

SENSORES INTELIGENTES: ESTADO DEL ARTE

Iñigo Aguirre¹, M^a Concepción Sáenz² e Iñigo Javier Oleagordia³

¹Universidad del País Vasco. inigo.aguirre@ehu.es

²Universidad del País Vasco. iepсахc@lg.ehu.es

³Universidad del País Vasco. jtpolagi@lg.ehu.es

RESUMEN

En este artículo damos a conocer el estado del arte de los sensores inteligentes, para ello iniciamos definiendo los sensores inteligentes. Seguidamente explicaremos la evolución de los sensores inteligentes desde su inicio hasta los de última generación, profundizando en el conocimiento interno. La norma IEEE 1451 permite establecer un protocolo para la comunicación entre distintos sensores y actuadores de diferentes fabricantes. Concluiremos con las conclusiones obtenidas de la comunicación.

1. INTRODUCCIÓN

El término 'Smart Sensor' se ha utilizado por varios investigadores en varios contextos diferentes, desde sensores que incorporan unos pocos dispositivos activos para proporcionar una señal de calidad, a sensores integrados que incorporan un bloque sofisticado de circuito electrónico con parte analógica y digital que permite convertir un sensor pasivo en un sensor inteligente [1]. El sensor inteligente se define como un dispositivo capaz de:

- 1) Proporcionar una señal digital.
- 2) Comunicar a través de un bus digital bidireccional.
- 3) Ejecutar funciones y órdenes lógicas.

Además, es deseable que el sensor inteligente realice tanto estas funciones como la compensación de parámetros secundarios (por ejemplo. la temperatura), la prevención y detección de fallos, auto-test y autocalibración. El desarrollo de estos sensores aumentará mucho las capacidades de muchos sistemas del control y la instrumentación en lo que respecta a la comunicación con el mundo externo.

La "Fig. 1." muestra el diagrama de bloques de los elementos de un sistema de medida y control electrónico típico. Los sensores proporcionan información analógica al sistema, esta información se acondiciona antes de pasar al microprocesador. El procesador interpreta la información, realiza las actuaciones necesarias y aplican esas decisiones vía los actuadores. Los sensores representan, en este esquema la conexión más débil en el desarrollo de la mayoría de los próximos sistemas de instrumentación y control de nuevas generaciones [2].

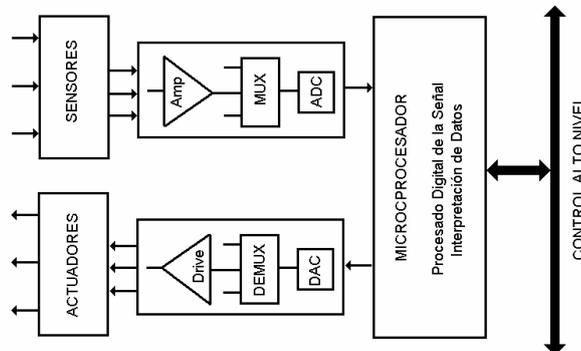


Fig.1 Sistema de medida y control típico.

2. EVOLUCIÓN DE LOS SENSORES INTELIGENTES

En la “Fig. 2.” se representan varias generaciones de sensores, desde los de tercera generación hasta los de quinta generación. Para ello primeramente se comparará con sensores no inteligentes.

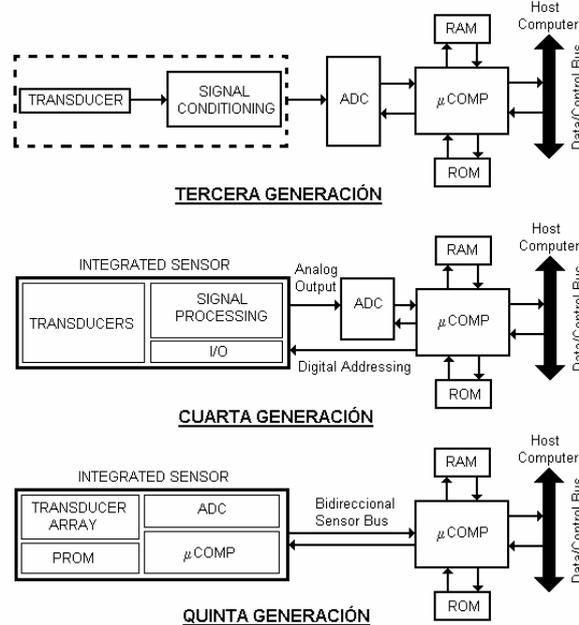


Fig. 2 Evolución de los sensores inteligentes

Los dispositivos de primera generación no tienen electrónica asociada, mientras que los sensores de segunda generación forman parte de sistemas puramente analógicos con un control remoto del sensor. Por otra parte los sensores de tercera generación, que son en los que se basan la mayoría de los sistemas actuales, la primera etapa de amplificación se realiza en el módulo del sensor o en el mismo chip. Así, la señal que aportan los mismos es una señal analógica de alto nivel, codificado, con una variación de tensión o como una señal de frecuencia variable. Esta señal se convierte a digital y posteriormente se procesa mediante un microprocesador. La cuarta generación de sensores se caracteriza por que la mayor parte de la electrónica, tanto analógica como digital, está en un chip, permitiendo, así, el direccionamiento del sensor y en algunos casos el autotest mediante comunicación entre el sensor y el microcontrolador.

Los sensores de quinta generación, en los que la conversión de datos se realiza en el módulo del sensor, para que la conexión bidireccional entre el microcontrolador sea digital. Estos dispositivos se pueden compensar, digitalmente, utilizando PROMs. Este tipo de sensores está caracterizado por varios atributos: comunicación bidireccional de datos y ordenes, transmisión totalmente digital, procesamiento digital local, testeo propio, algoritmos definidos por usuario y algoritmos de compensación [2]-[3].

3. ARQUITECTURA GENERAL DE UN SENSOR INTELIGENTE

La implementación de sensores inteligentes requiere la inclusión de tres partes principales. Estos son: el procesamiento de la señal, el control y manipulación de las señales digitales y la comunicación con el exterior mediante un bus. A continuación se explicarán con más detalle cada una de las áreas.

3.1. Procesado de señal

Las señales que registran los sensores normalmente son bajas en amplitud y la interfaz del sensor presenta una alta impedancia en las frecuencias de funcionamiento normal. La integración de la electrónica de la interfaz y los circuitos que procesan la señal, dentro del mismo sensor, tienen las siguientes funciones: la amplificación de la señal, la transformación de la impedancia, el filtrado de señal, los buffers y el multiplexado.

La amplificación de la señal del sensor es una de las funciones más importantes del sensor para muchas aplicaciones, sobre todo para aquellas en las que la señal es típicamente baja. La ampliación de estas señales en el chip no sólo aumenta la relación señal/ruido sino que reduce el efecto del ruido exterior y además permite aprovechar el máximo rango del convertidor analógico-digital, antes de enviar la señal al exterior. Esta amplificación se puede conseguir utilizando amplificadores MOS y bipolares que requieren de un circuito mínimo para unas especificaciones de ganancia y ancho de banda. Los amplificadores CMOS son mejores para obtener alta ganancia y alta impedancia y son fácilmente compatibles con la electrónica digital presente en el mismo chip. Los amplificadores CMOS son rápidos, se puede compensar su desviación con varias técnicas, consumen poca potencia y ocupan poco espacio. Estos amplificadores son de 3 a 5 veces más pequeños que los bipolares, por lo que permite incluir decenas de estos amplificadores por canal en el chip. Los amplificadores más sofisticados incorporan la ganancia programable con el objeto para aumentar la relación señal/ruido y para ajustar el rango de salida del amplificador con el rango del convertidor analógico-digital.

Además en los casos en los que hay que transformar el valor de impedancia en un valor de tensión, como puede ser el caso de los sensores resistivos o capacitivos, se necesita una impedancia baja a la salida del sensor, tanto para asegurar la transferencia máxima de la señal a la siguiente etapa como para reducir la susceptibilidad de la señal al ruido. Con la tecnología CMOS, a menudo, se puede conseguir simultáneamente la amplificación y la baja impedancia de salida.

En estos amplificadores, también, se puede incorporar el filtrado de señal. En los sistemas multisensor y en los que hay un multiplexor, a menudo se requiere un filtrado de la señal para prevenir el problema de la aliasing que puede introducir un ruido de alta frecuencia. El filtrado de señal mejora también la proporción señal/ruido, debido a que filtra el ruido de alta frecuencia que puede ser introducido por los propios dispositivos electrónicos [3].

Otra función importante para la mayoría de sensores es la reducción de canales de salida. La multiplexión de datos reduce la cantidad de circuitos requeridos para el sensor, por ejemplo compartiendo el ADC entre varios sensores.

Por lo tanto, en el momento de decidir el circuito que irá implementado en el chip, no sólo hay que tener en cuenta la funcionalidad sino que también la dificultad del proceso de fabricación y cómo afecta al rendimiento y al costo del dispositivo final.

3.2. Control digital

Uno de los principales requisitos para los sensores inteligentes es su compatibilidad con sistemas digitales y basados en microprocesadores. La mayoría de sensores de alto rendimiento deben proporcionar una señal digital para poder acceder a un bus digital. Una vez digitalizados los datos captados por el sensor, se puede realizar una variedad de procesados de señal para corregir varios errores. Estos incluyen la corrección de la desviación, una auto calibración, detección y corrección de faltas y la corrección de la linealidad. Mientras que algunas de estas funciones se pueden conseguir con circuitos analógicos, las técnicas de procesado digital de señal se aplican con mayor facilidad. Seguidamente se explicará la importancia, de estas características, en los smart sensors.

El convertidor analógico digital es el principal circuito necesario para manipular la señal del sensor y anterior al control digital. Estos ADCs han experimentado un gran progreso durante los años precedentes. Las técnicas utilizadas han permitido la integración de funciones analógicas de alto rendimiento en circuitos digitales CMOS de alta densidad y baja potencia, permitiendo así la implementación de ADCs de alta precisión. Para la mayoría de las aplicaciones las tasas de conversión desde 10 hasta 20 kHz a 12 bits es adecuado. Para

algunas aplicaciones puede ser necesario añadir, antes del ADC, un amplificador de ganancia programable con objeto de aprovechar al máximo el rango de entrada del ADC. Hay que tener en cuenta que para las aplicaciones del sensor es importante mantener el diseño general tan sencillo como sea posible y obtener así el mínimo área. Por lo tanto, el diseño del convertidor, para aplicaciones de propósito general puede requerir otro conjunto de prioridades. Puede que sea más interesante mejorar la precisión del convertidor a cambio de compensar externamente los errores del convertidor. El diseño del ADC, para diferentes aplicaciones, dependerá de los requisitos de la aplicación y de la complejidad del proceso de fabricación.

Una vez digitalizada la señal del sensor se pueden realizar varias funciones. La auto-calibración es una función muy interesante para los smart sensors. La mayoría de los sensores se deben ajustar tanto en la ganancia como en la desviación, en fábrica y antes de embalar. El funcionamiento de muchos sensores depende, en gran medida, de estos dos parámetros y, por lo tanto, la precisión dependerá de este ajuste. Además, la estabilidad del sensor se ve afectada en tanto en cuanto estos parámetros evolucionen a lo largo del tiempo modificando, así, la precisión del sensor. Por lo tanto es deseable no sólo poder calibrar en fábrica sino también calibrarlo en campo. Para la calibración de cualquier circuito se necesita otro circuito adicional con su complejidad. Esto se puede conseguir tanto con circuitos analógicos como digitales. Para evitar complicaciones y para mejorar el rendimiento general, se puede calibrar utilizando un procesador externo con acceso al PROM y por lo tanto a las características del sensor como: la dirección, tipo de sensor, coeficientes del polinomio que serán utilizados para compensar digitalmente el sensor.

La compensación de los datos del sensor se considera como una de las características y ventajas principales de un smart sensor. La compensación de datos se puede utilizar para corregir características como la sensibilidad, la falta de linealidad, la variación de la señal con el tiempo y el ruido. La compensación de cualquier error supone obtener un sensor más preciso.

Acerca de las funciones que se pueden implementar en el sensor están las DSP. Estas técnicas de DSP, se pueden añadir para mejorar el funcionamiento del sensor y además posee una característica de computación. El sensor, ahora, es capaz de realizar funciones lógicas y de informar al controlador en caso de un error. El poder computacional que poseen se puede utilizar para modificar automáticamente el rango de los amplificadores, del ADC, etc.

Además de la calibración y de la compensación, el auto-test y el diagnóstico son dos funciones necesarias para los smart sensors. La capacidad de auto-test es muy importante ya que permite conocer la funcionalidad del sensor sin tener que quitarlo de su lugar de funcionamiento. El auto-test se puede iniciar bajo el control externo, como por ejemplo de un controlador, para asegurar el buen funcionamiento del sensor. El auto-test es, únicamente para detectar el funcionamiento defectuoso y no se puede utilizar para determinar la calibración exacta.

Otra característica importante para varios sistemas de control y de instrumentación es la fiabilidad. Esto es, especialmente importante, en sistemas distribuidos donde el acceso a un determinado sensor no es sencillo y, por lo tanto es necesario que sea extremadamente seguro. Los smart sensors proporcionan una clara ventaja con respecto a los sensores pasivos. El método más sencillo para mejorar la fiabilidad es agregando redundancia al sensor. Esto es posible debido a su pequeño tamaño, por lo que se puede implementar una réplica del sensor en el mismo chip. También es posible duplicar los bloques asociados al sensor y situarlos en el chip para aumentar el rendimiento general. Esta redundancia no afecta al procesado de señal, la única desventaja viene por la limitación de espacio.

Otra posibilidad para mejorar el rendimiento y la fiabilidad sería minimizando el número de bloques en el chip. De este modo la posibilidad de fallo del dispositivo se reduce. Se deduce, así, que debe existir un compromiso entre el nivel de complejidad, y por lo tanto de la funcionalidad, y el costo general y el rendimiento [3]-[5].

5.1. Comunicación

Como se ha comentado anteriormente, un sensor inteligente debe ser capaz de interactuar con un controlador que maneja el sistema general. Por lo tanto, parte del circuito asociado al smart

sensor debe dedicarse a la interfaz con el bus para intercambiar información con el controlador. Respecto a este tema hay dos asuntos de importancia [3]:

1) Cada smart sensor debe ser capaz de comunicarse mediante varios buses y protocolos de bus, especialmente ante la falta de un bus universalmente aceptado para sistemas de medida. En la actualidad se está trabajando en desarrollar un estándar de comunicación para optimizar la funcionalidad la velocidad y el coste, para las distintas aplicaciones de sensores.

2) El segundo tema, trata de la interfaz de comunicación y de su complejidad. Como hemos visto anteriormente, se puede intercambiar una gran variedad de información entre el sensor y el controlador del bus.

La información a intercambiar serán: los datos de calibración, compensación, direccionamiento, información propia del sensor, los datos medidos y también la posibilidad de poder programarlo. En los modelos más complejos, la interfaz de comunicaciones debe realizar el intercambio de datos, a alta velocidad, no solo con el controlador sino también con los sensores que existen en el sistema distribuido.

4. SENSORES COMERCIALES

A continuación daremos a conocer una serie de sensores de distintos fabricantes y los distribuiremos en función del parámetro físico a medir.

4.1. Sensores de temperatura

La temperatura es una de las variables más extendidas en aplicaciones industriales. Según podemos leer en [6] hay cuatro tipos de sensores de temperatura: los analógicos, digitales, “analog plus” y los controladores del sistema. Los sensores analógicos ideales proporcionan una señal proporcional al valor de temperatura.

Los sensores digitales aportan información digital, por ello estos sensores digitales poseen un bus para la comunicación con el microcontrolador. Las interfaces más utilizadas son la I²C y SMBus, aunque también es común el bus SPI. Una de las funciones más habituales es la del control de los límites de temperatura de funcionamiento del microcontrolador para que este no trabaje fuera de estos límites. [6]

Los sensores “Analog plus” son sensores que aportan una señal cuadrada de la cual el valor de la frecuencia, el periodo o la relación de tiempos a nivel alto y bajo es directamente proporcional a la medida.

Los sensores controladores del sistema son los más complejos de los circuitos integrados. Además de las funciones que presentan los sensores digitales, este tipo de sensores visualizan los valores de la tensión de alimentación, produciendo una señal de alarma, vía serie, en el caso de que la tensión esté fuera del rango preestablecido. También visualizan y controlan la refrigeración del sistema. En este tipo de sistemas el sensor se utiliza para determinar si el ventilador debe funcionar o no. A continuación indicaremos una serie de sensores comerciales y sus características.

4.1.1. Analog Devices

Los sensores TMP03/TMP04 de Analog Devices generan una señal modulada en frecuencia. Como podemos ver en (1), la temperatura es proporcional a la relación de los tiempos alto y bajo de la señal.

$$T(^{\circ}C) = 235 - \frac{T_H}{T_L} \cdot 400 \quad (1)$$

Donde T_H es el tiempo en valor alto y T_L el tiempo en valor bajo de la señal cuadrada de salida.

Estos sensores son un sistema de medida de temperatura formados por el sensor, tensión interna de referencia y convertidor analógico digital Sigma-Delta. Ambos sensores son muy adecuados para conectarlos directamente al un microcontrolador. Las características más importantes son: rango de temperatura (-55 °C ÷ 150 °C) y 1.5% de precisión.

En la Tabla 1 se puede ver una muestra de los sensores de Analog Devices [7].

Modelo	Características	Error
AD7416	10 bit. Señal de sobre temperatura. Bus I ² C. -40 °C ÷ +125 °C.	±1 °C
AD7417/ AD7418	Son como el AD7416, pero el primero tiene 4 ADC y el segundo un ADC de aproximaciones sucesivas.	±1 °C ±1 °C
AD7816/ AD7817/ AD7818	Son como los anteriores pero con el bus SPI	±1 °C ±1 °C ±1 °C

Tabla 1 Sensores de temperatura de Analog Devices

4.1.2. Maxim Integrated Products

Maxim Integrated Products [8] suministra una amplia gama de circuitos integrados, para la medida de temperatura. Los que poseen una salida PWM puede ser modulada en frecuencia, periodo o en ancho de pulso. Los sensores que utilizan el SMBus aportan una alta fiabilidad para la protección de CPUs, FPGAs y ASICs. En la Tabla 2 se puede ver una muestra de algunos sensores.

Modelo	Características	Error
MAX6666 MAX6667	Salida digital modulada. Salida con drenaje abierto o salida push-pull	±1 °C
MAX6625 MAX6626	Desde 9 bits a 12 bits con salida digital de sobre temperatura. SMBus	±1 °C
MAX6627 MAX6628	Sensor de temperature de 12 bit con bus SPI	±1 °C

Tabla 2 Sensores de temperatura de Maxim

4.2. Sensores de presión

Al igual que los sensores de temperatura, estos se utilizan en un amplio rango de aplicaciones. Los sensores de presión se basan en las piezorresistencias difundidas en el silicio. El elemento sensor reside en un diafragma fino de silicio. La aplicación de una presión provoca la deformación de la membrana y, por consiguiente, la variación de la resistencia del elemento sensor. Las ventajas de este tipo de sensores son: alta sensibilidad, buena linealidad, baja histéresis y reducido tiempo de respuesta. Muchos de los actuales sensores consisten en cuatro sensores activos formando un puente Wheatstone. La salida del sensor es función de la temperatura, por lo que esta señal se tiene que compensar.

Actualmente, hay dos arquitecturas para compensar la señal: la primera es el método convencional para acondicionar sensores analógicos y el último consiste en una compensación totalmente digital basada en la incorporación de sofisticados DSPs al circuito impreso.

Seguidamente indicaremos una serie de sensores comerciales. Honeywell fabrica sensores de presión para una amplia variedad de aplicaciones con precisiones de de 0,1 ÷ 0,03% FS (Full Scale) [9]

El transmisor inteligente Digiquartz consiste en un sensor de presión basado en un cristal de cuarzo. Además, posee una interfaz de comunicación serie RS232. En los sensores de cristal de cuarzo con compensación de temperatura se consigue una precisión de hasta 0,01% FS.[10]

4.3. Sensores de posición angular

Hay varios principios de funcionamiento de estos sensores. La gran mayoría de estos sensores se basan en el efecto Hall o en magnetorresistencias o sensores inductivos. Para las aplicaciones modernas estos sensores aportan una señal digital o cuasi-digital compatible con las tecnologías actuales.

El MLX90316 de Melexis es un sensor de posición angular sin contacto que se basa en la tecnología Hall. El rango de medida es programable hasta 360 grados y 12 bits de resolución. Se puede seleccionar el modo de comunicación en frecuencia o mediante un bus serie [11].

5. CONCLUSIÓN

Con este artículo pretendemos dar una visión de los sensores inteligentes, indicando las partes de que constan, características que deben tener estas partes y las funciones que deben cumplir. Finalmente las comparaciones de sensores de diferentes comerciantes permiten, en un vistazo, conocer las características más importantes de cada uno. Por lo tanto pretende ser de gran ayuda a todos aquellos que quieran iniciarse en el mundo de los sensores inteligentes.

10. BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. E. Brignell, "Smart Sensors. A Comprehensive Survey," *University of Southampton, UK. ISBN* . 1989.
- [2] K. D. Wise, and K. Najafi, "An organization and interface for sensor-driven semiconductor process control systems" *IEEE Journal of semiconductor manufacturing*. pp. 230-238, Noviembre 1990.
- [3] K. Najafi, "Smart sensors," *Journa of Micromechanics and Microengineering*, vol. 1, no. 2, pp. 86-102, June 1991.
- [4] S. B. Crary, W. G. Baer, J. C. Cowles, and K. D. Wise, "Digital compensation of high-performance silicon pressure transducers," *Sensors and Actuators*, A21-A23, pp. 70-72, 1990.
- [5] P. P. L. Regtien, and P. J. Trimp, "Dynamic calibration of sensors using EEPROMS," *Sensors and Actuators*, A21-A23, pp. 615-618, 1990.
- [6] J. Scolio, "Temperature Sensor ICs Simplify Designs," *Sensors*, no. 1, 2000.
- [7] "Analog/Digital temperature sensors" <http://www.analog.com> [Consulta: 18/05/2006]
- [8] "Termal Management, Sensors, and Sensor Conditioners" <http://www.maxim-ic.com/Sensors.cfm> [Consulta: 18/05/2006]
- [9] "Honeywell pressure transducers and pressure sensors" <http://www.ssec.honeywell.com/> [Consulta: 21/06/2006]
- [10] "Digiquartz pressure instrumentation" <http://www.paroscientific.com/pdf/DQAdvantage.pdf> [Consulta: 24/06/2006]
- [11] <http://www.mlxsemi.com> [Consulta: 1/06/2006]