

# NUEVA METODOLOGÍA PARA LA ENSEÑANZA DE LAS CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONAMIENTO DE SISTEMAS DE MEDIDA

*Enrique J Berjano<sup>1</sup>, Albert Lozano-Nieto<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Universidad Politécnica de Valencia (España). eberjano@eln.upv*

<sup>2</sup>*Pennsylvania State University (USA). AXL17@psu.edu*

## RESUMEN

Presentamos una nueva metodología docente para la enseñanza y el aprendizaje de las características de funcionamiento de los sensores en particular y de los sistemas de medida en general. La innovación reside básicamente en que por primera vez se atiende a las diferencias fundamentales existentes entre las características vistas desde el punto de vista del fabricante (calibración de un número determinado de unidades fabricadas, y creación de un data sheet) y desde el punto de vista del potencial usuario (estimación de errores a partir de la información contenida en el data sheet, y calibración in situ sobre el dispositivo particular adquirido). Además, la metodología incluye diferentes herramientas que permiten un aprendizaje activo centrado en el alumno, en sintonía con los criterios de convergencia europea.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de medida han cambiado drásticamente en los últimos 30 años debido principalmente a la nueva instrumentación basada en computador y al desarrollo de sensores microelectrónicos (sensores inteligentes). Sin embargo, los fundamentos de la ciencia de la medida han permanecido inalterables. De hecho, la mayoría de los cambios en la instrumentación están relacionados con la implementación de las funciones de medida más que con sus métodos [1]. Casi todos los libros de texto sobre sistemas de medida o transductores [2-7] estructuran sus contenidos mediante una introducción sobre las características de funcionamiento de los sistemas, dejando el tratamiento de sistemas y transductores específicos para posteriores secciones. Como consecuencia, parece claro que es más importante enfocar la enseñanza de la instrumentación hacia principios de medida generales, que hacia implementaciones específicas. Norton [5] ha propuesto un sistema para clasificar las características de los transductores usando tres parámetros: diseño, funcionamiento y confiabilidad. El diseño hace referencia a cómo el transductor es construido; la confiabilidad se refiere generalmente a la caracterización del funcionamiento libre de fallos durante un periodo de tiempo; y las de funcionamiento estudian las diferencias entre la salida real y la teórica, y por lo tanto incluye términos tales como exactitud, fidelidad, respuesta dinámica, etc.

Creemos que aunque los principios de funcionamiento cambian mucho menos que las técnicas y los instrumentos, las características de funcionamiento de los sistemas de medida cambian incluso menos, y por ello, su conocimiento debería ser un punto esencial en cualquier curso de instrumentación. Desafortunadamente, los libros de texto para la enseñanza de los sensores y de instrumentación tratan a menudo con dichas características de una manera únicamente descriptiva, algunas veces con poco énfasis en la aplicabilidad real, y sin relacionarlas entre ellas. Como consecuencia, una gran cantidad de conceptos tales como error de *offset*, de ganancia, de linealidad, fidelidad, reproducibilidad, o resolución son descritos

secuencialmente, pero sin destacar la importancia relativa de cada una de ellas sobre el sistema total, y especialmente, sin tener en cuenta las diferencias entre las características de funcionamiento consideradas desde el punto de vista del fabricante y desde el punto de vista del usuario. Creemos que aunque los textos disponibles actualmente son útiles en clase, todos olvidan esta importante diferencia, y por ello, el objetivo de este trabajo es presentar una nueva aproximación a la enseñanza de las características de funcionamiento de los sistemas de medida en un curso de ingeniería eléctrica o electrónica con una aproximación generalista.

En esencia, la metodología consiste en una forma interactiva y estimulante de presentar los conceptos básicos relacionados con las citadas características. Primero, los estudiantes actúan como si fueran ingenieros de fabricación: caracterizan el funcionamiento del sistema, y lo comunican a potenciales usuarios mediante la confección de una hoja de datos (*data sheet*). Posteriormente, los estudiantes toman el rol de ingenieros de diseño o usuarios finales. En este nuevo papel, ellos tienen que ser capaces de entender la información contenida en un *data sheet*, inferir el funcionamiento del sistema que se ofrece, y finalmente concluir si el sistema es apropiado para una aplicación dada. Aunque sólo nos hemos preocupado de las características de funcionamiento estáticas, la metodología propuesta puede ser usada para evaluar las características dinámicas también.

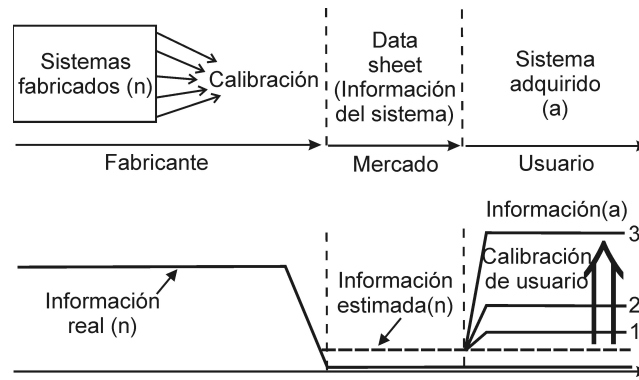
## 2. JUSTIFICACIÓN

El objetivo de la nueva metodología es mejorar el proceso de aprendizaje sobre un aspecto crítico de la ciencia de medida. En años recientes hemos constatado que la mayoría del material pedagógico en esta área omite algo que nosotros creemos una premisa clave: las diferencias claras e importantes entre las características de funcionamiento consideradas desde el punto de vista del fabricante y desde el punto de vista del usuario.

Creemos que los estudiantes graduados deberían ser conscientes de las siguientes cuestiones básicas: 1) las características de funcionamiento ofrecidas en un *data sheet* son el resultado de diferentes procesos de calibración realizados por el fabricante, algunas veces obtenidas por inferencia estadística, 2) la información de un *data sheet* permite al potencial usuario estimar el funcionamiento de cualquier sistema que emplee el dispositivo objeto del *data sheet*, y 3) cualquier proceso de calibración llevado a cabo por el propio usuario le permitirá conocer las características de funcionamiento específicas del dispositivo adquirido.

La Fig. 1 muestra este proceso: inicialmente la información sobre el funcionamiento de un sistema de medida es muy amplia. Tras procesos de calibración en la propia fábrica, una única *data sheet* es creada y ofrecida a los potenciales usuarios. Posteriormente, los usuarios finales tienen dos opciones sobre el conocimiento de las características: a) llevar a cabo un análisis teórico de los errores usando la información contenida en el *data sheet*, o b) realizar procedimientos de calibración específicos para la aplicación concreta.

Además de abordar estos aspectos técnicos, nuestra aproximación ha sido también diseñada con objeto de enriquecer la experiencia educativa mediante el uso de actividades de aprendizaje que implican a los alumnos en el propio proceso [8]. Nuestra aproximación se centra en: a) involucrar fuertemente a los estudiantes en la dinámica de la clase, b) fortalecer la interacción entre estudiantes, y c) valorar aquellos conceptos no entendidos totalmente por los alumnos. Hemos elegido comenzar las discusiones con cuestiones de final abierto hacia a los estudiantes. Aunque es importante en estos casos proporcionar el tiempo suficiente a los estudiantes para que piensen las respuestas y las implicaciones [8], las cuestiones planteadas pueden ser respondidas usando el simple sentido común.



**Figura 1.** Proceso por el cual la información sobre las características de funcionamiento de un sistema de medida va transformándose desde la fábrica hasta su uso en una aplicación concreta.

Entendemos nuestra aproximación metodológica como un proceso secuencial bi-direccional: una aproximación *bottom-up*, seguida de una *top-down*. La primera viene del gran número de medidas realizadas y datos obtenidos, y que requieren ser categorizados y clasificados en lo que normalmente se denomina un *data sheet*. La aproximación *top-down* viene de considerar que a través de la información contenida en el *data sheet*, los usuarios serán capaces de estimar el funcionamiento del sistema de medida. O sea, de mucha información concreta a una general, y viceversa.

### 3. ESTRUCTURA DE LA METODOLOGÍA

Nuestra aproximación está basada en que los estudiantes asumen dos roles diferentes durante el curso. En una primera fase, actúan como ingenieros involucrados en el diseño de un sistema de medida y en su caracterización con objeto de crear un *data sheet*. En una segunda fase, actúan como ingenieros que usarán el sistema en un futuro. Por lo tanto, en la primera fase se expone a los estudiantes conceptos tales como calibración, análisis estadístico, muestreo de piezas fabricadas, etc. y estos conceptos aparecen de forma natural. En la segunda fase, después de que un *data sheet* ha sido creado, los estudiantes trabajan sobre cómo leer e interpretar la información presentada en dicha documentación.

Esta aproximación de enseñanza está fuertemente basada en el aprendizaje activo por parte del estudiante, al cual en diferentes momentos se le exige el entendimiento de una serie de conceptos básicos. La Figura 2 corresponde a una especie de mapa de ruta que muestra aquellos conceptos que aparecen de forma natural a través del proceso de aprendizaje y auto-descubrimiento por parte del estudiante. Podemos definir los siguientes pasos:

**Paso 1. Presentación del caso:** Plateamos el ejemplo de un fabricante imaginario de sensores de presión sanguínea como ejemplo de sistema de medida. Se proporcionan inicialmente los siguientes datos: rango de medida (0 de 300 mmHg), rango de salida (0 a 50 mV), y respuesta lineal (función de transferencia teórica).

**Paso 2. Comportamiento real frente a teórico:** Usando las especificaciones previas se supone que los ingenieros (estudiantes) han fabricado una serie de 1000 unidades. El profesor plantea ahora cuestiones del tipo: ¿Se podría o convendría comercializar los sensores fabricados asumiendo que su comportamiento será exactamente idéntico a como indican las especificaciones iniciales?, o ¿se deberían llevar a cabo un análisis experimental del funcionamiento verdadero? Tras discusiones, los estudiantes tienden hacia la segunda opción. Es aquí también posible introducir en la discusión factores no tan técnicos, tales como de coste económico, confiabilidad, estrategias de marketing, o aspectos éticos [9].

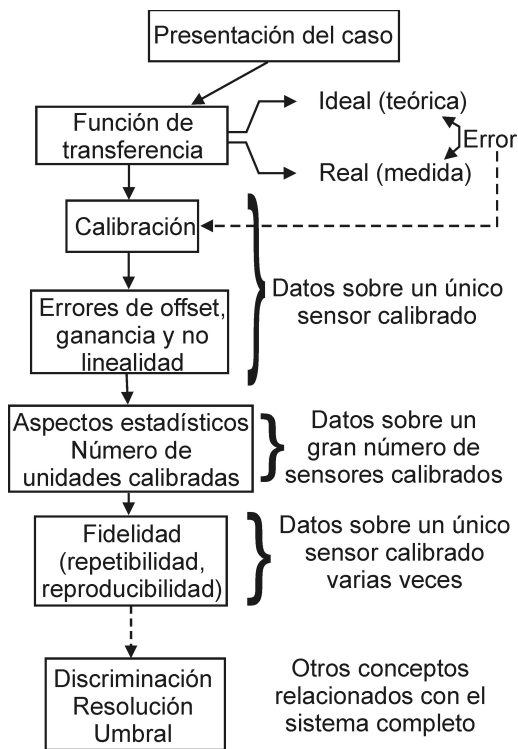


Figura 2. Mapa de conceptos y su secuenciación.

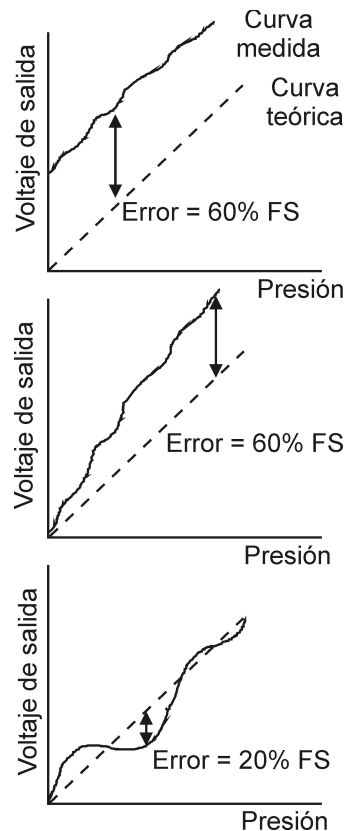


Figura 3. Ejemplo de tres funciones de transferencia real.

**Paso 3. Cuantificando el error genérico:** El concepto de calibración es problemático. Algunos estudiantes han oído algo sobre él previamente, mientras que otros malentienden que se trata del proceso de ajuste de un sistema de medida. Por esta razón preferimos comenzar con una lluvia de ideas sobre posibles alternativas para cuantificar la discrepancia entre la función de transferencia ideal y real. Entre todas las propuestas buscamos quedarnos con la de testear una única unidad elegida aleatoriamente mediante la introducción de diferentes valores de la magnitud de entrada. Aquí es importante enfatizar la utilidad de la aproximación gráfica frente a los datos en columna [10]. Por último, a partir de cuestiones del tipo ¿cómo es posible conocer el verdadero valor de la magnitud que se emplea en la calibración?, surge el concepto de patrón de referencia.

**Paso 4. Dividiendo el error genérico:** Al finalizar el paso 3 los estudiantes tienen una curva de calibración para uno de los sensores construidos. Ahora se introduce y justifica el concepto de dividir el error total en partes (error de offset, de ganancia y de no linealidad). Algunos alumnos plantean este tipo de solución. Empleamos los ejemplos de funciones de transferencia real de la Fig. 3 para discutir con los alumnos cuál de los tres sensores asociados funciona “mejor”. El concepto de exactitud corresponde con el error genérico que los propios alumnos ven de poca utilidad práctica frente a la posibilidad de dividirlo en los tres tipos mencionados.

**Paso 5. Infiriendo el funcionamiento de todos los sensores fabricados:** Una vez un único sensor ha sido caracterizado, se plantea a los alumnos la forma de inferir el funcionamiento de los 999 restantes. ¿Existirán diferencias entre los 1000? Aquí cada uno plantea diferentes

soluciones. Es importante que reflexionen sobre ventajas y problemas de cada una de ellas. Al acabar esta discusión, y dependiendo de la solución aportada, dispondremos de tres tipos de errores los cuales en realidad podrán corresponder a medias estadísticas, desviaciones típicas, intervalos de confianza, etc.

**Paso 6. Estudiando la repetibilidad de cada sensor:** Ahora se recuerda a los alumnos que todos los datos empleados corresponden únicamente a una medida, y que realmente la respuesta del sistema puede variar con el tiempo. Se introduce así el concepto de fidelidad (precisión) y sus casos particulares (repetibilidad y reproducibilidad). Con estos errores cuantificados, los estudiantes ya estarán casi preparados para crear un *data sheet* correspondiente a los 1000 sensores fabricados.

**Paso 7. El concepto de discriminación:** Junto a la definición del concepto de discriminación, y su diferencia y relación con el de exactitud, se plantean problemas prácticos sencillos (los de salida por lectura digital) y más complejos (totalmente analógicos).

**Paso 8. Utilizando una data sheet:** Una vez el funcionamiento del sistema ha sido totalmente caracterizado mediante el uso de los conceptos descritos anteriormente, es el momento de que los estudiantes trabajen el problema inverso. Ahora ellos cambian su rol y actúan como usuarios (potenciales compradores) del sistema caracterizado. El objetivo entonces es estimar teóricamente el error total del sistema bajo ciertas condiciones mediante la información contenida en el *data sheet*.

**Paso 9. Minimizando los errores mediante calibraciones in-situ y ajustes:** Aunque el funcionamiento general de un sistema de medida es definido por su *data sheet*, cualquier proceso de calibración realizado por el usuario le permitirá conocer, y consecuentemente corregir, algunos de los errores del sistema particular adquirido por él. Una calibración de un punto permitirá minimizar el error de *offset*, de dos puntos el de ganancia, etc. Al llegar aquí, creemos que la metodología propuesta demuestra fácil y cuantitativamente al estudiante la relación estrecha entre las características de funcionamiento de un sensor y la topología y características de los circuitos de acondicionamiento asociados.

#### 4. VALORACIÓN DEL CURSO, RESULTADOS POSITIVOS Y LIMITACIONES

Durante los cuatro últimos años se ha empleado esta metodología en un curso optativo de "Sensores" (9 créditos, tercer curso, sexto semestre) de la titulación de Ingeniero Técnico en Electrónica Industrial en la Universidad Politécnica de Valencia.

Creemos que esta metodología permite incrementar la interacción con los alumnos, desplazando las clases tradicionales e incorporando un gran número de actividades centradas en el alumno [11]. Esto nos permite desarrollar una aproximación de aprendizaje activo incluyendo la resolución de problemas, experimentos de laboratorio, grupos de discusión, técnicas de rol-playing, estudios autodirigidos, aprendizaje cooperativo, tutorías, comunicaciones orales y escritas, sesiones de póster, entre otros. De hecho, esta aproximación, está en total sintonía con las guías de la convergencia europea en materia de educación superior, donde se enfatiza fuertemente el aprendizaje activo y centrado en el alumno.

Además, hemos identificado los siguientes beneficios e innovaciones al emplear esta metodología: 1) Es posible enseñar y discutir sobre técnicas de presentación de resultados en ingeniería (uso preferible de gráficas frente a tablas) [10,12]; 2) Permite incrementar en los estudiantes hábitos buenos sobre la ciencia de la medida y la instrumentación; 3) Se trabaja tanto con una metodología *bottom-up* como *top-down*, permitiendo a los estudiantes organizar detalles y desarrollar ideas generalistas [13]; y 4) hemos constatado el curso se desarrolla de manera entretenida, a veces, incluso divertida, y esto supone un ingrediente esencial [14].

Por el contrario, hemos identificado algunas limitaciones: 1) Esta metodología sólo cubre una parte pequeña (pero esencial) de lo que debería ser un curso de instrumentación, 2) aspectos sobre estándares de medida y otros documentos técnicos deberían ser cubiertos en cursos complementarios [15], y 3) en cursos más específicos debería incorporarse mayor contenido matemático. Existe desde el año pasado unos apuntes editados que los alumnos utilizan en clase y que contienen los puntos tratados siguiendo la filosofía aquí descrita [16].

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Laopoulos, Th., "Introduction" in *Current trends on teaching instrumentation and measurement*. R. Morawski, R. Pallás-Areny, E. Petriu, M. Siegel, and Th. Laopoulos. In IMTC'99, pp. 1715-1726, 1999.
- [2] Cobbold, R. S., *Transducers for biomedical measurements: principles and applications*. New York: Wiley, 1974.
- [3] Doebelin, E. O., *Measurement systems. Application and design*. Third edition. McGraw-Hill, 1983.
- [4] Geddes, L. A., and L. E. Baker, *Principles of Applied Biomedical Instrumentation*. New York: Wiley, third edition, 1989.
- [5] Norton, H. N., *Handbook of transducers*. New Jersey: Prentice-Hall, 1989.
- [6] Pallás-Areny, R., and J. G. Webster, *Sensors and signal conditioning*. New York: Wiley, 1991.
- [7] Webster, J. G. (ed.), *The measurement, instrumentation and sensor handbook*. Springer: IEEE Press, 1999.
- [8] McKeachie, W.J., *Teaching tips. A guidebook for the beginning collage teacher*, D.C. Heath and Company, Lexington, Massachussets, USA, 1986.
- [9] Pearce, J. A., "Quantitative ethics problem examples," in 1998 FIE Conference, p. 1326, 1998.
- [10] Doebelin, O. *Engineering experimentation. Planning, execution, reporting*. McGraw-Hill, 1995.
- [11] J. L. Schmazel (1999) "The clinic as an enabling educational structure," *IEEE Instrum. Meas. Mag.*, pp. 41-42,50, march 1999.
- [12] Fentiman, W., and J. T. Demel "Teaching students to document a design project and present the results," *J. Eng. Educ.*, pp. 329-333, Oct.1995.
- [13] Barwicz, A., and R. Z. Morawski, "Teaching measuring systems. Beyond the year 2000," *IEEE Instrum. Meas. Mag.*, pp. 20-27, march 1999.
- [14] Pallás-Areny, R., "Electronic instrumentation: from transformers to transforms," in *Current trends on teaching instrumentation and measurement*. Morawski, R., R. Pallás-Areny, E. Petriu, M. Siegel, and Th. Laopoulos. In IMTC'99, pp. 1715-1726, 1999.
- [15] Laopoulos, Th., "Teaching instrumentation and measurement in the complex-systems era," *IEEE Instrum. Meas. Mag.*, pp. 28-30, march 1999.
- [16] Berjano, E. J., *Sensores. Conceptos y características generales*. Universidad Politécnica de Valencia, 2003.