
Descripción de un sistema de instrumentación

PID_00257323

Ferran Domínguez Gros
Jordi Solé Casals

Tiempo mínimo de dedicación recomendado: 4 horas



Ferran Domínguez Gros

Ingeniero técnico en Telecomunicaciones (Universitat Politècnica de Catalunya). Colaborador de la UOC desde el 2003 en los Estudios de Ingeniería Informática, ETTT, grado de Telecomunicación, posgrado y máster de Seguridad informática. Trabaja desde hace tiempo en diferentes empresas privadas del sector de las telecomunicaciones, informático y sanitario en diferentes proyectos de las TIC.

Jordi Solé Casals

Doctor ingeniero de Telecomunicaciones (Universitat Politècnica de Catalunya). Licenciado en Humanidades (Universitat Oberta de Catalunya). Colaborador de la UOC desde el 2001 en los Estudios de Ingeniería Informática, ETTT, grado de Telecomunicación. Actualmente es profesor titular en el Departamento de Tecnologías Digitales y de la Información de la Universidad de Vic. Su ámbito de investigación se centra en el procesamiento de señales biomédicas.

Tercera edición: febrero 2019
© Ferran Domínguez Gros, Jordi Solé Casals
Todos los derechos reservados
© de esta edición, FUOC, 2019
Av. Tibidabo, 39-43, 08035 Barcelona
Diseño: Manel Andreu
Realización editorial: Oberta UOC Publishing, SL

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

Introducción	5
Objetivos	6
1. Aplicaciones de medida y de control	7
2. Señales y variables	15
3. Característica estática	19
3.1. La curva de calibración	19
3.2. Calibración	22
4. Característica dinámica	24
4.1. Caracterización del comportamiento dinámico	27
4.1.1. Dominio de la frecuencia	28
4.1.2. Dominio del tiempo	29
5. Errores y propagación de errores	31
5.1. Error absoluto y error relativo	31
5.2. Propagación de errores	33
Resumen	35
Ejercicios de autoevaluación	37
Solucionario	38
Glosario	40
Bibliografía	42

Introducción

La instrumentación electrónica, en constante progreso y evolución, interactúa en nuestras vidas diariamente en cualquiera de sus ámbitos. Enumeramos a continuación unos pequeños ejemplos en los que intervienen, en nuestro día a día, diferentes aspectos de la instrumentación electrónica:

- Unos grandes almacenes abiertos en pleno verano o riguroso invierno con un flujo continuo de personas entrando y saliendo de los grandes espacios.
- Un centro de proceso de datos (CPD) lleno de hardware disipando calor a pleno rendimiento a ciertas horas del día, en el que nos interesa mantener, al igual que en el caso de los grandes almacenes, una temperatura constante.
- Un departamento de cardiología en un hospital cualquiera donde nos interesa monitorizar la actividad eléctrica del corazón de un paciente mediante un electrocardiograma. Garantizar la seguridad del paciente es de vital importancia y, por lo tanto, hay que garantizar también el aislamiento eléctrico entre el sistema de medida y el paciente.
- Un corredor de fondo que, cuando lleva a cabo su entrenamiento diario, quiere medir en tiempo real su esfuerzo, la distancia recorrida en cada instante, su velocidad y las calorías consumidas mientras llega, paso a paso, a su objetivo.

La lista con diferentes ejemplos que podríamos enumerar sería interminable.

Los sistemas de medida y control, las señales, las variables y los errores derivados de cada componente y de cada conexión representan la base, la denominada *PCB* (*printed circuit board*) o tarjeta de circuito impreso, sobre la que construiremos nuestro sistema de instrumentación electrónico.

Por este motivo, tenéis que prestar un especial interés a este módulo porque aquí empezaremos a construir los fundamentos sobre los cuales edificaremos el resto de los conceptos en los que reposa la totalidad del temario de *Instrumentación electrónica*.

Objetivos

Los objetivos que debéis alcanzar con este módulo didáctico son los siguientes.

- 1.** Conocer las aplicaciones de medida y control mediante la presentación de los diferentes conceptos sobre por qué nos interesa medir variables y cómo podemos utilizar estas medidas para controlar dispositivos.
- 2.** Conocer los conceptos de señales y variables para entender cómo podemos tener de manera numérica la evolución temporal de variables físicas que queremos medir y/o controlar.
- 3.** Conocer los dispositivos electrónicos, dado que el control se lleva a cabo con éstos, y saber cuáles son sus características estáticas y dinámicas más importantes, que nos permitirán caracterizar el dispositivo.
- 4.** Entender el concepto de error en la medida, para minimizar los errores en las implementaciones prácticas de modo que no afecten de manera negativa a nuestros diseños.

1. Aplicaciones de medida y de control

Los antiguos griegos utilizaban la palabra *μετρον* (*metron*) para referirse al término **medida**.

Los romanos se esforzaron en crear un sistema único de medida que fuera válido para todo su vasto imperio, a pesar de que durante la Edad Media volvió a reinar un importante desorden y proliferaron diferentes unidades que, si bien podían tener el mismo nombre, diferían en su valor muchas veces de una manera bastante significativa.

Finalmente, los ideólogos de la Revolución Francesa decidieron suprimir los derechos feudales referentes a los pesos y las medidas y los integraron en un sistema de medidas único y uniforme.

La Academia de las Ciencias trató de excluir todos aquellos elementos arbitrarios o de interés particular y apuntó a la naturaleza, tomando como unidad de medida el **metro**, palabra que como hemos visto proviene etimológicamente del griego y significa ‘medida’. El valor que se dio al metro equivalía a la diezmillonésima parte de un cuarto de meridiano terrestre.

Posteriormente, y ya dentro del ámbito de la ciencia moderna, en la XI Conferencia General de Pesos y Medidas se dio una definición del **metro** más exacta y en relación con un fenómeno físico natural constante, preciso, indestructible y reproducible en cualquier lugar:

“Un metro es igual a 1.650.763,73 veces la longitud de la onda en el vacío de la radiación correspondiente a la transición entre los niveles 2p₁₀ y 5d₅ del átomo de criptón 86.”

En cualquier caso, el metro se ha convertido en la unidad principal de medida de longitud del sistema internacional de unidades. Cuando a través de nuestros sentidos medimos de manera aproximada el tamaño de una habitación o de un campo de fútbol, por ejemplo, en realidad estamos haciendo una comparación con el estándar definido anteriormente, el cual utilizamos como referencia para nuestras medidas. De este modo, estamos obteniendo una magnitud de medida a partir de una magnitud concreta, precisa y reconocida internacionalmente que nos sirve como patrón de medida de longitud.

Sin embargo, en el anterior ejemplo, en el que intentábamos cuantificar el tamaño de una habitación, y pese a que podamos pensar que tenemos unos sentidos infalibles, no estamos llevando a cabo una medida objetiva porque siempre estará sujeta a errores de apreciación y a desviaciones especialmente significativas.

Además, nuestros sentidos son incapaces de medir ciertas variables físicas como objetos extraordinariamente pequeños o, dado el caso, percibir ondas sonoras de una frecuencia inferior a 20 Hz o superior a 20 kHz, debido a nuestras limitaciones auditivas.

Por lo tanto, para suplir todas las deficiencias de nuestros sentidos utilizaremos instrumentos de medida. Este sería el caso de una cinta métrica, un microscopio o un comprobador electrónico.

Estos instrumentos de los que nos ayudamos son capaces de cuantificar de una manera sistemática y precisa las diferentes magnitudes que podemos y no podemos percibir con nuestros sentidos, y nos permiten obtener un conocimiento principalmente científico.

Podemos, entonces, definir la instrumentación como un conjunto de metodologías basadas en el diseño, la construcción y la aplicación de dispositivos físicos que permiten optimizar la eficiencia de las percepciones humanas.

Una de las tecnologías de instrumentación más avanzadas es la que utiliza técnicas electrónicas para efectuar medidas.

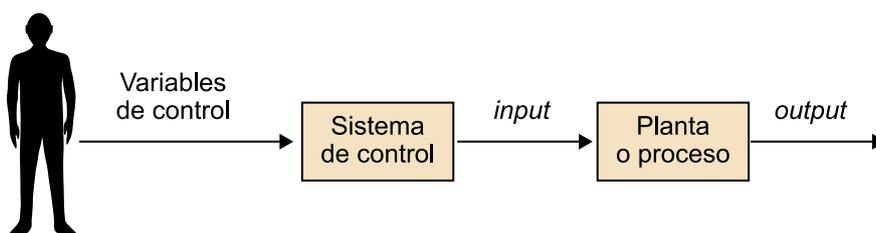
La instrumentación **electrónica** es la técnica que lleva a cabo la medida de cualquier magnitud física, la conversión de la misma a magnitudes eléctricas y su tratamiento para proporcionar información a un sistema de control y a un operador que la monitoriza.

Dentro de los entornos industriales la instrumentación electrónica toma una mayor dimensión y protagonismo, especialmente en el control de procesos.

El concepto de control es muy amplio y puede estar inmerso dentro de escenarios de topología muy variada y compleja. En una primera y más básica definición, podríamos decir que el control es el gobierno de un sistema por otro sistema. En la figura 1, podemos observar un sistema de control básico.

Figura 1. Diagrama general de un sistema de control de lazo abierto

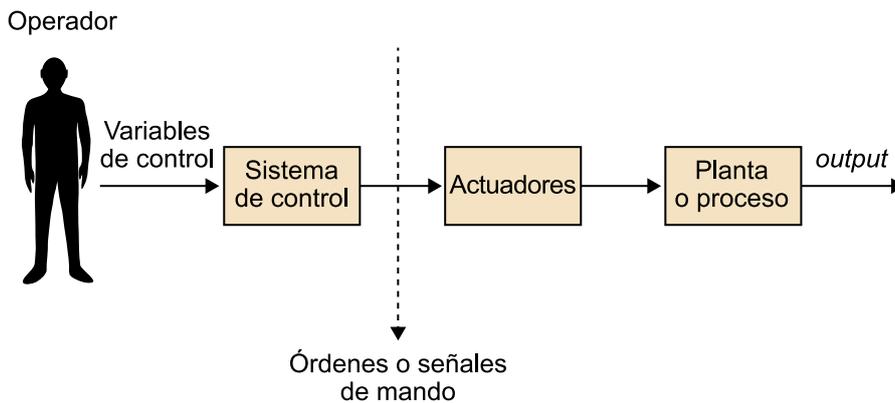
Operador



El objetivo del sistema de control de la figura 1 es obtener una salida concreta. Para conseguirlo, el operador introduce unas variables en el sistema de control, el cual genera las señales de mando que actúan sobre el proceso o la planta con el objeto de modificar la salida y obtener la respuesta esperada.

Los elementos que ejecutan las órdenes o señales de mando del operador desde el sistema de control reciben el nombre de **actuadores**. Por lo tanto, vemos que el sistema de control funciona con señales que gobiernan a los actuadores que ejecutan las órdenes dadas por el operador sobre la planta o proceso. Vemos esta idea gráficamente en la figura 2.

Figura 2. Diagrama general de un sistema de control de lazo abierto



En este sistema, se detallan las órdenes o señales de mando que gobiernan a los actuadores.

Este sistema de control se denomina *de lazo abierto* porque el sistema no obtiene ninguna información sobre el comportamiento del proceso, es decir, no hay ningún tipo de realimentación de la salida del sistema hacia su entrada.

Los sistemas de lazo abierto se utilizan cuando se conoce de manera anticipada la relación entre la entrada y la salida y no hay perturbaciones de ningún tipo. La perturbación es una señal que interviene negativamente en la salida del sistema.

Puesto que estamos hablando de un controlador en lazo abierto, la acción de una posible perturbación no podría ser corregida por el sistema de control al no tener ninguna constancia de su impacto en la salida. A partir de aquí, puesto que estas perturbaciones no son previsibles, no pueden compensarse previamente en el sistema.

En este momento, se impone la utilización de los sistemas de control de lazo cerrado o realimentados, que nos permiten conseguir que la salida mantenga el valor deseado a pesar de las perturbaciones externas no previstas.

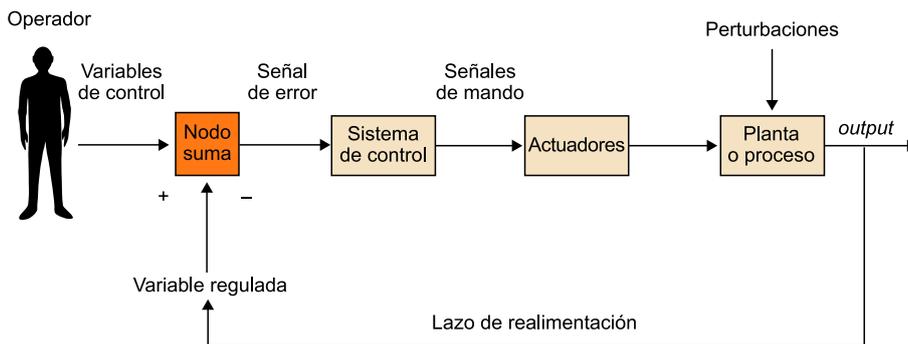
En los sistemas de control de lazo cerrado, la señal de error¹ obtenida de la salida se realimenta hacia la entrada del sistema (figura 3).

⁽¹⁾La señal de error es la diferencia entre la señal de referencia y la señal de realimentación.

Una ventaja interesante de los sistemas de control de lazo cerrado consiste en que la señal de salida obtenida deja de ser tan sensible a las perturbaciones externas y también ante las propias variaciones internas de los elementos que conforman el sistema.

En este contexto, el operador fija las variables de referencia responsables del comportamiento deseado y el sistema de control genera las señales de mando para conseguir que la variable regulada, o salida del proceso, acabe teniendo el valor que queremos sin verse modificada por las perturbaciones externas.

Figura 3. Diagrama general de un sistema de control de lazo cerrado



Sistema de control de lazo cerrado

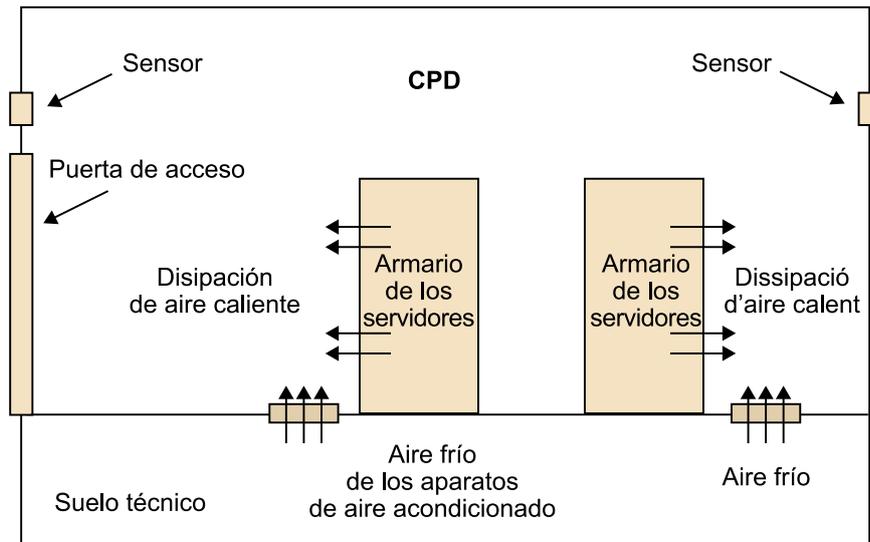
Veamos a continuación un ejemplo práctico de un sistema de control de lazo cerrado en el que se aplican los conceptos que acabamos de ver. El siguiente sistema realimentado, mostrado en la figura 4, está ubicado en un centro de proceso de datos² (CPD) donde queremos tener perfectamente controlado el clima de la sala (temperatura, humedad y un posible incendio).

Dentro de este CPD encontramos alojados todos los servidores de la Universitat Oberta de Catalunya (UOC), en constante funcionamiento las veinticuatro horas del día y siete días a la semana. El hecho de que estén funcionando de manera permanente implica que disipan calor las veinticuatro horas del día y pueden provocar, potencialmente, que aumente la temperatura ambiental de la sala. Además, este CPD es accesible por una puerta de grandes dimensiones que produce un aumento de la temperatura cada vez que se abre.

En general, todos los aparatos electrónicos tienen un margen establecido de temperatura a la que pueden funcionar de manera óptima. Superar el umbral mínimo o máximo de funcionamiento puede provocar que los servidores se detengan y quede interrumpido el servicio. Esto es precisamente lo que queremos evitar con nuestro sistema de control en lazo cerrado.

⁽²⁾A partir de ahora, abreviaremos centro de proceso de datos con la sigla CPD.

Figura 4. Ejemplo de un posible sistema real de control de lazo cerrado



El aire frío de los aparatos de aire acondicionado mantiene la temperatura deseada. La realimentación se obtiene de los sensores de humedad y temperatura.

El sistema de la figura 4 consta de unos aparatos de aire acondicionado que inyectan aire frío a través de unas canalizaciones dispuestas en el denominado suelo técnico del CPD, y de unos termómetros o sensores digitales que miden la humedad y temperatura ambiental de la sala y controlan que no se supere el umbral máximo o mínimo definido para el correcto funcionamiento de los servidores.

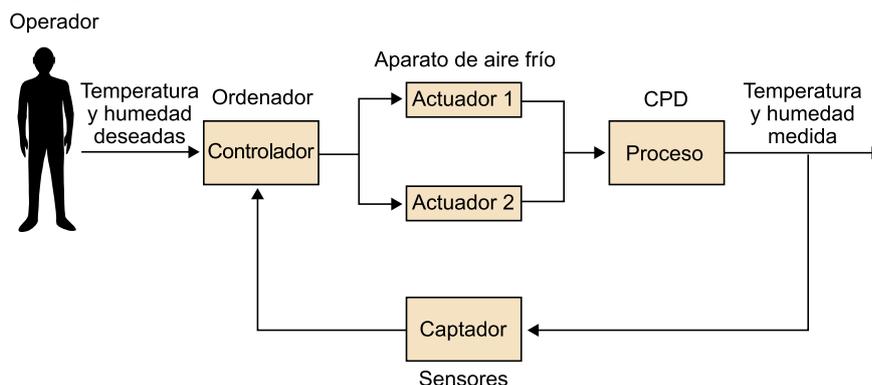
Para conocer el estado del proceso (temperatura y humedad de la sala) se utiliza, tal y como se ha comentado, un par de sensores digitales que informan al sistema de control de las dos variables.

Los sensores digitales miden, por ejemplo, la temperatura real del CPD y la comparan con el patrón mínimo y máximo previamente definido por el operador. Si el valor real medido supera alguno de los umbrales establecidos, el sistema de control recibe una señal de error y genera a su vez una señal de mando que actúa sobre el aparato de aire acondicionado aplicando más aire frío a la sala.

En el caso contrario, cuando se llega a la temperatura o humedad deseada, las señales de control disminuyen la inyección de aire frío y también se produce un ahorro energético.

El operador puede conocer y ajustar en todo momento la temperatura y humedad de la sala mediante un ordenador (**controlador**) que recibe de manera periódica y constante toda la información relativa al estado ambiental del proceso a través del sensor (**captador**), según podemos ver en la figura 5.

Figura 5. Esquema general de bloques que representa el control de lazo cerrado del CPD de la figura 4



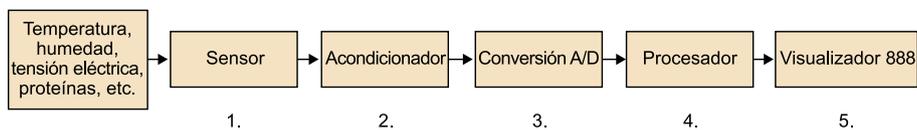
Del ejemplo anterior, se puede deducir que la medida es un elemento fundamental para el control. No obstante, no siempre resulta evidente el hecho de establecer una frontera entre la instrumentación electrónica de medida y la instrumentación electrónica de control. Las competencias de la primera estarían más referidas a la captura y el proceso de los datos, mientras que las competencias de la segunda, a su interpretación y toma de decisiones.

Los elementos de un sistema de medida incluyen la captura de las variables físicas (sensores), el proceso de acondicionamiento de la señal (amplificación, conversión, filtrado, modulación/desmodulación, etc.) y su visualización por parte del operador.

El esquema básico de un sistema de medida, que describimos a continuación, es el que vemos en la figura 6:

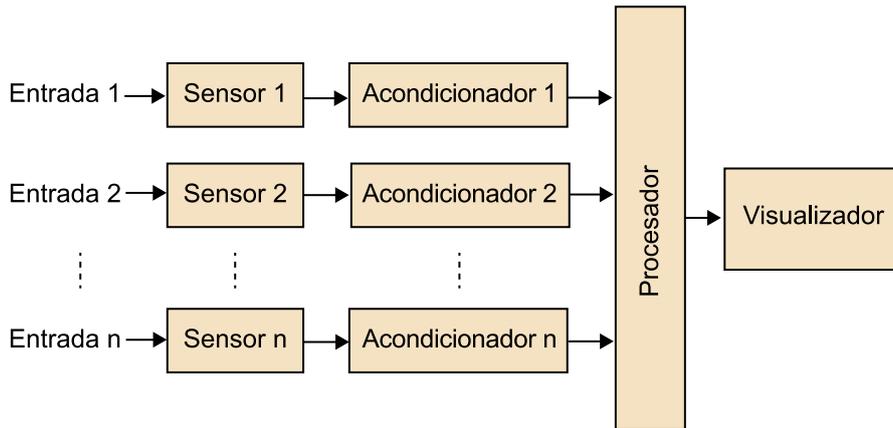
- 1) El sensor captura la variable física y la convierte en una señal eléctrica.
- 2) El acondicionador puede llevar a cabo varias funciones, como por ejemplo incrementar la potencia de la señal eléctrica, eliminar o filtrar los componentes de la señal (de tensión a corriente o a frecuencia) o modificar la forma de la señal para transmitirla a largas distancias y reducir su sensibilidad a posibles ruidos (modulación/desmodulación).
- 3) Después del acondicionamiento, la señal analógica se convierte al dominio digital mediante un convertidor A/D (analógico a digital). Procesar digitalmente la señal puede tener sus ventajas y permitir una mayor precisión, flexibilidad de diseño, facilidad de almacenamiento, etc.
- 4) El procesador, generalmente digital, trata, selecciona y manipula los datos en función del objetivo del sistema de medida.
- 5) El visualizador presenta la información a la persona que la monitoriza.

Figura 6. Esquema básico de un sistema de medida



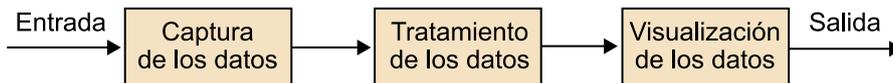
El sistema de medida que hemos visto es de un solo canal. No obstante, esta estructura no es la más adecuada cuando se hace necesaria la captura simultánea de distintas variables de entrada. Para estos casos, se utiliza un sistema de medida multicanal con convertidor A/D (de analógico a digital) independiente para cada canal de entrada. Lo podemos ver en el esquema de la figura 7.

Figura 7. Esquema general de un sistema de medida multicanal



Independientemente del número de variables y canales de medida que usemos, las funciones principales de un sistema de medida se pueden resumir tal y como se presenta en la figura 8.

Figura 8. Diagrama de bloques general de un sistema de medida



Como hemos visto en el ejemplo anterior (figura 7), encontramos procesos tecnológicos que tienen que procesar muchas variables en sus sistemas de medida y control.

Estos sistemas de medida y control pueden presentar dos arquitecturas:

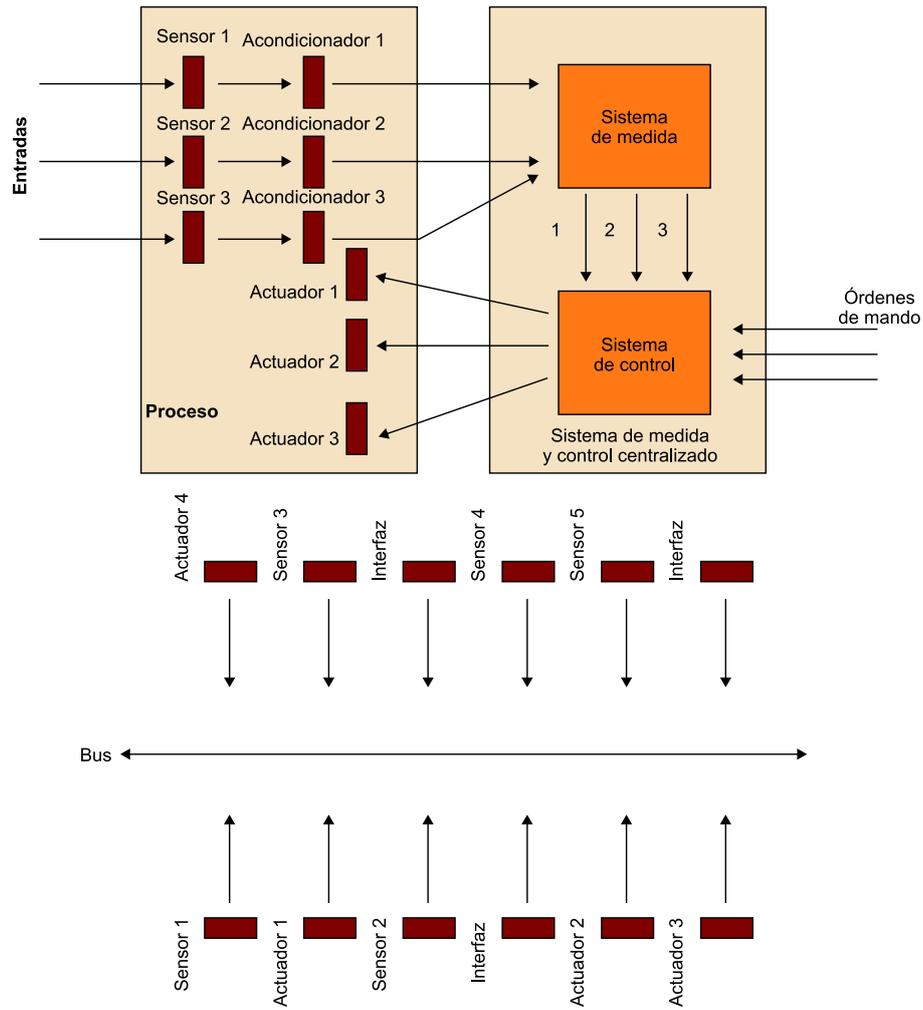
- Centralizada.
- Distribuida.

La arquitectura centralizada se utiliza cuando se trata de medir pocas variables y con distancias cortas entre los sensores y el procesador. Esta arquitectura presenta un alto nivel de cableado y requiere un sistema de acondicionamiento de altas prestaciones para evitar posibles ruidos e interferencias.

La arquitectura distribuida es utilizada para la medida de un número elevado de variables dispersas geográficamente. Toda la inteligencia del sistema está repartida entre los sensores y actuadores. Utilizan de manera típica un cableado en bus o redes inalámbricas.

En la figura 9, se muestra un sistema de medida y control centralizado (arriba) y otro distribuido (abajo).

Figura 9. Esquema de un sistema de medida y control centralizado (arriba) y distribuido (abajo)



2. Señales y variables

En términos de instrumentación electrónica, una **señal** es una variación de una magnitud física, generalmente corriente eléctrica, que se utiliza para transmitir información o tensión.

Esta variación que se pretende capturar es lo que se denomina **variable**, y forma parte como elemento de un conjunto concreto. De este modo, las señales guardan información sobre variables.

Veamos, a modo de ejemplo, diferentes tipos de variables en la tabla 1.

Tabla 1. Ejemplos de variables, según su naturaleza

Naturaleza de la variable	Tipo de variable
Biológica	Proteínas, hormonas, etc.
Eléctrica	Resistencia, carga, corriente, tensión, capacidad, frecuencia, etc.
Magnética	Flujo, campo magnético, permeabilidad magnética, etc.
Mecánica	Velocidad, aceleración, fuerza, presión, masa, etc.
Óptica	Microondas, rayo gamma, rayo X, ultravioleta, etc.
Química	Humedad, pH, conductividad, concentración de gases, etc.
Térmica	Temperatura, entropía, calor, etc.

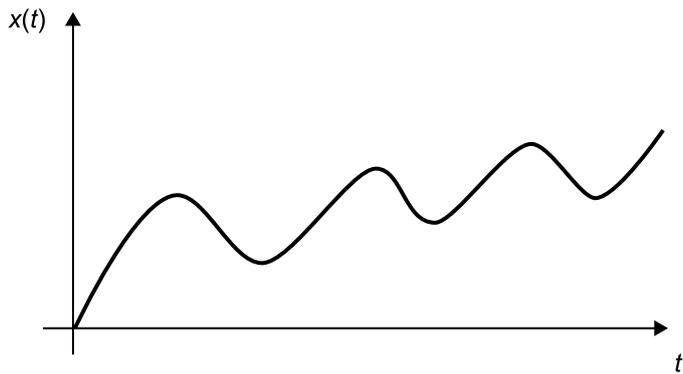
En nuestro ámbito, tanto las señales como las variables se pueden clasificar siguiendo un mismo criterio. Por ejemplo, podemos distinguir entre las variables analógicas y las variables digitales:

1) Hablamos de variables **analógicas** cuando dentro de un intervalo determinado podemos tener cualquier valor, es decir, todos los datos constituyen matemáticamente un conjunto denso. Tenemos, pues, un número total infinito de valores. En la figura 10, se muestra un ejemplo de variable analógica.

Conjunto denso de datos

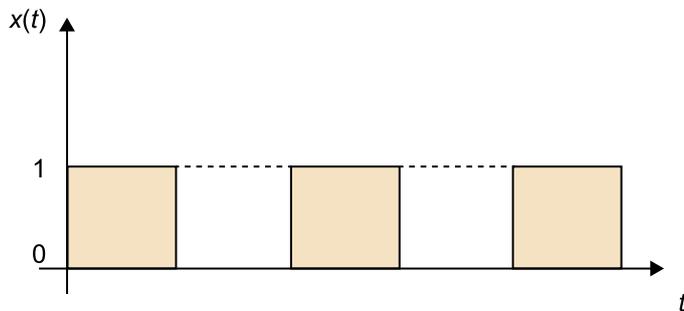
Hablamos de conjunto denso porque entre dos valores cualesquiera siempre podemos incluir un tercer valor del mismo conjunto.

Figura 10. Ejemplo de variable analógica



2) Para las **variables digitales**, los datos constituyen un número finito de valores. En el caso del sistema binario, tendríamos solo dos valores: 0 y 1. Podemos ver una posible representación en la figura 11.

Figura 11. Ejemplo de variable digital



Del mismo modo, las señales pueden clasificarse en señales analógicas y señales digitales:

1) Las **señales analógicas** guardan información, $x(t)$, sobre variables, $v(t)$ –como hemos visto anteriormente–, en cualquiera de los parámetros que las definen. Dependiendo de donde se guarda la información, se tiene la clasificación siguiente.

- Instantáneas. En este caso, la variable contenida coincide con la señal o es proporcional a la misma: $v(t) = k x(t)$.
- De amplitud. Si se trata de una señal periódica en la que la variación se encuentra en la amplitud: $v(t) = k x(t) \sin(\omega t)$.
- Frecuencia. Tomando la señal periódica anterior y haciendo variar su frecuencia: $v(t) = A \sin(k x(t) t)$.
- Fase. Para el mismo caso de una señal periódica en la que la variación se encuentra en su fase: $v(t) = A \sin(\omega t + k x(t))$.

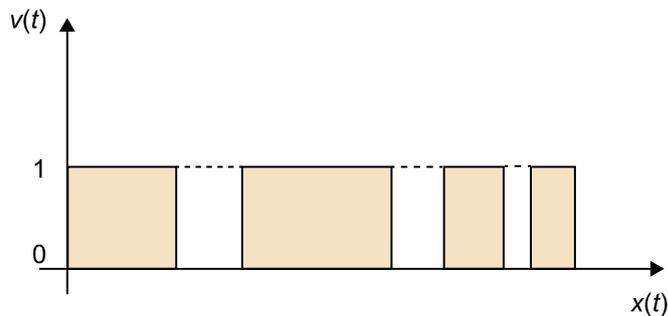
Donde:

- k es una constante.
- A es una constante.
- ω se corresponde con la pulsación ($\omega = 2\pi f$, donde f es la frecuencia de la senoide).
- t representa la dependencia temporal.

2) Las **señales digitales** pueden almacenar información tanto digital como analógica en los parámetros que determinan el aspecto de la señal:

- Información en el nivel, con información digital y en la que la señal deberá contener tantos niveles como los que se quieran distinguir en la variable original. Si dibujamos una señal binaria, la información almacenada solo podrá tener dos posibles valores, como podemos ver en la figura 12.

Figura 12. Señal digital de dos niveles (binario)



- En su frecuencia. Sería un caso particular de la señal analógica pero sustituyendo la senoide por una onda cuadrada como la de la figura 12.
- En su fase, similar al caso de la señal analógica.
- La duración de los pulsos o ciclo de trabajo de la señal.

Cuando una señal o variable contiene factores que dificultan su lectura decimos que está contaminada o que tiene **ruido**, y por lo tanto se trata de una variable no deseada y de difícil control.

Si clasificamos las señales desde el punto de vista del **ruido**, tenemos lo siguiente.

- **Señales deterministas:** tenemos una señal pura conocida con la información que nos interesa (figura 13).

- **Señales aleatorias:** aquel tipo de señal con ruido aleatorio añadido al de la información que nos interesa (figura 14).

Figura 13. Señal determinista

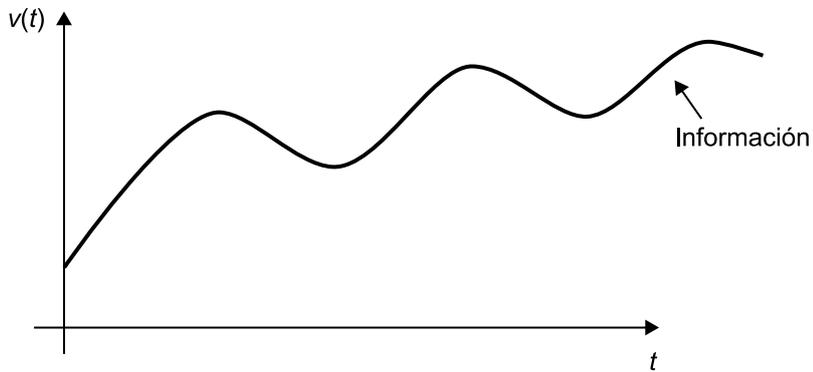
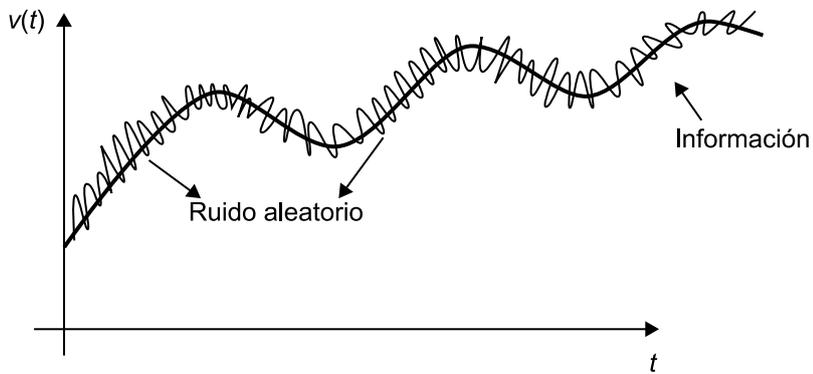


Figura 14. Señal aleatoria



En realidad, no existen señales estrictamente deterministas dado que todas las señales tienen cierta componente de aleatoriedad.

No obstante, cuando el nivel de ruido es bajo respecto a la señal que contiene la información que nos interesa, consideramos la señal como determinista.

3. Característica estática

En líneas generales, el comportamiento de un instrumento de medida puede definirse mediante su función de transferencia o relación entre los valores de entrada y de salida.

Esta función de transferencia nos indica tanto el comportamiento **estático** como el **dinámico**.

El **comportamiento estático** corresponde a la relación entre la entrada y la salida cuando el valor de entrada es constante o ha pasado el tiempo suficiente para que la salida haya llegado a su régimen permanente o valor final.

Ante un valor variable de la entrada, y hasta que la salida llega a su valor final, el **comportamiento dinámico** analiza la evolución del sistema o sensor evaluado.

En este apartado, nos referiremos de manera exclusiva a las características estáticas.

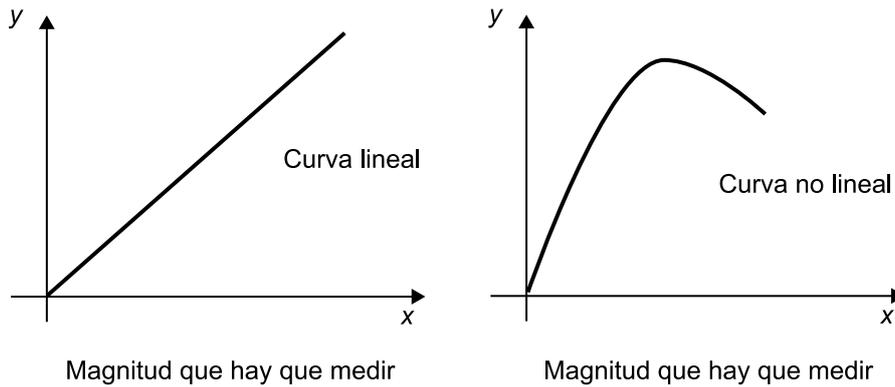
3.1. La curva de calibración

La curva **de calibración** o función **estática de transferencia** es la relación entre la entrada y la salida de un sistema en régimen estático y, para definirla de manera adecuada, hay que especificar su forma y sus límites.

En cuanto a la **forma**, muchos de los sensores de mayor interés pueden aproximarse a una línea recta, por lo que la curva de calibración puede definirse mediante dos puntos de la curva o bien un solo punto y la pendiente de la curva.

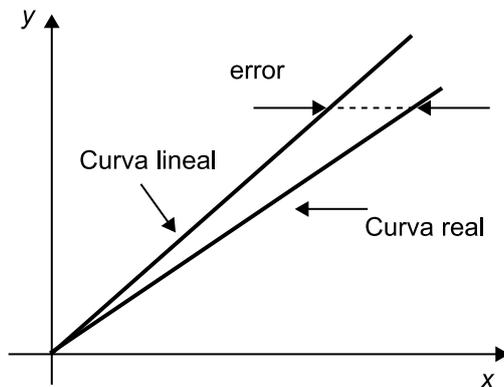
En la figura 15 podemos ver ejemplos de curvas de calibración, curva lineal y no lineal.

Figura 15. Curva lineal y curva no lineal



En el dibujo de las curvas de la figura 15, se acostumbra a hablar del error cometido. Como vemos en la figura 16, se trata del error en la diferencia entre la curva real y la curva linealizada.

Figura 16. Curva lineal y curva real



Observamos que no son iguales y, por lo tanto, tenemos un error cometido en la medida.

La curva **linealizada** se define según los tres términos siguientes.

a) Error de linealidad o no linealidad: máxima desviación de la curva de calibración respecto a la línea recta para la que se ha aproximado, expresada en tanto por ciento (%).

b) Sensibilidad: pendiente de la curva de calibración. Para los casos en los que la curva de calibración no es lineal, la sensibilidad no resulta suficiente para definirla y es necesario algún parámetro adicional, como por ejemplo los siguientes.

- La saturación o nivel de entrada a partir del que la sensibilidad disminuye de manera significativa.
- La resolución o el incremento mínimo de la variable de entrada para que la salida experimente un cambio medible.
- La zona **muerta** o región de la curva de calibración que presenta una sensibilidad nula.

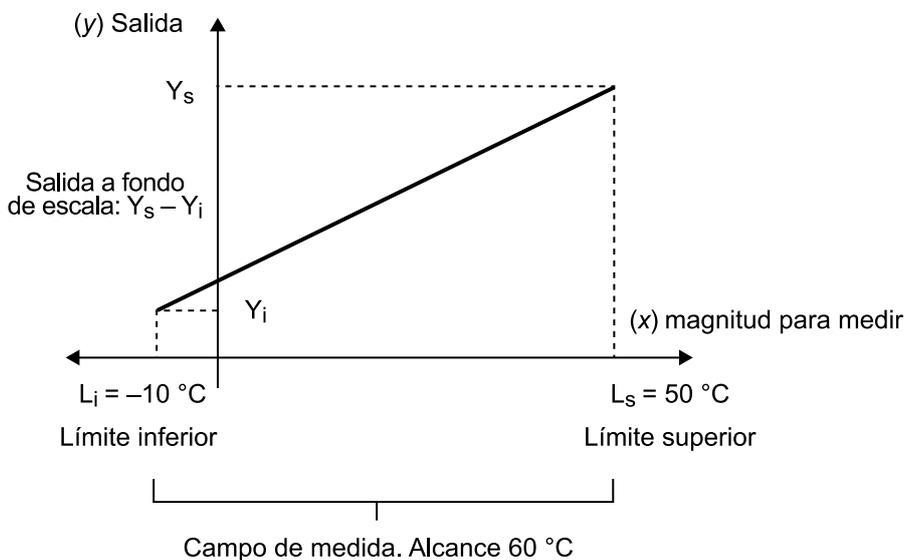
- La **deriva** o variación de algún aspecto de la curva de calibración respecto del tiempo o de algún parámetro ambiental (humedad, presión atmosférica, temperatura, etc., siempre y cuando estos parámetros no sean objeto de la propia medida).

c) **Histéresis**: es la diferencia en la medida dependiendo del sentido en el que se haya medido. Por ejemplo, supongamos que nos encontramos en un entorno donde la temperatura objetiva es de 15 °C y disponemos de un termómetro que inicialmente marcaba 0 °C y después de hacer la medida, marca 14 °C. Si hacemos la misma medida con el mismo termómetro, pero que ahora marca inicialmente 30 °C, al final de la medida nos marcará 16 °C. En este caso, la histéresis sería de 2 °C o de un 7% aproximadamente, medida en porcentaje.

En cuanto a los **límites** de la curva de calibración, especificamos los tres parámetros siguientes.

- **Campo de medida**: de valores entre los que efectuaremos la medida, delimitados por un valor superior y un valor inferior. Por ejemplo, un termómetro diseñado para medir entre -10 °C y 50 °C tendría un campo de medida de -10 °C/50 °C.
- **Alcance o fondo de escala**: diferencia entre los límites superior e inferior de medida. Del ejemplo del termómetro anterior, tendríamos que el alcance o fondo de escala es de 60 °C.
- **Salida a fondo de escala**: diferencia entre las salidas por los extremos del campo de medida. Podemos ver la representación de la salida a fondo de escala del ejemplo del termómetro en la figura 17.

Figura 17. Parámetros sobre los límites de la curva de calibración



3.2. Calibración

Las no idealidades de los circuitos electrónicos y las tolerancias de sus componentes provocan que dos aparatos de medida aparentemente idénticos no tengan la misma curva de calibración. Por otro lado, su curva de calibración varía con el tiempo y el grado de utilización de los aparatos de medida.

La calibración pretende establecer, con la mayor exactitud posible, la correspondencia entre los valores obtenidos con un instrumento de medida y los valores de la magnitud que se miden con el mismo.

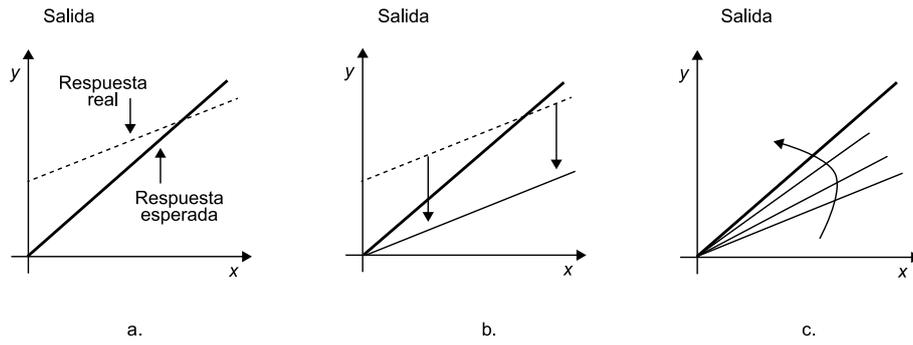
A pesar de todo, en cualquier proceso de calibración hay un problema que no podemos obviar. Para calibrar con precisión un equipo de medida necesitamos otro equipo de referencia que presente una exactitud mayor y más fiable que el primero que pretendemos calibrar, o bien disponer de patrones igualmente solventes.

En ocasiones es fácil determinar un punto de calibración para un usuario final (por ejemplo, el cero en una balanza doméstica de baño), pero la mayoría de las veces no resulta sencillo calibrar otros puntos y esta calibración solo se encuentra al alcance de grandes empresas que disponen de laboratorios habilitados para llevarla a cabo.

Los métodos más sencillos de calibración son los siguientes.

- **La calibración a un punto**, que consiste en actuar sobre el sistema de medida de tal manera que la salida por aquel punto sea lo más precisa posible. Acostumbra a efectuarse sobre el valor cero de la variable de entrada, dado que suele ser un valor conocido como verdadero. En el ejemplo anteriormente citado de la balanza de baño doméstica, el usuario actuaría sobre la rueda de calibración para indicar el cero en ausencia de peso.
- **Calibración del cero y de la sensibilidad** o pendiente de la curva de calibración. Para ajustar con precisión una curva de calibración lineal es necesario ajustar dos puntos, o bien un punto y la pendiente o sensibilidad. Para llevar a cabo este ajuste, se sigue un procedimiento que consiste en ajustar primero el nivel del cero (*offset*) y, a continuación, la pendiente de la curva de calibración o ganancia (sensibilidad del sistema). Podemos ver este procedimiento en la figura 18.

Figura 18. Procedimiento de calibración del cero y de la sensibilidad



En la figura (a), vemos la respuesta real y la esperada, con lo cual con el paso (b) se ajusta el nivel del cero. Además, hay que medir en otro punto y ajustar la ganancia (c), de manera que en esta segunda medida la salida sea la que se desea.

4. Característica dinámica

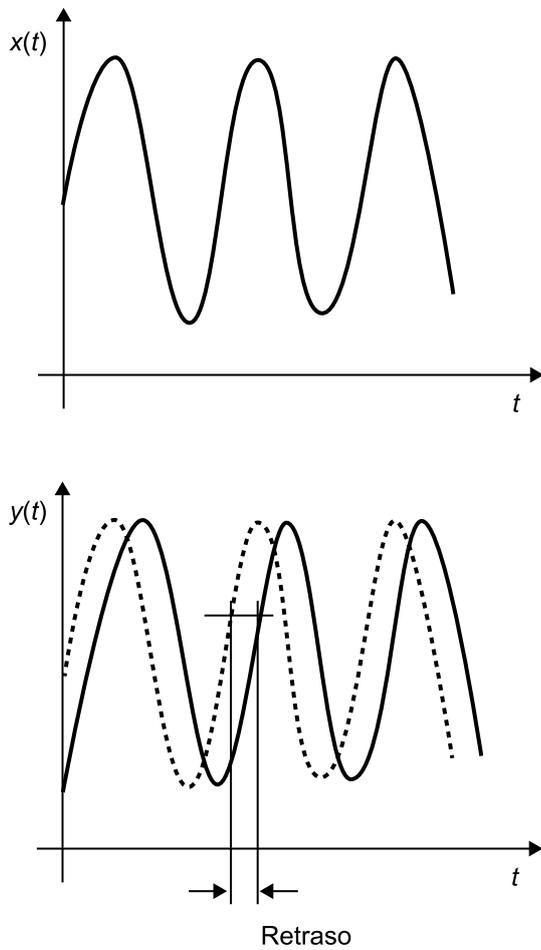
Tal y como acabamos de comentar, la función de transferencia es una expresión que relaciona las variables de entrada y las respuestas a estas entradas o excitaciones.

Estas salidas o respuestas no son inmediatas. Esta no inmediatez introduce un error momentáneo en la respuesta del sistema que se traduce en una diferencia entre lo que esperamos que se produzca y lo que se produce realmente.

En sistemas en los que la entrada varía constantemente, nos encontraremos con el hecho de que la salida también lo hará pero con un cierto retraso. Estos efectos introducen una desviación momentánea o permanente que afectan a la medida y **la obtención del valor real** que se pretende medir, objetivo de la instrumentación electrónica.

La pregunta de si estos efectos son o no son importantes no tiene una respuesta general, dado que depende de cada caso. Si el valor que hay que medir es la frecuencia o la amplitud, el efecto del retraso no tendrá más importancia dado que se puede corregir con facilidad. Un ejemplo de este caso es el que se presenta en la figura 19.

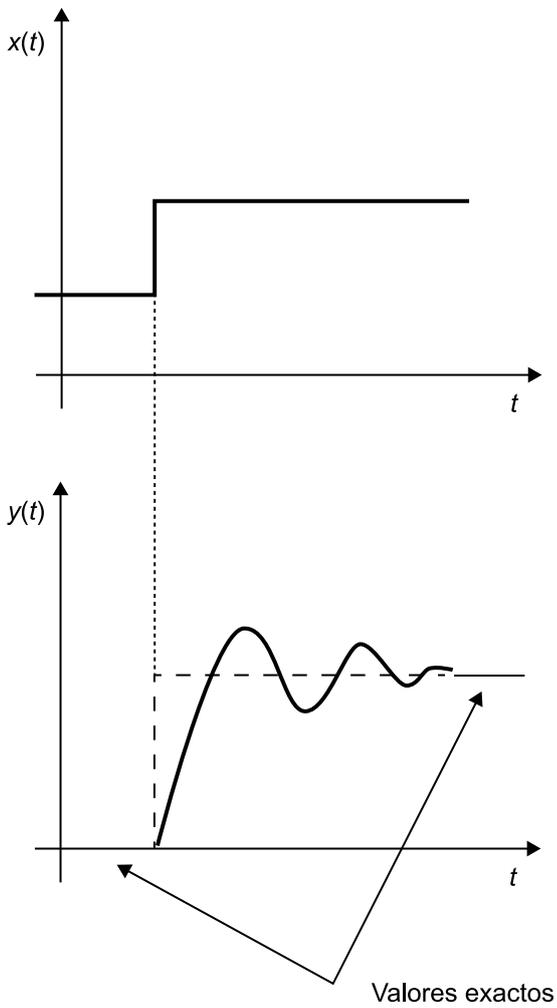
Figura 19. Error producido por el retraso del sistema al generar la respuesta



Si lo que se está midiendo es un valor instantáneo o la fase, por ejemplo, entonces este efecto no puede ignorarse, dado que estamos añadiendo un error sistemático.

En el caso de la figura 20, la importancia del efecto solo está centrada en el tiempo que hay que esperar hasta obtener el valor exacto o real después de cada cambio. La señal puede considerarse correcta el resto del tiempo.

Figura 20. Efecto del periodo transitorio en un sistema de instrumentación



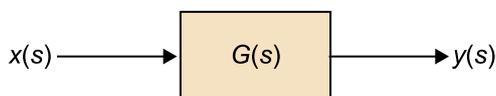
El análisis matemático nos proporciona herramientas útiles, basadas en transformadas de Laplace o de Fourier, para modelar un sistema lineal mediante una función de frecuencia compleja s (ecuación 1.1) o de frecuencia $j\omega$ (ecuación 1.2), como la denominada función de transferencia (figura 21).

De este modo, tendríamos:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} \quad 1.1$$

$$G(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} \quad 1.2$$

Figura 21. Diagrama de bloques de un sistema general



Este diagrama se caracteriza por su función de transferencia ($G(s)$) en el espacio transformado de Laplace.

La función de transferencia dependiente de la frecuencia $j\omega$ representa el comportamiento de un sistema electrónico para cualquier frecuencia de la señal de entrada, y es una manera muy habitual de caracterizar su comportamiento.

4.1. Caracterización del comportamiento dinámico

Se conoce como *modelado dinámico* el hecho de obtener la función de transferencia de cualquier sistema electrónico.

Tenemos dos maneras de hacer este modelado, teórica y empíricamente.

1) **Modelado teórico:** consiste en extraer relaciones teóricas entre las variables del sistema, su linealización en torno a un punto concreto de funcionamiento y la aplicación de la transformada de Fourier (o de Laplace) para obtener la función de transferencia. Es una tarea pesada y poco exacta.

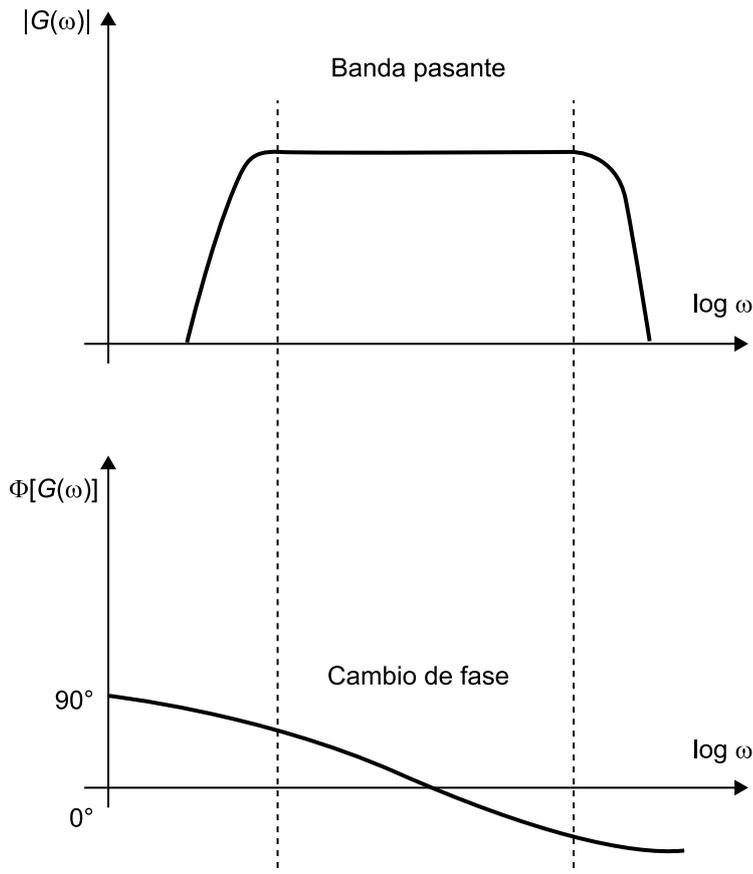
2) **Modelado empírico:** consiste en observar la salida –y por lo tanto buena parte del comportamiento del sistema– a partir de someter el sistema electrónico a un barrido de frecuencias de entrada. Obtenemos, entonces, punto a punto y para todas estas frecuencias, la función de transferencia.

De cada uno de los métodos anteriormente enumerados se desprende que ninguno de estos modelados resulta una tarea simple.

Una vez obtenida la función de transferencia mediante uno de los dos métodos anteriores, o incluso mediante una combinación de los dos, podemos representarla de manera gráfica con un diagrama de Bode. El diagrama de Bode es una manera habitual de representación de la función de transferencia de los sistemas electrónicos en función de la pulsación ω .

A continuación, presentamos un ejemplo de representación del diagrama de Bode en un caso habitual de un sistema electrónico:

Figura 22. Diagrama de Bode



Arriba, el módulo de la respuesta frecuencial $|G(\omega)|$ y, abajo, la fase $\Phi(\omega)$.

Lo que nos permite definir la respuesta dinámica en un sistema de instrumentación es la caracterización de la función de transferencia en **el dominio de la frecuencia** y en **el dominio del tiempo**.

4.1.1. Dominio de la frecuencia

En **el dominio de la frecuencia**, las principales características dinámicas son:

- La distorsión armónica total.
- El ancho de banda.

El concepto de armónico proviene del teorema de Fourier y define que una función periódica cualquiera se puede escribir mediante una suma de funciones sinusoidales. El primer armónico, también denominado señal fundamental, es del mismo periodo y frecuencia que la función original. El resto serán funciones sinusoidales, cuyas frecuencias son múltiplos de la fundamental y se denominan armónicas de la función periódica original.

Cuando la adición de otras señales no presentes en la entrada del sistema origina un comportamiento no lineal hablamos de distorsión armónica, que cuantificada mediante un parámetro globalizador denominamos **distorsión armónica total**. Su valor se calcula como el porcentaje de potencia interferente respecto de la potencia original.

Los cambios de aspecto de la señal de salida respecto de la señal de entrada también pueden venir ocasionados por **una distorsión de amplitud**, efecto debido a cambios en la amplificación de cada uno de los componentes de salida respecto de los de entrada, y por **una distorsión de fase**, cambio introducido en la fase de cada uno de los componentes del espectro de entrada al atravesar el sistema electrónico.

Considerando un comportamiento lineal de los sistemas electrónicos (sin distorsión armónica), podemos dividir la respuesta del sistema en dos zonas:

- Una zona plana donde todas las señales son amplificadas con el mismo valor.
- Las zonas con una amplificación menor.

La zona útil de trabajo, que coincide con el margen de frecuencias que concentra la mayor parte de la potencia de la señal sin que sea deseable un cambio de fase, la denominamos **ancho de banda útil**.

4.1.2. Dominio del tiempo

La respuesta dinámica de un sistema también puede establecerse desde el punto de vista de los conceptos referidos directamente al tiempo, que contempla y define tanto los aspectos lineales como los no lineales.

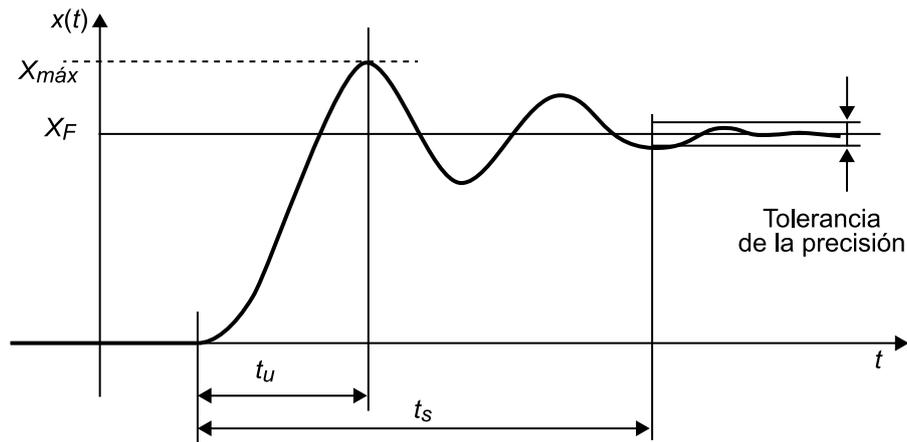
Desde el punto de vista dinámico, lo que nos resulta útil para decir cómo se comporta un sistema es la rapidez en su respuesta y si presenta o no sobreoscilaciones.

Esta “rapidez” va referida al **tiempo de establecimiento**, t_s , definido como el tiempo que pasa hasta que el sistema electrónico proporciona una salida dentro del margen de tolerancia definido por su precisión, es decir, se estabiliza su señal de salida a un valor concreto.

La sobreoscilación de un sistema, S_u , se define como un cociente entre el valor máximo al que se llega en el tiempo t_u y el valor final en tanto por 1 o en porcentaje, según se muestra en la figura 23 y en la ecuación 1.3:

$$S_u(\%) = \left[\frac{X_{m\acute{a}x} - X_F}{X_F} \right] \cdot 100 \quad 1.3$$

Figura 23. Representación gráfica de los parámetros para la medida de la sobreoscilación



Vemos, pues, que tanto el tiempo de establecimiento como la sobreoscilación se convierten en las principales características en el dominio del tiempo en un sistema de instrumentación electrónica.

No acostumbran a interesar valores altos de sobreoscilación, puesto que pueden poner en peligro los sistemas electrónicos por valores excesivos no tolerables de la señal.

En general, y como resumen, es preferible que los equipos de medida tengan una buena velocidad de respuesta con tiempos de establecimiento cortos.

5. Errores y propagación de errores

Un principio básico de la instrumentación electrónica es medir una magnitud con el menor error posible.

Vivimos en un mundo de aproximaciones que nos hacen cometer un cierto grado de errores, a los cuales hay que añadir el envejecimiento de los aparatos de medida, el ruido y toda una serie de variables incontroladas.

Una situación tan cotidiana como ir a comprar 300 gramos de cualquier producto alimentario al supermercado nos puede servir como ejemplo. A nosotros mismos nos parece suficiente obtener mediante la balanza un peso aproximado del producto que queremos comprar, sin buscar la exactitud absoluta de los decimales.

También hay que considerar que existe un grado de incertidumbre, con implicaciones filosóficas y físicas muy importantes –que no nos preocupan en este momento– y tratadas en el principio de incertidumbre de Heisenberg, dado que no es posible llevar a cabo una medida de una magnitud sin modificar en mayor o menor grado el objeto de la medida.

5.1. Error absoluto y error relativo

Tradicionalmente, los errores se han cuantificado en términos de **error absoluto** y **error relativo**. Las definiciones más convencionales de los dos errores son las siguientes.

- **Error absoluto:** diferencia entre el valor medido y el valor exacto.
- **Error relativo:** es el resultado de dividir el error absoluto entre el valor exacto.

Cuando después de repetidas medidas los errores se mantienen constantes en signo y error absoluto, los denominamos **errores sistemáticos** y, por lo tanto, corregibles.

Si una vez corregidos continúan manifestándose más errores, hablaremos de errores **aleatorios**.

Una mejor cuantificación del error, de tal manera que podamos detectar el origen del mismo, es lo definido según las normas UNE 82009, que nos refieren a veracidad, precisión y exactitud.

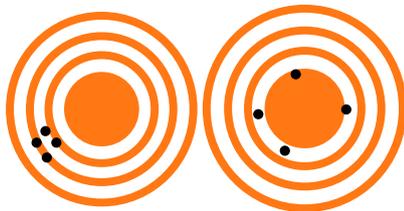
1) **Veracidad:** a partir de un valor verdadero, o aceptado como valor de referencia (por ejemplo, el patrón de metro), la veracidad será el grado de concordancia entre este valor de referencia y el valor medio obtenido de una gran serie de medidas. La veracidad solo la podemos calcular si disponemos de una referencia mejor, puesto que se obtiene de la comparación directa entre el valor medio de las medidas y esta referencia.

2) **Precisión:** es el grado de concordancia entre los resultados. Notemos que precisión no implica veracidad. 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 de un valor se cuantifica mediante cálculos estadísticos como la desviación estándar, la varianza o el intervalo de confianza.

3) **Exactitud:** para relacionar veracidad y precisión, es decir, la concordancia entre los resultados obtenidos y el valor verdadero. Vemos, pues, que a pesar de que se acostumbra a asociar precisión con exactitud, las diferencias pueden ser sensiblemente diferentes. Los fabricantes acostumbran a indicar en porcentaje la exactitud de los aparatos de medida. En realidad, este porcentaje nos está dando el margen de error de la mayor parte de todas las lecturas en términos estadísticos.

En la figura 24, se muestra la relación entre precisión y exactitud: mientras que a la izquierda tenemos alta precisión (somos capaces de obtener medidas muy similares entre sí) pero poca exactitud (estamos lejos del valor real que representamos como el centro de la diana), a la derecha tenemos valores mucho más exactos (cercanos al valor real) pero con una precisión muy baja (los valores son muy diferentes entre sí).

Figura 24. Relación entre precisión y exactitud



A la izquierda, alta precisión pero baja exactitud. A la derecha, alta exactitud pero baja precisión. En los dos casos, representamos el valor real de la medida con el centro de la diana.

Estos conceptos se pueden cuantificar mediante el cálculo de la **repetibilidad** y de la **reproductibilidad** de las medidas, que se definen de este modo.

- **Repetibilidad:** es la variación de las medidas obtenidas con un instrumento de medida, utilizado varias veces por un evaluador mientras mide la misma característica. Observemos que mide la precisión de un instrumento.
- **Reproductibilidad:** es la variación de la media de las medidas llevadas a cabo por diferentes evaluadores y utilizando el mismo instrumento para medir una característica. Observemos que ahora medimos lo mismo pero sin tener en cuenta el operador, el lugar, el instante de tiempo, etc.

5.2. Propagación de errores

En el campo de la instrumentación electrónica, en el que los sistemas de medida están formados por subsistemas que presentan errores, es muy importante conocer la propagación del error en todo el proceso de cálculo de la medida.

Cálculo del valor de unas resistencias

Veamos un ejemplo en el cálculo del valor de unas resistencias. Si suponemos que tenemos dos resistencias en serie, una de $750 \Omega \pm 10\%$ y la otra de $2.000 \Omega \pm 5\%$, ¿cuál será el valor de la resistencia final?

Podemos suponer que el error equivalente máximo y mínimo será:

$$R_{\text{máx}} = (750 + 0,1 \cdot 750) + (2.000 + 0,05 \cdot 2.000) = 2.750 + 175 \Omega \quad 1.4$$

$$R_{\text{mín}} = (750 - 0,1 \cdot 750) + (2.000 - 0,05 \cdot 2.000) = 2.750 - 175 \Omega \quad 1.5$$

Por lo tanto, la resistencia equivalente sería $2.750 \pm 175 \Omega$ o, lo que es lo mismo en términos estadísticos:

$$R_{\text{equivalente}} = 2.750 \Omega \pm 6,36\% \quad 1.6$$

No obstante, si seguimos hablando en términos estadísticos, es muy poco probable que las dos resistencias presenten sus valores máximos o mínimos de manera simultánea, situación en la que se estaría sobrestimando el error.

Por lo tanto, cuando sumamos dos variables con error, el resultado tendría que darse en términos estadísticos.

En líneas generales, una aproximación válida, teniendo en cuenta la distribución normal del error relativo, es:

$$(a + b) \pm e_R \quad 1.7$$

Donde:

a y b son los valores sin error y e_R es:

$$e_R = \sqrt{(K_1 a)^2 + (K_2 b)^2} \quad 1.8$$

En nuestro ejemplo:

$$(750 + 2.000) \pm \sqrt{(750 \cdot 0,1)^2 + (2.000 \cdot 0,05)^2} = 2.750 \pm 125 \Omega \quad 1.9$$

Es decir:

$$2.750 \pm 4,54\% \quad 1.10$$

Para el resto de las operaciones, resto, multiplicación y cociente, el cálculo de la **propagación del error** se resume en la tabla 2.

Tabla 2. Cálculo de la propagación del error para las operaciones elementales

Suma	$(a + b) \pm \sqrt{(K_1 a)^2 + (K_2 b)^2}$	1.11
Resta	$(a - b) \pm \sqrt{(K_1 a)^2 + (K_2 b)^2}$	1.12
Multiplicación	$ab \pm ab \sqrt{K_1^2 + K_2^2}$	1.13
Cociente	$\left(\frac{a}{b}\right) \pm \left(\frac{a}{b}\right) \sqrt{K_1^2 + K_2^2}$	1.14

Donde a y b son los valores sin error y K_1 y K_2 son las tolerancias en porcentaje. Notamos que las operaciones de resto y cociente son las que arrastran una mayor propagación del error relativo, puesto que en los dos casos el valor sin error resultante de la operación es menor que los valores sin error originales.

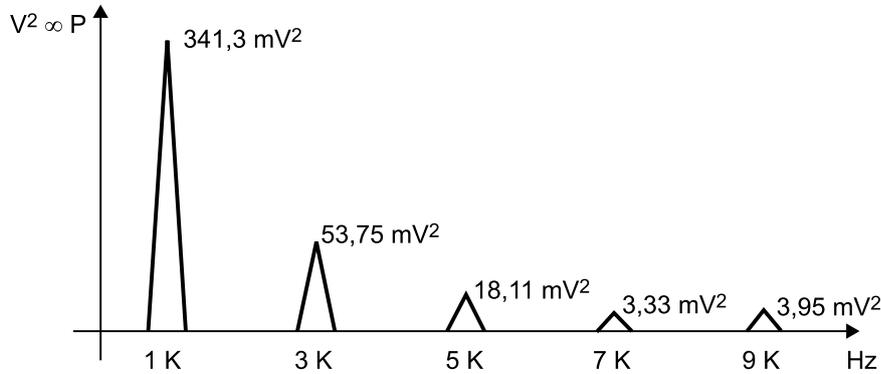
Resumen

En este módulo nos hemos centrado en la descripción de un sistema de instrumentación, especialmente en las aplicaciones de medida y control. Hemos presentado las señales con las que estos sistemas trabajan y hemos visto sus principales características: las estáticas y las dinámicas. Finalmente, hemos visto los conceptos de errores y su propagación en los sistemas de medida.

Ejercicios de autoevaluación

1. Supongamos que tenemos el espectro de la señal de salida de un amplificador que se muestra en la figura 25, en el que podemos observar la frecuencia original (1 kHz) y los armónicos generados en múltiples impares de la fundamental. Calculad el valor de distorsión armónica total.

Figura 25. Espectro de la señal de salida de un amplificador



2. Queremos comprobar el funcionamiento de una balanza de cocina capaz de medir pesos entre 0 y 5 kg. Por este motivo, llevamos a cabo un conjunto de medidas mediante pesos conocidos (patrón) y anotamos el resultado, que podéis observar en la tabla siguiente:

Tabla 3. Lectura de pesos

Patrón	100 g	500 g	1 kg	2 kg	3 kg	4 kg	5 kg
Lectura	0,102	0,498	1,003	1,985	3,011	4,014	4,989

Si consideramos que la incertidumbre del patrón utilizado es menor que 1 g, determinad:

- a) Los errores absolutos de la medida.
- b) Los errores relativos en tanto por ciento.

3. Tres laboratorios diferentes llevan a cabo una serie de medidas con un mismo instrumento, utilizando un patrón de valor de 100 unidades de medida. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla siguiente.

Determinad cuál es la repetibilidad y la reproductibilidad del instrumento. Utilizad como criterio la desviación estándar. Comentad de manera razonada los resultados.

Tabla 4. Valores resultantes de la medida

Medida	1	2	3	4	5	6	7
Lab 1	115	114	115	116	113	117	119
Lab 2	92	99	105	100	98	96	102
Lab 3	110	109	111	115	113	104	106

Solucionario

Ejercicios de autoevaluación

1. Calculamos la distorsión armónica total como el porcentaje de potencia interferente sobre el total de la potencia de la señal original. Por lo tanto, tendremos:

$$\text{THD} = \frac{53,75 + 18,11 + 3,33 + 3,95}{341,3} \times 100 \approx 23,19\% \quad 1.15$$

2. a) El error absoluto es la diferencia entre el valor real y el valor medido, en valor absoluto. Puesto que los patrones tienen una incertidumbre menor que la resolución de nuestra báscula (1 g), podemos considerar que los pesos de los patrones son valores reales. Por lo tanto, tendremos:

Tabla 5. Cálculo del error absoluto

Patrón	100 g	500 g	1 kg	2 kg	3 kg	4 kg	5 kg
Lectura	0,102	0,498	1,003	1,985	3,011	4,014	4,989
Error absoluto [g]	2	2	3	15	11	14	11

b) El error relativo se calcula como el cociente entre el error absoluto y el valor verdadero. Por lo tanto, tendremos:

Tabla 6. Cálculo del error relativo

Patrón	100 g	500 g	1 kg	2 kg	3 kg	4 kg	5 kg
Lectura	0,102	0,498	1,003	1,985	3,011	4,014	4,989
Error absoluto [g]	2	2	3	15	11	14	11
Error relativo [%]	2	0,4	0,3	0,75	0,36	0,35	0,22

3. La repetibilidad hace referencia a un solo instrumento, considerando que las medidas las ha llevado a cabo un mismo operador en iguales condiciones y en un intervalo corto en el tiempo.

La reproductibilidad del tipo de instrumento hace referencia al conjunto de todas las pruebas (las efectuadas por todos los laboratorios) y, por lo tanto, sin tener en cuenta qué operador ha efectuado las medidas ni en qué instante de tiempo.

Dado que nos indican que utilicemos como criterio la desviación estándar, calcularemos este parámetro junto con la media de las medidas:

Tabla 7. Cálculo de la media y desviación estándar

Lab 1	Media = 115,6	Desviación estándar = 1,99
Lab 2	Media = 98,9	Desviación estándar = 4,18
Lab 3	Media = 109,7	Desviación estándar = 3,82
Conjunto	Media = 108,1	Desviación estándar = 7,82

Si nos fijamos en un solo instrumento (laboratorio), veremos que el instrumento que da resultados más cercanos a la realidad (100) es el de Lab 2, puesto que presenta una media de 98,9. Ahora bien, también es el que presenta una desviación estándar más elevada, lo cual indica que tiene una mala repetibilidad. En cambio, el instrumento de Lab 1 es el que tiene

una mejor repetibilidad porque su desviación estándar es la menor de los tres. En este caso, sin embargo, también tenemos un problema: su valor medio es el más alejado del valor real (115,6 ante 100). En términos cualitativos, diríamos que el instrumento más veraz es el de Lab 2 y el más preciso, el de Lab 1.

Si nos fijamos en el conjunto de todas las medidas, observaremos que la desviación estándar es elevada, y, por lo tanto, la reproductibilidad es baja puesto que el error que podemos cometer es cercano a 8 unidades.

Glosario

actuador *m* Elemento que ejecuta las órdenes o señales de mando del operador desde el sistema de control.

alcance *m* sin. fondo de escala

ancho de banda de un sistema *m* Conjunto de frecuencias comprendidas entre una de corte inferior y otra de corte superior, y caracterizadas porque el error de la variable de salida está dentro de una banda especificada.

campo de medida *m* Conjunto de valores entre los que efectuaremos la medida.

captador *m* sin. sensor

control *m* Gobierno de un sistema por medio de otro sistema.

controlador *m* Dispositivo especializado en controlar equipos electrónicos.

convertidor A/D *m* Dispositivo que convierte una señal analógica y continua en el tiempo en una señal digital y discreta en el tiempo.

curva de calibración *f* Relación entre la entrada y la salida de un sistema en régimen estático.

decibelio *m* Unidad logarítmica de medida que expresa la magnitud de una cantidad física (habitualmente la potencia) respecto a un nivel de referencia.

deriva *f* Variación de algún aspecto de la curva de calibración respecto del tiempo o de algún parámetro ambiental, siempre y cuando estos parámetros no sean objeto de la propia medida.

error *m* Valor que acota la incertidumbre de un determinado sistema.

error absoluto *m* Diferencia entre el valor medido y el valor exacto.

error relativo *m* Cociente entre el error absoluto y el valor exacto, en valor absoluto.

exactitud *f* Capacidad de un instrumento de dar una lectura cercana al valor verdadero de la magnitud en la entrada.

factor de ruido (F) *m* Relación entre la potencia de ruido en la salida del cuadripolo y la que habría si el cuadripolo no fuera ruidoso. Este parámetro nos indica la cantidad de ruido que genera un dispositivo.

fondo de escala *m* Diferencia entre los límites superior e inferior del campo de medida. sin. alcance

fondo de escala de salida *m* Diferencia entre el máximo y el mínimo de la salida de un sistema.

instrumentación electrónica *f* Rama de la electrónica que se encarga del diseño y manejo de los aparatos electrónicos y eléctricos para su uso en mediciones.

perturbación *f* Señal que interviene de manera negativa en la salida del sistema.

precisión *f* Grado de concordancia entre los resultados de una medida.

relación señal-ruido *f* Cociente entre la potencia de señal y la de ruido en un determinado punto de un sistema. Normalmente se expresa en dB.

resolución *f* Incremento mínimo de la variable de entrada para que la salida experimente un cambio medible.

ruido *m* Cualquier señal que altera nuestra señal de interés.

salida a fondo de escala *f* Diferencia entre las salidas por los extremos del campo de medida.

saturación *f* Nivel de entrada a partir del cual la sensibilidad disminuye de manera significativa.

sensibilidad *f* Pendiente de la curva de calibración.

sensor *m* Dispositivo capaz de medir magnitudes físicas o químicas, denominadas variables de instrumentación, y transformarlas en variables eléctricas.
sin. **captador**

señal *f* Variación de una magnitud física, generalmente corriente eléctrica, que se utiliza para transmitir información o tensión.

señales aleatorias *f pl* Señales con ruido aleatorio añadido al de la información que nos interesa.

señales analógicas *f pl* Señales definidas por una variable analógica.

señales deterministas *m pl* Señal pura conocida con la información que nos interesa.

señales digitales *f pl* Señales definidas por una variable digital.

tiempo de establecimiento *m* Tiempo que tarda el sistema en proporcionar un valor de salida dentro de una banda de error determinada en torno al valor final, cuando en la entrada se ha aplicado un cambio en forma de escalón.

variables analógicas *f pl* Aquellas variables que, dentro de un intervalo determinado, pueden tener cualquier valor.

variables digitales *f pl* Aquellas variables que, dentro de un intervalo, pueden tener valores de un conjunto finito. En el caso del sistema binario, tendríamos solo dos valores: 0 y 1.

veracidad *f* Grado de concordancia entre el valor de referencia y el valor medio obtenido de una serie de medidas.

zona muerta *f* Región de la curva de calibración que presenta una sensibilidad nula.

Bibliografía

Chen, C. T. (1993). *Analog and Digital Control System Design: Transfer-function, State-space and Algebraic Methods*. Orlando, FL: Saunders College Publishing Electrical Engineering, Oxford University Press Inc.

Riu, P. J., Rosell, J.; Ramos, J. (1995). *Sistemas de instrumentación*. Barcelona: Edicions UPC.

Webster, J. G. (1999). *Section I: Measurement Characteristics*. En: *Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook CRCnetBASE 1999*. Boca Raton, FL: CRC Press.