

---

# Introducción a los sistemas de medida y actuación

---

PID\_00247320

Francisco Vázquez Gallego

---

Tiempo mínimo de dedicación recomendado: 2 horas

---



Universitat  
Oberta  
de Catalunya

---

*Ninguna parte de esta publicación, incluido el diseño general y la cubierta, puede ser copiada, reproducida, almacenada o transmitida de ninguna forma, ni por ningún medio, sea éste eléctrico, químico, mecánico, óptico, grabación, fotocopia, o cualquier otro, sin la previa autorización escrita de los titulares del copyright.*

## Índice

<b>Introducción</b> .....	5
<b>1. Estructura de los sistemas de medida y actuación</b> .....	6
<b>2. Arquitecturas del sistema de medida multicanal</b> .....	8
<b>3. Margen dinámico del sistema de medida</b> .....	10
<b>4. Características estáticas del sistema de medida</b> .....	12
4.1. Calibración.....	12
4.2. Sensibilidad .....	13
4.3. Error de cero y error de sensibilidad .....	14
4.4. Exactitud, errores y precisión .....	14
<b>5. Características dinámicas del sistema de medida</b> .....	16
<b>Bibliografía</b> .....	18



## Introducción

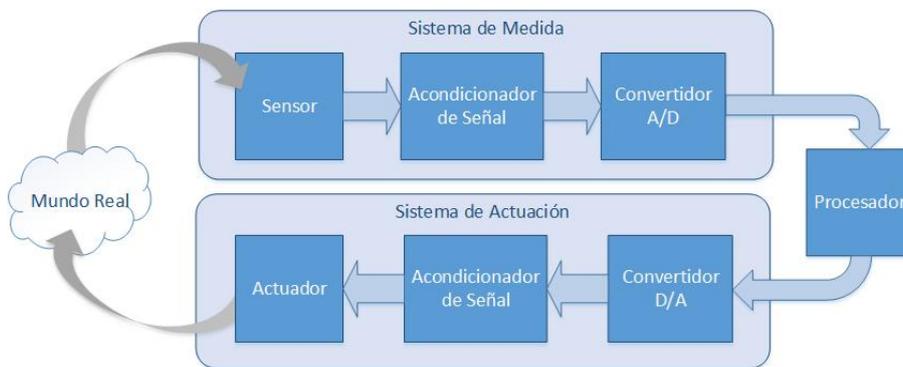
Los sistemas de medida y actuación permiten la interacción del sistema ciberfísico con el mundo real. El sistema de medida recoge la información procedente de variables o magnitudes físicas, y la prepara para su posterior tratamiento, visualización y almacenamiento en el procesador del sistema ciberfísico. El sistema de actuación es capaz de producir variaciones o perturbaciones mecánicas o eléctricas, a partir de señales de control generadas por el procesador, según sea el valor de las magnitudes físicas y el estado global del sistema ciberfísico. Por tanto, los sistemas de medida y actuación funcionan como interfaces entre el mundo físico y el procesador, el cual intercambia información con el *cloud* y con otros sistemas ciberfísicos a través del sistema de comunicaciones.

El objetivo de este material consiste en describir el funcionamiento y los componentes fundamentales de los sistemas de medida y actuación. En primer lugar, en el apartado 1 se describe la estructura general de ambos sistemas y se detallan las funcionalidades de los diferentes elementos que los componen. En el apartado 2 se describen diversas arquitecturas posibles para los sistemas de medida multicanal. En el apartado 3 se introduce el concepto de *margen dinámico* en las diferentes etapas de los sistemas de medida. Finalmente, en los apartados 4 y 5 se describen los parámetros que caracterizan el comportamiento de un sistema de medida.

## 1. Estructura de los sistemas de medida y actuación

En la figura 1 se representa la estructura básica de los sistemas de medida y actuación de un sistema ciberfísico. La misión principal del sistema de medida consiste en convertir una magnitud física en un valor numérico (digital) que pueda ser interpretable por el procesador del sistema ciberfísico. Como puede observarse en la figura 1, el sistema de medida está compuesto por los siguientes elementos que se describen a continuación [Pallás Areny (1993), Webster y Eren (2016)]: sensor, acondicionador de señal de entrada y convertidor analógico-digital.

Figura 1. Estructura de los sistemas de medida y actuación



- **Sensor.** Es un dispositivo que proporciona una señal eléctrica a partir de la energía de la magnitud física que se mide. Las magnitudes físicas adquiridas por un sensor pueden ser de tipo mecánico, térmico, eléctrico, magnético, óptico, acústico, químico y biológico. La señal eléctrica de salida puede ser de tipo analógico o digital, y el valor de la medida puede estar incluido en un nivel de tensión, corriente, frecuencia, variación de impedancia, etc.
- **Acondicionador de señal de entrada.** Cuando la salida del sensor es analógica, el acondicionador de señal está formado por un conjunto de componentes electrónicos que convierten la señal de salida del sensor en una señal analógica adecuada para realizar la conversión al dominio digital: amplificadores, filtros y circuitos dedicados al procesamiento analógico de señal. Cuando la salida del sensor es digital, el acondicionador de señal es más sencillo y solo realiza la adaptación de los niveles de tensión para que sean compatibles con los de las entradas del procesador.
- **Convertidor analógico-digital (A/D).** Es un dispositivo electrónico que convierte al dominio digital la señal analógica procedente del acondicionador de señal de entrada. La conversión analógico-digital se lleva a cabo en tres etapas: muestreo, cuantificación y codificación. El muestreo consiste en adquirir y retener una ten-

sión analógica de entrada mientras dura la conversión. La cuantificación se basa en asignar a la amplitud de la señal muestreada el valor más cercano de un conjunto finito de valores de amplitud posibles. La codificación consiste en asignar un código digital a cada valor de amplitud.

La misión del sistema de actuación consiste en convertir las señales de control generadas por el procesador en acciones mecánicas, cambios de temperatura, señales ópticas o señales acústicas. Como puede observarse en la figura 1, el sistema de actuación está compuesto por los siguientes elementos descritos a continuación: actuador, acondicionador de señal de salida y convertidor digital-analógico.

- **Actuador.** Es un dispositivo que ofrece una salida no eléctrica a partir de una señal eléctrica. Las salidas o acciones típicas generadas por un actuador pueden ser de los siguientes tipos: *(i)* mecánico (por ejemplo, la rotación de un motor, un desplazamiento lineal o la apertura de un relé); *(ii)* térmico (por ejemplo, el aumento o la disminución de la temperatura por efecto Peltier); *(iii)* óptico (por ejemplo, la activación o desactivación de indicadores luminosos), o *(iv)* acústico (por ejemplo, la generación de ultrasonidos o vibraciones producidas por efecto piezoeléctrico).
- **Acondicionador de señal de salida.** Se utiliza cuando el actuador requiere señales de entrada con niveles de tensión o corriente muy elevados. El acondicionador de señal de salida está formado por un conjunto de componentes electrónicos que adaptan los niveles de tensión y corriente a la salida del procesador, o del convertidor digital-analógico (en caso de que el actuador funcione con una señal de control analógica), a los niveles que requiera la entrada del actuador.
- **Convertidor digital-analógico (D/A).** Se utiliza cuando el actuador requiere una señal de control analógica. El convertidor digital-analógico es un dispositivo que genera una señal analógica a partir de un valor numérico (dominio digital) a la salida del procesador. Si el actuador funciona con señales digitales de control, las salidas del procesador se conectan directamente al acondicionador de señal sin pasar por un convertidor digital-analógico.

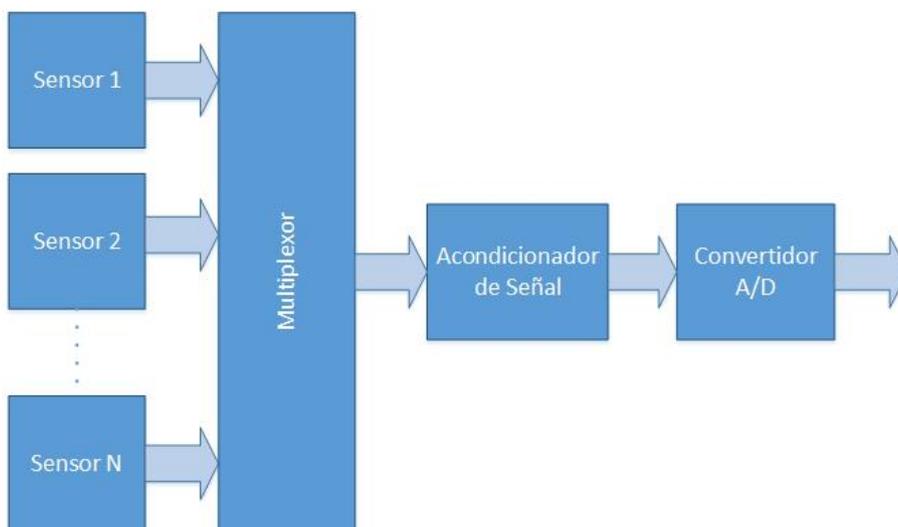
## 2. Arquitecturas del sistema de medida multicanal

A partir de la estructura básica del sistema de medida de la figura 1, concebida para adquirir la medida de un único sensor, se pueden considerar diversas arquitecturas de diseño alternativas cuando el sistema ciberfísico está equipado con varios sensores.

A continuación, se describen las características de tres arquitecturas de diseño de un sistema de medida multicanal, en el que cada canal es el conjunto de elementos del sistema de medida que van desde cada sensor hasta el procesador. En las arquitecturas 1 y 2, se utiliza un multiplexor analógico para permitir que varios canales compartan uno o diversos recursos del sistema de medida. El multiplexor funciona como un conmutador que asigna el recurso compartido a cada canal de forma secuencial o arbitraria. La selección del canal en el multiplexor se controla desde el procesador.

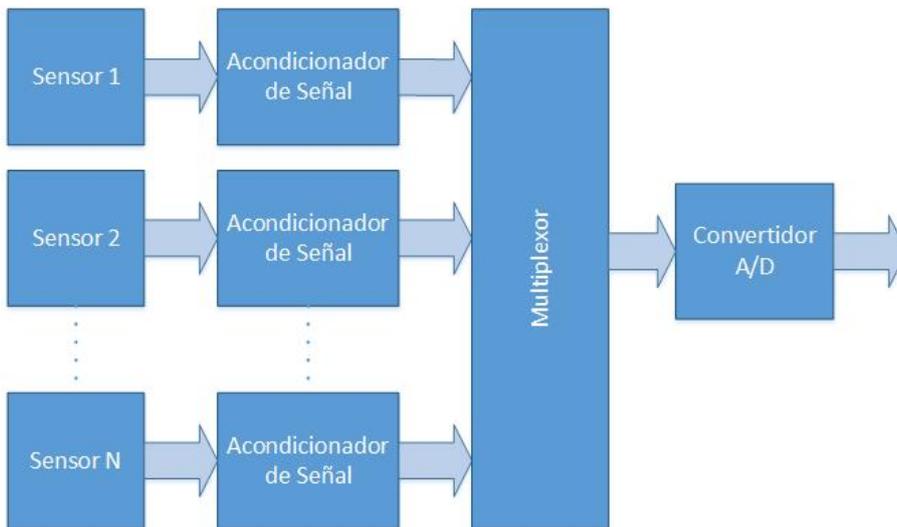
1) **Acondicionador y convertidor A/D compartidos.** En la figura 2 se muestra el diagrama de bloques de la arquitectura 1. Está compuesta por un multiplexor analógico, un único acondicionador de señal de entrada y un único convertidor analógico-digital compartidos. Debido a que el nivel de tensión de las señales de los sensores suele ser muy bajo, esta arquitectura requiere que el multiplexor introduzca errores muy pequeños. Además, si las características de las señales de salida de los sensores son muy diferentes, será necesario que la ganancia de los amplificadores y las características de los filtros del acondicionador de señal sean configurables desde el procesador.

Figura 2. Arquitectura de un sistema de medida multicanal basado en un acondicionador y un convertidor A/D compartidos



2) **Convertidor A/D compartido.** En la figura 3 se muestra el diagrama de bloques de la arquitectura 2. Está compuesta por un acondicionador de señal de entrada por sensor, un multiplexor analógico y un único convertidor analógico-digital compartido. Esta arquitectura reduce el efecto de los errores introducidos por el multiplexor en la arquitectura 1, y no requiere reconfigurar las cadenas de acondicionamiento, con la consiguiente reducción de los tiempos de adquisición.

Figura 3. Arquitectura de un sistema de medida multicanal basado en un convertidor A/D compartido



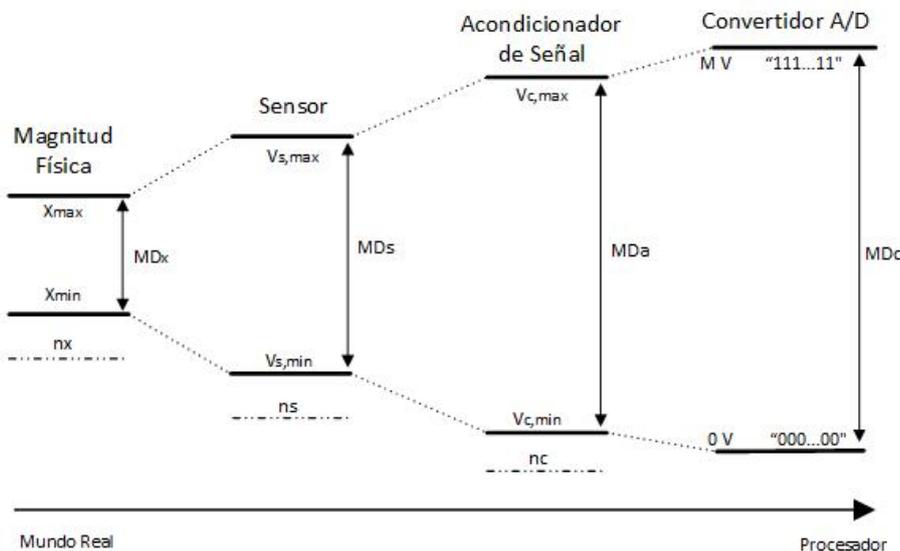
3) **Canales independientes.** Esta arquitectura está compuesta por un acondicionador de señal de entrada por sensor y un convertidor analógico-digital por sensor. De este modo, es posible medir simultáneamente en todos los canales, lo que reduce los tiempos de adquisición respecto a las otras arquitecturas.

### 3. Margen dinámico del sistema de medida

Un sistema de medida debe adaptar el rango de valores de la magnitud física que se ha de medir ( $x_{min}, x_{max}$ ) a un rango de códigos de salida ( $D_{min}, D_{max}$ ) del convertidor analógico-digital. Además, el sistema de medida debe ser capaz de detectar una variación  $\delta x$  en la amplitud de la magnitud física.

En la figura 4 se muestran los diferentes rangos de señal en un canal del sistema de medida, desde la magnitud física, pasando por la salida del sensor y la salida de los amplificadores del acondicionador de señal, hasta la entrada al convertidor analógico-digital. El sensor proporciona una señal de salida cuya tensión está dentro de un rango de valores ( $V_{s,min}, V_{s,max}$ ). El convertidor analógico-digital tiene un rango de tensiones de entrada entre  $0 V$  y  $M V$ , con una resolución  $M/2^n$ , donde  $n$  es el número de bits del convertidor. La salida digital del convertidor ofrecerá un total de  $2^n$  códigos distintos.

Figura 4. Rangos de señal en un canal del sistema de medida



La adaptación entre el rango de tensiones de salida del sensor y el rango de tensiones de entrada al convertidor la realizan los amplificadores incluidos en la electrónica del acondicionador de señal.

El rango o margen dinámico (MD) de cada uno de los elementos del sistema de medida se define como la relación entre el valor de salida máximo y el valor mínimo aceptable. El valor mínimo de tensión a la salida de cada elemento del sistema de medida viene limitado por el ruido, las derivas intrínsecas de los componentes y las interferencias externas. El rango dinámico suele expresarse en decibelios (dB). El margen

dinámico de todos los elementos del sistema de medida debe ser mayor que el margen de variación de la magnitud física.

## 4. Características estáticas del sistema de medida

El comportamiento del sistema de medida está definido por su función de transferencia, o por la relación entre los valores de la señal de entrada (magnitud física) y los valores de la señal eléctrica de salida. Dicha función de transferencia define el comportamiento estático y dinámico del sistema.

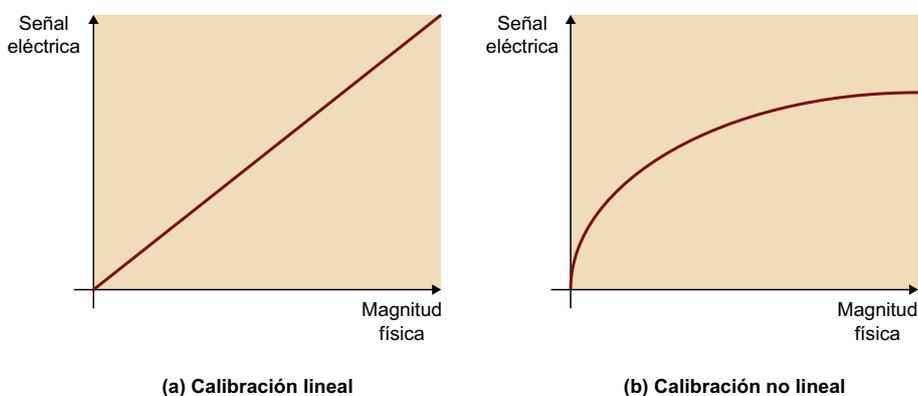
Las **características estáticas** del sistema de medida describen su comportamiento estático, que corresponde a la relación entre la entrada y la salida cuando el valor de la magnitud física es constante, o bien ha pasado el tiempo suficiente para que la salida del sistema de medida tenga un valor estable, es decir, que haya llegado a su régimen permanente.

En los siguientes subapartados se describen las características estáticas del sistema de medida. Las características dinámicas se introducen en el apartado 5.

### 4.1. Calibración

El proceso de calibración del sistema de medida consiste en aplicar sucesivos valores de la magnitud física de entrada y anotar los valores de salida obtenidos para cada valor de entrada. La curva de calibración es la línea que une todos los puntos obtenidos. En la figura 5 se muestran dos ejemplos de curvas de calibración, de tipo lineal y de tipo no lineal, donde  $x$  es el eje de los valores de la magnitud física de entrada e  $y$  el eje de los valores de la señal eléctrica de salida.

Figura 5. Ejemplos de curvas de calibración: (a) lineal, y (b) no lineal

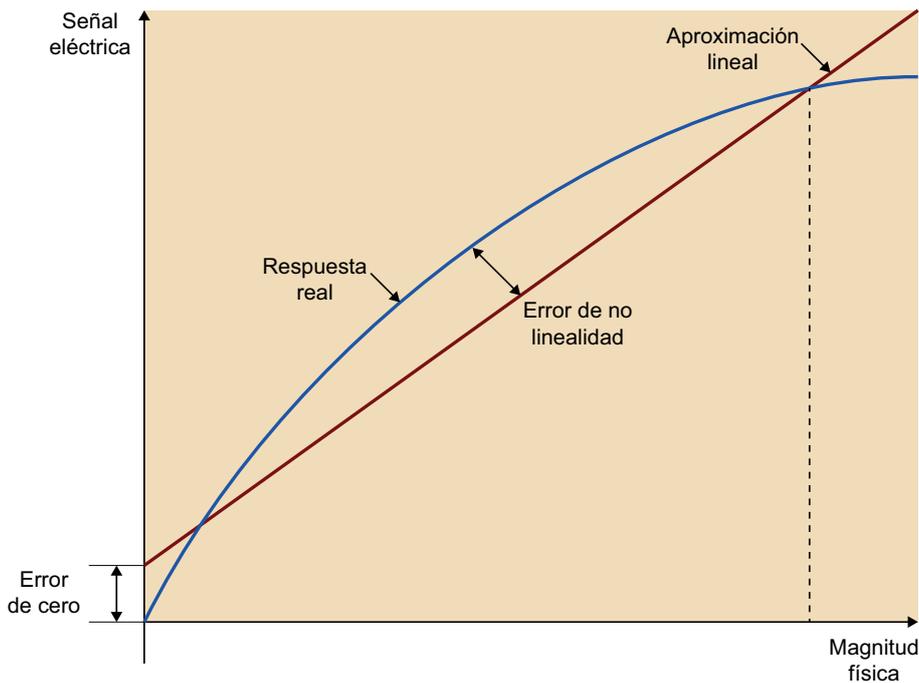


En cuanto a la linealidad de la curva de calibración, en algunos de los sensores de mayor interés suele ajustarse a una línea recta (por ejemplo, utilizando el método de

mínimos cuadrados). Pero no siempre es posible obtener una curva de calibración que sea recta.

En la figura 6 se muestra un ejemplo de la linealización de la curva de calibración. La *curva real* es un segmento de una curva de calibración no lineal. La *curva lineal* es la línea recta a la cual se ha ajustado la curva de calibración. Como puede observarse, en la linealización se produce una diferencia entre la curva lineal y la curva real, lo que conlleva el error de no linealidad en la medida.

Figura 6. Linealización de la curva de calibración



## 4.2. Sensibilidad

La sensibilidad de un sistema de medida es la pendiente de la curva de calibración. Si la curva de calibración es una línea recta, la sensibilidad es constante y se dice que el sistema de medida es lineal. En ese caso, el valor de la magnitud física se puede obtener fácilmente restando la salida correspondiente a la entrada cero y dividiendo por la sensibilidad.

Para los casos en que la curva de calibración no es lineal, se pueden guardar en una tabla los valores de la salida correspondientes a cada entrada, o bien es posible obtener matemáticamente el valor de la entrada a partir del valor de la salida y los coeficientes de la curva de calibración.

### 4.3. Error de cero y error de sensibilidad

El error de cero y el error de sensibilidad (o de ganancia) se utilizan en sistemas de medida lineales. El error de cero es el valor de la salida del sistema de medida cuando la magnitud física aplicada a la entrada debería generar una salida nula. El error de sensibilidad indica la diferencia entre la sensibilidad prevista y la real. En la figura 6 se muestra claramente la existencia del error de sensibilidad.

### 4.4. Exactitud, errores y precisión

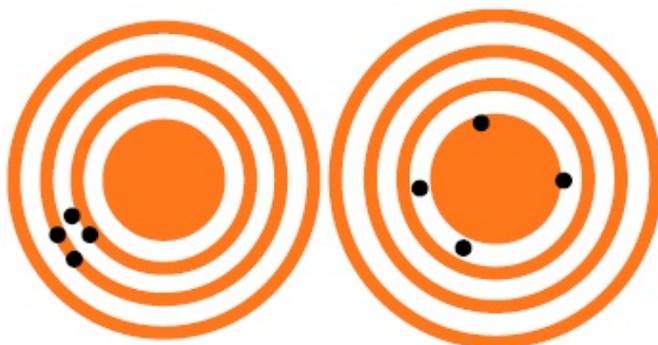
La **exactitud** de un sistema de medida es el grado de concordancia entre el valor real de la magnitud física aplicada a la entrada y el valor calculado a partir de la salida del sistema de medida.

El **error absoluto** se define como la diferencia entre el valor real de la magnitud física aplicada y el valor obtenido con el sistema de medida. El **error relativo** es el cociente entre el error absoluto y el valor real de la magnitud física.

Los **errores sistemáticos** son aquellos que se mantienen constantes, en signo y error absoluto, después de repetidas medidas. Por tanto, los errores sistemáticos son corregibles. Los **errores aleatorios** son los que permanecen una vez corregidos los errores sistemáticos.

La **precisión** de un sistema de medida es el grado de concordancia entre los resultados. A partir de un elevado número de medidas, los valores obtenidos pueden ser muy similares entre sí pero diferentes respecto del valor de referencia o verdadero. Normalmente, la precisión se cuantifica mediante cálculos estadísticos como la desviación estándar, la varianza o el intervalo de confianza.

Figura 7. Relación entre precisión y exactitud



En la figura 7 se puede observar la relación entre la precisión y la exactitud de un sistema de medida. A la izquierda se muestran los resultados de un sistema de medida de alta precisión (los valores de medida son muy similares entre sí) pero poca exactitud (los valores de medida están lejos del valor real, representado por el centro de la diana).

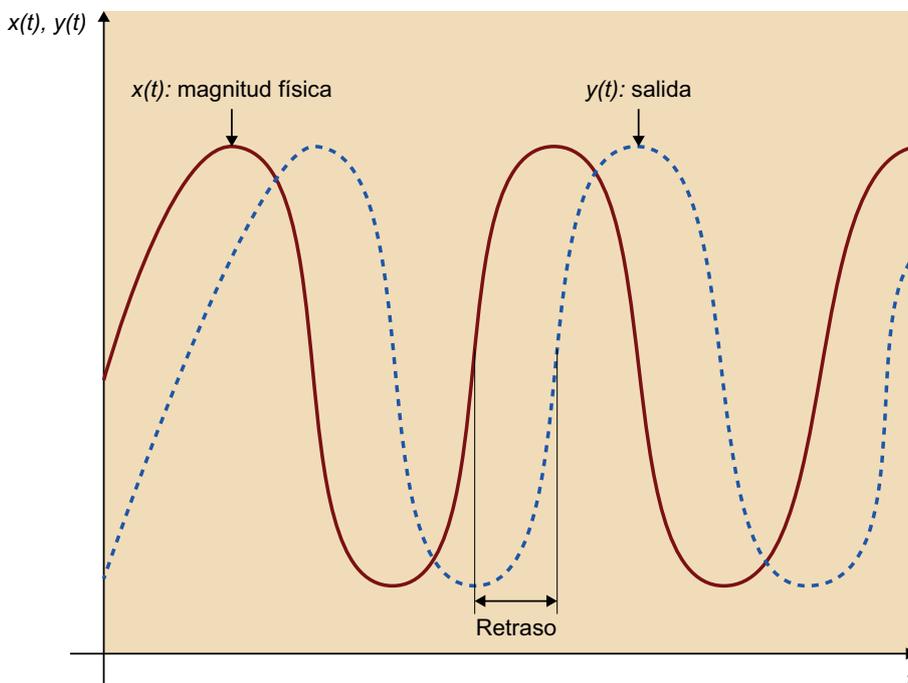
A la derecha se muestran los resultados de un sistema de medida de mayor exactitud (los valores de medida están más cerca del valor real) pero baja precisión (los valores de medida son muy diferentes entre sí).

## 5. Características dinámicas del sistema de medida

Las **características dinámicas** del sistema de medida describen su comportamiento dinámico, que corresponde a la evolución de la salida cuando la magnitud física de entrada es variable. La función de transferencia del sistema define de qué forma evoluciona la salida ante variaciones de la magnitud física.

Los cambios en la señal de salida se producen con un cierto retraso con respecto a los cambios en la entrada, debido principalmente a las latencias introducidas por la electrónica del sensor y de la cadena de acondicionamiento de señal. Por tanto, cuando la magnitud física presenta fluctuaciones a lo largo del tiempo, la salida del sistema de medida también fluctúa, pero con un cierto retraso. En la figura 8 se muestra un ejemplo del retraso introducido por el sistema de medida. La magnitud física de entrada está representada por la señal  $x(t)$ , y la salida del sistema está representada por la señal  $y(t)$ .

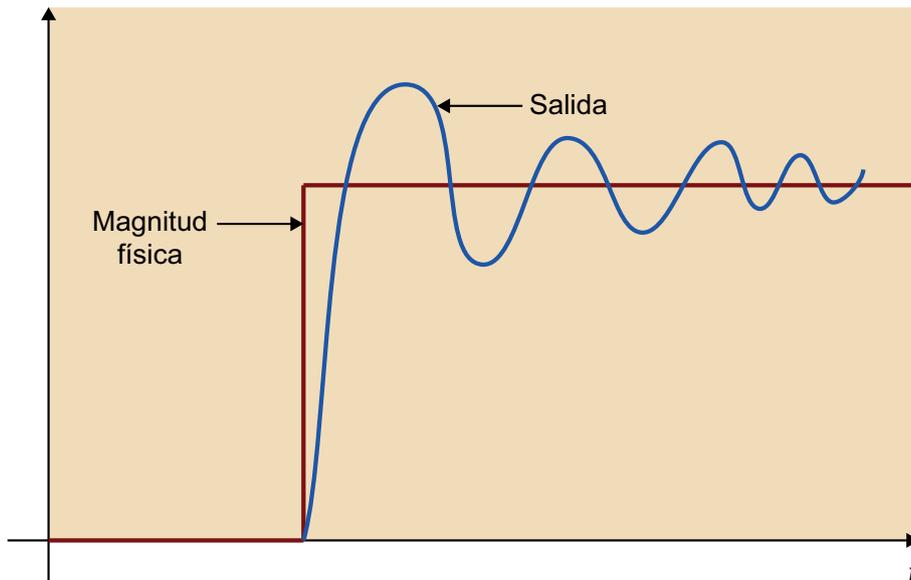
Figura 8. Ejemplo del retraso introducido por el sistema de medida



La importancia del retraso en la medida depende de cada caso. Si el valor que hay que medir es la frecuencia o la amplitud máxima de la señal de entrada, el retraso no introducirá errores en la medida. Sin embargo, si lo que se mide es el valor instantáneo o la fase de la señal de entrada, el retraso introduce un error sistemático en la medida.

Las características dinámicas del sistema de medida también describen cómo evoluciona la salida ante lo que se denomina *entrada escalón*, es decir, cuando la magnitud física de entrada presenta un cambio abrupto, y varía de un valor inicial a un valor final en un intervalo de tiempo muy corto. En la figura 9 se muestra un ejemplo de la respuesta de un sistema de medida a una entrada en escalón. Como puede observarse, la salida presenta un transitorio en el que se producen oscilaciones en la señal. Pasado el transitorio, la señal de salida se estabiliza y llega al régimen permanente o estacionario.

Figura 9. Ejemplo de la respuesta del sistema de medida a una entrada en escalón



Es muy importante caracterizar el comportamiento dinámico del sistema de medida en función del tipo de variaciones que presente la magnitud física de entrada y de cuál sea el parámetro que hay que medir (amplitud máxima, frecuencia, fase, etc.) de la señal eléctrica proporcionada por el sensor. La caracterización o modelado del sistema de medida puede llevarse a cabo de manera teórica o experimental. El modelado teórico consiste en la extracción de relaciones teóricas entre las variables del sistema, su linealización en un margen dinámico de funcionamiento y la obtención de la función de transferencia aplicando la transformada de Fourier. El modelado empírico consiste en obtener la función de transferencia a partir de medidas de amplitud y fase en la señal de salida del sistema realizando un barrido frecuencial en la señal de entrada.

Una vez obtenida la función de transferencia empleando uno de los dos métodos, o mediante una combinación de ambos, se podrá estudiar el comportamiento dinámico del sistema, tanto en el dominio temporal como en el frecuencial, dependiendo de las necesidades de la aplicación de la medida.

## Bibliografía

**Pallás Areny, R.** (1993). *Adquisición y distribución de señales*. Marcombo.

**Webster, J. G.; Eren, H.** (2016). *Measurement, instrumentation, and sensors handbook*. CRC Press.