

7

Sistemas de instrumentación y control

7.1 TRANSDUCTORES Y SEÑALES DE CAMPO

Transductor es todo dispositivo o elemento que convierte una señal de entrada en una de salida pero de diferente naturaleza física. Normalmente se desea transformar señales de las variables físicas o químicas que deseamos medir, en magnitudes eléctricas que son las que manejamos con más facilidad en instrumentación. La salida del transductor es una función conocida de la magnitud de entrada y la relación entre ambas (magnitud a medir y salida del transductor) puede no ser lineal, aunque se procura que lo sea para simplificar su tratamiento.

Aunque lo más habitual es que una de las dos formas de energía que intervienen en el proceso de transducción sea eléctrica, no siempre es cierto. Pensemos por ejemplo en los micrófonos ópticos en los que el sonido produce deformaciones en una lámina metálica en la que se refleja un haz luminoso. La señal de salida es una variación en el brillo del haz reflejado que posteriormente será convertida mediante un fotodetector (que no es más que un transductor electroóptico) a una señal eléctrica.

La señal eléctrica tal como la proporciona un transductor no es, en general, directamente utilizable por un sistema de adquisición de datos conectado a un ordenador. Por eso suele someterse a estas señales a una serie de procesos típicos. Estos pueden ser entre otros: aislamiento, acoplo de impedancias, cambios de nivel o tipo de la señal, amplificación, filtrado, linealización, cálculos varios (p. ej. $\sqrt{\quad}$), etc. Estos procesos pueden efectuarse en el propio transductor, en el sistema de adquisición de datos o en un punto intermedio.

Uno de los procesos deseados suele ser la amplificación o conversión de la señal al rango de tensión usual en los sistemas de adquisición de datos (0 a 10V); esto puede requerir una atenuación para señales más elevadas, o una amplificación apropiada para las de niveles bajos. Otro es su transformación al rango habitual de corriente en proceso de datos de campo (4 a 20 mA), para poder transmitirlos por cable trenzado a distancia. La transmisión en corriente proporciona una notoria inmunidad al ruido ya que la información no es afectada por caídas de tensión en la línea, impulsos parásitos, resistencias o voltajes inducidos por contaminación electromagnética, etc.

Desde el punto de vista de las señales que proporcionan estos transductores se pueden clasificar en:

- 1) Transductores de resistencia variable
- 2) Transductores de reactancia variable (capacitivos o inductivos)
- 3) Transductores generadores de carga
- 4) Transductores generadores de tensión
- 5) Transductores generadores de corriente
- 6) Transductores digitales

En esta pequeña lista no están incluidos todos los tipos posibles pero sí los más habituales. Los dos primeros son de tipo pasivo (no generan señal, sólo la transforman, el resto se consideran activos (sí generan señal). El hecho de que generen una señal no implica necesariamente que deban ser alimentados de forma externa. Como ejemplo tenemos los transductores piezoeléctricos que generan una tensión entre sus dos extremos, cuando son sometidos a presión o deformación.

Para su introducción en un sistema de instrumentación con osciloscopios digitales o conexión a ordenador, los que generan señal no presentan problemas ya que pueden ser conectados directamente al ordenador. Hay materiales que permiten variar su resistencia como respuesta a casi cualquier fenómeno físico: temperatura, presión, humedad, etc., por lo que la variedad de este tipo de transductores es inmensa.

7.1.1 Transductores de resistencia variable

Son muy populares y se utilizan en la medida de numerosas variables, ya que es la salida de aquellos que utilizan potenciómetros lineales de cursor deslizante, galgas extensiométricas, termómetros resistivos (termorresistencias RTD y termistores), magnetorresistencias, resistencias dependientes de la luz (LDR), higrómetros resistivos, etc.

Para obtener una señal de salida se deben tener en cuenta dos fenómenos, el primero es la necesidad de una alimentación eléctrica ya que la resistencia en sí no genera ninguna señal y el segundo es que esta alimentación influye en la salida por el posible autocalentamiento del transductor.

La medida de la resistencia se puede hacer de forma directa, es decir, como una aplicación de la ley de Ohm midiendo la corriente que la atraviesa a una cierta tensión o la tensión que cae en ella a una corriente constante. Pero el método más usado por ser el más preciso y sensible es el que utiliza un puente de Wheatstone. Sobre este tipo de medidas existe una gran bibliografía que se puede encontrar en cualquier texto de instrumentación. Su salida se realiza a través de un amplificador diferencial que proporciona una señal en tensión, que es la más usada como entrada de un sistema de adquisición de datos conectado a un ordenador personal.

7.1.2 Transductores de reactancia variable (capacitivos o inductivos)

Los transductores capacitivos son muy usados cuando se quiere detectar desplazamientos muy pequeños (hasta 10^{-9} cm.), ya que poseen una gran estabilidad y precisión. También se utilizan para medida de niveles de líquidos conductores o dieléctricos, medida de espesores de dieléctricos, etc. Los transductores inductivos son muy usados ya que se incorporan en muchos equipos que los usan como transformadores de desplazamientos en señales eléctricas. Se suelen dividir en tres grupos principales: los de reluctancia variable, los de corrientes de Foucault y los transformadores diferenciales (LVDT).

La medida en estos transductores se debe realizar en alterna y por lo tanto a continuación, deberá haber un sistema de conversión de alterna a continua, que puede ser de valor eficaz, de valor medio o de pico. La medida propiamente dicha se puede hacer por medio de un divisor de tensión aplicando directamente la ley de Ohm, utilizando un puente de alterna o un oscilador de frecuencia variable. En cualquier caso su paso a tensión continua es necesario para su utilización en un sistema de adquisición de datos por ordenador.

7.1.3 Transductores generadores de carga

En realidad los transductores generadores de carga son generadores de corriente pero en estado de reposo poseen resistencias muy altas y por lo tanto corrientes muy bajas. Son muy usados para medida de radiación, células fotoeléctricas, células de ionización, transductores piezoeléctricos. Su medida depende del transductor y del uso que se desee de la medida. Si se desea una medida continua se utilizan amplificadores, convertidores tensión-corriente o amplificadores de carga. Pero si se desea analizar los impulsos (número, tensión máxima, etc.) deberán utilizarse amplificadores y analizadores de impulsos.

7.1.4 Transductores generadores de tensión

Estos transductores están bastante extendidos. Destacan los termopares, pHmetros, medidores Redox, etc. Además, numerosos equipos que no generan esta salida directamente del sensor, la presentan en su salida por medio de conversiones electrónicas internas. La ventaja que presentan es que no necesitan ninguna acción para su introducción en sistemas de adquisición de datos por ordenador salvo quizás, una adaptación de niveles de tensión. Su desventaja es la transmisión a distancia ya que ésta puede ser afectada por ruidos.

7.1.5 Transductores generadores de corriente

Existen numerosos transductores que presentan salida en corriente, ya que es la salida más extendida en equipos de instrumentación para la transmisión de señales de campo (4-20 mA), por lo que la transformación en tensión de estas señales es una práctica muy generalizada, antes de introducirlas en el sistema de adquisición de datos que suele trabajar en tensión. La conversión corriente-tensión se realiza simplemente usando una resistencia de precisión.

7.1.6 Transductores digitales

Estos transductores son muy utilizados en equipos electromecánicos para indicar acciones, por ejemplo finales de carrera, interruptores de diferentes magnitudes, alarmas, etc. Desde el punto de vista de su introducción al ordenador no presentan más problema que la adaptación de sus niveles de tensión.

7.2 SISTEMAS DE ADQUISICIÓN DE DATOS

7.2.1 Introducción

Los sistemas digitales de control se utilizan ampliamente debido a su bajo coste en comparación con los analógicos. Presentan ventajas en cuanto inmunidad al ruido, precisión y facilidad de implementar funciones complejas. El principal inconveniente es que tienen una respuesta más lenta, aunque para la mayoría de las aplicaciones esto no es un inconveniente. Los

sistemas de control de procesos con realimentación computerizada se utilizan en muchas industrias para controlar sus distintos procesos de fabricación. En el mundo físico, las variables son continuas y es preciso transformarlas, amplificarlas y convertirlas a variables digitales para que un sistema digital las pueda procesar. Los sistemas de adquisición de datos realizan todas estas funciones. En otras palabras, los sistemas de adquisición y conversión de datos se usan para procesar señales analógicas y convertirlas en digitales para su posterior procesamiento o análisis mediante computador o en nuestro caso en un ordenador personal.

En general, un sistema de adquisición de datos toma una magnitud física tal como presión, temperatura, posición, etc. y la convierte en una tensión o corriente eléctrica que será posteriormente muestreada y cuantificada (digitalizada). Una vez conseguido esto, todo el posterior tratamiento de la señal se realiza por circuitos electrónicos digitales.

En principio tiene lugar un tratamiento electrónico y al terminar éste, la señal se convierte en digital mediante un convertidor o conversor A/D (analógico/digital). Esta salida digital puede ir a diferentes sistemas digitales tales como un ordenador, un controlador digital, un transmisor de datos digital, etc.

Un circuito completo de adquisición de datos se indica en la figura (7.1) con todos los componentes fundamentales y sus interconexiones.

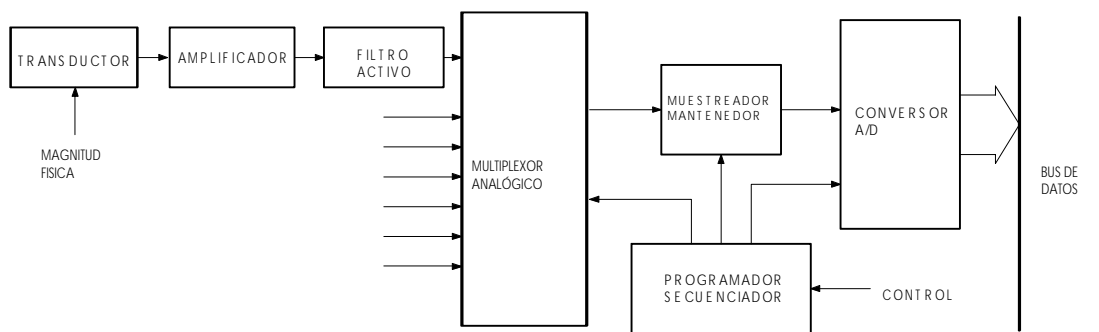


Fig. 7.1 Esquema general de un sistema de adquisición de datos

La entrada al sistema (el parámetro físico a medir), se convierte en una magnitud eléctrica por el transductor y ésta se lleva a la entrada del amplificador. La misión de éste es preparar la señal de salida del transductor al nivel de tensión necesario (1 a 10V) para atacar al siguiente circuito analógico. Sigue al amplificador un filtro activo paso baja, usado para eliminar los componentes de alta frecuencia o ruido de la señal. En ocasiones se puede necesitar hacer con la señal alguna operación no lineal en cuyo caso ésta se puede hacer antes o después del filtrado.

A continuación, la señal va a un multiplexor analógico en el que cada canal de entrada es conectado secuencialmente a la salida durante un periodo de tiempo especificado. De esta forma los circuitos que siguen al multiplexor son compartidos secuencialmente por un cierto número de señales analógicas.

La salida del multiplexor analógico va a un circuito de muestreo y retención ('sample and hold'), el cual muestrea la salida del multiplexor en un momento determinado y mantiene el nivel de tensión en su salida hasta que el conversor (A/D) realiza la conversión.

Por último, la programación y secuencia de tiempos de la operación se realiza por los circuitos de control que a partir de las salidas digitales de control, procedentes del ordenador personal, controla al multiplexor, 'sample and hold' y conversor A/D.

Veamos a continuación algunos principios en los que se basa la conversión analógico-digital de la información.

7.2.2 Cuantificación y codificación

La conversión A/D es en su forma conceptual básica un proceso de dos pasos: cuantificación y codificación.

Cuantificar es el proceso de convertir una entrada analógica continua en una serie de niveles discretos de salida. Estos niveles se pueden identificar por una serie de números, en general como un código binario. La operación de cuantificar una señal se ilustra por la figura (7.2) que muestra la transferencia de las tensiones continuas a valores discretos con ocho estados de salida correspondientes a un convertidor A/D de tres dígitos. Los ocho estados binarios tienen asignada la secuencia de números binarios desde el 000 al 111. El número de estados de salida para una codificación binaria de un convertidor A/D es 2^n donde n es el número de bits. Por lo tanto, un convertidor de ocho bits tendrá 256 estados de salida y uno de 12 bits, 4096.

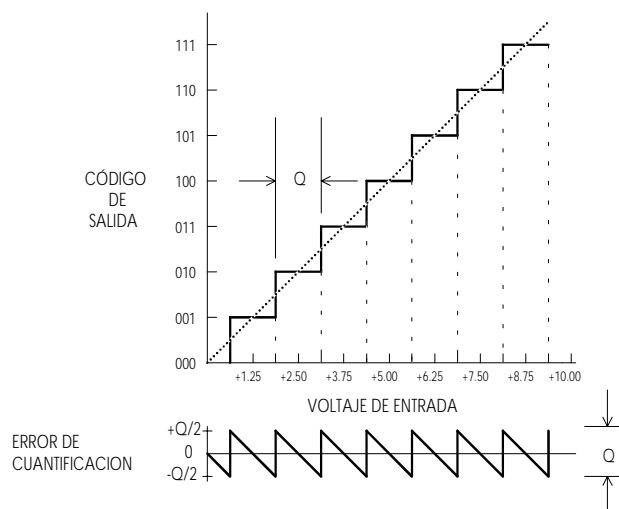


Fig. 7.2 Cuantificación de una señal continua

Esta función cuantificadora tiene algunas características importantes:

- Su resolución, que es el número de estados de salida expresados en bits (en este caso, 3 bits).
- Los niveles de decisión analógica o niveles de umbral; en el caso de la figura (7.2), los valores de 0.625, 1.875, 3.125, 4.375, 5.625 y 8.125. Hay $2^n - 1$ puntos de decisión analógica.
- Los niveles de decisión están colocados a medio camino entre el centro de los puntos de las palabras del código y que en el caso de la figura (7.2) corresponden a los valores de tensión 1.25, 2.50, 3.75, 5.00, 6.25, 7.50 y 8.75 V.

La distancia entre los niveles de decisión codificados se expresa por Q (intervalo de cuantificación). Si para todo el rango de variación de la señal analógica de entrada, restamos ésta de la salida (niveles discretos), obtendremos una señal de error. Este error llamado error de cuantificación es intrínseco del proceso (no se puede eliminar por tanto) y depende del número de niveles de cuantificación o resolución del cuantificador. La salida por tanto se puede considerar como la entrada analógica con un ruido (el de cuantificación) asociado a ella.

Un conversor A/D hace las operaciones de cuantificar y codificar una señal en un tiempo determinado. El tiempo requerido para hacer una medida o conversión se denomina generalmente 'tiempo de apertura' (t_a). La velocidad de conversión requerida en un caso particular depende de la variación temporal de la señal a convertir y del grado de resolución requerido. El tiempo de apertura se puede considerar como una incertidumbre de tiempo (error) en hacer una medida y resulta en una incertidumbre en amplitud si la señal está cambiando durante ese tiempo. Como se ve en la figura 7.3, la señal de entrada al convertidor A/D cambia ΔV durante el tiempo de apertura t_a en que la conversión se efectúa. El error puede ser considerado como un error en amplitud o un error en tiempo. Los dos están relacionados como sigue:

$$\Delta V = t_a \frac{dV(t)}{dt}$$

donde $\frac{dV(t)}{dt}$ es la velocidad de cambio en el tiempo de la señal de entrada.

Si a partir de aquí obtuvieramos el tiempo necesario para digitalizar una determinada frecuencia de señal con un cierto grado de resolución veríamos que para convertir una señal de variaciones relativamente lentas (p. ej. 1 KHz) con una moderada resolución (10 bits), se requiere un conversor A/D extremadamente rápido (tiempo de apertura no superior a 160 nseg.) y por tanto muy caro. Pero este problema se puede resolver de una manera muy simple y barata usando un circuito 'sample and hold', el cual reduce el tiempo de apertura considerablemente al tomar un muestreo rápido de la señal y mantener su valor durante el tiempo requerido para la conversión.

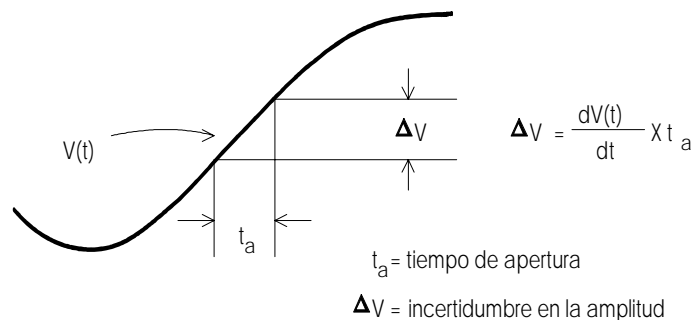


Fig. 7.3 Relación entre el tiempo de apertura y la incertidumbre de amplitud

7.2.3 Muestreo y "aliasing"

La operación de muestreo está indicada en la figura 7.4 en la que vemos una señal analógica (a) y un tren de impulsos de muestreo (b). El resultado del proceso de muestreo es el mismo que obtendríamos al multiplicar la señal analógica de entrada por un tren de impulsos de amplitud unidad. La señal modulada resultante se ve en la parte (c) donde la amplitud de la señal analógica está contenida en la envolvente de los impulsos.

El propósito del muestreo es utilizar de una forma eficiente los equipos procesadores de datos y facilitar la transmisión de los mismos. Un simple SAD (sistema de adquisición de datos), por ejemplo, puede utilizarse para transmitir varios canales analógicos basándose en el muestreo de forma secuencial, con la ventaja respecto al sistema antieconómico de utilizar varios canales de transmisión para enviar continuamente varias señales.

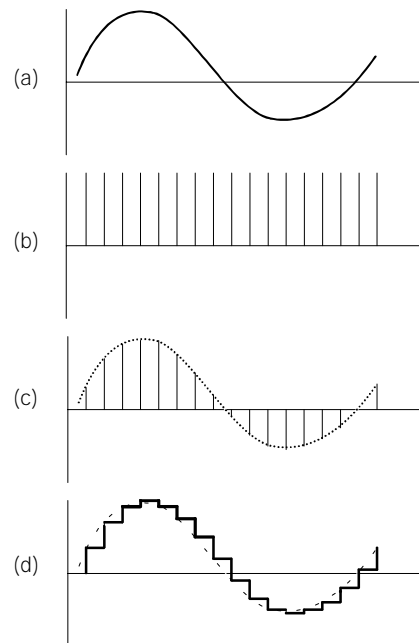
Si la señal analógica es muestreada y memorizada (mantenida) entre los impulsos de muestreo, el resultado es el indicado en la figura 7.4 (d). Este es el trabajo que realiza un circuito llamado de muestreo y retención ('sample and hold'). En los equipos de proceso de datos para vigilancia y control de procesos, puede ser suficiente muestrear el estado del proceso solamente

una vez cada cierto tiempo, realizando el cálculo y corrección oportunos y a continuación liberar el computador para otras tareas.

No se debe olvidar que el objeto de sistemas de conversión de datos es la reconstrucción fiel de la señal a partir de los datos adquiridos. Será necesario saber cada cuanto tiempo se debe tomar una muestra de una señal para no tener pérdidas de su información. Si una señal es lenta, se puede extraer toda su información fácilmente al muestrear de forma que no haya cambio, o éste sea muy pequeño, entre cada muestra. Habrá una pérdida de información si hay un cambio significativo en la amplitud de la señal entre cada muestra. La frecuencia con que se debe muestrear una señal para no perder información de la misma viene dada por el teorema de muestreo ('Sampling Theorem'): "Si el espectro de frecuencias de una señal analógica no contiene componentes de frecuencia superiores a f_c , la señal original puede ser completamente recuperada sin distorsión, si es muestreada a un ritmo de al menos $2f_c$ muestras por segundo".

Fig. 7.4 Operación de muestreo:

- a) Señal analógica a muestrear
- b) Tren de impulsos de muestreo
- c) Señal modulada
- d) Señal muestreada y mantenida



El teorema de muestreo se puede ilustrar con el espectro de frecuencias de la figura 7.5. La figura 7.5(a) muestra el espectro de una señal continua con componentes de frecuencia limitadas por la frecuencia f_c .

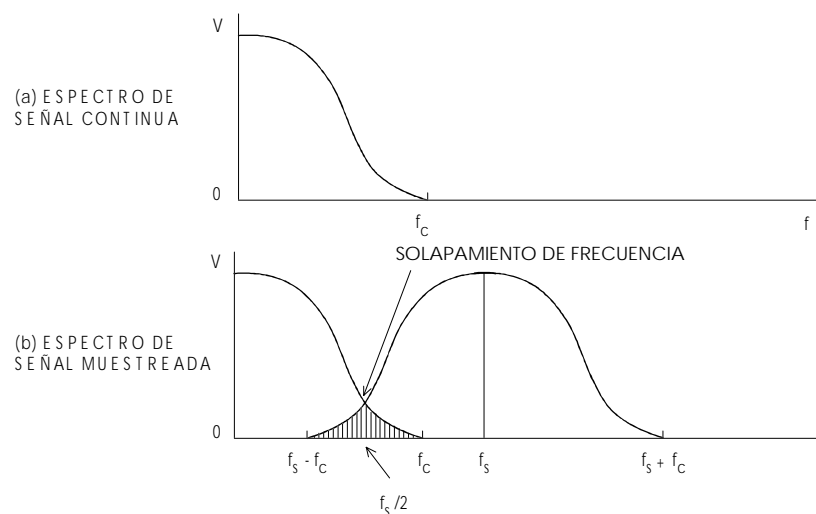


Fig. 7.5 Espectro en frecuencia de la señal muestreada

Cuando esta señal es muestreada a un ritmo f_s el proceso de modulación da como resultado el espectro mostrado en la figura 7.5(b). Aquí debido a que el ritmo de muestreo no es suficiente, algunas de las componentes de alta frecuencia de la señal se pliegan en el espectro. Este efecto es el llamado plegado de frecuencias ('frequency folding'). En el proceso de recuperación de la señal original, las componentes de frecuencias plegadas causan distorsión y no se pueden separar o distinguir de la señal original.

Se elimina el plegado de frecuencias usando una frecuencia de muestreo suficientemente alta o filtrando la señal original para eliminar las componentes de frecuencia mayor de $f_c/2$.

En la práctica no obstante, hay siempre algún plegado de frecuencias debido al ruido y filtros no ideales. Debe tratarse de reducir este efecto a proporciones despreciables.

Otro efecto consecuencia del plegado es conocido como 'aliasing'. La figura 7.6 ilustra esto mostrando una señal periódica que se muestrea a un ritmo menor que dos veces por ciclo. Las amplitudes de muestreo indican unidas por una línea de puntos que evidentemente tiene un periodo bastante diferente de la señal original y es una 'alias'. En esta figura puede verse que si la forma de onda es muestreada al menos dos veces por periodo como requiere el teorema de muestreo, la frecuencia original se mantiene.

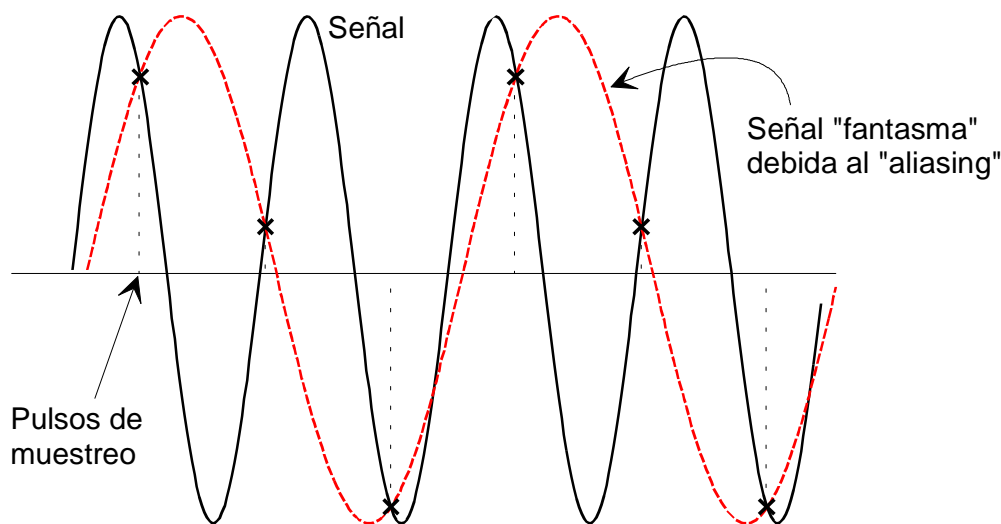


Fig. 7.6 Efecto de aliasing

7.3 CIRCUITOS BÁSICOS DE UN SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

Describimos a continuación el funcionamiento de los circuitos que componen un sistema de adquisición de datos.

7.3.1 Amplificadores

La primera parte de un sistema de adquisición y conversión de datos trata de extraer la señal a medir. El procesado inicial de la señal se hace con un amplificador, filtro y posiblemente un 'operador' no lineal. El propósito del amplificador es realizar una o más de las siguientes tareas: aumentar la amplitud de la señal, adaptar impedancias, convertir una señal de corriente a tensión o separar una señal diferencial del ruido en modo común. En la mayoría de los sistemas de conversión de datos el nivel deseado de tensión de salida es de 5 a 10V a fondo de escala. Este es

el nivel aceptado por la mayoría de los multiplexores analógicos, 'sample and holds', y conversores A/D.

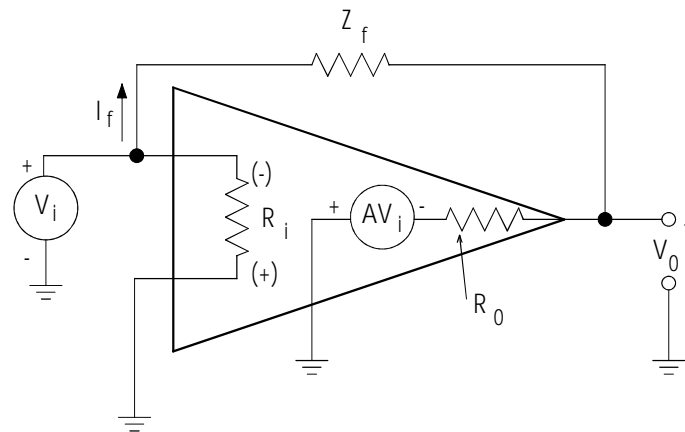


Fig. 7.7 Amplificador operacional ideal

- Impedancia de entrada: $R_i = \infty$
- Ganancia en lazo abierto: $A = \infty$
(sin resistencia de realimentación entre entrada y salida)
- Impedancia de salida $R_0 = 0$
- Ancho de banda $BW = \infty$
(rango de frecuencias en el que mantiene las mismas propiedades)

Un elemento imprescindible en todo sistema de adquisición de datos es el amplificador operacional. En la figura 7.7 se muestran las características de un amplificador operacional ideal (A.O.I.). Como puede comprobarse, estas características son imposibles de alcanzar en la práctica pero sirven para un estudio cualitativo de su comportamiento. De hecho un amplificador operacional comercial será tanto mejor cuanto más se acerque a estas características ideales. El diseño y la estructura interna de un elemento de este tipo queda fuera de los objetivos de este curso, aunque conviene saber de su existencia y función. Se puede emplear de forma aislada para adaptar o amplificar señales, o también configurado como comparador dentro de un circuito conversor A/D o D/A. En la figura 7.8 se muestran algunas de las configuraciones más elementales realizadas con A.O.

Después del amplificador puede ser necesario usar un filtro paso baja para reducir la interferencia del ruido sobre la señal y para limitar la anchura de banda de la señal analógica a menos de la mitad de la frecuencia de muestreo. En este último caso se denominan filtros 'antialiasing'. Últimamente un tipo de filtro utilizado cada vez más debido a su facilidad de implementación es el de conmutación de capacidad mediante el cual, con un sólo circuito integrado y pocos componentes externos más, se puede obtener filtros que de otra forma requerirían muchos componentes discretos.

7.3.2 Codificación digital

Los conversores A/D y D/A relacionan los valores analógicos y digitales mediante un código digital apropiado. Los códigos usados son binarios y entre éstos el más común es el binario puro. Un número binario puro se representa como:

$$N = a_n 2^n + a_{n-1} 2^{n-1} + \dots + a_1 2^1 + a_0 2^0$$

donde los coeficientes a_n toman los valores '0' ó '1'.

En un conversor A/D o D/A el primer bit es llamado bit más significativo o MSB ('most significant bit') y tiene un peso de $1/2$ del fondo de escala (FS) del conversor, el segundo bit tiene un peso de $1/4$ de FS y así sucesivamente hasta el último bit llamado bit menos significativo o LSB ('least significant bit').

La resolución del conversor está determinada por el número de bits y el valor de los intervalos o amplitud del LSB viene dado por $FS/2^n$, esto ha sido llamado anteriormente Q (intervalo de cualificación)

El valor analógico del fondo de escala para un conversor puede ser cualquier voltaje conveniente pero intervalos de 0 a 5 V y 0 a +10 V en los de entrada analógica unipolar y de ± 5 V y ± 10 V en los bipolares (ó diferenciales), son los usados más comúnmente.

Para valores analógicos bipolares los códigos más comunes son el binario desplazado ('offset binary') y el complementado a 2 (2's complement). Otro código muy usado en ambos tipos de conversores es el decimal codificado en binario, BCD ('binary coded decimal') en el que 4 dígitos binarios se usan para cada dígito decimal. Esto es muy usado en multímetros y otros aparatos que poseen indicadores de salida.

En ciertas ocasiones se utiliza el código Gray que cambia un solo bit para pasar de un número a su inmediato. Este código reduce la ambigüedad en los casos de medidas consecutivas, es decir, sistemas en los que para ir de un valor a otro, se debe pasar por todos los intermedios; por ejemplo, la determinación de posiciones angulares mediante un disco giratorio.

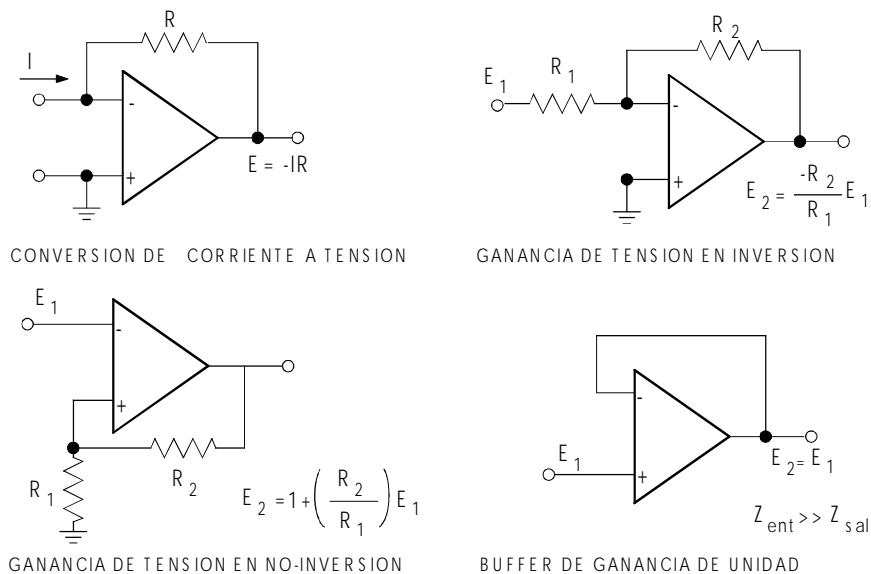


Fig. 7.8 Configuraciones con amplificadores operacionales

7.3.3 Conversores digitales/analógicos (D/A)

Estos conversores son usados en la comunicación del ordenador con el mundo exterior para una gran cantidad de aplicaciones específicas. Además, estos conversores D/A son componentes de gran cantidad de conversores A/D. A continuación veremos su principio de funcionamiento pero limitándonos al método de conversión paralelo que es el más comúnmente usado y cuya configuración básica veremos en la figura 7.9.

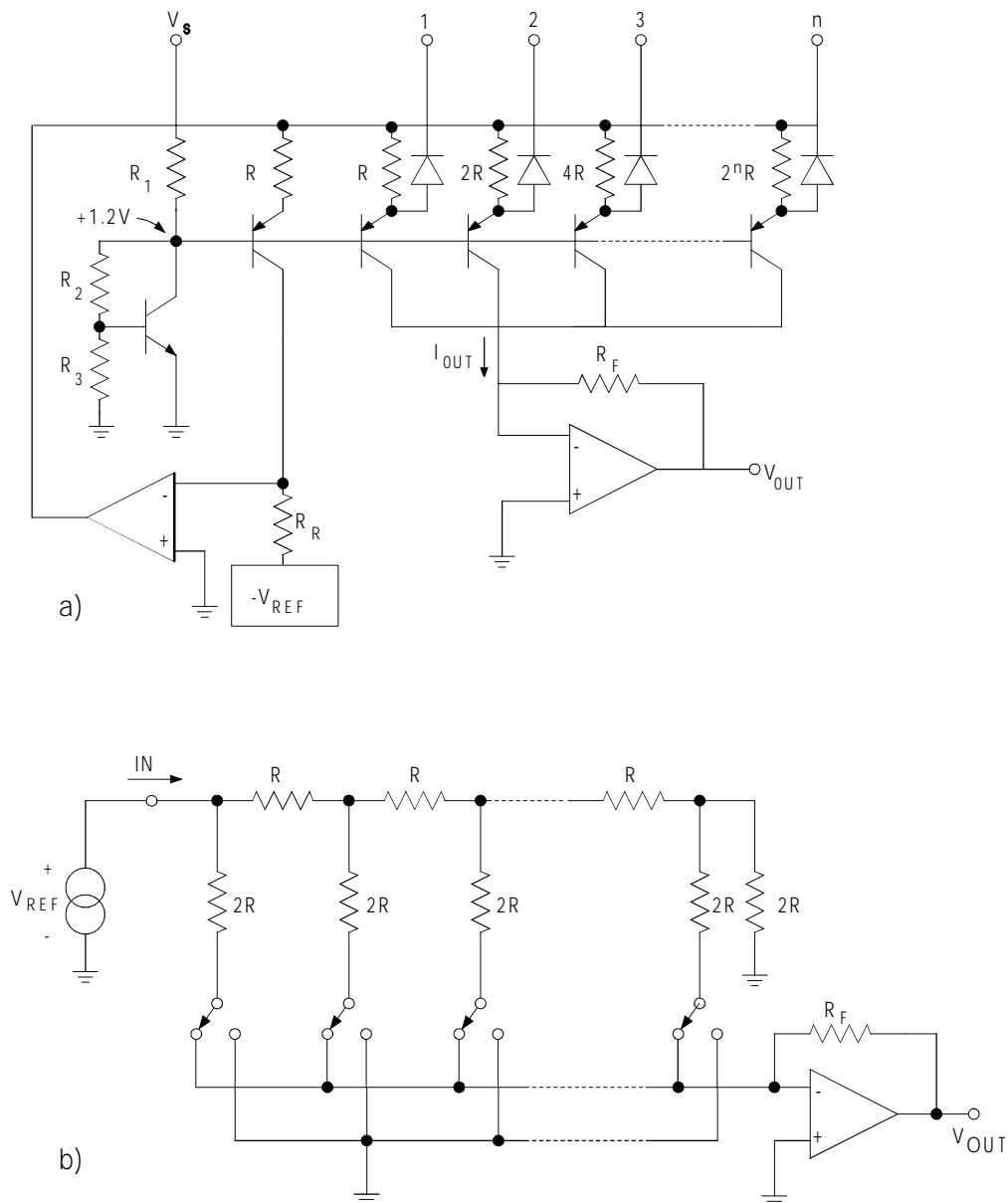


Fig. 7.9 Converters Digitales-Analógicos

Un interfaz digital convierte las entradas lógicas a los niveles de control de una serie de interruptores. Estos operan junto con una red escalonada de resistencias de precisión, como un sumador ponderado para dar voltajes cuantificados según los pesos binarios 1, 2, 4, etc. La red de resistencias está referenciada a una fuente de tensión precisa y estable (V_{ref}). La salida de esta red es la suma de los 'pesos' binarios en forma de tensión. Existen convertidores con salida en corriente que son convertidores con salida en tensión con un amplificador operacional que hace de convertidor corriente-tensión.

El circuito que utiliza resistencias ponderadas cuantificadas como $R_1 = 2R_2 = 4R_3 = \dots = 2^{n-1}R_{n-1}$ (Fig. 7.9.a) es complicado de implementar. Por eso en la práctica se utiliza la red R-2R cuyo comportamiento en cuanto a tensión de salida es el mismo (Fig. 7.9.b).

7.3.4 Conversores analógico-digitales

Un convertidor A/D, también llamado ADC, constituye el núcleo central de un sistema de adquisición de datos. Su función es la de transformar una señal continuamente variable en el tiempo en una sucesión unívoca de unos y ceros, es decir, en información binaria. Usualmente será necesario acondicionar la señal de entrada al ADC, bien sea atenuando, bien sea amplificando. En ocasiones, debido a la naturaleza de las señales a digitalizar, deberán utilizarse circuitos de muestreo especiales del tipo 'sample and hold'.

Veremos el fundamento de los tres tipos de conversores A/D utilizados más ampliamente y que son:

- 1) Tipo paralelo
- 2) Tipo contador y de aproximaciones sucesivas
- 3) Tipo integrador de doble rampa.

1) Conversor A/D tipo paralelo

Es el más sencillo de comprender ya que es simplemente una red de comparadores. Su funcionamiento no es secuencial sino que realiza simultáneamente 2^n comparaciones entre la señal V y 2^n niveles predeterminados. El resultado de estas comparaciones son 2^n señales digitales que son codificadas mediante un circuito combinacional. En la figura 7.10 vemos su diagrama de bloques funcionales.

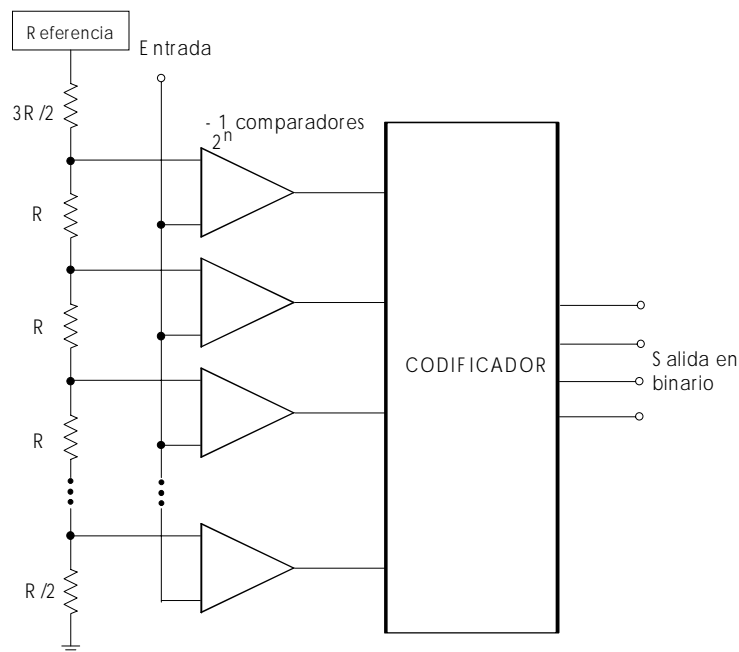


Fig. 7.10 Conversor A/D de tipo paralelo

La velocidad de este circuito puede ser muy alta ya que sólo está limitada por la del conjunto de comparadores del circuito lógico. Con este tipo se puede llegar a ritmos de conversión por encima de los 100MHz para 8 bits. Su principal inconveniente es el gran número de comparadores que requiere, lo que limita el número de bits con el que trabaja. Este es el tipo de convertidor más rápido, pero tiene el inconveniente de que su complejidad crece con el número de bits. En la práctica se construye para cuatro, seis u ocho bits como máximo (16, 64 ó 256 comparadores respectivamente). El precio está relacionado con esta complejidad.

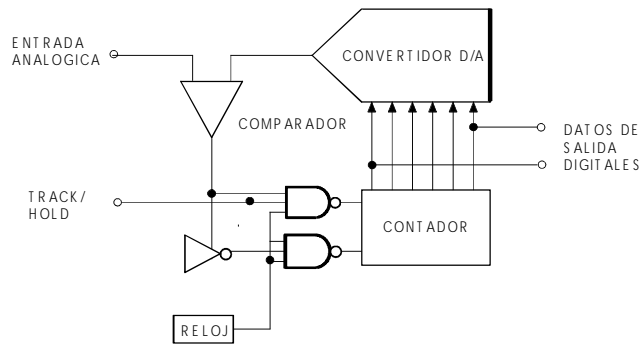


Fig. 7.11 Conversor A/D de tipo contador

2) Conversor A/D tipo contador y de aproximaciones sucesivas

Estos dos tipos están relacionados ya que ambos usan convertidores D/A cuya salida comparan con la señal de entrada para obtener un valor digital de ella.

El de tipo contador es uno de los más simples y baratos. En la figura 7.11 vemos su diagrama en bloques funcionales.

Al comienzo de la conversión se permite el paso de los impulsos del reloj a la entrada del contador con lo que éste comienza a contar aquellos. A medida que el contador avanza cambia la salida del convertidor D/A en escalera y esta salida se compara con la tensión analógica de entrada. Cuando llegamos a la igualdad el comparador cambia de estado y su salida bloquea la entrada de impulsos al contador. En este momento se ha acabado la conversión y el resultado digital de salida está contenido en las salidas del contador.

Este convertidor tiene como ventajas la simplicidad, el bajo costo y su buena precisión y como gran desventaja su baja velocidad.

El convertidor de aproximaciones sucesivas es probablemente el de uso más generalizado debido a que combina gran resolución y gran velocidad. En estos convertidores se opera con un tiempo de conversión fijo por bit e independiente del valor de la entrada analógica. Este método se ilustra en la figura 7.12 y opera por comparaciones sucesivas de la tensión analógica de entrada con la salida del convertidor D/A bit a bit.

Al comenzar el ciclo de conversión el bit más significativo (MSB) del convertidor D/A (que es 1/2 del fondo de escala) aparece en su salida y es comparado con la entrada. Si es menor que ésta, se deja metido este bit y se intenta la misma operación con el bit siguiente. Si el MSB es mayor que la entrada éste es rechazado antes de pasar a meter el siguiente bit. Este proceso se continua de esta forma hasta el bit menos significativo (LSB), después del cual en el contador de salida tenemos el número digital correspondiente. Este contador constituye en este instante el registro de salida.

Con este método podemos conseguir velocidades tan altas como 100 nanosegundos por bit, además este tipo de convertidores es bastante preciso y pueden trabajar en doble polaridad restando de la entrada una corriente o tensión equivalente a 1/2 FS.

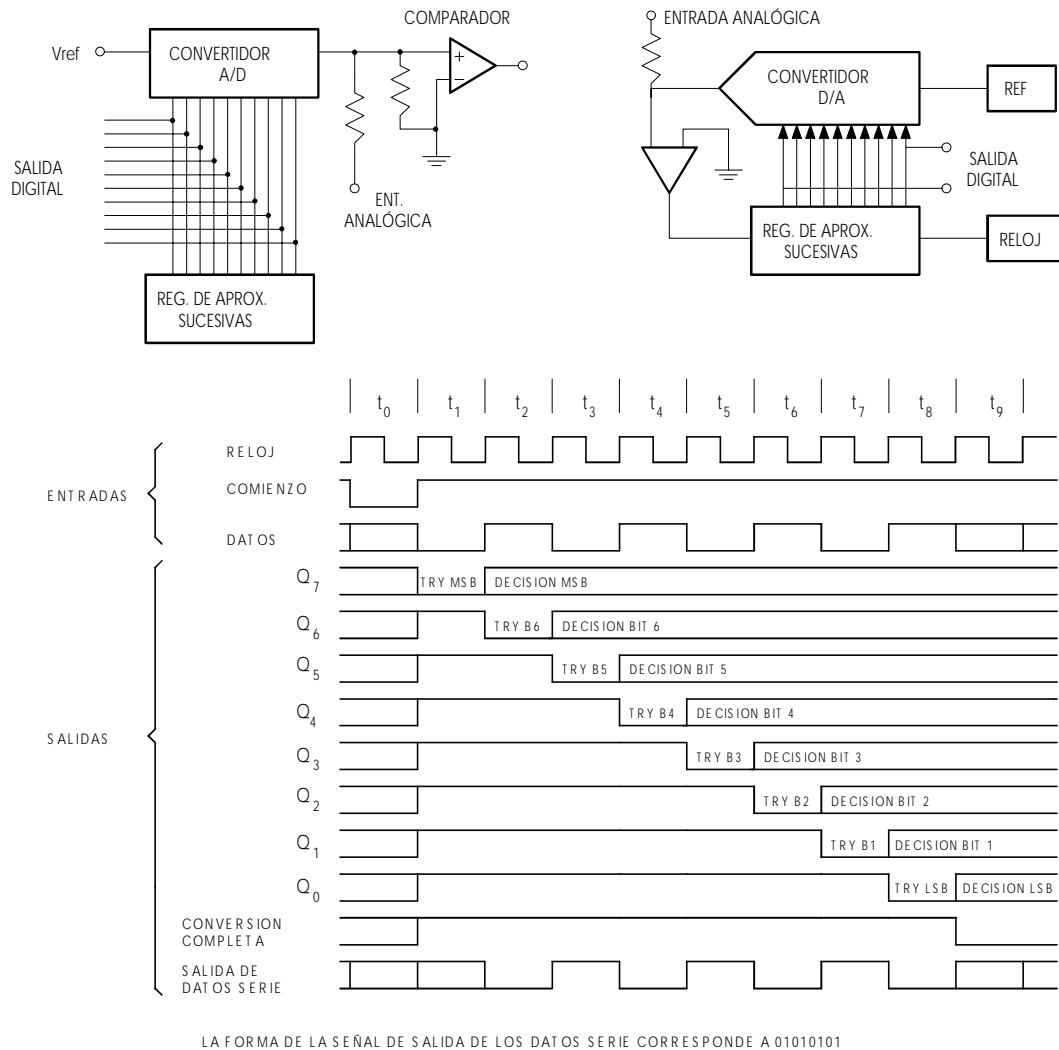


Fig. 7.12 Conversor A/D de aproximaciones sucesivas

3) Conversor A/D tipo integrador de doble rampa

Los conversores A/D de tipo integrador operan por el método indirecto de convertir un voltaje en un periodo de tiempo que posteriormente es medido por un contador. Hay muchos conversores usando este principio, pero el más popular y de más amplia utilización es el de doble rampa. Su diagrama funcional se representa en la figura 7.13.

La conversión comienza al conmutar la tensión desconocida de entrada a la entrada del integrador. Esto hace que el condensador comience a cargarse hasta una determinada tensión. La pendiente de carga será tanto más elevada cuanto mayor sea la tensión de entrada. Este proceso de carga se lleva a cabo durante un número fijo de pulsos al cabo del cual, el condensador tendrá un determinado nivel de carga que depende exclusivamente de la tensión desconocida de entrada. Una vez pasada esta primera fase, se conecta la entrada a la tensión de referencia (se desconecta la entrada) y el condensador comenzará a descargarse hasta alcanzar esta tensión de referencia. El tiempo que tarda en producirse esta descarga, es proporcional a la tensión inicial a la que se cargó durante la primera fase y que dependía únicamente de la tensión desconocida de entrada. Este tiempo es directamente proporcional a la tensión de entrada.

El integrador generará una rampa descendente que cruzará por el nivel de disparo del comparador en cuyo momento el contador es parado. La tensión de salida es:

$$E_{IN} = \frac{T_2}{T_1} V_{REF}$$

donde T_1 y T_2 son los números de cuentas acumuladas en el contador de estos intervalos y se obtendrán directamente de lo registrado en el contador al final del proceso.

El método de doble rampa posee ciertas ventajas. La precisión es independiente de la frecuencia del reloj y del valor de la capacidad de integración siempre que sean estables durante un periodo de conversión y sólo depende de la precisión y estabilidad de la referencia.

La resolución está limitada básicamente sólo por la del comparador. Además este conversor da un excelente rechazo al ruido por ser de tipo integrador. La principal desventaja de este método es que el tiempo de conversión es relativamente largo.

La figura 7.14 compara los productos comerciales que usan estos tres métodos en términos de coste frente a velocidad.

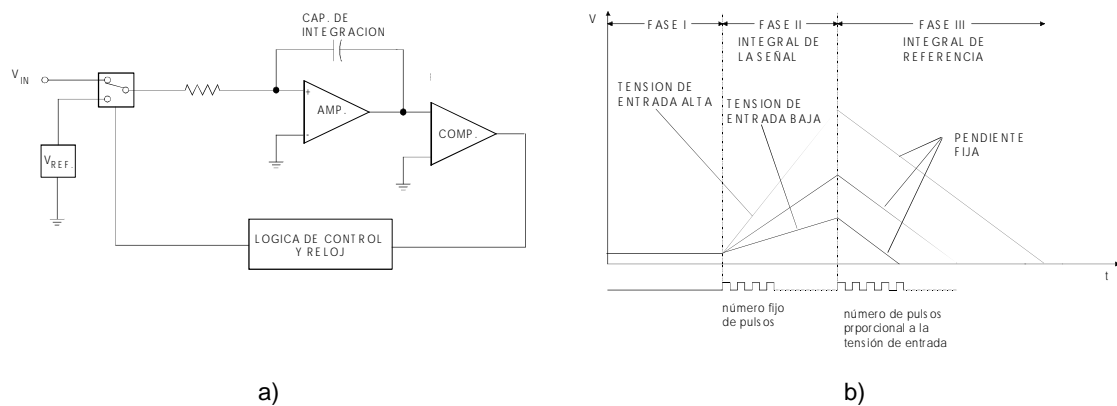


Fig. 7.13 a) Convertidor integrador de doble rampa, b) la conversión se produce en tres fases distintas

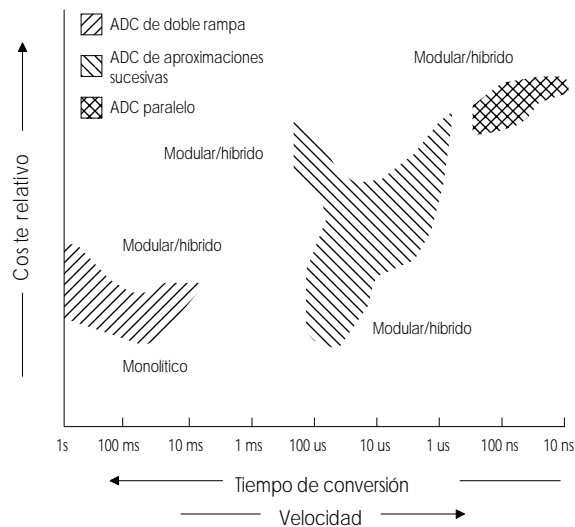


Fig. 7.14 Comparaciones entre diferentes convertidores A/D en términos de coste de velocidad

7.3.5 Multiplexores analógicos

Estos circuitos se usan para compartir el tiempo a la entrada de un convertidor A/D entre varios canales analógicos de información. Son útiles para evitar tener que disponer varios

convertidores A/D. Los tipos más usuales son de 4, 8 y 16 canales conectados en forma simple o diferencial. Un multiplexor analógico consta de un grupo de interruptores analógicos ordenados con entradas conectadas a los canales analógicos individuales y una salida común como se muestra en la figura 7.15. Los interruptores se pueden direccionar con un código digital de entrada. Se usan generalmente interruptores 'MOSFET' los cuales se pueden conectar directamente a la carga de salida si ésta tiene una impedancia suficientemente alta o, en su defecto, necesitaremos usar un amplificador 'buffer' de salida. Podemos conseguir que la impedancia de entrada del 'buffer' sea del orden de $10^9 \Omega$ en cuyo caso el error de transferencia debido a la resistencia del interruptor es despreciable, ya que ésta suele ser del orden de los $2K\Omega$. En la figura vemos un circuito multiplexor de 8 canales.

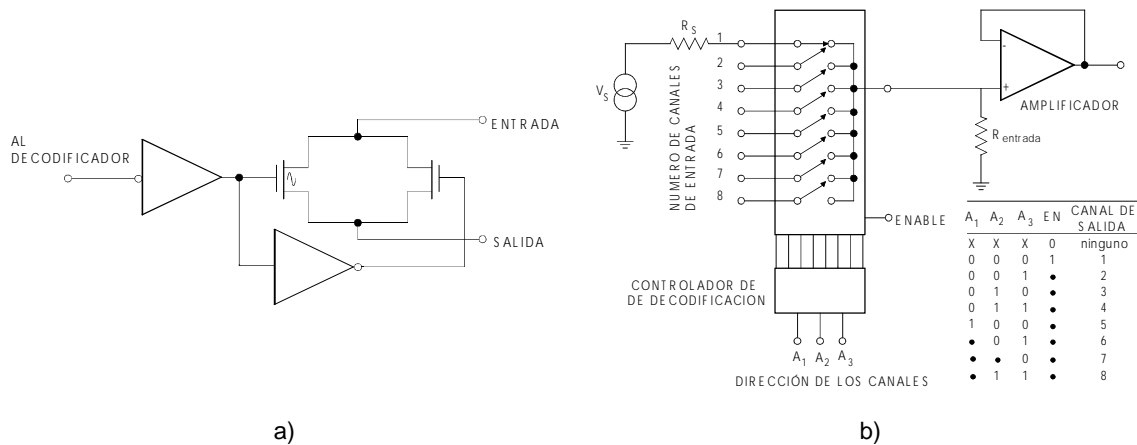


Fig. 7.15 a) Interruptor analógico basado en transistores MOS. b) Ejemplo de multiplexor analógico

7.3.6 Circuitos de muestreo y retención

Los circuitos de muestreo y retención o S&H (sample and hold') se usan ampliamente en el procesamiento de señales analógicas y en sistemas de conversión de datos para almacenar de forma precisa, una tensión analógica durante un tiempo que puede estar comprendido entre algo menos de $1\mu\text{seg.}$ y varios minutos. Esta característica les da importancia en aplicaciones que incluyen sistemas de adquisición de datos, sistemas simultáneos de muestreo y retención, en los convertidores A/D, osciloscopios de muestreo, multímetros digitales, filtros reconstructores de señal y circuitos analógicos de computación. Este tipo de circuitos son necesarios, para que el conversor A/D de un sistema de adquisición de datos disponga de una señal estable a su entrada durante el periodo de conversión.

Estos circuitos cumplen la misión de muestreo y retención que se vieron en la teoría de muestreo. Aquí discutiremos brevemente la configuración del circuito. Los circuitos de muestreo y retención se usan junto con los conversores A/D ó D/A. Con los conversores A/D se usan para acortar el tiempo de apertura para el conversor, al muestrear rápidamente la señal y después mantener su valor hasta que la conversión finalice. En los conversores D/A para mantener la salida un tiempo mayor.

Un circuito 'sample and hold' (Fig. 7.16) está formado básicamente por un interruptor y un condensador. Cuando el interruptor está cerrado el circuito está en el modo de muestreo ('sampling mode') y seguirá a una señal variable de entrada. Cuando el interruptor se abre el circuito está en el modo de mantenimiento ('hold mode') y retiene una tensión en el condensador durante cierto tiempo que depende de éste y de las fugas del interruptor.

Los circuitos de muestreo y retención ('sample and hold') prácticos también usan amplificadores 'buffer' de entrada y salida, y sofisticadas técnicas de conmutación.

El amplificador 'buffer' de salida debe tener un 'FET' (transistor de efecto campo) de baja corriente de entrada (alta impedancia) para que el efecto de fugas del condensador sea lo más pequeño posible.

En la figura 7.16 vemos varias configuraciones de circuitos 'sample and hold' usadas normalmente. Algunos se usan para circuitos de muestreo y retención rápidos. Otro es una configuración en lazo cerrado con un integrador operacional en la línea de realimentación del 'buffer' de entrada. Este circuito tiene gran precisión y linealidad.

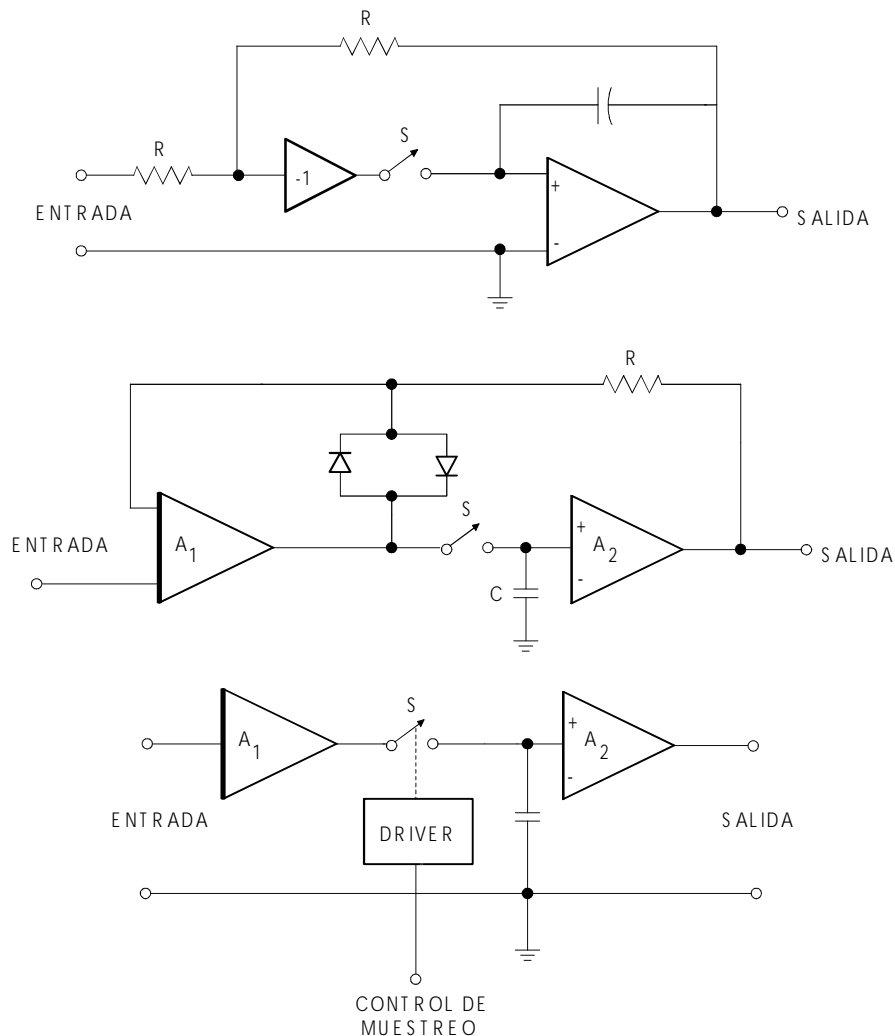


Fig. 7.16 Circuitos de muestreo y retención "sample & hold"

7.3.7 Modos de conexión de un sistema de adquisición de datos a un ordenador

Existe básicamente cuatro modos de conexión de un convertidor analógico-digital a un ordenador:

1) Adquisición del valor más reciente

En este método el convertidor está funcionando continuamente y al final de cada conversión el registro de salida es actualizado con el nuevo valor. El ordenador procede simplemente a leer

este registro en el momento que lo necesita. Este registro es actualizado a la velocidad máxima de actuación del convertidor.

2) Comienza y espera

En este método el ordenador controla el proceso poniendo en marcha el convertidor cuando lo necesita y espera la señal de (EOC, 'End Of Conversión') de fin de la conversión que le indica que ésta ha concluido y que en el registro de salida del convertidor se encuentra el valor deseado, a continuación el ordenador lee este valor. Otra técnica consiste en esperar un tiempo superior al de conversión y leer entonces el registro de salida del convertidor. Este procedimiento es bastante sencillo de implementar pero el ordenador no puede hacer otra cosa mientras espera a la conversión.

3) Utilizar interrupciones

Este método hace uso de las capacidades de interrupción del ordenador. Bien por un reloj o por el propio ordenador se da la orden de inicio de la conversión y el ordenador sigue haciendo otro programa. Cuando el convertidor termina (la señal EOC) produce una interrupción al ordenador, obligándole a abandonar la tarea que está realizando para atender a la rutina de servicio de la toma de datos. A continuación prosigue su tarea.

4) Utilizar acceso directo a memoria (DMA)

El acceso directo a memoria es la manera más eficaz de transferir datos a alta velocidad. Este método permite la transferencia Entrada/Salida sin intervención de programa. La transferencia se efectúa a través de canales especiales que 'roban' ciclos del bus sin que el procesador intervenga. Sólo tienen sentido para la introducción de un bloque de datos, por lo que su utilidad en adquisición de datos se reduce al estudio de transitorios o a transferencias de datos entre equipos que posean memoria propia y la del ordenador.

7.3.8 Especificaciones y parámetros característicos

ESPECIFICACIONES DEL SISTEMA DE ENTRADA Y SALIDAS ANALÓGICAS

ENTRADAS	SALIDAS
Número máximo de señales	Número máximo de señales
Frecuencia máxima de lectura	Tiempo de conversión
Márgenes de tensión	Margen de la tensión
Tensión máxima accidental	Impedancia de salida/carga
Tipo de señal y masa	Precisión
Impedancia de salida del transductor	Estabilidad
Impedancia de entrada en el ordenador	
Desequilibrio de impedancias en el sistema	
Ruido en modo común	
Espectro del ruido normal	
Precisión	
Estabilidad	

ESPECIFICACIONES DEL SISTEMA DE ENTRADA Y SALIDAS DIGITALES

ENTRADAS	SALIDAS
Número máximo de señales	Número máximo de señales
Frecuencia máxima	Frecuencia máxima
Sincronización	Sincronización
Duración mínima de la señal antes de su lectura	Duración de la señal
Duración máxima o mínima de la señal	Impedancia salida/carga
Impedancia máxima en circuito cerrado	Límites de tensión y corriente
Impedancia mínima circuito abierto	
Límites de tensión y corriente	
Tensión máxima accidental	
Tipo de señal y masa	

ESPECIFICACIONES PARA EL CABLEADO INSTRUMENTACIÓN-ORDENADOR

Unifilar / bifilar
 Trenzado / paralelo
 Pantalla: tipo, recubrimiento, masa, etc.
 Sección
 Aislamiento y protección
 Número máximo de cables juntos
 Separación de cables con otro tipo de señal (alterna, potencia, etc.)
 Longitud máxima de cable permitida
 Tipo de conexión terminal