

Redes de sensores. Una aplicación práctica

Sergio Rodríguez Buenafuente

Adeje, 2004

Resumen

Se presentan las últimas tendencias en el campo de los sensores, que incorporan cada vez más funciones, de modo que ya no se limitan a ser meros transductores, sino que proporcionan resultados elaborados, muchas veces obtenidos de diversos transductores. Se introduce el estándar IEEE 1451 que permitirá la conexión directa de los sensores con un puerto estándar, RS232, USB, etc, y la comunicación entre sensores. Se presenta el concepto de red de sensores y su utilidad en la industria. Finalmente se muestra un ejemplo de aplicación práctica, *localizador de interlocutores en entornos cerrados*, que permite comprender la complejidad de los procesos que son llevados a cabo por estos sensores de última generación.

1. Introducción

Los sensores se emplean en la industria desde sus comienzos, bien como elementos que permiten monitorizar entornos de trabajo correctos o como elementos que proporcionan información necesaria para los circuitos de realimentación de diferentes procesos. Un sensor consta de un transductor, que convierte la variación de una magnitud física en la variación de otra magnitud física fácilmente medible, un soporte que permita poner en contacto el transductor con el sistema físico, y una serie de elementos para poder transportar la señal que contiene la información, hasta el lugar de su almacenamiento o análisis. Con los avances en microelectrónica, en codificación de la información, en transmisión de datos, etc, el concepto de sensor a evolucionado incorporando estos avances en mayor o menor medida. Los “*Micro Electrical–Mechanical System*”, *MEMS* y los “*Sensores Inteligentes*”, *SMART–SENSORS* están cada

vez más presentes en los mercados y en las industrias, por ejemplo en la industria del automóvil: frenos inteligentes *ABS*, dirección inteligente, amortiguación inteligente, etc. Los sensores de última generación incorporan la auto calibración, la codificación y transmisión de la información, el tratamiento de datos en el propio sensor, correcciones de diversos tipos, selección automática del rango, etc. Los conceptos de *Multisensores*, *Array de Sensores* y *Redes de sensores* hacen referencia a las últimas tendencias en este campo. El estándar IEEE 1451 está en pleno desarrollo y permitirá la conexión directa de los sensores con un PC mediante puertos estándar RS232, USB, etc, así como la comunicación directa entre sensores.

1.1. ¿Qué es un sensor?

Un sensor es un dispositivo capaz de proporcionar una “señal” que contiene información de alguna “magnitud”. La señal puede ser eléctrica, mecánica u óptica. En cuanto a la magnitud puede ser una cantidad o un parámetro. Sin embargo, el concepto de sensor se suele entender en un sentido más amplio, incorporando los bloques necesarios desde la medición de la magnitud física hasta la presentación de los resultados. La estructura física del sensor, entendido en este sentido amplio, se puede descomponer en varias partes, tal y como se muestra en la Figura 1.

1.1.1. Transductor

Es la parte esencial del sensor. Un transductor es un elemento que responde de una manera determinada ante un estímulo determinado. El estímulo puede ser mecánico, térmico, electrostático, electromagnético, radiativo, químico o biológico. La respuesta puede ser mecánica, térmica, electrostática, electromagnética, radiativa o química.

1.1.2. Soporte y Acondicionamiento

El transductor debe ser colocado convenientemente, con un soporte físico que permita ponerlo en contacto con el sistema que se quiere medir, y en ocasiones se debe acondicionar su respuesta para obtener la señal con la información. Algunos transductores dan directamente la señal en una forma que se puede utilizar inmediatamente, pero otros necesitan ser "alimentados" exteriormente, de manera que el transductor modula dicha alimentación.

1.1.3. Amplificador–Acondicionador

La señal proporcionada por el sensor debe ser amplificada y adaptada para su posterior utilización. El amplificador debe ser diseñado cuidadosamente teniendo en cuenta la naturaleza y magnitud de la señal emitida por el sensor.

1.1.4. Tratamiento de la información

La señal amplificada y acondicionada se puede utilizar de muchas maneras. Generalmente se necesitará realizar un tratamiento de las medidas obtenidas, filtrados, integrales, estadísticas, etc. La forma habitual de trabajar es hacer una conversión analógica–digital y realizar el tratamiento de los datos.

1.1.5. Presentación y uso de los resultados

El uso de los sensores es muy amplio. Tradicionalmente se establecen dos grandes bloques de utilización:

- **Análisis.** En estos sistemas el sensor se utiliza para recabar información de alguna magnitud. La finalidad en estos casos es presentar un valor numérico de la medida.
- **Control.** En los sistemas de control, el sensor proporciona información del estado de la magnitud que se quiere controlar, de manera que a partir dicha información se regula un dispositivo, con actuadores, que modifica la magnitud en el sentido deseado.

1.2. Características de un sensor

Diversos parámetros permiten caracterizar un sensor.

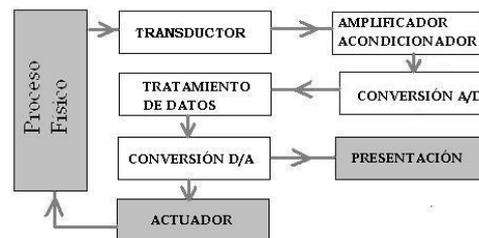


Figura 1: Diagrama de bloques de la utilización de un sensor.

Rango. El rango de medida se da en función del *fondo de escala*, *FDE*. El *FDE* indica el máximo valor de la señal de salida para el máximo valor de la magnitud.

Linealidad. Un sensor ideal da una señal proporcional a la magnitud, con la misma constante de proporcionalidad en todo el rango. Sin embargo, los sensores reales presentan variaciones en la proporcionalidad según el valor de la medida.

Resolución Es el mínimo incremento en la salida del sensor. Se suele dar como porcentaje del *FDE*

Repetibilidad. Es la capacidad de un sensor de dar la misma respuesta ante las mismas circunstancias en diferentes mediciones. Relacionado con la repetibilidad está el error de histéresis y el efecto memoria.

Intercambiabilidad. Dos sensores "iguales" deben dar la misma respuesta, de modo que idealmente se podría sustituir uno por otro sin tener que preocuparse por variaciones en las medidas.

Velocidad de repuesta. Es el tiempo que tarda el sensor en dar una variación de su salida ante una variación en la magnitud.

Selectividad. Idealmente un sensor solo debe ser sensible ante la magnitud para la cual se ha diseñado. Sin embargo, magnitudes como la temperatura, la humedad, la presión, etc suelen afectar al comportamiento del sensor. Son las llamadas respuestas cruzadas.

Tiempo de vida. Indica el tiempo que el sensor es capaz de responder según sus especificaciones, sometido a condiciones normales de funcionamiento.

Todos estos parámetros se deben medir y especificar para cada sensor. Normalmente se recogen en tablas de calibración, que son emitidas por instituciones acreditadas, y son obtenidas siguiendo protocolos estandarizados. Muchos de estos parámetros se pueden regular o ajustar empleando diversas técnicas en un proceso de calibrado. Cuando no se pueden corregir, se deben tener en cuenta las medidas, y compensarse en un tratamiento posterior de los datos.

1.3. ¿Para qué se utilizan los sensores?

Tal y como se comenta en párrafos anteriores, los sensores se utilizan para obtener información de magnitudes físicas. En el contexto industrial, esta información se utiliza para verificar condiciones de trabajo correctas o para realimentar sistemas de control. En cualquiera de estos supuestos lo normal es que varios sensores estén monitorizando varias magnitudes físicas de modo simultáneo. Por lo tanto, es más correcto hablar de agrupaciones de sensores que de sensores aislados. Existen diferentes tipos de agrupaciones:

Multisensores. Un sistema de multisensores consta de diferentes sensores que miden distintas magnitudes. Un ejemplo puede ser el sistema que se utiliza en el control automatizado de invernaderos.

Sensor multifunción. Un sensor multifunción integra en el mismo dispositivo varios transductores que miden diferentes magnitudes en el mismo lugar físico. Un ejemplo son los sensores de nivel, temperatura y presión para tanques contenedores.

Sistema de sensores. También conocido como "array", consta de varios sensores iguales distribuidos espacialmente de una forma determinada. Se utiliza un sistema de este tipo para medidas precisas en zonas extensas, o para determinar la evolución espacial de alguna magnitud.

Red de sensores. Consiste en un conjunto de sensores, multisensores y/o sistema de sensores integrados en un bus de comunicaciones que puede ser controlado o monitorizado desde un sistema central. Cada sensor tiene un identificador en la red y mediante un conjunto de protocolos puede comunicarse con los otros sensores en la red y con el sistema central. Las funciones de calibrado, ajuste de rangos, control de actuadores, etc se pueden ejecutar desde el sistema central a través de la red. La red puede ser específica, o ajustarse a un estándar *ethernet* o *wireless*.

2. Evolución en los sensores

Los avances en microelectrónica han permitido que los diferentes bloques que aparecen en la Figura 1 se hayan ido integrando en un único dispositivo. Se pueden establecer cuatro niveles, más o menos cronológicos, en la evolución de los sensores:

1^{er} Nivel Se integra en el sensor un ajuste del offset, se añaden transductores que permiten compensar los efectos cruzados, como el de la temperatura.

2^o Nivel Se integra en el sensor el amplificador y la conversión analógica-digital. La salida de estos sensores es digital, y se puede enviar codificada para evitar ruidos y distorsiones. Además facilita el análisis posterior de los datos.

3^{er} Nivel, sensores inteligentes. Se añade un microprocesador al sensor. Este micro permite:

- Procesado digital de la señal en el propio sensor.
- Compensación digital de errores estáticos como el offset o la no linealidad.
- Permite realizar auto calibración y testeo de correcto funcionamiento.
- Permite realizar cambios de escala de forma automática, ajustando el rango a la magnitud.
- Cálculo de medias, tolerancias, etc.
- Gobierno centralizado de multisensores y *arrays*.

- Compensación de inestabilidades en la velocidad de respuesta.

4º Nivel, redes de sensores inteligentes. La integración del microprocesador en el sensor permite el desarrollo de una interfaz de comunicación entre sensores y su incorporación a una red de comunicaciones. Si se utilizan unos estándares apropiados, se podrán conseguir cosas como:

- Sensores *Plug and Play*. Sensores acompañados de un software, que se conecta y proporciona la información necesaria, el autocalibrado, etc.
- Control y monitorización a distancia de sistemas. Incluso a través de Internet o por redes inalámbricas.
- Gestión de errores *On Line*. El propio sensor puede avisar de defectos, intentar corregirlos o avisar de averías graves.
- Intercambio de información entre sensores.

3. La estandarización

El proceso de estandarización es fundamental para que las redes de sensores alcancen su pleno desarrollo. Si existe un estándar bien afianzado, los fabricantes de sensores pueden implementar sus diseños con la seguridad de que son compatibles con el mercado. Los usuarios pueden elegir el tipo de red de sensores que mejor se adapte a sus necesidades, sin tener que modificar sus instalaciones de red. Además en cualquier momento se puede ampliar o modificar la red de sensores, sin ocuparse de incompatibilidades. El estándar que actualmente se está imponiendo es el *IEEE 1451*.

3.1. IEEE1451

En septiembre de 1993, el *National Institute of Standards and Technology, NIST* y el *Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE* a través de su comité técnico en tecnología de sensores para la instrumentación y medición, patrocinaron un foro de discusión para la creación de una interfase estándar que permitiera la comunicación entre sensores inteligentes, y su incorporación a una red

de comunicaciones. Desde entonces, se han formado cinco grupos de trabajo que desarrollan diferentes aspectos del estándar. Todos quedan agrupados en lo que se ha denominado IEEE 1451. El grupo P1451.1 se encarga de concretar un modelo común para definir los tipos de sensores, junto con una interfase de identificación. El grupo P1451.2 desarrolla un *módulo de interfase para transductores inteligentes, STIM*, una *hoja de datos del transductor, TEDS*, y una interfase digital para el acceso de dichos datos. El *TEDS* contiene las tablas de calibración del transductor, y toda la información citada en párrafos anteriores. Además la interfase digital permitiría modificar dichos datos en el caso, por ejemplo, de una recalibración. El grupo P1451.3 trabaja en el desarrollo de una interfase digital para sistemas distribuidos. El grupo P1451.4 desarrolla una interfase mixta con los protocolos de comunicación para sensores analógicos. El grupo P1451.5 se encarga de las comunicaciones inalámbricas. El estándar pretende recoger tanto a sensores como actuadores. A fecha de hoy, se han publicado dos estándares: *IEEE Std 1451.2-1997*, que define el formato del TEDS, y *IEEE Std 1451.1-1999*, que define el formato de identificación del tipo de sensor y/o actuador.

En la Figura 2 se puede ver el diagrama de bloques del estándar IEEE 1451.

4. Ejemplos de Aplicaciones

4.1. Seguimiento de Interlocutores

Los avances en las comunicaciones digitales han permitido el desarrollo de teleconferencias en tiempo real. Una *web-cam*, un micrófono y un PC con conexión de banda ancha a Internet, permite a dos personas mantener una conversación cara a cara. Sin embargo en el caso de que existan varios interlocutores, es necesario que el micrófono sea pasado a la persona que habla, mientras que la cámara se debe apuntar a dicho individuo. El empleo de una red de sensores inteligentes permite que estos procesos sean automáticos, y más concretamente elimina la necesidad de que el micrófono tenga que pasarse a cada interlocutor, mediante un procedimiento denominado "*array dirigido*".

Consideremos el caso simple de un conjunto de sensores distribuidos, uniformemente espaciados,

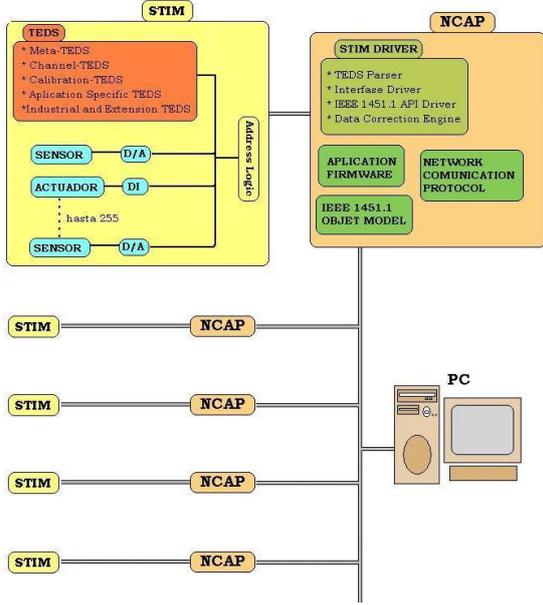


Figura 2: Estándar IEEE 1451.

sobre una línea, y una fuente puntual que proporciona un frente de onda plano con una forma $f(t)$ incidiendo con un ángulo θ sobre los sensores; en la Figura 4 se presenta un esquema para sólo dos micrófonos. La señal llega a los sucesivos sensores con un retraso incremental. La salida del primer sensor será $g_0(t) = a_0 f(t)$, la salida del segundo será $g_1(t) = a_1 f(t - \Delta t)$ y así sucesivamente, de modo que la salida del sensor m -ésimo es $g_m(t) = a_m f(t - m\Delta t)$. La suma de todos los sensores es

$$g(t) = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} a_m f(t - m \frac{d}{c} \sin \theta) \quad (1)$$

donde el desfase incremental es $\tau = \frac{d}{c} \sin \theta$, d es la separación entre sensores y c es la velocidad de propagación de la onda en el medio.

A veces, es conveniente representar la salida del conjunto de sensores en el dominio de la frecuencia, sin más que tener en cuenta la representación espectral de un proceso estocástico estacionario

$$\begin{aligned} g(t) &= \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} a_m f(t - m\tau) \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} dF(\omega) e^{j\omega t} \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} \tilde{a}_m e^{-j\omega \frac{m d}{c} \sin \theta} \end{aligned}$$

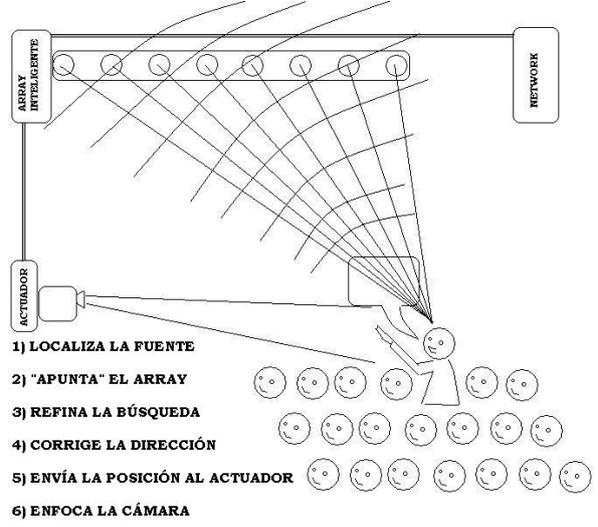


Figura 3: Localizador de interlocutor.

$$= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} dF(\omega) H(\omega\tau) e^{j\omega t} \quad (2)$$

donde $H(\omega\tau)$ es la función de respuesta del instrumento. La $H(\omega\tau)$ de un "Uniform Linear Array", ULA es

$$H(\omega\tau) = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} \tilde{a}_m e^{-j\omega \frac{m d}{c} \sin \theta} \quad (3)$$

En este caso \tilde{a} es un coeficiente complejo. La función de respuesta del ULA dada por (3) es periódica con periodo 2π . Los máximos ocurren en $\omega\tau = 2n\pi$. La respuesta del sistema de sensores es máxima cuando la dirección de llegada es $\theta = 0$. Sin embargo, la dirección para la cual se produce el máximo se puede variar sin más que añadir un retardo τ' a cada sensor antes de sumar. Esto se conoce como *array dirigido*.

$$\begin{aligned} g(t) &= \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} a_m f(t + m\tau' - m\tau) \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} dF(\omega) e^{j\omega t} \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} \tilde{a}_m e^{j(\tau' - \frac{d}{c} \sin \theta_0)\omega m} \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} dF(\omega) H((\tau' - \frac{d}{c} \sin \theta_0)\omega) e^{j\omega t} \end{aligned} \quad (4)$$

donde se asume que la dirección de llegada, DOA es θ_0 . Si $\tau' = \frac{d}{c} \sin \theta$, la respuesta del sistema

será máxima para $\theta = \theta_0$, es decir, el instrumento está apuntado hacia θ_0 .

Para el correcto funcionamiento del sistema, todos los micrófono deben ser “iguales”, es decir, tienen que proporcionar la misma respuesta ante la presión acústica. En caso de que no sea así, usando la curva de calibración de cada uno, el microprocesador del sensor debe corregir la señal que proviene de cada micrófono. El proceso de localización se efectúa en varias etapas, que se representan esquemáticamente en la Figura 3:

1. Un interlocutor comienza a hablar. El sensor recibe la señal y en función de los retrasos en el tiempo de llegada a cada micrófono estima la situación del interlocutor.
2. Una vez estimada la dirección inicial, el sensor añade el retraso correspondiente a la dirección estimada a la señal recibida en cada micrófono. La suma de las señales debe ser un máximo, puesto que los retrasos añadidos hacen que coincidan temporalmente. Se utiliza un algoritmo de máxima probabilidad para la localización de la fuente, refinando la búsqueda.
3. Cuando el sensor “decide” que tiene localizado espacialmente al interlocutor, envía la posición al actuador que mueve la cámara.
4. La señal de vídeo y la señal de audio se digitalizan convenientemente y se envían por la red hasta el centro de control, o a donde sea necesario.

Todas las funciones se han descrito de una manera muy simplificada, pero un análisis más detallado nos mostraría conversiones analógico-digitaes, algoritmos de búsqueda, estimaciones estadísticas, corrección de errores, transformadas al espacio de frecuencias, generación de señales de control, conversiones digital-analógicas, algoritmos de decisión, etc. Además el factor tiempo es fundamental, ya que se pretende que el proceso se realice en tiempo real. Un sistema de este tipo incorporado a una red de comunicaciones permitiría incluso monitorizar varias salas a la vez, seguir físicamente a un interlocutor que desplaza dentro de una sala, mantener vídeo conferencias entre varias personas a la vez, etc.

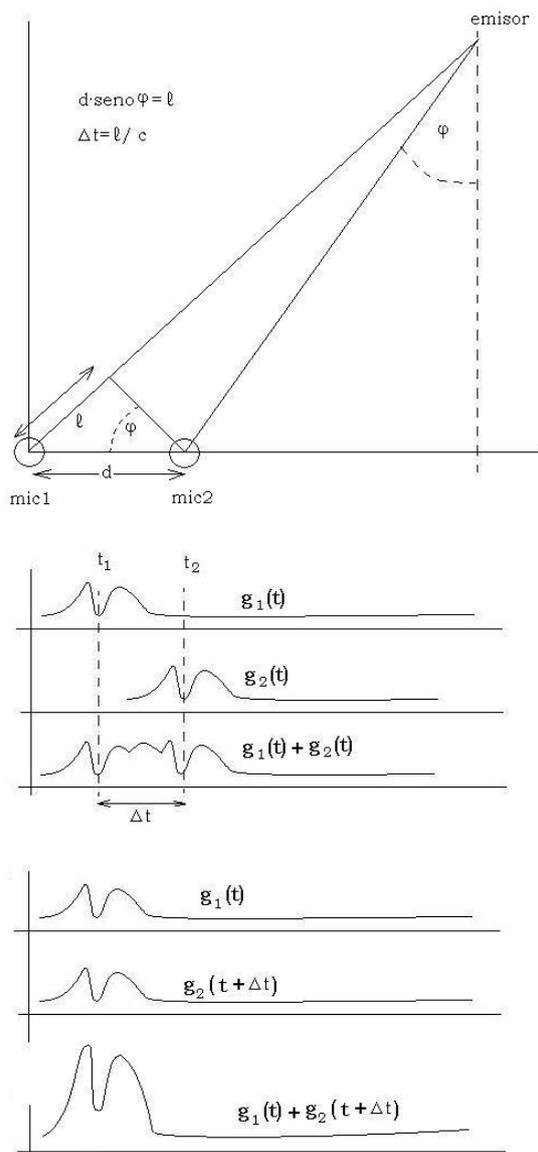


Figura 4: Array dirigido.