



SENSORES INTELIGENTES: UNA HISTORIA CON FUTURO



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUNYA, BARCELONA-SPAIN
UNIVERSIDAD NACIONAL EXPERIMENTAL POLITÉCNICA «ANTONIO JOSE DE
SUCRE», PUERTO ORDAZ - VENEZUELA

MsC. Ing. Angel Custodio Ruiz

*El Ing. Angel Custodio es Profesor Asistente en el Dpto. de Ingeniería Electrónica de la UNEXPO, Vicerrectorado Puerto Ordaz. Actualmente realiza el Doctorado en el Departamento de Ingeniería Electrónica de la Universidad Politécnica de Catalunya, en Barcelona, España.
(Dirección: UPC Campus Nord, C/Jordi Girona 1-3, Edificio C4, Dpto. de Ingeniería Electrónica, C.P. 08034)
Telf: 34-934016840, Fax: 34-934016756, e-mail: custodio@eel.upc.es.*

PhD Ramon Bragós Bardía

*El Dr. Ramon Bragós Bardía es Profesor Titular en el Dpto. de Ingeniería Electrónica de la Universidad Politécnica de Catalunya en Barcelona, España.
(Dirección: UPC Campus Nord, C/Jordi Girona 1-3, Edificio C4-311, Dpto. de Ingeniería Electrónica, C.P. 08034)
Telf: , Fax: 34-934016756, e-mail: rbb@eel.upc.es.*

PhD Ramon Pallàs Areny

*El Dr. Ramon Pallàs Areny es Catedrático de Universidad en el Dpto. de Ingeniería Electrónica de la Universidad Politécnica de Catalunya en Barcelona, España. Actualmente dirige la División de Instrumentación y Bioingeniería del Dpto de Ingeniería Electrónica de la Universidad Politécnica de Catalunya, en Barcelona, España.
(Dirección: UPC Campus Nord, C/Jordi Girona 1-3, Edificio C4-305, Dpto. de Electrónica, C.P. 08034)
Telf: , Fax: 34-934016756, e-mail: elerpa@eel.upc.es.*

INTRODUCCIÓN

La historia de los sensores inteligentes (o Smart Sensors) ha sido un tema apasionante desde el primer y muy sencillo sensor desarrollado por Honeywell en el año 1969, hasta los dispositivos complejos actuales de alta tecnología. Estos últimos integran muchas funciones automáticas: Identificación, calibración, comprobación, etc., que permiten obtener sensores que no sólo entregan una señal digital (o casi digital), sino además, linealizada, calibrada, robusta y compatible con otros dispositivos.

El desarrollo de estos revolucionarios componentes ha permitido aumentar la eficiencia, calidad y velocidad de los procesos industriales, la investigación y el desarrollo científico.

LA MOTIVACIÓN

El foco de interés en el desarrollo de los sensores inteligentes ha ido cambiando a lo largo de su vida [1]. Inicialmente la atención se concentró en el procesamiento de la señal generada por el sensor para mejorar la compensación de la temperatura y lograr una señal normalizada. Más tarde la atención se centró en mejorar los sistemas

digitales derivados de la conversión de la señal analógica a digital, como la comunicación remota y la direccionalidad. Esta última consiste en la posibilidad de conocer en qué punto se encuentra el sensor (ya sea en una red de multiplexado, red de sensores, o bus de campo). El desa-



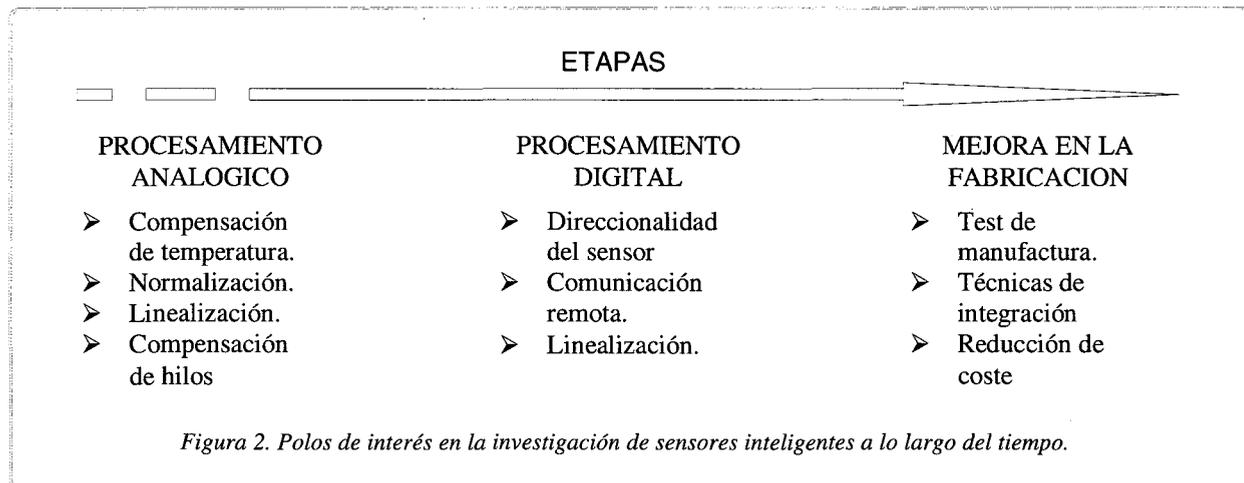
Figura 1. Medidor de temperatura industrial, basado en sensores inteligentes. Cortesía de Moore Industries.

rollo más reciente está orientado a los tests de manufactura e integración para mejorar la fabricación de los sensores, con el fin de reducir los costos y mejorar la



relación precio/prestaciones. Esto incluye el diseño de nuevos dispositivos con arquitecturas optimizadas: lo más simple que se puedan realizar, pero conservando los beneficios alcanzados a lo largo de su historia.

sensores. Lo desarrolló Honeywell en los años 60, para el sistema de aire en los aviones DC-9 [2]. Estaba formado por dos piezoresistores que medían la presión, y dos capacitores para crear un desplazamiento de fase. Estos



Estas arquitecturas actuales, aunque tiene el mismo objetivo, tienen forma de implementarse muy diferentes: recurrir a la microelectrónica para integrar componentes ya existentes (convertidores A/D, microprocesador, sensores de silicio, etc.); utilizar sistemas híbridos electromecánicos que utilizan el principio de los servomecanismos; plantear nuevas técnicas de conversión, etc.

En este artículo haremos hincapié en aquella arquitectura que busca simplificar el diseño mediante la técnica de conversión directa de la señal del proceso o sistema a digital. Entiéndase, sin utilizar convertidores A/D convencionales ni amplificadores operacionales. Esto permitirá conocer un mundo interesante donde la lucha entre bajo coste y eficiencia es mucho más fuerte que en otras tendencias.

EL NACIMIENTO

El primer sensor inteligente nació como una solución al problema de compensación de temperatura en los

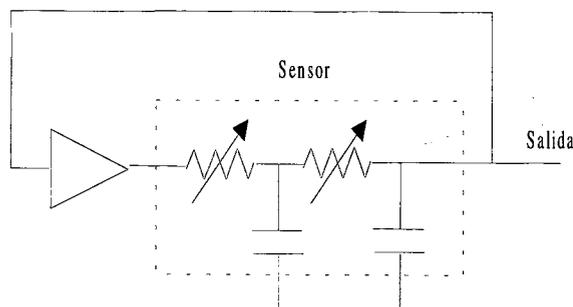


Figura 3. El primer sensor inteligente usaba sensores piezoresistivos y capacitivos integrados, conectados a un inversor para crear una salida en frecuencia proporcional a la presión.

elementos estaban realimentados y conectados a un inversor para crear un oscilador. La frecuencia de salida era proporcional a la constante de tiempo RC, y por ende a la presión. Tiempo después Toyota Research presentó otro sensor de presión similar [3]. Ambas empresas, sin imaginárselo, estaban empezando una revolución sin par en las tecnologías de sensado, que aun hoy continúa.

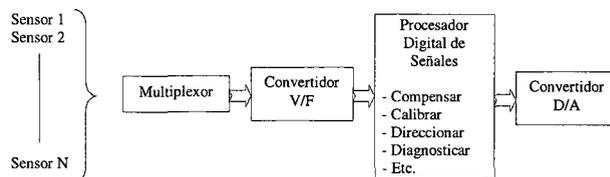


Figura 4. Sensor inteligente de la generación de los ochenta.

La siguiente generación la introdujo nuevamente Honeywell en los años 80. La presentó en dos aplicaciones: Una para el control de procesos (ST3000) [4], y otra para aplicaciones aeroespaciales [5]. Ambos estaban formados por un grupo de sensores multiplexados, conectados a un convertidor V/F (tensión/frecuencia) La frecuencia obtenida la procesaba un microprocesador tipo DSP, y la salida se llevaba a un convertidor D/A. La salida era acorde al estándar analógico de 4 mA a 20 mA. El software tenía compensación de la presión estática, calibración remota del rango, direccionalidad y diagnóstico. Los sensores eran de presión diferencial estática y temperatura en el caso del control de procesos, y presión absoluta y temperatura en el caso aeroespacial.

En la presente década se ha multiplicado el desarrollo de sensores integrados aplicables en el ámbito industrial, desarrollados por investigadores y académicos [6-9], aunque su precio elevado ha llevado a centrarse en

arquitecturas simples y mejorar los procesos de integración.

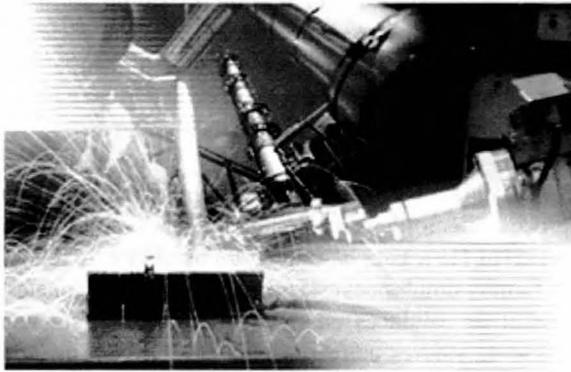


Figura 5. Los sensores inteligentes se utilizan en todo tipo de ámbito

LA ACTUALIDAD

Actualmente hay cuatro grandes tendencias en el diseño de sensores inteligentes:

1. Desarrollo de sensores inteligentes integrados. Consiste básicamente en integrar todo el dispositivo junto al sensor. Algunos ejemplos recientes son:

- 1.1. Un oscilador controlado por tensión basado en un simple flip-flop tipo D presentado por Xi. [10]
- 1.2. La integración de un sensor capacitivo junto a un convertidor Σ/Δ propuesto por Llamada y Watanabe [11]. Se consigue linealizar la señal, ajustar el cero y la ganancia.
- 1.3. Un sensor para medición angular o linear (tipo resistivo sin contacto), con conversión a frecuencia mediante el uso de un oscilador modificado de Martín, desarrollado por Li y Meijer [12].

2. Usar sistemas de conversión integrados y dejar todo el procesamiento y parte del acondicionamiento en una computadora conectada a la red. Scheriber propone que el sistema de interfaz realice sólo la captura y conversión, y dejar todo el procesamiento para corregir los errores a un PC [13]. De esta manera se podría proponer un sistema avanzado de eliminación de errores, tal como los de lógica inteligente.

También se podría usar un microcontrolador muy pequeño (como la serie PIC2XXX de Microchip Technology), y construir un sistema de adquisición de señales (multicanal) muy económico. Pailoor propone un circuito de estas características muy simple y económico [14].

3. Desarrollo de sistemas de medida integrados como el AD654 (convertidor V/F) de Analog Devices el cual permite acoplar termopares y galgas directamente.

Otra idea simple es propuesta por Atmanand para la medida de sensores L, C, y R [15]. Para ello ha desarrollado un circuito de interfaz en el cual el sensor (uno de los tres tipos) se coloca en serie con una resistencia formando la mitad de un puente. La otra mitad está formada por un convertidor DAC multiplicador. Un detector de fase compara ambas señales analógicas de los puentes y su salida es transformada a frecuencia a través de un comparador. El error en la lectura es de 0,7 %.

La familia AD771X de Analog Devices está orientada al desarrollo de sistemas de adquisición integrados (señales simples, diferenciales o pseudodiferenciales, en sensores tipo puente o medida de tensiones). Las señales de entrada son multiplexadas a un convertidor A/D (tipo Σ/Δ), y la señal digital de salida tiene formato serie. El AD280 (del mismo fabricante) tiene 4 canales y está orientado a señales de tensión y termistores, sensores integrados y RTD (permitiendo conexión de 2, 3 o 4 hilos). Debe notarse que en el caso de medida de señales diferenciales, lo que hace el dispositivo es multiplexar ambas entradas. El componente más avanzado de este fabricante es el AduC812, el cual integra un microcontrolador (8052) y tiene un precio de apenas 20 \$.

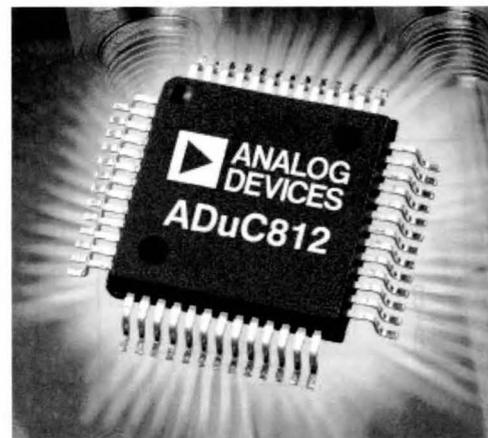
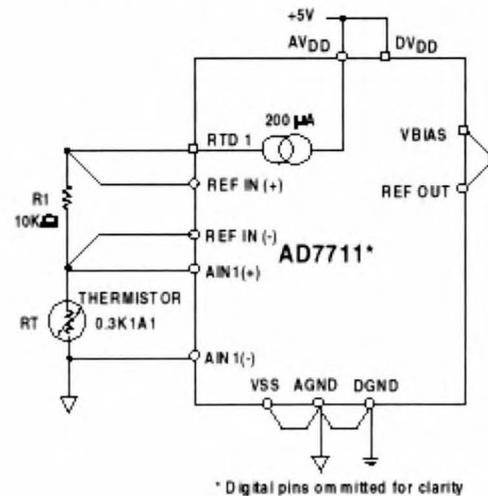


Figura 6. Ejemplos representativos de circuitos de interfaz de sensores inteligentes de la empresa Analog Device.

Crystal tiene el CS550X para conexión a circuitos diferenciales, pero necesita una electrónica compleja de interfaz. También tiene el CS554X, que es multicanal, con autocalibración de cero y ganancia.

Las ideas más revolucionarias pueden encontrarse en los dos trabajos siguientes:

3.1. El USIC (Universal sensor interface chip) desarrollado por ERA Technology Ltd [16]. Este chip posee comparadores, demoduladores Σ/Δ , filtros digitales, interfaz serie y paralelo, convertidor DAC, multiplexor, memoria RAM y un microprocesador RISC. Los convertidores son de 20 bits. Los multiplexores pueden seleccionar tres fuentes de entrada para cada convertidor, haciendo un direccionamiento total de 6 sensores. La salida digital puede ir por RS482 / RS232, o paralelo. Este sistema sin embargo fue retirado del mercado por ser demasiado costoso.

3.2. El UTI (Universal Transducer Interface), creado por Van der Goes y Meijer [17], que se puede utilizar para sensores capacitivos, RTD, termistores, puentes de resistencia y potenciómetros. Se basa en una red de interruptores utilizados para seleccionar el tipo de sensor a utilizar. La salida de la red se conecta a un convertidor de carga a periodo (oscilador de relajación), y éste genera la salida en frecuencia del sistema. El circuito tiene una resolución de 16 bits en un rango de medida de 1 ms a 100 ms. Es muy económico por estar desarrollado en tecnología CMOS. Opera con una fuente simple (3,3 V a 5,5 V), posee auto-calibración de offset y ganancia, medida 2/3/4 hilos, suprime interferencias de 50/60 Hz, y todo en un encapsulado DIP de 16 patillas.

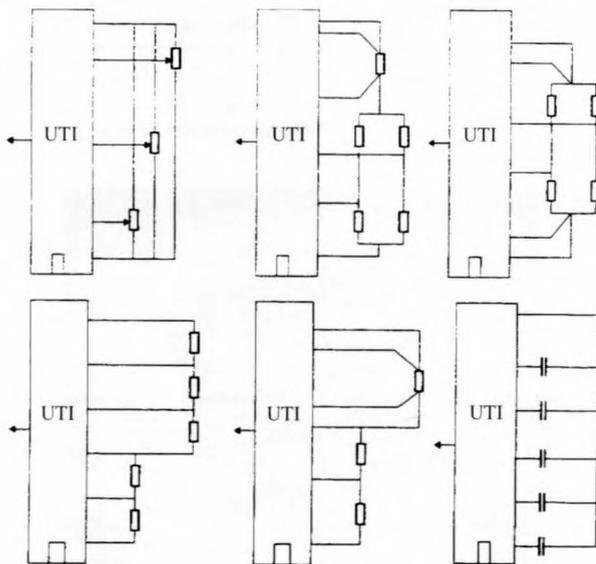


Figura 7. Posibilidades de conexión del UTI en la medida de sensores diferentes.

4. Desarrollo de sensores inteligentes de bajo coste no integrados. En el ámbito discreto se han planteado algunas técnicas de conversión a frecuencia más económicas que las anteriores. Un circuito muy simple formado por dos inversores y un comparador [18], puede alcanzar los 9 bits de resolución y, al proveer una salida que es la relación entre un voltaje de referencia y el voltaje de interés, permite reducir algunas fuentes de error.

Mochizuke y Watanabe proponen un circuito para el procesamiento de señal de alta precisión en sensores capacitivos [19]. Está basado en un oscilador de relajación. Es muy simple pues está formado por 4 operacionales. Su señal de salida es en frecuencia, siendo ésta una relación de valores entre sensores capacitivos (medida ratiométrica). Se puede detectar cambios pequeños de capacitancia de 0,1 % en un tiempo total de 10 μ s.

Ferrari propone el diseño de una interfaz que permita suministrar mediante una sola señal dos informaciones del proceso [20]. La frecuencia la controla un sensor tipo puente, mientras que el ciclo de trabajo lo controla otro sensor. Weinberg propone otro circuito que aprovecha estas dos características para obtener dos informaciones en una misma señal [21].

Otro circuito simple de Mochizuki y Watanabe, pero para sensores resistivos en puente [22], utiliza un oscilador de relajación, cuya salida realimenta a la alimentación del puente. Se obtiene una resolución de 0,05 %, y una excelente linealidad.

En todos estos trabajos se obtiene la relación de la señal medida respecto a una señal de referencia. De esta manera se reduce el efecto de elementos indeseables como son la temperatura y las variaciones en la fuente de alimentación, el efecto de elementos secundarios en la medida, y la corrección de offset y errores de sensibilidad, entre otras cosas.



Figura 8. Para el desarrollo de un sensor inteligente se necesita una fuerte investigación y el apoyo de recursos actualizados.

EL PRESENTE Y EL FUTURO

Los sensores inteligentes diseñados eran incompatibles hasta que se decidió definir una norma que permitiera su interconexión: La norma IEEE-P1451 (Transducer to Microprocessor Interface), la cual fija las directivas de los sensores inteligentes, así como la comunicación con el bus digital [23].

A continuación se exponen unas ideas generales sobre la posible repercusión futura de esta norma.

La norma generaliza el concepto de sensor inteligente al de Transductor Inteligente, todos montados sobre una red común y con la información necesaria para saber en cualquier momento quien es sensor y quien es actuador, y que propiedades tiene cada uno.

sensibilidad, corrección de temperatura), e inteligencia (auto-comprobación, auto-calibración y auto-identificación).

La arquitectura en diagramas de bloques se muestra en la figura 10.

El NCAP es un microprocesador encargado de administrar la comunicación con la red donde se instale el dispositivo. El TEDS es una ROM donde se guarda la información de identificación del componente (tipo, fabricante, funciones, etc.). El funcionamiento es muy simple: Los sensores, vía un multiplexor, entregan la información a un acondicionador de señal, el cual se encarga de corregir los errores fundamentales de la señal (linealidad, offset, derivas, etc.). Luego esta señal se digitaliza a digital; esta información, junto con la del TEDS, se envía

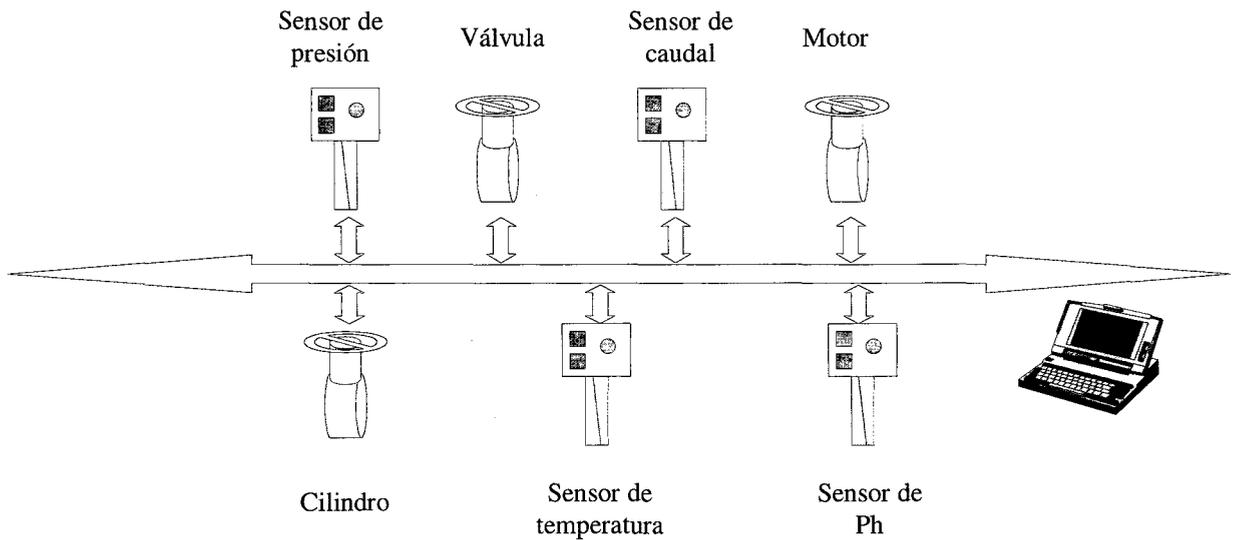


Figura 9. Transductores interconectados en un mismo bus.

La figura 9 recoge la idea central de la norma. Hay varios dispositivos, sensores y actuadores, de diversos fabricantes, con diversas tecnologías. Algunos pueden ser más complejos que otros, pero comparten los requerimientos mínimos de identificación, direccionalidad y comunicación. De esta manera el sensor, no sólo podrá «conocerse a sí mismo», sino que también podrá «conocer a sus compañeros». Esta comunicación interactiva permitirá saber qué tipo de transductor es el dispositivo (sensor o actuador), cuál es su función (sensor de presión, caudal, etc.), posibilidades, ubicación y fabricante. Así podrán realizarse enlaces online de identificación, corrección de parámetros, optimización del proceso, y un amplio etcétera de posibilidades.

Desde el punto de vista del sensor, éste es un circuito (integrado o no), que tiene una o más de las funciones de sensado (uno o más sensores), interfaz (acondicionamiento de la señal, conversión entre dominios, estandarización de la salida), calibración (cero, linealidad,

al NCAP para que sea normalizada y colocada en la red. El proceso inverso también es válido. La información proveniente de la red se convierte al lenguaje propio del fabricante a través del NCAP, con el fin de poder actuar

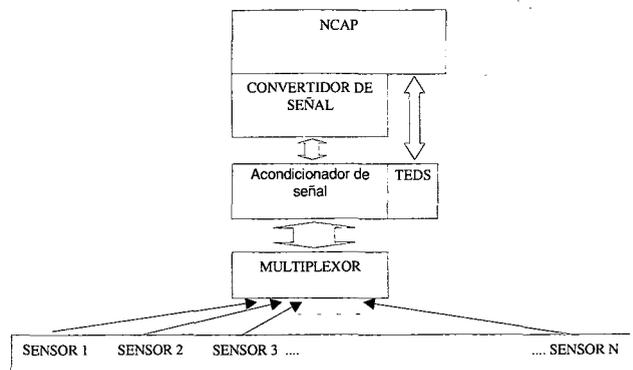


Figura 10. Arquitectura de un "Sensor Inteligente" formado por varios sensores.

sobre el sensor, ya sea para corregir algún parámetro o simplemente para identificarlo.

El futuro de la instrumentación pasa por hacer realidad esta norma, desde el punto de vista de la compatibilidad, ya que fabricantes como Motorola o Siemens, han implementando los conceptos, pero con sus equipos y sus redes.

Este mundo de la instrumentación física, termina por conectarse y complementarse con el de la instrumentación virtual. Esta última busca proyectar en un computador personal toda la información necesaria para supervisar y controlar los componentes presentes en una red, de tal forma que se integre la instrumentación y se transforme al computador en un instrumento.

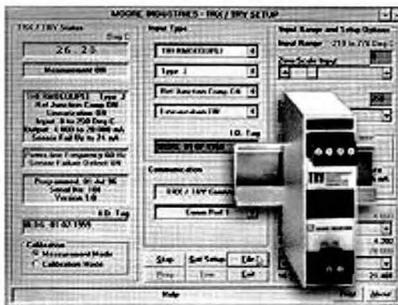


Figura 11. La integración software-hardware forma parte del futuro de la instrumentación

Claro que más allá del PC, la instrumentación virtual mediante el uso de la red de redes, Internet, transportará todas estas funciones a cualquier dispositivo: Televisores domésticos, tercera generación de teléfonos móviles, etc.

A pesar del gran esfuerzo realizado por algunas instituciones como la IEEE y su norma, la fundación Fieldbus, IMA, etc., el reto del futuro próximo seguirá siendo la interconectividad entre sensores.

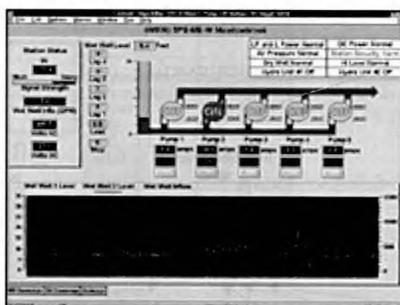


Figura 12. Sistema Scada donde se interconectan sensores y actuadores en un proceso.

REFERENCIAS

- [1] J Bryzek. (1993, October). «The evolution of smart sensor and transducer design.» *Sensors*, Vol. 10, N° 10: 12-23.
- [2] E. Peake. (1969). «Solid state digital pressure transducer,» *IEEE Trans. on Electron Devices*, ED-16(10): 870-876.
- [3] S. Sugiyama, M. Takigawa, I. Igarashi. (1983). «Integrated piezoresistive pressure sensor with both voltage and frequency output,» *Sensors and Actuators*, 4: 113-120.
- [4] E. Kompass. (1983, October). «'Smart' Transmitter stores calibration data,» *Control Engineering*: 100-110.
- [5] P. DuPuis. (1994, May). «A novel primary air data quality pressure transducer,» *Proc. IEEE National Aerospace and Electronics Conference* (Dayton, OH.).
- [6] U. Schoneberg et al. (1991, June). «CMOS integrated capacitive pressure transducer with on-chip electronics and digital calibration capability,» *Digest of Technical Papers, Transducer '91* (San Francisco, CA.).
- [7] W. Graber. (1993, March). «Computer literate pressure sensors,» *Proc. Sensors Expo West* (San Jose, CA.).
- [8] N. Najafi. (1993, March). «A multi-element gas analyzer utilized in a smart sensing system,» *Proc. Sensors Expo West* (San Jose, CA.).
- [9] W. Yun and R. Howe. (1993, March). «Interfacing force balance accelerometers,» *Proc. Sensors Expo West* (San Jose, CA.).
- [10] Y. Xi. (1992, Sep.). «Dual D Flip-Flip forms VCO,» *Electronics Design*: 89.
- [11] M. Llamada, K. Watanabe. (1997). «A capacitive pressure sensor interface using oversampling delta sigma modulation techniques,» *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 46(1): 3-7.
- [12] X. Li, G. Meijer. (1998). «A novel low-cost noncontact resistive potentiometric sensor for the measurement of low speed,» *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 47(3): 776-781.
- [13] R. Schreiber. (1997). «Air flow control using fuzzy logic,» *Application Note AN600*, Microchip Technology.
- [14] R. Pailoor. (1997). «Smart sensor,» *Sensor Interface*, Microchip Technology Inc.
- [15] M. Atmanand, V. Kumar, V. Murti. (1996). «A microcontroller-based quasi-balanced bridge for the measurement of L, C and R,» *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 45(3): 757-761.
- [16] P. Wilson, S. Hopkins, R. Spraggs, I. Lewis, V. Skarda, J. Goodey. (1995). «Application of a universal sensor interface chip (USIC) for intelligent sensor application,» *Advances in Sensors, IEE Colloquium on*: 3/1-3/6.
- [17] F. Vandder Goes, G. Meijer. (1997). «A universal transducer interface for capacitive and resistive sensor elements,» *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 14: 249-260.
- [18] M Walne. (1994, March). «Simple ADC is surprisingly accurate,» *EDN*: 154.
- [19] K. Mochizuke, K. Watanabe, T. Masuda. (1998). «A high-accuracy high-speed signal processing circuits of differential-capacitance transducers,» *IEEE Trans. Instrum. and Meas.*, 47(5): 1244-1247.
- [20] V. Ferrari, C. Ghidini, D. Marioli, A. Taroni. (1997, May). «Oscillator-based signal conditioning for resistive sensors,» *IEEE Instrum. Meas. Technology Conference* (Ottawa): 1490-1494.
- [21] H. Weinberg. (1998, Nov). «Accelerometer output gives temperature info,» *EDN*: 130.
- [22] K. Mochizuki, K. Watanabe. (1996). «A high-resolution, linear resistance-to-frequency converter,» *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 45(3): 761-764.
- [23] S. Woods. (1996, June). «The IEEE-P1451 Transducer to microprocessor interface,» *Sensors and Systems*: 43-48.