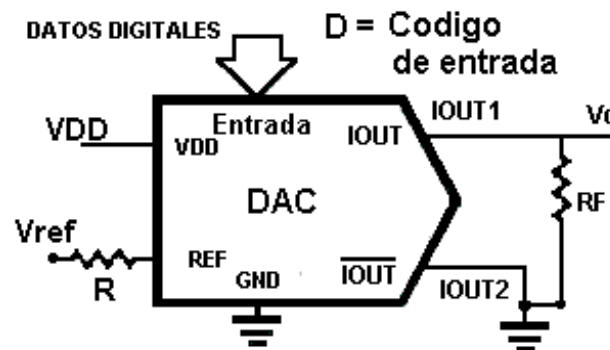
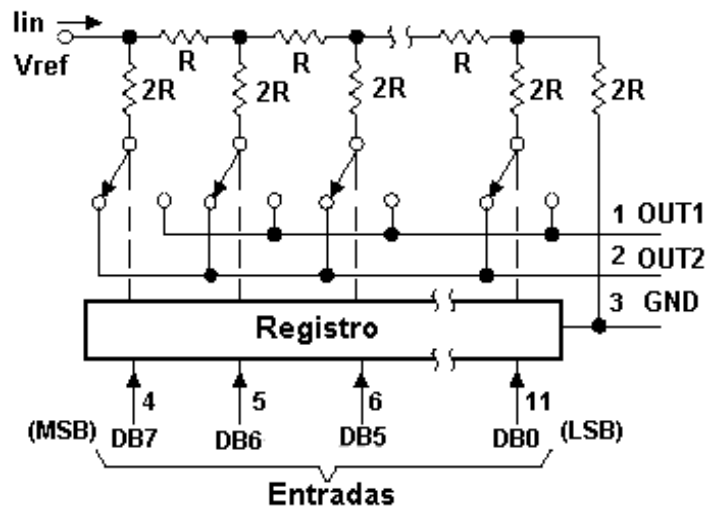


Figura 6-8 Símbolo del DAC con salida de corriente

### Convertidor de corriente con red resistiva

Los DAC con salidas de corriente pueden también ser fabricados utilizando solamente redes de resistencia con la condición de tener en cuenta el efecto de la carga que se conecte. En la figura 6-9 se puede ver el esquema básico de un DAC de este tipo. Estos DAC están formados por una red R-2R invertida, interruptores análogos y un registro de datos de entrada. Las corrientes establecidas en cada rama 2R son corrientes de valor con peso binario, y son desviadas entre las líneas OUT1 y OUT2 por los interruptores, manteniendo así una corriente constante en cada rama, independientemente de la posición de cada interruptor.



**Figura 6-9 DAC con salida de corriente tipo red resistiva Fuente: Idem**

La corriente de entrada a la red desde  $V_{ref}$  es  $I_{in} = V_{ref}/R$ . Debido a que en la resistencia terminal  $2R$  pasa constantemente una corriente  $I_{in}/2$ , la suma de todas las corrientes a través de los interruptores será siempre:

$$I_{total} = I_{ref} = I_{in}/2 = V_{ref}/(2R)$$

Con todas las entradas en valor cero, la corriente de las ramas ( $I_{ref}$ ) es desviada hacia la salida OUT2 por lo que  $OUT1 = 0$  Amp. Si todas las entradas están en valor uno la corriente  $I_{ref}$  es desviada hacia la salida OUT1. Por tanto, dependiendo de la posición de los interruptores o entrada digital:

$$I_{out1} = \frac{(D)_{10}}{2^n} I_{ref}$$

La desventaja de este tipo de convertidor es que el efecto de carga se debe superar, de ser necesario, con el uso de circuitos externos de aislamiento. Otra ventaja a parte de su simplicidad es la posibilidad de trabajar con el convertidor en modo de salida a voltaje. Si se coloca un voltaje  $V_I$  en el terminal de salida de corriente se dispondrá de una salida de voltaje analógica en el terminal de entrada del voltaje de referencia.

### EJEMPLO 6-3

Sea un DAC de 8 bits con salida a corriente (figura 6-8) en el cual:

$V_{ref} = 10$  voltios y  $R = 5 \text{ k}\Omega$ .

Calcule la corriente máxima de salida y la resolución del convertidor. Calcule la corriente en la salida OUT2 y el número binario de entrada si la corriente en la salida OUT1 es 0,35 mA.

Solución:

$I_{max} = I_{ref} (255/256)$ ;  $I_{ref} = V_{ref} / R$  y Resolución =  $I_{ref} / 256$

$I_{ref} = 2\text{mA}$ .  $I_{max} = 1,9922 \text{ mA}$ .

Resolución = 7,8  $\mu\text{A}$ .

$I_{max} = I_{out1} + I_{out2}$

Para  $I_{out1} = 0,35 \text{ mA}$ , entonces:  $1,9922 \text{ mA} = 0,35 \text{ mA} + I_{out2}$

$I_{out2} = 1,65 \text{ mA}$ .

$I_{out1} = I_{ref} (D/256)$ , por tanto,  $D = 256 (0,35 \text{ mA}) / 1,9922 \text{ mA}$ .

$D = 45 = (00101101)_2$

### EJEMPLO 6-4

Sea un DAC de 8 bits como el de la figura 6-8, en el cual  $V_{ref}$  y  $R$  son tales que  $I_{ref} = 2,048 \text{ mA}$  y  $R_F = 5 \text{ k}\Omega$ .

Calcule el voltaje máximo de salida, la resolución del voltaje de salida y el voltaje si la entrada es  $D = (10000000)_2$ .

Solución:

$V_{max} = I_{max} R_F = I_{ref} (255/256) R_F$

$V_{max} = 10,2$  voltios

Resolución (voltios) =  $R_F (I_{ref}/256)$

Resolución = 40 mv.

$V_o = \text{resolución} (D)_{10}$ ;  $D = (10000000)_2$ .

$V_o = 40 \text{ mv} (128)_{10} = 5,12 \text{ v}$

### 6.1.7.CONVERTIDORES D/A BIPOLARES

En la conversión de señales binarias con signo (números positivos y negativos) es conveniente el uso de DACs bipolares. En la figura 6-10, se observa un convertidor bipolar con base en un DAC (con salida en corriente) y un circuito de conversión a voltaje. El circuito de conversión corriente a voltaje permite obtener una salida  $V_o$  proporcional a la diferencia de las corrientes de salida del DAC  $I_{out1}$  e  $I_{out2}$ . [10]

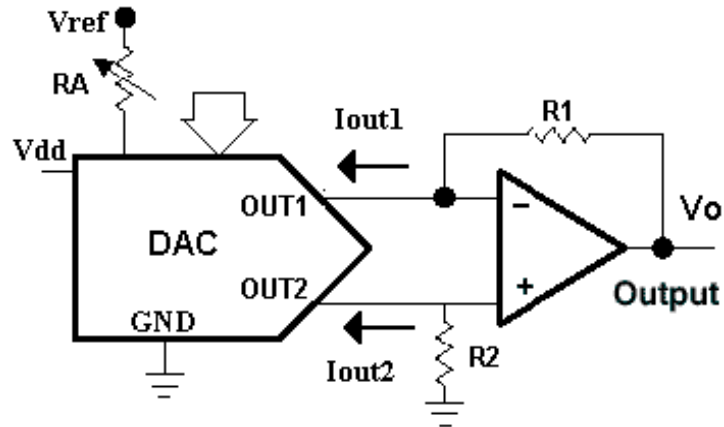


Figura 6-10 Convertidor con salida bipolar

Para el circuito de la figura 6-10 se tiene:

$$I_{out1} = \frac{(D)_{10}}{2^n} I_{ref}$$

$$I_{out2} = I_{max} - I_{out1}$$

$$D' = D_{max} - D,$$

Por tanto:

$$I_{out2} = \frac{(D')_{10}}{2^n} I_{ref}$$

Del circuito:

$$I_{ref} = V_{ref}/R_A$$

$$V_o = R_A (I_{out1} - I_{out2}) \text{ y}$$

Con:  $R_1 = R_2 = R_A$

tenemos:

$$V_o = \frac{(D)_{10} - (D')_{10}}{2^n} V_{ref}$$

En la tabla 6-2 se muestran los valores de salida para el circuito cuando:

$V_{ref} = 10,24$  y  $R_A = 5 \text{ k}\Omega$ .

$I_{ref} = 2,048 \text{ mA}$

La resolución o paso de la salida  $V_o$  es:

Resolución =  $V_{LSB} = V(2) - V(1) = + 80 \text{ mv}$

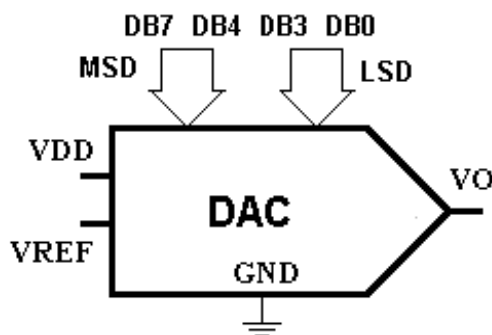
Es de notar que en este circuito no hay un valor de entrada en el cual la salida tome el valor de  $V_o = 0 \text{ v}$ .

ENTRADA DIGITAL			SALIDA ANALOGICA	
(BIN)	D	D'	$V_o$	$V_{ref} = 10,24$
0 0 0 0 0 0 0 0	0	255	- 255/256 $V_{ref}$	-10,20
0 0 0 0 0 0 0 1	1	254	- 253/256 $V_{ref}$	-10,12
0 0 0 0 0 0 1 0	2	253	- 251/256 $V_{ref}$	-10,04
0 1 1 1 1 1 1 1	127	128	- 1/256 $V_{ref}$	- 0,04
1 0 0 0 0 0 0 0	128	127	+ 1/256 $V_{ref}$	+ 0,04
1 0 0 0 0 0 0 1	129	126	+ 2/256 $V_{ref}$	+ 0,08
1 1 1 1 1 1 1 1	255	0	+ 255/256 $V_{ref}$	+ 10,20

**Tabla 6-2 Salida del convertidor bipolar**

### 6.1.8.CONVERTIDORES D/A BCD

En la figura 6-11 se presenta el símbolo de otro tipo de convertidor D/A, aquel en que el código de las entradas digitales es BCD. Debido a la característica del código las posibles combinaciones utilizables de las entradas son  $10^n$ , donde n es el número de dígitos decimales codificados en binario. En el caso de dos dígitos de entrada, cada uno de 4 bits, hay 100 posibles combinaciones para las entradas (00 al 99) por lo que en la conversión deben existir 99 escalones o pasos. [2]



**Figura 6-11 Convertidor D/A BCD de dos dígitos**

Así en general la salida es:

$$V_o = \frac{(D)_{10}}{10^n} V_{ref}$$

$$\text{Resolución} = V_{ref}/10^n$$

La salida máxima es:

$$V_{max} = (10^n - 1) \times \text{Resolución}$$

$$V_o = \text{Resolución} \times (D)_{10}$$

En la tabla 6-3 se presentan dos tablas de conversión D/A con entradas BCD de dos (2) dígitos. Es de notar que en el caso de dos dígitos BCD de 6 bits, el dígito más significativo (MSD) solo posee dos bits para codificar el decimal y, por tanto, el máximo número que puede representar es el tres (3) decimal.

CONVERSIÓN BCD DE 8 BITS			CONVERSIÓN BCD DE 6 BITS		
MSD 4 bits 1/10	LSD 4 bits 1/100	SALIDA Resol = Vref/100 (99 Pasos)	MSD 2 bits 1/10	LSD 4 bits 1/100	SALIDA Resol = (1/40)Vref (39 Pasos)
0	0	0	0	0	0
0	1	Vref/100	0	1	1/40 Vref
5	4	(54/100) Vref	2	5	25/40 Vref
9	9	(99/100) Vref	3	9	(39/40) Vref

**Tabla 6-3 Salidas de convertidores D/A BCD**

## 6.2. CONVERTIDORES A/D

El convertidor analógico digital, abreviado ADC, es un circuito electrónico que convierte una señal analógica en digital. Se utiliza en equipos electrónicos como ordenadores o computadoras, grabadores digitales de sonido o vídeo y equipos de comunicaciones. En este tipo de conversión, la señal analógica se conecta a la entrada del dispositivo y se somete a un muestreo y una cuantificación discreta (asignación de un valor numérico digital a las muestras de la señal) a una velocidad fija, obteniéndose así una señal digital a la salida.

Algunos autores a veces hablan de la conversión A/D como codificación (encoding) puesto que la información analógica se está transformando en información digital. En forma general el proceso de conversión A/D es conocido como Adquisición de Datos o DAQ.

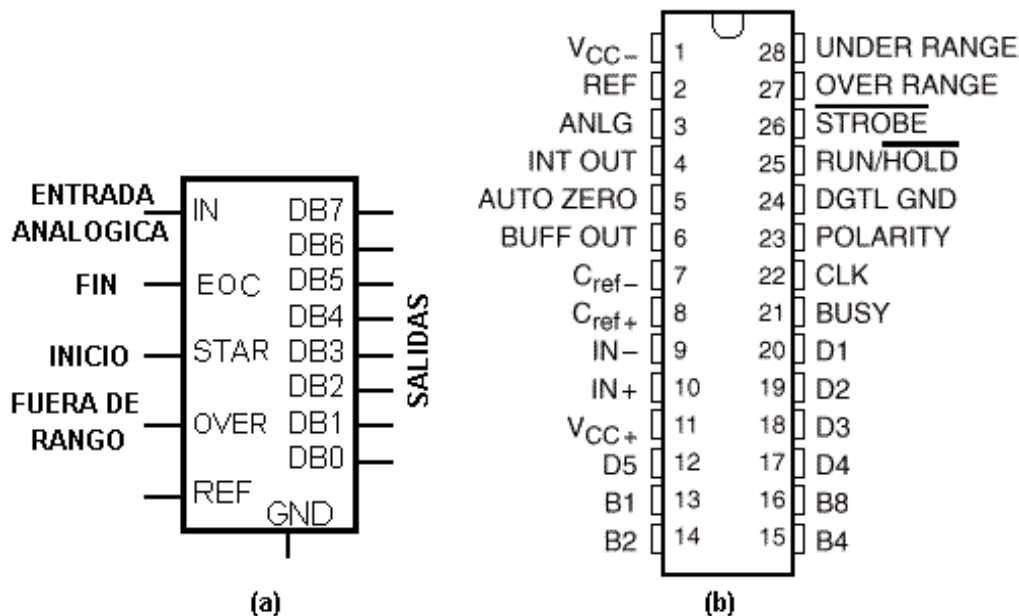


### 6.2.1.PRINCIPIOS DE LA CONVERSIÓN A/D

La figura 6-12 se presenta el símbolo genérico típico del convertidor A/D y el encapsulado de un ADC comercial. Un convertidor A/D genera un código binario que es la representación de una entrada analógica (voltaje o corriente).

Se observa en la representación de la figura 6-12 las principales señales de control del proceso de conversión, estas son: [5]

- FIN DE CONVERSION (EOC): La activación de esta salida indica la conclusión del ciclo de conversión y la disponibilidad de los datos binarios en la salida.
- INICIO (STAR): Se utiliza para comenzar un ciclo de conversión. Algunas veces se puede conectar a la salida EOC logrando una conversión continua.
- FUERA DE RANGO (OVER): Esta salida es activada por el ADC como indicación de un fallo en el proceso de conversión al pasarse la salida de su máximo.
- VOLTAJE DE REFERENCIA (REF): En esta entrada se requiere un voltaje estable y preciso que el ADC utiliza como patrón en la conversión.



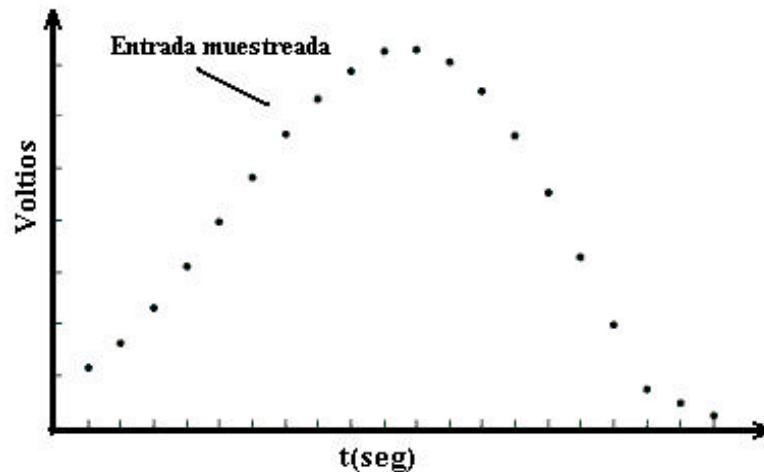
**Figura 6-12 Símbolos de convertidores A/D**

Como se ve en la figura 6-12 un convertidor puede necesitar o suministrar señales adicionales que facilitan la conexión con otros dispositivos como microprocesadores, microcontroladores o circuitos integrados de aplicación específica (ASIC).

La conversión analógica a digital es la base de cualquier sistema de adquisición de datos analógicos. A continuación se presentan los procesos de la conversión A/D como son el muestreo, la retención y la cuantización de la señal analógica.

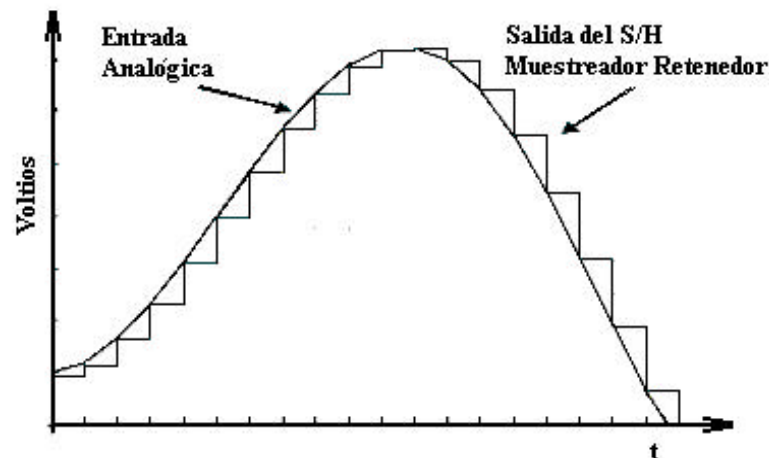
### ***Muestreo y retención de la señal***

Las señales analógicas pueden ser muestreadas (sample) por un circuito analógico con el fin de obtener una onda de salida como la de la figura 6-13, la señal poseerá un rango continuo (puede tomar cualquier valor) pero será discreta en el tiempo (dominio). Tal como se ve en la figura 6-13, el muestreo se realiza a intervalos de tiempo determinados, extrayéndose valores de la señal estudiada. La frecuencia de este muestreo se determina según el teorema de Shannon el cual lo fija en, al menos, el doble de la frecuencia a reconstruir.



**Figura 6-13 Señal analógica muestreada**

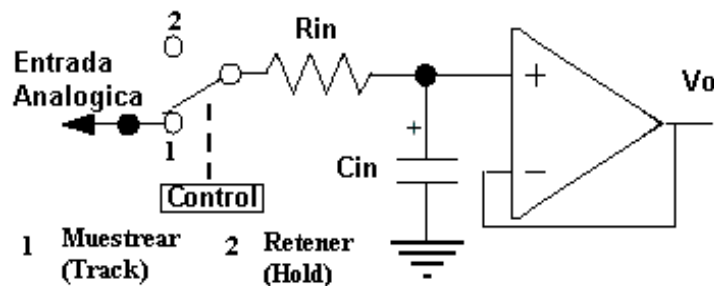
En procesos rápidos o de tiempo compartido, la conversión A/D requiere el uso de interfaces como multiplexores y circuitos retenedores (sample-and-hold). El retenedor (S/H en forma abreviada) toma de manera rápida una señal analógica y la mantiene constante en su salida tal que pueda ser usada por el ADC hasta que la conversión finalice. Entre el S/H y el convertidor A/D se requiere un sincronismo, el cual puede conseguirse mediante una señal que envía el ADC, que avise a los circuitos de captura y mantenimiento cuando tomar otra muestra e iniciar una nueva conversión. En la figura 6-14 se distingue una señal de salida de un retenedor.



**Figura 6-14 Muestreo y retención**

Los circuitos retenedores S/H son amplificadores con dos modos de trabajo definidos por una señal lógica de entrada. En el modo de muestreo (track) se comporta como un amplificador cuya salida sigue al voltaje de entrada; en el modo de retención (hold) la salida se mantiene constante en el valor que tenía justo al final del modo de muestreo, es decir, el circuito se comporta como una memoria analógica.

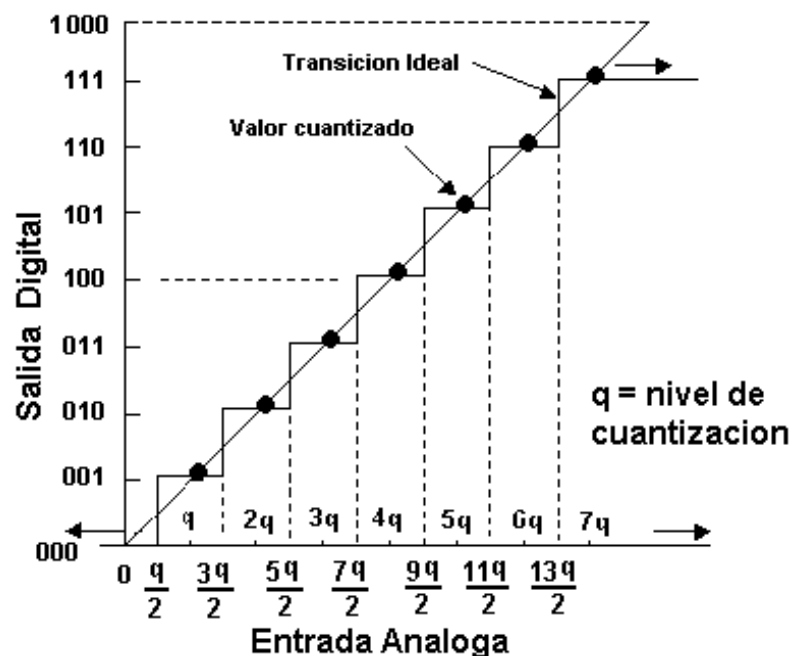
El circuito básico de un S/H se presenta en la figura 6-15. Cuando el condensador es conectado, y los cambios de la entrada son lentos en comparación con la constante RC, el voltaje de salida sigue al de la entrada. Al abrirse el interruptor la salida  $V_o$  se mantiene en su último valor. Los parámetros más importantes son el tiempo de apertura y el tiempo de transición los cuales junto con el tiempo de adquisición o conversión determinan el rango de frecuencia del retenedor.



**Figura 6-15 Circuito básico de un retenedor (S/H)**

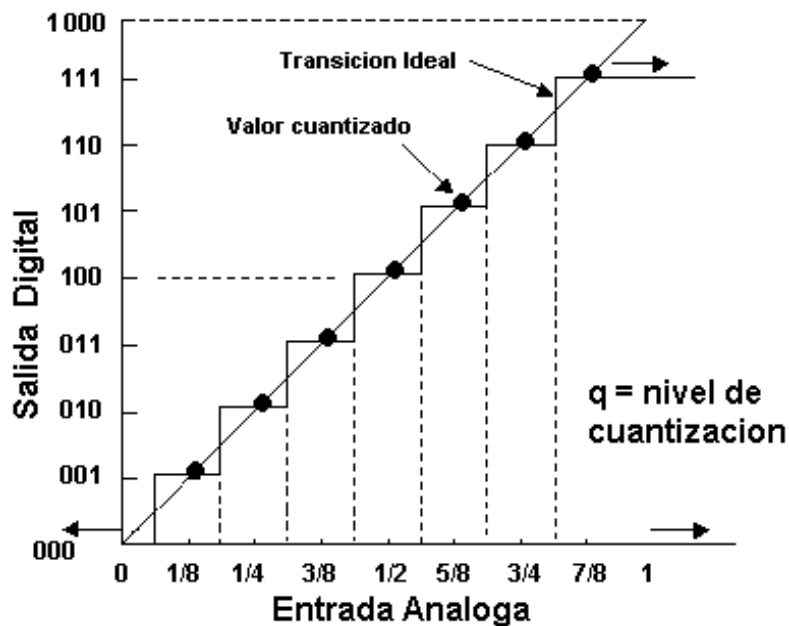
### ***Cuantización y codificación***

Los procesos de cuantización y la codificación pueden ser difíciles de ver separadamente. La función de transferencia ideal de un convertidor A/D, es una línea recta que relaciona la entrada analógica normalizada con la salida digital. Debido al número finito de bits la función de transferencia característica práctica (figura 6-16) es similar a una escalera uniforme. Puesto que la salida digital puede asumir solamente un finito número de valores, es necesario redondear al número digital más cercano el valor analógico de la entrada, esto se conoce como cuantización de la entrada (quantization).



**Figura 6-16 Función de Transferencia Ideal y real de un ADC** *Fuente:* Texas Instruments Inc. Logic Selection Guide and Databook. 2/E, Texas Instruments Inc, Dallas, 1997

Las figura 6-16 y 6-17 ilustran la relación entre una entrada analógica normalizada (positiva) y un código binario de tres (3) bits. La ilustración muestra como cada código digital es asignado a un grupo de valores (analógicos) que son una fracción del rango de entrada analógico ( $V_{ref}$  o FS).



**Figura 6-17 Cuantización de una conversión A/D de tres bits**

Se observa que la señal analógica presenta valores  $q/2$ ,  $q3/2$ ,...Etc., que son niveles de decisión en los cuales ocurre el cambio de la salida digital asignada. El parámetro  $q$  se conoce como nivel de cuantización. En la tabla 6-4 se muestra la asignación o correspondencia de los valores digitales con los analógicos.

ENTRADA	NÚMERO BINARIO			CUANTIZACIÓN
$V_{in}$	MSB (x 4q)	LSB (x 2q)	LSB (x q)	(LSB = $1/8 V_{ref}$ ) Valor Central
$V_{in} \leq 0,5q$	0	0	0	0
$0,5q \leq V_{in} < 1,5q$	0	0	1	$1/8 V_{ref} = q = \text{LSB}$
$1,5q \leq V_{in} < 2,5q$	0	1	0	$1/4 V_{ref} = 2q$
$2,5q \leq V_{in} < 3,5q$	0	1	1	$3/8 V_{ref} = 3q$
$3,5q \leq V_{in} < 4,5q$	1	0	0	$1/2 V_{ref} = 4q$
$4,5q \leq V_{in} < 5,5q$	1	0	1	$5/8 V_{ref} = 5q$
$5,5q \leq V_{in} < 6,5q$	1	1	0	$3/4 V_{ref} = 6q$
$6,5q \leq V_{in} < \infty$	1	1	1	$7/8 V_{ref} = V_{ref} - \text{LSB} = 7q$

**Tabla 6-4 Tabla de cuantización de tres bits**

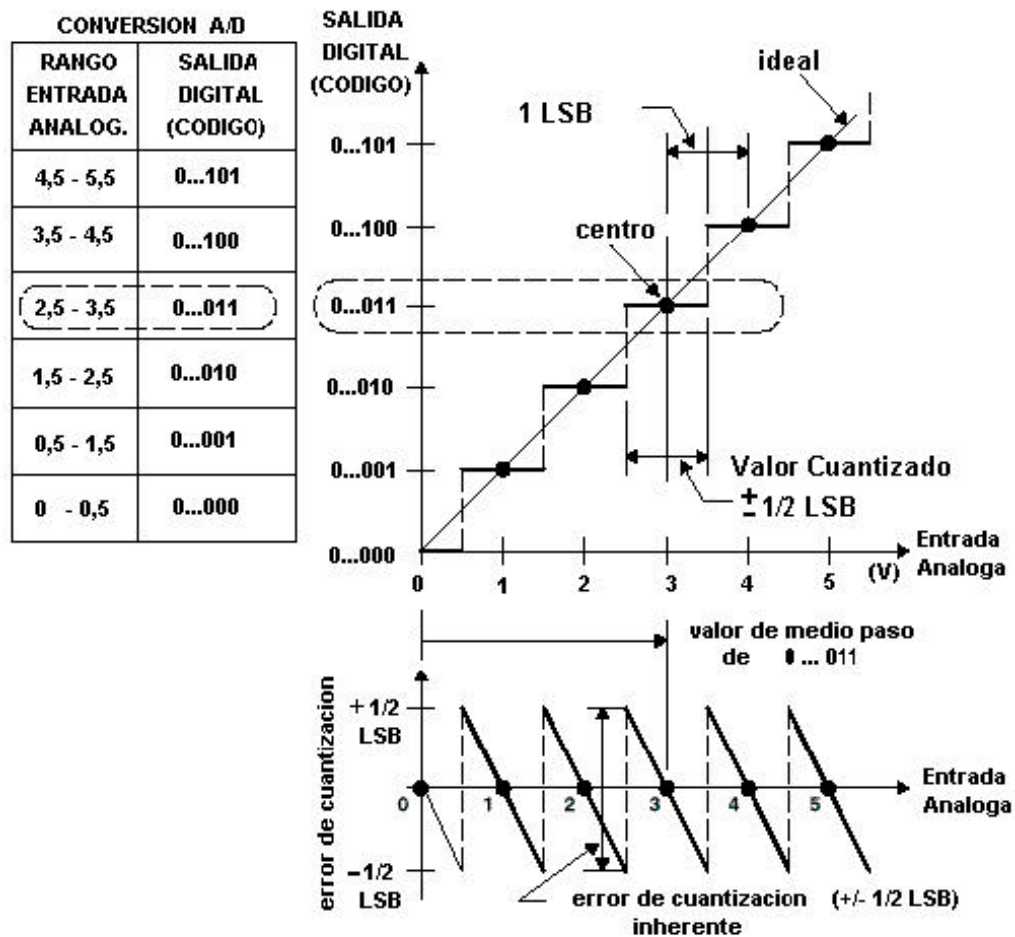
#### □ Resolución analógica

El ancho de un paso analógico ideal es denominado **1 LSB** (figura 6-18) y es usado como unidad de referencia en otros parámetros del convertidor A/D. Puesto que

1 LSB define el número de divisiones o unidades del rango de entrada analógico, es claro que es una medición de la resolución del convertidor.

Es decir, para un ADC de n bits:

$$\text{Resolución Analógica} = 1 \text{ LSB} = V_{\text{ref}} / (2^n - 1)$$



**Figura 6-18 Error del proceso de cuantización Fuente: Idem**

La resolución de un ADC también suele ser expresada como el número de bits de su salida. Un ADC con n bits de resolución tiene  $2^n$  palabras posibles lo cuál define  $2^n$  niveles de paso. Por tanto, el rango de voltaje de entrada es dividido en  $2^n - 1$  valores cuantizados o anchos de paso (step widths).

El proceso de cuantización introduce un error al asignar a una señal analógica en escala continua códigos binarios que son discretos. Cuanto mayor sea el número de palabras o códigos, tanto menor será el correspondiente valor de entrada cuantizado o

ancho del paso (step widths), y la función de transferencia se aproximará a una línea recta ideal. Es de notar que la cuantización es elegida de forma que las transiciones ocurran en la mitad de cada paso o punto central sobre la recta ideal.

#### ❑ **Ruido de cuantización**

La entrada analógica en un ADC es una señal continua con un infinito número de posibles estados, mientras que la salida digital es una función discreta con un número de diferentes estados, determinados por la resolución del dispositivo. De lo anterior se deduce que en la conversión A/D, valores diferentes de la señal analógica serán representados por el mismo código digital en la salida. Es decir, la asignación de códigos introduce distorsión en la conversión por la pérdida de información en la señal, esto es denominado ruido de cuantización.

En un ADC con función de transferencia tipo escalera perfecta, si se asume que la entrada es aleatoria, el error entre la entrada y la salida tendrá una función densidad de probabilidad uniforme la cual variará en el rango  $\pm 1/2$  LSB o  $\pm q/2$ . Entonces, se presenta un error que varia entre  $-q/2$  y  $+q/2$ , tal como se ve en la figura 6-18. El error es cero únicamente donde el código o palabra es absolutamente correcto, es decir, cuando coincide sobre la recta de la función de transferencia ideal.

### **6.2.2.CLASIFICACIÓN DE CONVERTIDORES A/D**

Los convertidores A/D se pueden dividir en dos grandes grupos.

- De bucle abierto.
- Con realimentación.

El convertidor de bucle abierto genera un código digital directamente bajo la aplicación de una tensión en la entrada. Dentro de esta familia podemos distinguir los siguientes tipos de convertidores o principios de conversión A/D:

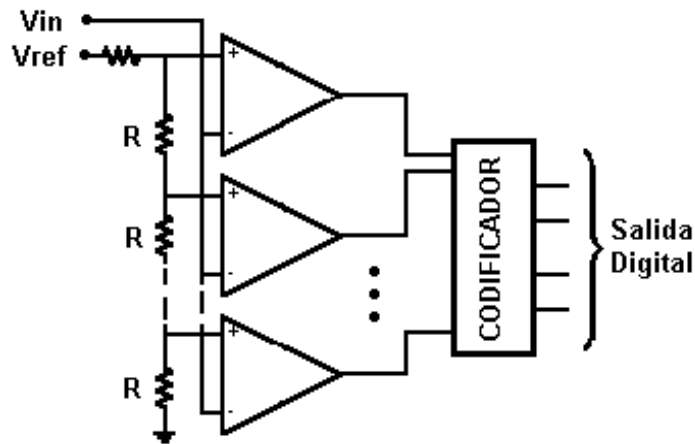
- Conversión paralelo.
- Conversión del voltaje a frecuencia.
- Conversión del voltaje analógico a anchura de impulso.

El convertidor de realimentación genera una secuencia de números digitales, los convierte en un valor analógico y los compara con la entrada, la salida digital resultante será el valor más cercano al hacer la comparación. En este grupo, los tipos más importantes son:

- Doble rampa      - Conteo continuo o tracking      - Conversión no lineal
- Rampa binaria      - De aproximaciones sucesivas      - Rampa de diente de sierra

### ***Convertidor con comparadores (Flash o Paralelo)***

En la figura 6-19 se presenta este tipo de ADC en el cual los procesos de cuantización y decodificación aparecen claramente separados. Se trata de un convertidor de alta velocidad ya que el proceso de conversión es directo; sin embargo, se puede disponer de almacenamiento sincronizado adicional. Su utilidad queda reducida en los casos de baja resolución, pues se necesita gran cantidad de comparadores, lo que lleva a encarecer el circuito si se desea obtener una alta resolución.



**Figura 6-19 Convertidor A/D paralelo o Flash**

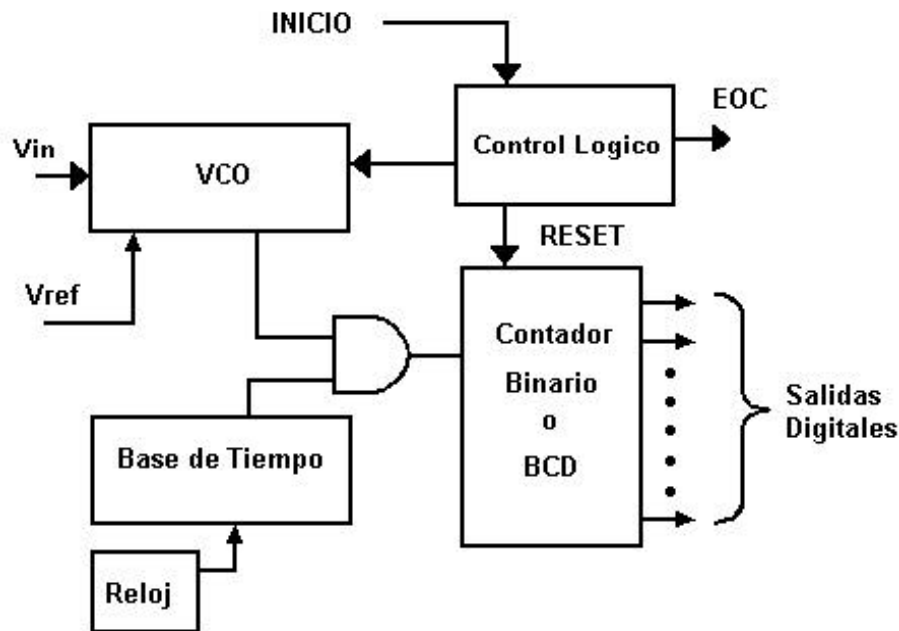
El primer paso se lleva a cabo mediante comparadores que discriminan entre un número finito de niveles de tensión. Estos comparadores reciben en sus entradas la señal analógica, junto con una fracción de la tensión de referencia distinta para cada uno de ellos. Cada comparador cambia su salida cuando la entrada excede su referencia particular. Al estar las tensiones de referencia escalonadas, es posible conocer si la señal de entrada se halla por encima o por debajo de cada una de ellas, lo cual permitirá saber el estado que le corresponde como resultado de la cuantización. Las salidas de los comparadores van a un codificador que produce la señal digital.

### ***Convertidor V/F***

Los convertidores de voltaje a frecuencia pueden ser utilizados como base en la conversión A/D. En el esquema de la figura 6-20 el convertidor V/F transforma la tensión de entrada desconocida en un tren de pulsos cuya frecuencia es proporcional



al voltaje. Utilizando un frecuencímetro con base en un contador se generan palabras binarias que representan el voltaje aplicado. El contador cuenta el número de pulsos recibidos en un periodo de tiempo específico, midiendo la cantidad de pulsos por unidad de tiempo.



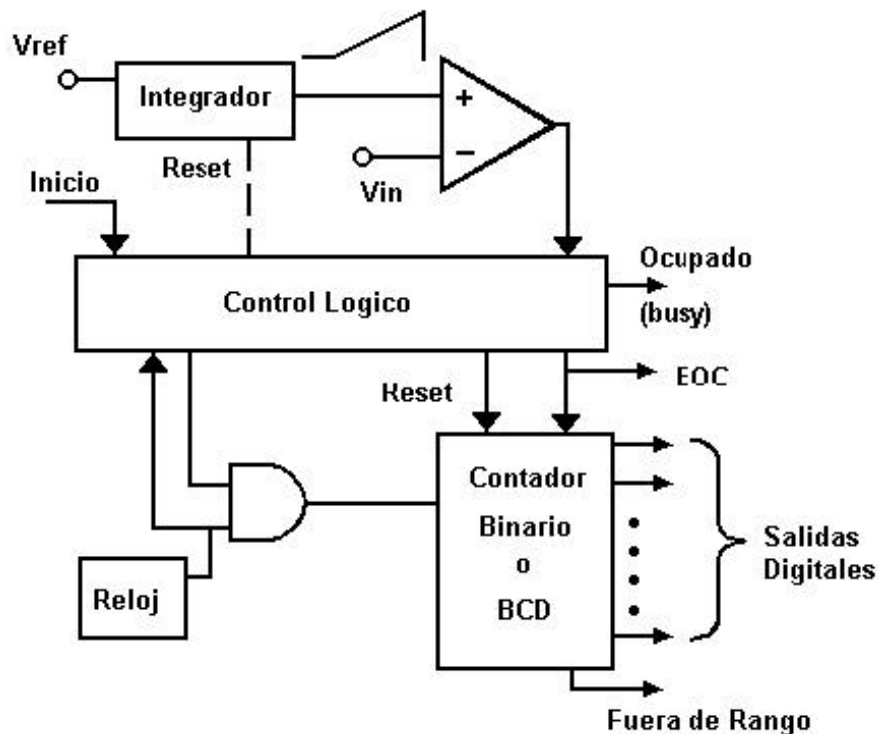
**Figura 6-20 Convertidor A/D Voltaje en Frecuencia**

### ***Convertidor por anchura de impulsos***

En la figura 6-21 se presenta un diagrama del ADC también denominado de rampa simple. Este convertidor transforma la tensión desconocida en un intervalo de tiempo que es medido mediante un reloj y un contador.

Al recibir por la entrada de control la orden de iniciar la conversión, el contador recibe impulsos de frecuencia fija del reloj, al mismo tiempo, inicia la generación de una rampa analógica en función del voltaje de referencia. Este conteo se mantiene hasta que la rampa supere el valor de la entrada analógica, instante detectado por un comparador el cual entonces inhibe o detiene el contador. De esta manera las salidas del contador serán una representación digital función de la tensión de entrada. La rampa debe ser de una duración de  $2^n$  pulsos de reloj para un contador de  $n$  bits; si la tensión de entrada es mayor que la máxima amplitud de la rampa, el comparador no podrá detener el conteo y se activará la señal de fuera de rango (overflow).

Una de las principales limitaciones de este convertidor es la falta de linealidad del generador de rampa, lo que puede provocar que la duración del conteo no sea la correcta; otra deficiencia es la susceptibilidad a las variaciones o ruido en la entrada analógica. Por otra parte, el tiempo de conversión no es fijo sino que está en función de la entrada analógica.



**Figura 6-21 Convertidor A/D por anchura de impulsos o rampa simple**

### ***Convertidor de doble rampa***

Algunas de las limitaciones mencionadas del ADC anterior se pueden evitar con este convertidor, el cual es uno de los más utilizados en la práctica, especialmente en el caso de aplicaciones que requieran gran precisión. La base de funcionamiento de este circuito es un integrador.

La figura 6-22 esboza el esquema básico de este ADC. El proceso de conversión, que se puede entender mejor al ver las gráficas de la figura 6-23, se inicia conectando la tensión de entrada al integrador durante un tiempo fijo denominado intervalo de medición ( $T_1$ ). En este lapso la salida del integrador aumenta hasta alcanzar un valor  $V_{max}$  (este tiempo puede ser aquel en que el contador llega al desbordamiento).

Luego el control lógico aplica la tensión de referencia, de polaridad adecuada, en la entrada del integrador tal que la salida de éste tiende a cero voltios (intervalo de conteo T2). Durante este intervalo, en que se mantiene constante la pendiente de la rampa, son contados los impulsos de reloj, y la cuenta que se alcance en el instante del cruce por cero de la salida del integrador es el número digital equivalente buscado.

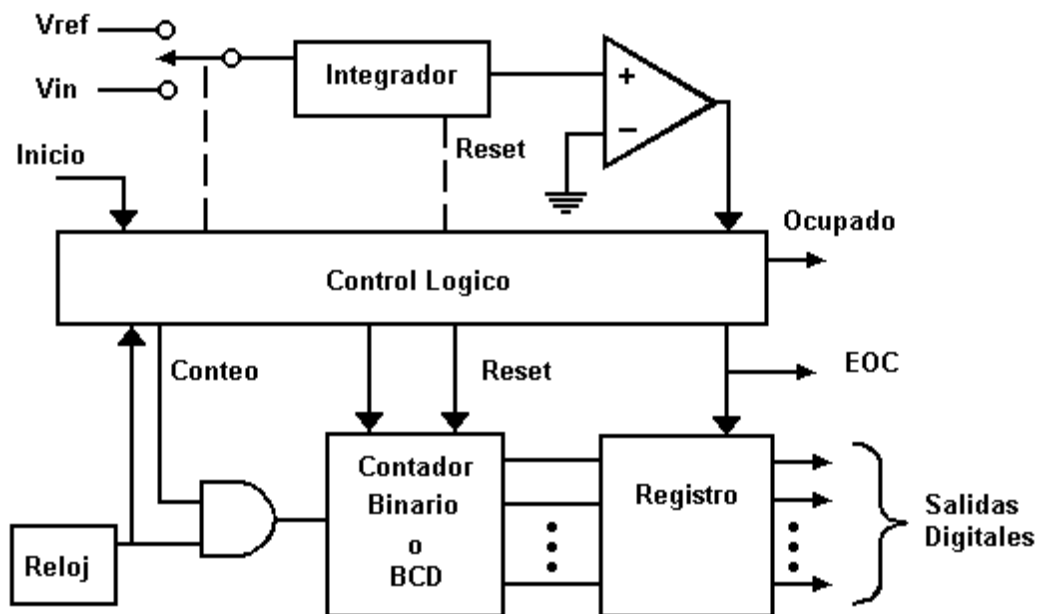
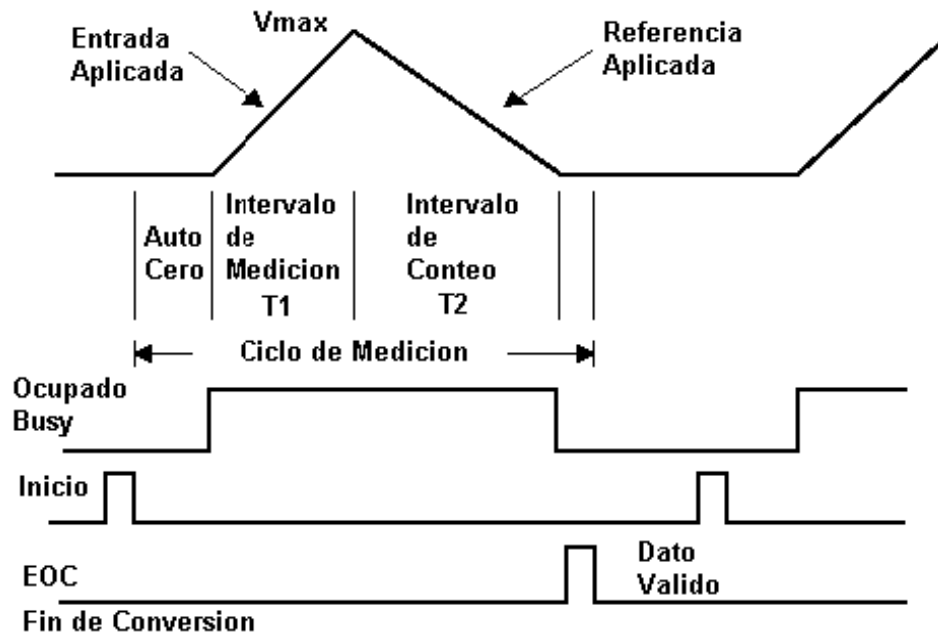


Figura 6-22 Convertidor A/D de doble rampa



**Figura 6-23 Señales del ADC de doble rampa o integrador**

Con el fin de determinar los parámetros que intervienen en la conversión es necesario definir algunos términos:

- T1 = Duración del intervalo de medición.
- T2 = Duración del intervalo de conteo.
- TC = Tiempo o constante de integración.
- $V_{max}$  = Salida del integrador al final del intervalo de medición.
- $f_{clk}$  = Frecuencia del reloj.
- $V_{ref}$  = Voltaje de referencia.
- $n$  = Número de bits de la salida digital o del ADC.
- $N_{cont}$  = Valor final del conteo.

Recordando que al final del intervalo de medición el contador llega a su máximo conteo se tiene:  $T1 = 2^n / f_{clk}$ .

Además, durante este intervalo:

$$V_{max} = V_{in} (T1/TC).$$

Al final del intervalo de conteo:

$$- V_{max} = - V_{ref} (T2/TC).$$

Por tanto:

$$T2 = T1(V_{in}/V_{ref}) = (V_{in}/V_{ref}) (2^n / f_{clk}).$$

El número de pulsos de reloj contados será:

$$N_{\text{cont}} = T_2 (f_{\text{clk}}) = V_{\text{in}} (2^n / V_{\text{ref}}).$$

La salida del contador es proporcional al voltaje de entrada, siendo insensible a cambios en la frecuencia del reloj o en la constante de integración. Además, intrínsecamente existe inmunidad al ruido y a los cambios lentos en la entrada puesto que la señal pasa por el integrador.

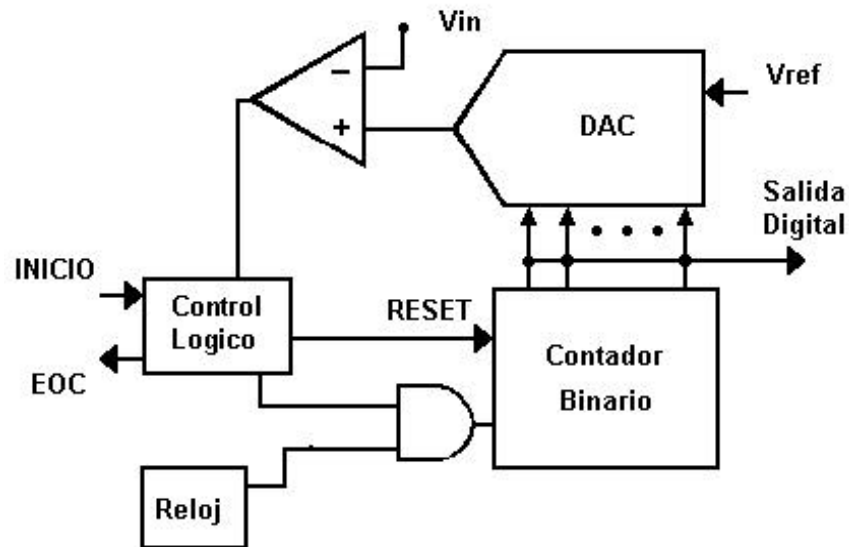
Entonces, como característica importante de este convertidor se destaca la precisión, esto se debe a la independencia de la salida respecto a la estabilidad del condensador o de la frecuencia del reloj (con tal que mantengan constantes sus valores durante el periodo de conversión). Por lo cual, la precisión sólo será función de la linealidad de las rampas que entregue el integrador y de la precisión del voltaje de referencia.

Finalmente, y como desventaja, cabe mencionar la necesidad de un tiempo de conversión muy largo y variable el cual depende del valor de la entrada y del número de bits o cuentas que se deben realizar.

### ***Convertidor rampa binaria***

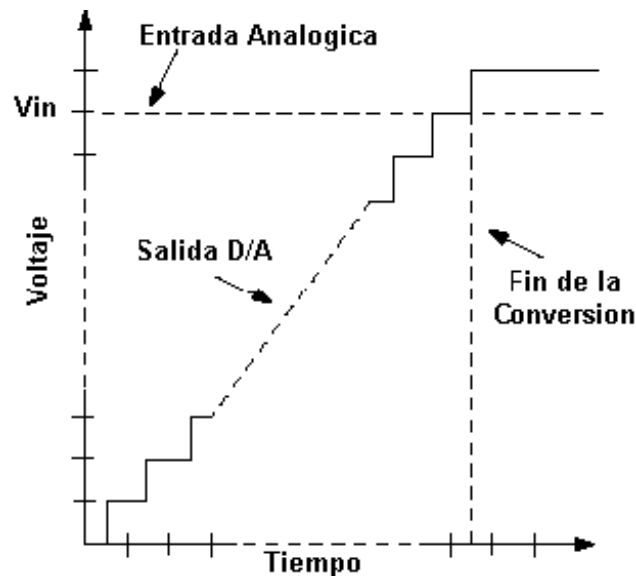
En la figura 6-24 muestra el diagrama con los componentes del ADC tipo rampa binaria mientras que la figura 6-25 ilustra la secuencia de conversión.

Este convertidor es uno de los muchos que utiliza un DAC para realizar la conversión. Cuando se inicia el ciclo, el control lógico pone a cero el contador y permite que reciba los pulsos del reloj. El contador incrementa su salida binaria con cada pulso lo cual aumenta la salida del convertidor D/A. La salida del DAC es comparada con el voltaje de entrada  $V_{\text{in}}$ . Cuando la salida del DAC es mayor que  $V_{\text{in}}$ , el control lógico inhibe el paso de pulsos al contador, manteniendo el último valor como salida del proceso de conversión.



**Figura 6-24 Convertidor A/D tipo rampa binaria**

El tiempo de conversión es función de la tensión de entrada, del número de bits y de la frecuencia del reloj, siendo el mayor tiempo de conversión posible del orden de  $2^n$  pulsos de reloj.



**Figura 6-25 Señal de salida del DAC tipo rampa binaria**

### Convertidor tracking

Este convertidor es una variación del tipo rampa binaria. En la figura 6-26 se expone el diagrama de un ADC Tracking o de seguimiento y la figura 6-27 ilustra su forma de trabajo.

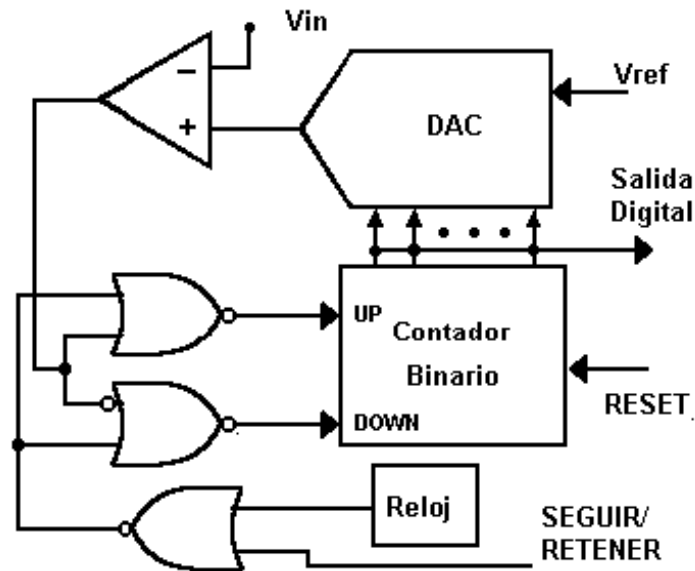
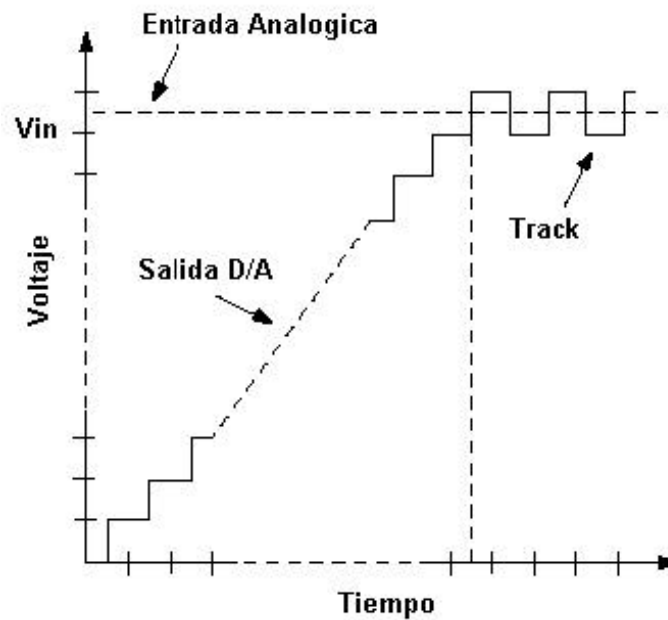


Figura 6-26 Convertidor A/D tracking

En este convertidor la salida del DAC es comparada con la señal de entrada y el control lógico usa esta información para habilitar el conteo ascendente o descendente del contador cuando la entrada sea mayor o menor, respectivamente, que la salida del DAC. El control lógico modifica el código de tal manera que la salida del DAC sigue a la entrada con una resolución igual a la del DAC.



**Figura 6-27 Salida del convertidor A/D tracking**

### ***Convertidor de aproximaciones sucesivas***

En la figura 6-28 se presenta el diagrama con las principales partes del ADC de aproximaciones sucesivas (abreviado ADC S.A.). En la figura 6-29 se aprecia la secuencia de conversión en el caso específico de un ADC S.A. de 4 bits. Este convertidor se basa en el llamado registro de aproximación sucesiva o SAR el cual se representa en la figura por dos registros individuales.

En el proceso de conversión se trata cada bit individualmente en el orden MSB a LSB. Al iniciarse el ciclo se coloca la salida del registro a cero. Luego, el control lógico, coloca solamente el bit MSB en uno y por medio de la comparación entre la salida del DAC y la entrada analógica, determina si el bit debe asumir este valor o puesto a cero. Cuando la entrada sea mayor que la salida del DAC se coloca en uno, caso contrario en cero. Tomada la decisión respecto al valor del MSB y una vez fijado, el control lógico repite el procedimiento para el siguiente bit más significativo, manteniendo por supuesto el valor o valores anteriores de los bits.

Este proceso se repite con cada uno de los bits hasta el LSB, obteniéndose el valor digital el cual estará 1LSB por debajo del valor de la entrada (figura 6-29).



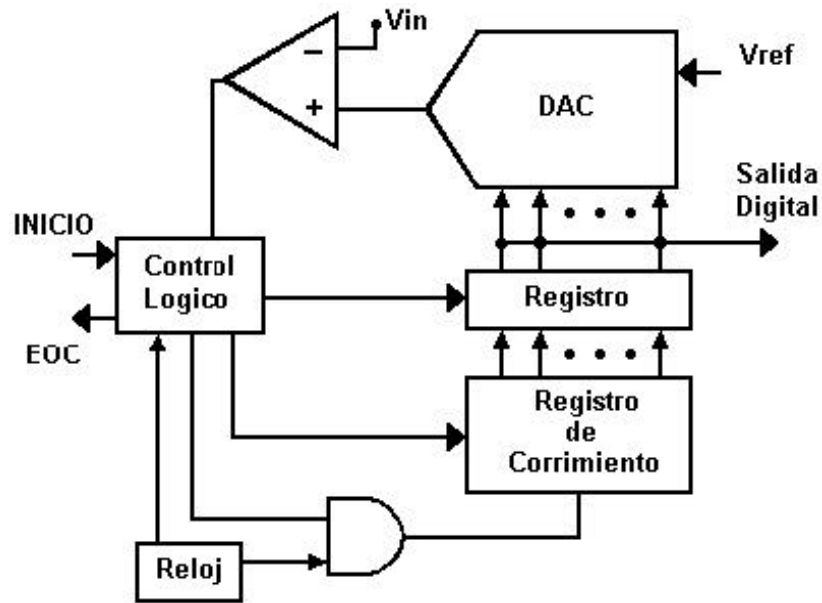


Figura 6-28 Convertidor de aproximaciones sucesivas

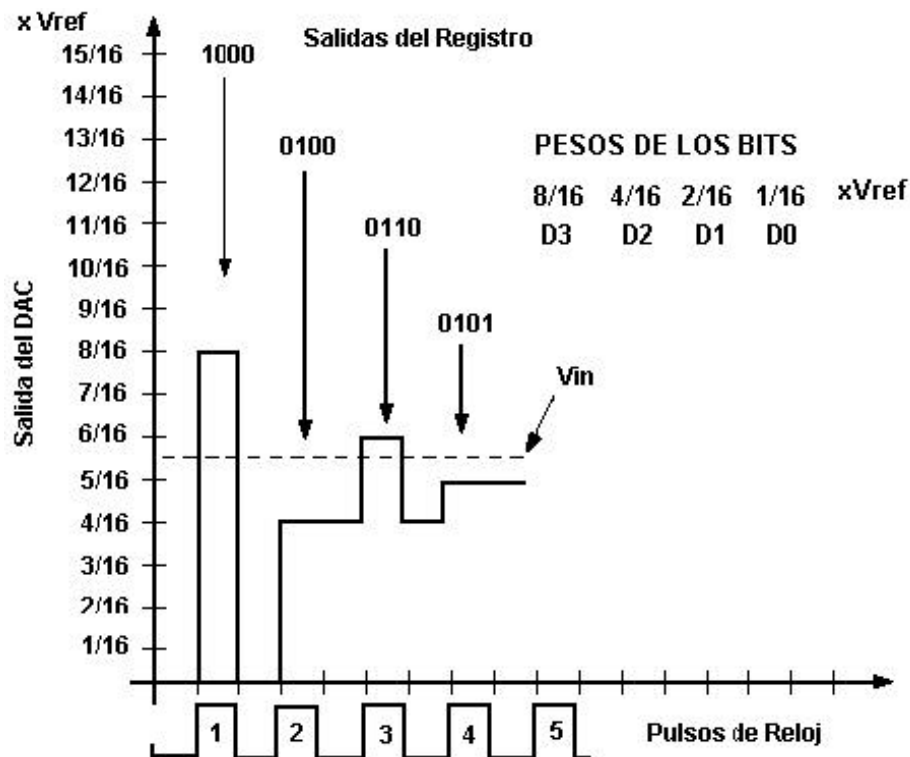


Figura 6-29 Señales del Convertidor de aproximaciones sucesivas

Es de notar que el tiempo de conversión del ADC S. A. no depende de la amplitud de la señal de entrada sino del número de bits y de la frecuencia del reloj puesto que la conversión se efectúa en  $n$  pulsos de reloj. Sin embargo, la entrada analógica

debe permanecer sin variaciones durante la conversión ya que va directamente al comparador.

Los largos tiempos de conversión de los convertidores basados en DAC, se deben a que los contadores cambian su salida y, por tanto, la del DAC en un LSB por cada pulso del reloj. Sin embargo, es posible obtener el valor binario en menor tiempo utilizando el método de conversión por aproximaciones sucesivas.

### 6.2.3.CARACTERÍSTICAS DE LOS CONVERTIDORES A/D

Hasta aquí hemos analizado cada una de las fases de funcionamiento de un convertidor A/D y los principios básicos de estos dispositivos. Es importante indicar que las razones que llevan a seleccionar uno u otro dispositivo son principalmente tres: económicas, tiempo de respuesta y requerimientos de almacenamiento. Con respecto a las razones económicas, resulta obvio que cuanto mayor sea el número de componentes que lleva el convertidor más se encarecerá el circuito integrado.

Las características que podemos confrontar a la hora de seleccionar un convertidor para una aplicación específica son:

**Resolución   Linealidad   Precisión   Impedancia   Sensibilidad.**

Sin embargo, cabe destacar otras no mencionadas:

**Error de cuantización.** Todos los valores analógicos dentro de un rango están representados por un único código digital, normalmente asignado al valor medio del mismo. Si tenemos un número de intervalos de cuantización reducido, el error puede ser bastante apreciable. Así, con más intervalos menor el error, para esto se necesita más precisión lo cual repercute en el tiempo de conversión, la capacidad de almacenamiento y el coste.

**Tiempo de conversión.** Es el tiempo requerido por el convertidor para entregar la palabra digital equivalente a la entrada analógica.

Es importante resaltar que la estabilidad y precisión del voltaje de referencia es de gran influencia en el desempeño de los convertidores, por esto existen dispositivos especialmente fabricados con el fin de establecer esta referencia.