



Laboratorio de Mediciones Eléctricas de 6° año - Electromecánica

Trabajo Práctico N° 6

1. Describir las ventajas de los instrumentos digitales.
2. ¿Cómo es el procesamiento de las señales?
3. ¿Qué es un convertidor?
4. Nombrar tipos de convertidores que conocen y cómo funcionan.



CAPITULO 3

INSTRUMENTOS DIGITALES

Introducción

Este tipo de instrumentos cumplen básicamente la misma función que los descritos en el capítulo anterior, con la diferencia que el valor de la medición se ve reflejada en un *display* o *pantalla de cuarzo líquido LCD* (existen casos en que el operario puede optar por una forma de muestreo en particular, por ejemplo gráfico de barras, tablas de valores medidos, etc.), y que el procesamiento de los datos a medir se realiza mediante conversores analógicos/digitales (A/D) o en forma íntegramente digital.

Estos instrumentos poseen una cantidad de ventajas frente a los analógicos, las cuales serán descritas a continuación, a saber:

1. *La exactitud de los instrumentos digitales resulta mayor que la de sus similares analógicos. Por ejemplo, la exactitud habitual en un buen instrumento analógico es de 0,5% mientras que en un instrumento digital la misma se encuentra entre el $\pm 0,1\%$ y 0,005%.*
2. *Para un mismo valor a medir, dos observadores podrán obtener la misma conclusión respecto al valor numérico de la medición, evitando así errores de paralaje o de lectura. La repetitividad en las mediciones (entendida como precisión) es mayor cuanto mayor sea la cantidad de dígitos intervinientes en la medición.*
3. *La apreciación en forma de dígitos agiliza el proceso de medición cuando se requiere tabular o tomar un gran número de mediciones.*
4. *La salida de la gran mayoría de los instrumentos digitales actuales pueden alimentar impresoras y/o registradores, y además por medio de distintos sistemas de software permiten procesar y analizar datos mediante el uso de computadoras u ordenadores personales (PC) y microprocesadores.*
5. *Debido a la evolución electrónica y al avance logrado en la integración de componentes a gran escala, los instrumentos digitales*



hoy por hoy resultan de un valor más que razonable y accesible comparados con sus similares analógicos.

Descripción primaria del instrumental digital

En los *sistemas digitales*, el procesamiento de las señales a medir se realiza *digitalmente*, es decir que si la señal de entrada es analógica, se convierte en digital mediante un conversor analógico/digital (A/D), y la medición se realiza operando sobre pulsos digitales.

Los *instrumentos digitales* lograron proporcionar mayor versatilidad y portabilidad por minimizarse el consumo eléctrico, su peso y su volumen; además de obtener ventajas sobre otros aspectos que se detallarán en el transcurso de este capítulo.

Los sistemas digitales interpretan dos estados lógicos conocidos como *bits* del *sistema digital binario* (unos y ceros). Mediante la transmisión de datos en el formato de 4, 8, 16 ó 32 bits, la información digital es mostrada en un indicador (display o pantalla), o bien transmitida a otro sistema sistema digital como por ejemplo registradores, memorias, microprocesadores y/o computadoras para su procesamiento en tiempo real en control de proceso o para su posterior análisis, tabulación y/o graficación. Según la tecnología utilizada (TTL, CMOS, ECL, I²L), variarán los valores nominales de tensión que representen a cada uno de los dígitos binarios, pero en todos los casos el valor **1** representa el estado *encendido* y el valor **0** el estado *apagado*. Además, se pueden aplicar diferentes convenciones lógicas, la *positiva* y la *negativa*. Su diferencia radica en la utilización de tensiones positivas (*lógica positiva*) o negativas (*lógica negativa*) para la representación del *valor binario 1*.

Un número de 8 bits del sistema binario sería, por ejemplo, *10001001* y la transmisión de dicho número se hace mediante un tren de pulsos de "encendido" y "apagado" en función del tiempo (Fig. 3.1). Para la correcta interpretación entre las distintas etapas de elaboración de los datos binarios transmitidos, se deberá tener un sincronismo de los mismos (correlación en los tiempos de transmisión), lo cual se logra mediante una frecuencia de barrido o "frecuencia de clock", lo cual permite la correcta transmisión e interpretación de los datos, ya que por cada ciclo o pulso de "clock" se transferirá un bit . El sistema binario (basado en sus dos valores, 1 ó 0), si bien no es el único sistema digital, resulta el más

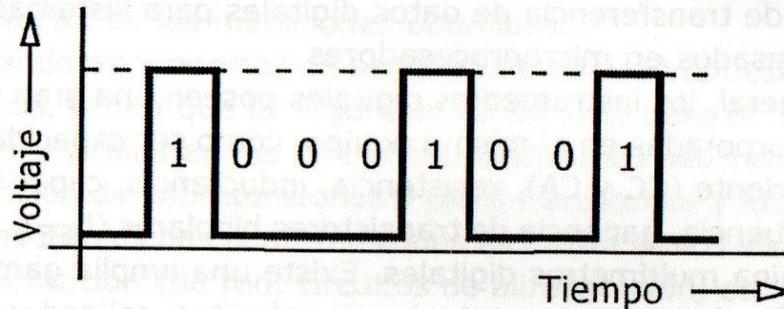


Fig. 3.1 Representación en pulsos binarios (8 bits) del número 10001001 (lógica positiva)

sencillo de explicar para poder tener una idea sobre los mecanismos de transferencia de datos utilizados por estos sistemas.

Previo al advenimiento en el desarrollo de las técnicas digitales, existían instrumentos electrónicos valvulares y transistorizados, que ejecutaban el procesamiento de la señal a medir en forma analógica, funcionando sus circuitos como adaptadores (amplificadores, atenuadores o conversores). Mediante la construcción de equipos de medición valvulares, se obtuvieron mejoras en las características de impedancia de entrada, evitando que el instrumento de medición genere una carga o consumo sobre el circuito o valor a medir.

Una vez impuesto el uso de los semiconductores, con el desarrollo de los transistores FET (transistores de efecto de campo) se logró conservar las características de alta impedancia de los equipos valvulares, con un consumo eléctrico mucho menor (sin pérdidas por disipación de calor), pudiéndose fabricar equipos con menor peso y tamaño. Con el avance de las técnicas digitales, resultó indispensable realizar medidas sobre circuitos lógicos, por lo que era indispensable disponer de instrumentos enteramente digitales.

En la actualidad se existen en el mercado equipos, analógicos-digitales y enteramente digitales. Esta clasificación radica en el procesamiento de la señal a medir. Por ejemplo, un instrumento analógico procesará enteramente la señal a evaluar en forma analógica. En el caso de un instrumento analógico-digital, la señal se procesa combinando ambas tecnologías, como por ejemplo en una pinza amperométrica digital, la cual sensa la corriente mediante un sistema inductivo (transformador) y luego es procesada digitalmente. En los instrumentos digitales, el tratamiento de la señal es digital de punta a punta, como ocurre en los analizadores



de velocidad de transferencia de datos digitales para sistemas de control de proceso basados en microprocesadores.

Por lo general, los instrumentos digitales poseen una gran cantidad de funciones incorporadas en el mismo equipo, como ser capacidad de medir tensión y corriente (CC y CA), resistencia, inductancia, capacitancia, continuidad, frecuencia, ganancia de transistores bipolares (h_{FE}), etc. Por ello se los denomina multímetros digitales. Existe una amplia gama de multímetros, clasificados por sus prestaciones, robustez, calidad y precio.

A continuación describiremos algunos de los datos a tener en cuenta en la selección de un instrumento digital.

Cuando uno describe las posibilidades de muestreo que posee un instrumento digital se refiere habitualmente a un display de $3\frac{1}{2}$ ó $4\frac{1}{2}$ dígitos. Esto se refiere a la capacidad numérica de muestreo que el display del instrumento posee. Por ejemplo, un instrumento identificado con display de $3\frac{1}{2}$ dígitos puede mostrar los tres últimos dígitos de 0 a 9 (sistema decimal), mientras que el primero de ellos sólo podrá ser un 0 ó un 1.

De lo explicado, se deduce que la mayor marcación que dicho display podrá hacer es 1999, independientemente de donde se encuentre ubicado el punto decimal (el cual dependerá de la escala de medida seleccionada en el instrumento). En el caso que el instrumento digital utilizado sea autorango (selección automática del rango de medida), si la medición a realizar se encuentra fuera de la capacidad máxima del instrumento, se leerá en pantalla la leyenda *OL* (correspondiente a la abreviatura de la palabra inglesa "overload" que significa sobrecarga). Este será uno de los factores que se deberá tener en cuenta en función de las mediciones más habituales a realizar con el multímetro y en su precisión.

Si las mediciones a realizar corresponden a variables en función del tiempo, y resulta importante tener un lote de mediciones separadas una de otra un lapso de tiempo determinado, dependiendo de la duración de dicho lapso de medición (microsegundos o días) se deberá elegir el instrumento en cuestión para que éste posea la rapidez necesaria para captar las variaciones deseadas. Además, si las mediciones obtenidas se desean registrar, que el multímetro elegido posea la capacidad de almacenamiento, o bien de, transferencia de datos a un registrador externo.

Habitualmente, se diferencian los equipos portátiles de los estacionarios o de laboratorio, aunque debido a la gran versatilidad que los instrumentos digitales actuales poseen, no resulta una limitación de prestacio-



nes o de calidad en las mediciones obtenidas.

Los estándares y normas de seguridad actuales impuestos a los equipos eléctricos, hacen que la seguridad en servicio para el operario de los multímetros digitales en las diferentes mediciones sea realmente elevada. La aparición de sobretensiones o picos transitorios y los niveles, cada vez mayores que dichas sobretensiones alcanzan en los sistemas eléctricos de alimentación (de red, circuitos de alimentación, etc.), ha obligado a establecer normas de seguridad mas severas para los equipos de mediciones eléctricas. Los transitorios superpuestos con alguna fuente de alimentación (de red o no), puede desencadenar en sucesos capaces de ocasionar graves lesiones para el operario, por lo que el equipo de medición deberá estar diseñado para proteger a las personas que trabajan con ellos o en el entorno de tensiones y corrientes de gran magnitud.

En 1988, la CEI (Comisión Electrotécnica Internacional) ha elaborado

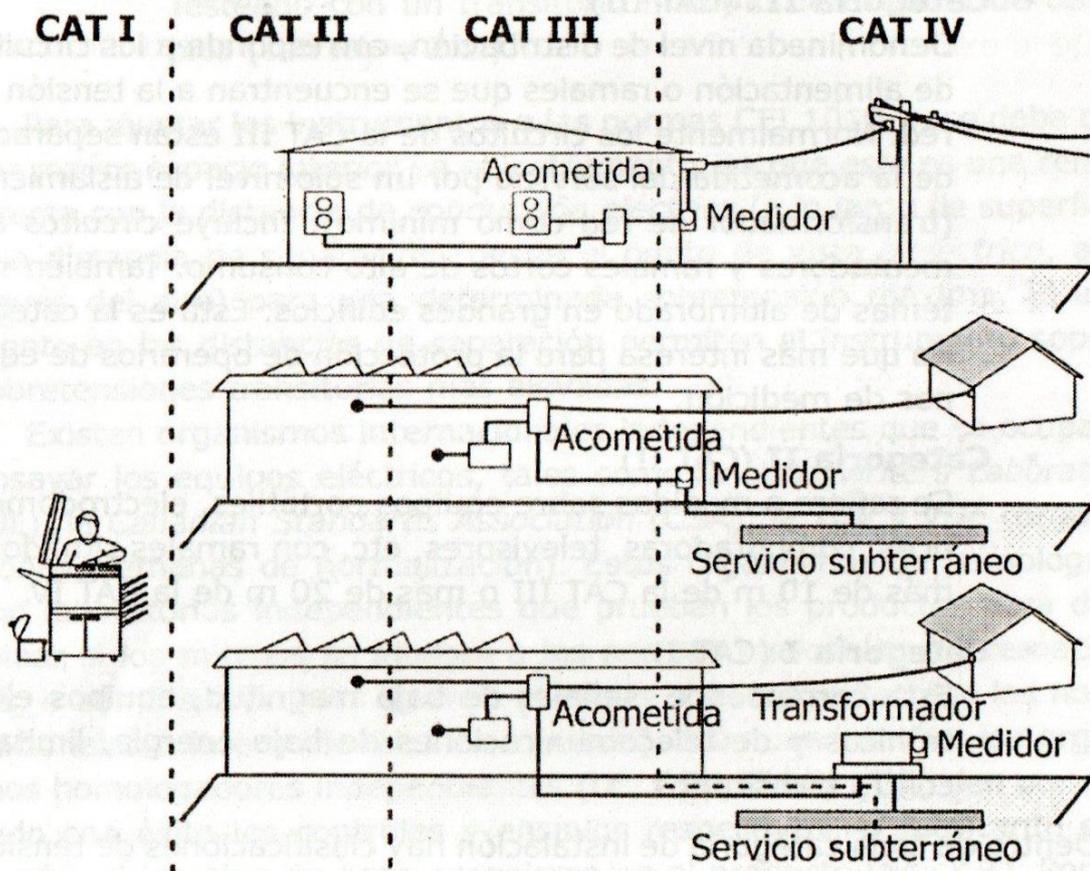


Fig. 3.2 Categorías de sobretensión según la CEI 1010-1



una norma, la *CEI-1010-1*, que es usada como base en diferentes normas internacionales (*US ANSI/ISA-S82.01-94* en EEUU; *CAN C22.2 N° 1010.1-92* en Canadá; *EN61010-1* de 1993 en Europa). En ella se especifican categorías de sobretensión, basadas en la distancia entre el equipo a la fuente de energía, y en la amortiguación natural de los transitorios eléctricos en un sistema de distribución. Las categorías que la norma indica son cuatro, y cuanto más cerca se encuentre el equipo de la fuente de energía, mayor deberá ser el grado de protección. Las categorías son las ilustradas en la fig. 3.2 y descritas a continuación, a saber:

- **Categoría IV (CAT VI)**
Denominada alimentación primaria (ver fig. 3.1). Incluye la línea de alimentación exterior (aérea o subterránea), acometida desde el poste al edificio, tramo del medidor a la caja o tablero seccionador principal del edificio.
- **Categoría III (CAT III)**
Denominada nivel de distribución, corresponde a los circuitos de alimentación o ramales que se encuentran a la tensión de red. Normalmente los circuitos de la CAT III están separados de la acometida del servicio por un solo nivel de aislamiento (transformador de red como mínimo). Incluye circuitos alimentadores y ramales cortos de alto consumo. También sistemas de alumbrado en grandes edificios. Esta es la categoría que más interesa para la protección de operarios de equipos de medición.
- **Categoría II (CAT II)**
Se refiere a medidas sobre equipos portátiles, electrodomésticos, computadoras, televisores, etc. con ramales situados a más de 10 m de la CAT III o más de 20 m de la CAT IV.
- **Categoría I (CAT I)**
Esta corresponde señales de baja magnitud, equipos electrónicos y de telecomunicaciones de baja energía, limitada contra transitorios.

Dentro de cada categoría de instalación hay clasificaciones de tensión. La combinación de la *categoría de instalación* con la de *clasificación de tensión* es lo que determina la *capacidad máxima del instrumento para*



soportar los transitorios. La comprobación en los instrumentos se realiza como se detalla a continuación, siendo R_{if} la resistencia interna de la fuente de suministro para el ensayo, a saber:

- **Categoría II 600 V**
Testeado con un transitorio máximo de 4.000 V de tensión pico (con $R_{if} = 12 \Omega$).
- **Categoría II 1000 V**
Testeado con un transitorio máximo de 6.000 V de tensión pico (con $R_{if} = 12 \Omega$).
- **Categoría III 600 V**
Testeado con un transitorio máximo de 6.000 V de tensión pico (con $R_{if} = 2 \Omega$).
- **Categoría III 1000 V**
Testeado con un transitorio máximo de 8.000 V de tensión pico (con $R_{if} = 2 \Omega$).

Para ajustar los instrumentos a las normas CEI 1010-1, se debe obtener mayor espacio interior en el instrumento, ya que este es una relación directa con la distancia de *conducción eléctrica* (a lo largo de superficies) y la distancia de *separación* (desde el punto de vista *dieléctrico*, aún a través del aire) para una determinada sobretensión máxima. El incremento en las distancias de separación permiten al instrumento soportar sobretensiones transitorias más elevadas.

Existen organismos internacionales independientes que se ocupan de ensayar los equipos eléctricos, tales como la *Underwriters Laboratories (UL)*, la *Canadian Standards Association (CSA)*, la *TUV* y *VDE* (organizaciones alemanas de normalización). Estos organismos de homologación son laboratorios independientes que prueban los productos para determinar si los mismos se ajustan a las normas nacionales e internacionales, o aún a sus propias normas (siempre más exigentes que las normas nacionales e internacionales en vigencia). Sólo una vez que los organismos homologadores independientes (UL, CSA, TUV y VDE) den por superado con éxito los controles y ensayos respectivos, el fabricante podrá exhibir el logotipo de cada organismo en el producto (fig. 3.3). Por ello, al adquirir un equipo de medición, resulta de alta confiabilidad que el mis-



mo se encuentre aprobado por los organismos independiente citados.

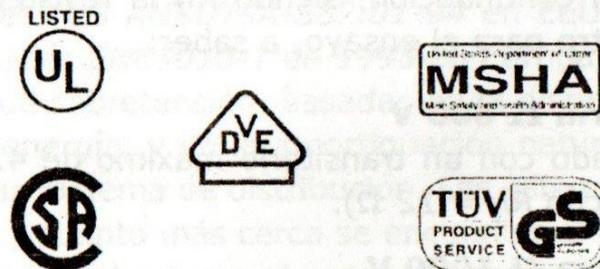


Fig. 3.3 Logotipos de organismos de homologación independientes

Descripción de los convertidores A/D

Como ya hemos mencionado anteriormente, los instrumentos digitales manejan internamente información binaria (1 y 0), la cual puede provenir de señales a evaluar *digitales*, o bien de señales *analógicas convertidas a digitales* dentro del equipo mediante el uso de *convertidores A/D*. Como su nombre lo indica, son dispositivos electrónicos que convierten una señal analógica cualquiera en formato digital. Los más comunes son los mencionados brevemente a continuación, a saber:

1. Convertidores A/D por rampa en escalera:

Estos son los más sencillos. En la fig, 3.4 se describe un diagrama de bloques. Al dar inicio, la señal analógica de entrada es comparada con una rampa digital ascendente, y a través de los pulsos de reloj o "clock" que alimenten el contador, se producirá el proceso de comparación. Cuando la señal de la rampa digital supere el valor de la *señal analógica* V_{entr} , se inhibirá el conteo. La comparación entre la señal analógica y la digital producida por la rampa se realiza por un convertidor digital/analógico (D/A). Por ejemplo, si se fija la frecuencia de "clock" en 5 MHz, para una salida de 10 bits son necesarios 0,2 ms para un barrido completo de rampa.

2. Convertidores A/D por aproximaciones sucesivas:

Son utilizados ampliamente por su combinación de *alta velocidad* (entre 1 y 50 μs) y *perfecta resolución*, aunque resultan más costosos. El diagrama de bloques de este tipo de



convertidores resulta similar al visto en el punto 1, pero la diferencia radica en la lógica especial que el convertidor posee, ya que la comparación no se hace por una rampa ascendente sino que intenta varios códigos de salida y los alimenta al convertidor D/A. El tiempo de conversión de este tipo de convertidor es $T_{conv} = n / f$, siendo n el número de bits del convertidor y f la frecuencia de "clock". Por ejemplo, para una salida de 12 bits y una frecuencia de reloj de 12 MHz, hará una conversión cada 1 μs . Sin embargo, una desventaja que estos convertidores poseen es que mientras se realiza la conversión, la señal de entrada deberá permanecer constante.

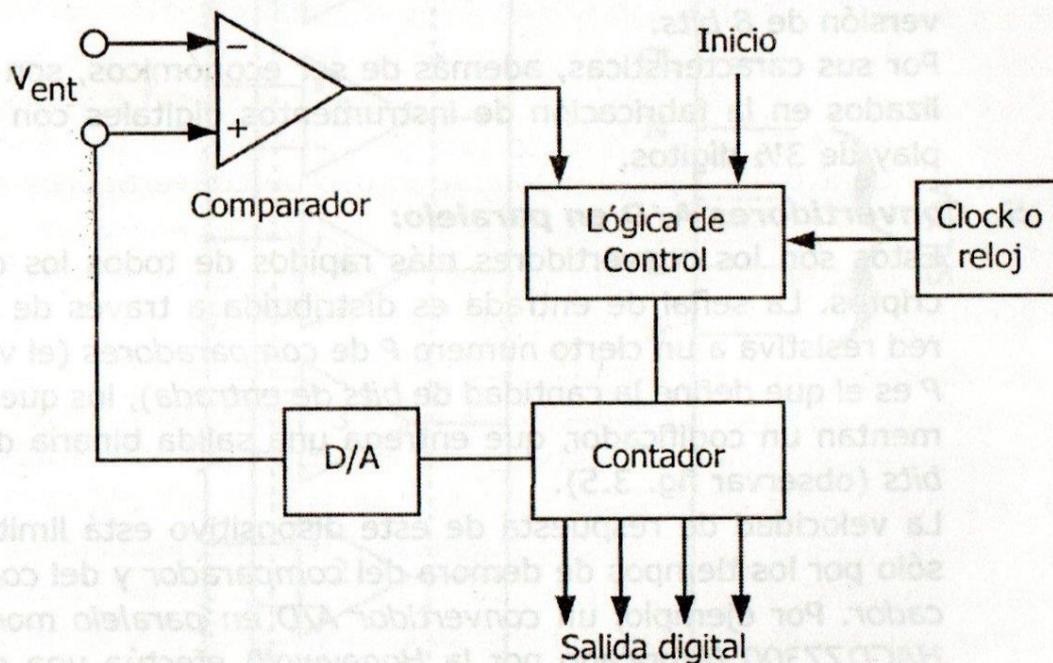


Fig. 3.4 Diagrama de bloques de conversor A/D por rampa en escalera

3. Convertidores A/D de doble rampa:

Son empleados normalmente en aplicaciones donde se requiera una alta inmunidad al ruido, gran exactitud y economía. Pueden eliminar gran cantidad del ruido proveniente de la señal de entrada ya que en la conversión digital de esta señal se encuentra una etapa integradora. Si bien esto resulta beneficioso en un sentido, extiende los tiempos de con-



versión (valores típicos entre 10 y 50 ms). Estos convertidores son muy utilizados en voltímetros digitales.

4. Convertidores de voltaje a frecuencia (V/F):

Estos dispositivos funcionan convirtiendo la señal analógica de entrada en un tren de pulsos binarios, los cuales tendrán una determinada *frecuencia* f (o *período* T) en función del valor numérico de la tensión de entrada. Mediante este mecanismo de conversión, se logra un alto rechazo al ruido proveniente de la señal de entrada.

Las *frecuencias* típicas de operación de los *convertidores* V/F están entre 10 KHz y 10 MHz. Un convertidor de 10 KHz, necesita un intervalo de compuerta de 0,025 s para una conversión de 8 bits.

Por sus características, además de ser económicos, son utilizados en la fabricación de instrumentos digitales con display de 3½ dígitos.

5. Convertidores A/D en paralelo:

Estos son los convertidores más rápidos de todos los descritos. La señal de entrada es distribuida a través de una red resistiva a un cierto número P de *comparadores* (el valor P es el que define la cantidad de *bits de entrada*), los que alimentan un codificador, que entrega una salida binaria de N bits (observar fig. 3.5).

La velocidad de respuesta de este dispositivo está limitada sólo por los tiempos de demora del *comparador* y del *codificador*. Por ejemplo, un *convertidor* A/D en paralelo modelo HACD77300 (fabricado por la Honeywell) efectúa una conversión de datos analógicos en digitales en un lapso de tiempo de 4 ns. La resolución de salida estará limitada por la cantidad N de *bits de salida* que el codificador posea. Para una salida de 3 bits son necesarios 8 *comparadores*, mientras que para una salida de 8 bits serán necesarios 256 *comparadores*.

La exactitud que poseen los instrumentos digitales son generalmente mayores que las que poseen sus pares analógicos, pero deben ser comprendidas en forma clara y correcta las especificaciones de los fabrican-

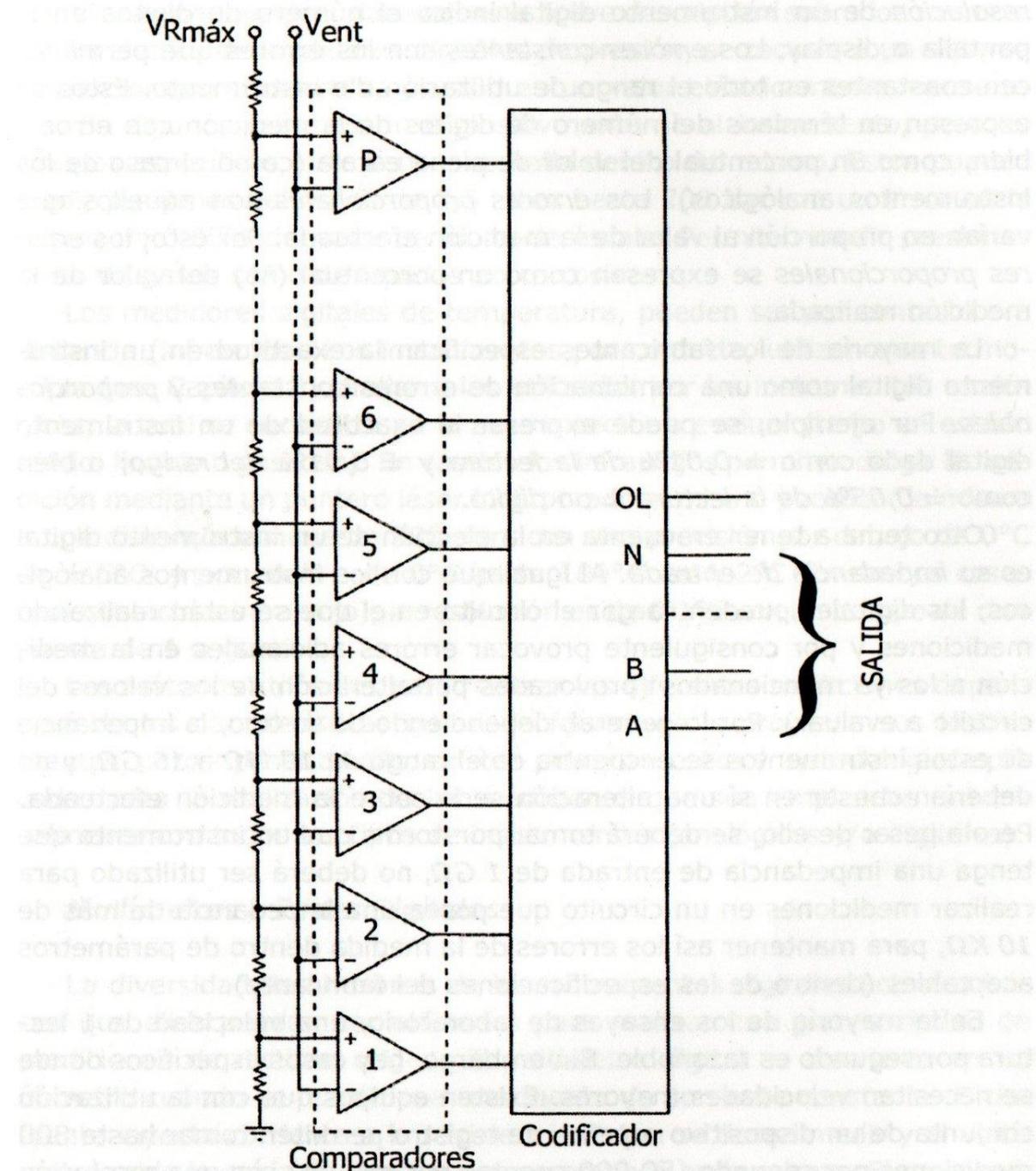


Fig. 3.5 Diagrama de bloques de conversor A/D en paralelo

tes para que dicha afirmación sea cierta. Hay tres conceptos claves involucrados en la comprensión de las especificaciones de exactitud de estos instrumentos: la *resolución*, el *error constante* y el *error proporcional*. La



resolución de un instrumento digital indica el número de dígitos en la pantalla o display. Los *errores constantes* son los errores que permanecen constantes en todo el rango de utilización del instrumento. Estos se expresan en términos del número de dígitos de la medición con error o bien, como un porcentual del valor de plena escala (como el caso de los instrumentos analógicos). Los *errores proporcionales* son aquellos que varían en proporción al valor de la medición efectuada. Por esto, los *errores proporcionales* se expresan como un porcentual (%) del valor de la medición realizada.

La mayoría de los fabricantes especifican la exactitud en un instrumento digital como una combinación de errores *constantes* y *proporcionales*. Por ejemplo, se puede expresar la exactitud de un instrumento digital dado como $\pm 0,01\%$ de la lectura y $\pm 0,01\%$ del rango; o bien como $\pm 0,05\%$ de la lectura \pm un dígito.

Otro tema a tener en cuenta en la elección de un instrumento digital es su *impedancia de entrada*. Al igual que con los instrumentos analógicos, los digitales pueden cargar el circuito en el que se están realizando mediciones y por consiguiente provocar errores adicionales en la medición a los ya mencionados (provocados por alteración de los valores del circuito a evaluar). Por lo general, dependiendo de su tipo, la impedancia de estos instrumentos se encuentra en el rango de $10 M\Omega$ a $10 G\Omega$, y no deberían causar en sí una alteración seria sobre la medición efectuada. Pero a pesar de ello, se deberá tomar por norma que un instrumento que tenga una impedancia de entrada de $1 G\Omega$, no deberá ser utilizado para realizar mediciones en un circuito que posea una impedancia de más de $10 K\Omega$, para mantener así los errores de la medida dentro de parámetros aceptables (dentro de las especificaciones del fabricante).

En la mayoría de los ensayos de laboratorio, una velocidad de 1 lectura por segundo es razonable. Sin embargo, hay casos específicos donde se necesitan velocidades mayores. Existen equipos que con la utilización conjunta de un dispositivo externo de registro permiten tomar hasta 800 mediciones por segundo (50.000 cuentas por minuto) con una resolución de $6\frac{1}{2}$ y una exactitud de 5 ppm (5 partes por millón) con una sensibilidad de 10 nV (10 nanovolt).

Si bien lo especificado hasta aquí corresponde a medidores digitales convencionales, existen dispositivos específicamente diseñados para realizar únicamente mediciones de presión, temperatura, aislación, frecuen-



cia, etc. A continuación, daremos una breve descripción sobre los mismos.

En el caso de medidores digitales de presión, se recurre a un sistema transductor que convierte la presión en un valor eléctricamente mensurable. En algunos casos es un dispositivo externo al instrumento, pero en equipos específicos, este sensor se halla dentro del mismo. Estos pueden medir presiones del orden de 2,5 mbar hasta 700 bar con un error en la misma de 0,05% del valor de fondo de escala. Permiten medir presiones tanto de gases como de líquidos no corrosivos.

Los medidores digitales de temperatura, pueden ser por contacto o a distancia (infrarrojos). Los instrumentos por contacto, utilizan una termocupla (ver Capítulo 2) similar a las utilizadas por los instrumentos analógicos, la cual se encuentra en la zona o sector a evaluar (tanto en estado sólido, líquido o gaseoso). En cambio los infrarrojos permiten dirigir la medición mediante un puntero láser incorporado al mismo y realizar la misma a una distancia mínima de 300 mm, con una precisión por debajo de 0°C de $\pm 5^\circ\text{C}$, y por encima de 0°C hasta 100°C de $\pm 2^\circ\text{C}$. En ambos casos (por contacto e infrarrojo), la resolución es de 0,1°C con un tiempo de respuesta de 1 segundo.

Los métodos utilizados para realizar las diferentes mediciones dependerá de las características que cada fabricante le provea a sus instrumentos, pero a pesar de ello, existen procedimientos y metodologías aplicadas para la realización de las mediciones que son empleados universalmente con todos los tipos de instrumentos (analógicos y/o digitales).

Multímetros o Tester Digitales

La diversidad de funciones de los instrumentos digitales actuales hacen que ellos puedan ser utilizados para realizar una gran variedad de mediciones de distinto origen. El voltímetro digital se convierte en un óhmetro cuando se le adiciona una fuente de corriente constante. Dicha fuente inyecta corriente a la *resistencia R* que se desea medir y el voltímetro mide la caída de tensión que se provoca en la misma. El error que se tiene en la medición de resistencia con un multímetro digital varía desde $\pm 0,002\%$ de la lectura ± 1 dígito hasta $\pm 1\%$ de la lectura ± 1 dígito. Las demás mediciones que un multímetro puede realizar se logran mediante sistemas transductores que expresan las diferentes variables a evaluar como valores de tensión, corriente o resistencia. De esta forma,



si el multímetro no posee los accesorios instalados internamente, disponiendo de los elementos sensores y/o transductores necesarios para interconectarlos externamente, se podrán evaluar distintos tipos de valores y variables.

Escuela de Educación Secundaria Técnica N°1
Juan Bautista Alberdi
Conesa



Profesor: Giovagnoli Francisco Ariel
Correo: frangiovagnoli@hotmail.com
