



Equipos de medida para procesos industriales^{*}

Adolfo Hilario¹, José Vicente Salcedo² y Pablo Carbonell³

¹ Universitat Politècnica de València, ahilario@upv.es

² Universitat Politècnica de València, jsalcedo@upv.es

³ Universitat Politècnica de València, pjcarbon@upv.es

How to cite: A. Hilario, J.V. Salcedo y P. Carbonell. 2024. Equipos de medida para procesos industriales. En libro de actas: *X Congreso de Innovación Educativa y Docencia en Red*. Valencia, 11 – 12 de julio de 2024. Doi: http://dx.doi.org/10.4995/INRED2024.2024.****.

Abstract

In English...

Keywords: *L^AT_EX*, template, congress, UPV.

Resumen

Este es un documento de ejemplo realizado con L^AT_EX que utiliza la plantilla para congresos de la Universitat Politècnica de València. En el primer apartado se detalla la estructura de secciones que debe seguir la comunicación. El resto son apartados de ejemplo cuyo contenido no se corresponde con el título de la sección. Estos capítulos de ejemplo se pueden encontrar ejemplos de uso de los distintos elementos de una comunicación.

Keywords: *L^AT_EX*, plantilla, congreso, UPV.

1 Introducción

Las comunicaciones tendrán una extensión mínima de 5 folios y máxima de 15, y deberán constar de los siguientes apartados:

1. Introducción
2. Objetivos
3. Desarrollo de la innovación
4. Resultados
5. Conclusiones
6. Referencias

^{*}Proyecto financiado por la Universitat Politècnica de València

En el resto de apartados de esta plantilla encontrarás ejemplos de uso de los distintos elementos de una comunicación.

2 Objetivos

Los equipos de medida se encargan de realizar mediciones sobre las variables involucradas en los procesos industriales. A partir de ellos, se observa y se controla el proceso. Dichas mediciones deben ser fiables, seguras y de gran exactitud, y en general permitir la visualización continua del proceso.

Los requisitos técnicos de un proceso industrial y/o de sus resultados (productos y servicios) en todas las etapas de su ciclo de vida (comercialización, diseño, fabricación, montaje, etc.) se establecen mediante especificaciones que definen intervalos de valores admisibles o tolerancias para las diferentes magnitudes que determinan su calidad.

Cada vez que hay que decidir si el valor de una característica está dentro de la tolerancia especificada, es preciso medir con suficiente exactitud, fiabilidad y seguridad como para tomar esta decisión con la menor incertidumbre compatible con los condicionantes económicos.

3 Desarrollo de la innovación

De acuerdo con el número de junio de 1992 de *Quality System Update*, las cinco razones principales que suelen producir problemas en las empresas que desean implantar la ISO 9000 son:

- Control de la documentación.
- Calibración.
- Seguimiento de los equipos de medida.
- Registros de formación del personal.
- Planificación de contactos con los proveedores.

Esto muestra hasta qué punto resulta de gran importancia aquellos aspectos relacionados con los equipos de medida, y en particular, con la calibración de los mismos, (Griful & Canela, 1998).

Existe un documento complementario, véase (UNE-EN 30012-1, 1994), codificado como ISO 10012-1 que define con más detalle los procedimientos necesarios para seleccionar, utilizar, calibrar, controlar y mantener equipos de medida, tal como marca ISO 9001-9003.

A continuación se resumen los principales requisitos de calibración y medida contenidos en el documento ISO 10012-1:

1. La compañía debe disponer de **equipos de medida** para cuantificar todos los parámetros relacionados con la calidad, y éstos equipos deben tener las características metrológicas adecuadas, (Lope et al., 1998).

2. Debe estar documentada la **lista de todos los instrumentos** utilizados para cuantificar los parámetros relacionados con la calidad.
3. Se debe implantar y mantener un sistema para el **control** y la **calibración** de los equipos de medida. En Hilario Caballero (2020) se puede acceder a un vídeo con un ejemplo de calibración de un transmisor de presión.
4. Todos los equipos utilizados para realizar medidas de la calidad, y todos los equipos utilizados para calibrar, se deben **manipular con cuidado** y deben ser usados de tal forma que su exactitud y ajuste quede a salvo.
5. Todas las medidas, tanto para calibrar equipos como para la verificación del producto, deben realizarse teniendo en cuenta todos los **errores e incertidumbres** significativos identificados en el proceso de medida.
6. El cliente debe tener acceso a **pruebas objetivas** de que el sistema de medida es efectivo.
7. La calibración se debe realizar con equipos con **trazabilidad a patrones nacionales**.
8. Todas las personas que desarrollan funciones de calibración deben estar **debidamente formadas**.
9. Los procedimientos de calibración deben estar **documentados**.
10. El sistema de calibración debe ser **revisado** periódica y sistemáticamente para asegurar que continúa siendo efectivo.
11. Se debe mantener una **ficha o registro** de calibración para cada equipo de medida por separado. Cada ficha debe demostrar que el instrumento es capaz de realizar medidas dentro de los límites designados. Estas fichas deben contener, al menos, esta información:
 - Una descripción del instrumento y una identificación única.
 - La fecha de calibración.
 - Los resultados de la calibración.
 - El intervalo de calibración, además de la fecha de la próxima calibración.
12. Dependiendo del tipo de instrumento a calibrar, también se debe incluir parte o toda la información que se relaciona a continuación:
 - El procedimiento de calibración.
 - Los límites de error permisibles (ver [Sección 4](#)).
 - Informe de todos los efectos acumulativos de incertidumbre en los datos de calibración.
 - Las condiciones medioambientales requeridas para la calibración.
 - La fuente que certifica la trazabilidad empleada.
 - Los detalles de cualquier reparación o modificación que pudiera afectar el estado de la calibración.

- Cualquier limitación de uso del instrumento.
- 13. Cada instrumento debe estar **etiquetado**, de manera que se muestre el estado de calibración y cualquier limitación de uso (únicamente donde es posible).
- 14. Cualquier instrumento que haya fallado, que sea sospecho o se sepa que se encuentra fuera de calibración, debe ser **retirado del uso** y etiquetado visiblemente para prevenir posibles usos accidentales del mismo.
- 15. Los equipos de medida ajustables se deben **sellar** para evitar manipulaciones no deseadas.

4 Resultados

Cada aplicación de un equipo de medida requiere de una exactitud y de unas prestaciones distintas. Si se pretendiera exigir mayor confianza a la medida que la necesaria, el coste del proceso de medida se vería incrementado sustancialmente. La elección, por tanto, se debe realizar a partir del conocimiento de las características, tanto estáticas como dinámicas, que definen el funcionamiento de estos equipos.

En las hojas de especificaciones técnicas del fabricante que acompañan al equipo pueden encontrarse las características que presenta el instrumento bajo condiciones normales de calibración.

Es responsabilidad del personal técnico asegurar que la información suministrada por el fabricante sea suficiente para la aplicación.

A continuación se definirán las características que generalmente suele proporcionar el fabricante. Para más información, un texto excelente de referencia es Pallás Areny (2004). En la [Tabla 1](#) se ofrece una muestra de las características propias de cuatro equipos de medida de la firma *Rosemount*. En la [Tabla 2](#) se ofrece el mismo contenido con otro formato.

Tabla 1: Características estáticas de equipos de catálogo

	Equipo 1	Equipo 2	Equipo 3
Descripción	Sonda RTD de platino serie 68	Caudalímetro modelo 8705	Transmisor de presión diferencial 2088-0
Rango	-50 ÷ 400 °C	0 ÷ 10 m/s	0-6,89 ÷ 0-55,15 kPa
Alcance	450 °C	10 m/s	0-55,15 kPa
Fondo de escala	400 °C	10 m/s	55,15 kPa
Precio aproximado	125 €	257 €	350 €

Tabla 2: Características estáticas de equipos de catálogo (tabla con color)

	Equipo 1	Equipo 2	Equipo 3
Descripción	Sonda RTD de platino serie 68	Caudalímetro modelo 8705	Transmisor de presión diferencial 2088-0
Rango	$-50 \div 400$ °C	$0 \div 10$ m/s	$0-6,89 \div 0-55,15$ kPa
Alcance	450 °C	10 m/s	0-55,15 kPa
Fondo de escala	400 °C	10 m/s	55,15 kPa
Precio aproximado	125 €	257 €	350 €

4.1 Características de funcionamiento del equipo

4.1.1 Rango de medida (range)

El rango define los valores mínimo o límite inferior (*lower range limit*) y máximo o límite superior (*upper range limit*) de lectura para los cuales el equipo ha sido diseñado.

4.1.2 Alcance (span)

El alcance es la diferencia entre el valor máximo y el mínimo de la variable de entrada del instrumento de medida. Hay que destacar que muchos equipos presentan un alcance que puede ser ajustado según los requisitos de la señal (*calibrated span*), como es el caso del Equipo 3 en la [Tabla 1](#). En este caso el alcance puede no coincidir con los valores que definen su rango.

4.1.3 Fondo de escala (full-scale reading)

Máximo valor que puede medir el instrumento o del que se obtiene lectura.

4.2 Desviación respecto al funcionamiento ideal

4.2.1 Exactitud (accuracy)

Es la capacidad de un equipo de medida de dar indicaciones que se aproximen al verdadero valor de la magnitud medida. Para expresar esto, se indica el intervalo dentro del cual puede recaer el valor real del mensurando. Se debe evitar traducirlo como “precisión”, ya que el término *precision* en inglés denota otro significado, como se verá a continuación. La exactitud es un parámetro determinante para la elección de un equipo u otro. Analicemos la exactitud de los tres equipos de la [Tabla 1](#).

Equipo 1. En la sonda de temperatura el fabricante proporciona una exactitud que no es uniforme para todo el rango de medida, sino que depende de la zona en la que se realice. Así por

ejemplo, para una temperatura en torno a los 0 °C, se tiene una exactitud de $\pm 0,30$ °C. Por el contrario, en torno a 400 °C se tiene una exactitud de $\pm 2,30$ °C.

Equipo 2. Presenta una exactitud de $\pm 0,5\%$ de la velocidad del fluido circulante medido en el rango comprendido entre 0,3 y 10 m/s y una exactitud absoluta de $\pm 0,0015$ m/s para velocidades inferiores a 0,3 m/s. La velocidad del fluido es empleada como medida indirecta en éste caudalímetro magnético.

Equipo 3. En este caso la exactitud es de $\pm 0,25\%$ del alcance para el que ha sido ajustado el equipo (*calibrated span*).

Todos los equipos de medida cuya exactitud no supera un valor concreto, denominado “índice de clase”, se consideran pertenecientes a una misma clase de exactitud.

4.2.2 Tolerancia (tolerance)

La tolerancia es un término íntimamente relacionado con la exactitud y define el máximo error esperado en cierto valor. Estrictamente hablando, no es una característica estática del instrumento de medida.

La tolerancia, cuando se emplea de forma apropiada, hace en realidad referencia a la desviación de un producto fabricado respecto a un valor especificado. Por ejemplo, una resistencia de 100 Ω con una tolerancia de $\pm 5\%$, puede en realidad tener un valor entre 95 y 105 Ω .

4.2.3 Fidelidad (precision)

La fidelidad es la cualidad que caracteriza la capacidad del instrumento de medida para dar el mismo valor de magnitud al medir varias veces en unas mismas condiciones. Un instrumento con fidelidad alta implica que, al tomar muchas medidas, la dispersión en éstas es muy baja. Esta característica no guarda ninguna relación con la exactitud del instrumento.

4.2.4 Repetibilidad (repeatability)

La repetibilidad tiene un significado similar a la fidelidad, si bien se entiende ahora que las medidas son realizadas en un periodo de tiempo corto y, por tanto, en unas condiciones ambientales similares.

4.2.5 Reproducibilidad (reproducibility)

La reproducibilidad es un término equivalente a la fidelidad cuando las medidas son tomadas de manera que entre cada una de ellas se producen cambios en las condiciones ambientales, en el observador, en la localización y ubicación o en los intervalos de medida.

4.2.6 Desplazamiento (bias, offset)

Un desplazamiento en la medida se produce cuando existe un error constante sobre todo el rango de medida. Este error generalmente puede ser eliminado por medio de un procedimiento de ajuste (*ajuste de cero*).

4.2.7 Linealidad (linearity)

Generalmente se desea que la lectura de los equipos de medida sea linealmente proporcional a la cantidad medida. Esto significa que debe ser posible trazar una línea recta que haga corresponder cada valor de la cantidad medida con la lectura de salida. En la [Figura 1](#) se muestran las lecturas obtenidas de un instrumento para diferentes valores de la medida.

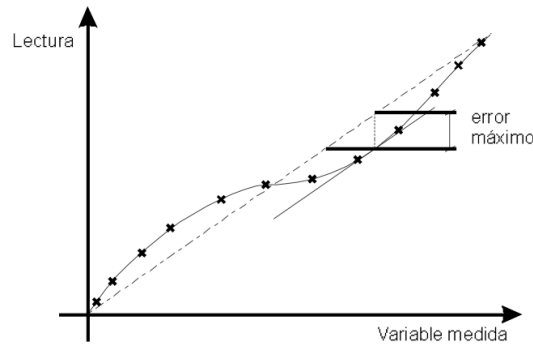


Fig. 1: Error de linealidad

Para trazar la línea recta que pasa aproximadamente por todas estas lecturas, puede emplearse la técnica estadística de regresión lineal con ajuste por mínimos cuadrados. La no linealidad del equipo queda definida como la máxima desviación (o residuo) de las lecturas respecto a dicha recta. En la [Figura 1](#) se muestra este error máximo de no linealidad.

4.2.8 Sensibilidad de la medida (sensitivity of measurement)

La sensibilidad de la medida es la variación relativa de la salida del instrumento frente a un incremento en la cantidad medida. Por tanto viene dada por:

$$S = \frac{\text{Variación de la salida}}{\text{Variación de la cantidad medida}} \quad (1)$$

La sensibilidad mide la pendiente o derivada de la recta mostrada en la [Figura 2](#). Si por ejemplo una presión de 2 bar produce una variación de 2 V en un transductor de presión, se tiene una sensibilidad de 1 V/bar, siempre que se asuma la linealidad del dispositivo.

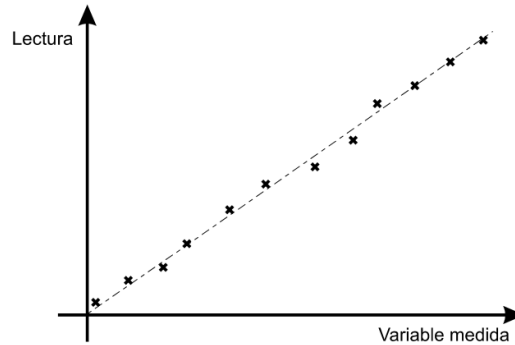


Fig. 2: Curva característica del equipo de medida

4.2.9 Sensibilidad ante perturbaciones (*sensitivity to disturbance*)

Todas las especificaciones indicadas en la hoja del fabricante, o bien obtenidas por calibración de un equipo de medida, sólo son válidas para condiciones normales controladas de temperatura, presión, etc. Si tienen lugar cambios en esas condiciones, las características estáticas del instrumento pueden sufrir variaciones. Estas alteraciones pueden modificar las características del instrumento de dos formas:

- Deriva de paso por cero (*zero drift/offset*): Se trata de una lenta variación con el tiempo del valor de paso por cero. Este cambio generalmente tiene lugar como consecuencia de una variación de temperatura. El efecto que trae asociado es un desplazamiento en la lectura.
- Deriva de la sensibilidad (*sensitivity drift/scale factor drift*): es la variación que tiene lugar en la sensibilidad del instrumento como consecuencia de un cambio en las condiciones ambientales.

4.2.10 Histéresis (*hysteresis*)

Por histéresis se entiende la propiedad presente en algunos instrumentos de medida que provoca que la curva de medida difiera según las lecturas se hagan de forma ascendente o en sentido descendente. Los parámetros que permiten cuantificar esta característica son la histéresis máxima de entrada y la histéresis máxima de salida, tal y como se muestra en la [Figura 3](#).

4.2.11 Zona muerta (*dead space*)

La zona muerta de un instrumento se define como el rango de entrada para el cual no se obtiene lectura en la salida. Todo instrumento con histéresis va a presentar (en promedio) también zona muerta. Otros equipos, aún sin tener histéresis, pueden presentar zona muerta. Su curva característica se ha representado en la [Figura 4](#).

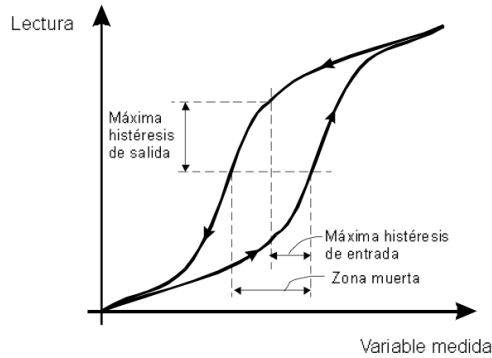


Fig. 3: aracterística de un instrumento con histéresis

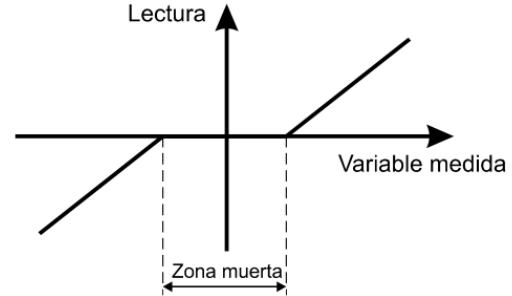


Fig. 4: Característica de un instrumento con zona muerta

4.2.12 Umbral (threshold)

Es el nivel mínimo necesario para que cuando la entrada del instrumento aumente de forma progresiva desde cero, tenga lugar a la salida un cambio suficientemente grande como para ser detectado.

5 Conclusiones

Características dinámicas de los equipos de medida definen el comportamiento del equipo de medida durante el intervalo transitorio, previo a la estabilización de la lectura, que aparece ante una variación en la magnitud física medida. Cabe destacar que las características dinámicas de los equipos de medida son más difíciles de medir y de calibrar que las características estáticas, ya que es necesario el empleo de instrumental de medida de señales dinámicas de gran exactitud, como un osciloscopio o un analizador de espectro. Del mismo modo, se debe contar con el material de laboratorio adecuado para poder realizar un ensayo dinámico sobre el equipo de medida.

Por simplicidad, se trata de reducir la dinámica presente en cualquier equipo a tres casos distintos: orden cero, primer orden y segundo orden.

5.1 Orden cero

Un sistema de orden cero es aquél que no presenta dinámica, entendiéndose que la señal presente en la entrada se halla disponible ala salida de forma instantánea. Ningún equipo de medida es de orden cero, ya que siempre existe una cierta dinámica asociada a éste. Ahora bien, cuando se tiene que el tiempo que tarda en estabilizarse el equipo de medida es mucho menor que los del resto de elementos involucrados en el proceso industrial, la dinámica de dicho equipo puede ser despreciada, y el sistema puede considerarse aproximadamente de orden cero.

Un potenciómetro que mide desplazamientos es un ejemplo de un sistema de orden cero, ya que el voltaje de salida varía casi de forma instantánea cuando el cursor es desplazado sobre dicho potenciómetro.

5.2 Primer orden

Un equipo de medida de primer orden presenta una evolución a la salida como la mostrada en la [Figura 5](#) ante un cambio brusco en la variable medida. Sobre dicha curva es posible medir el parámetro que define su dinámica, la constante de tiempo τ , que equivale al tiempo transcurrido desde que se produce el cambio brusco en la variable medida hasta que la salida alcanza el 63 % de su valor final.

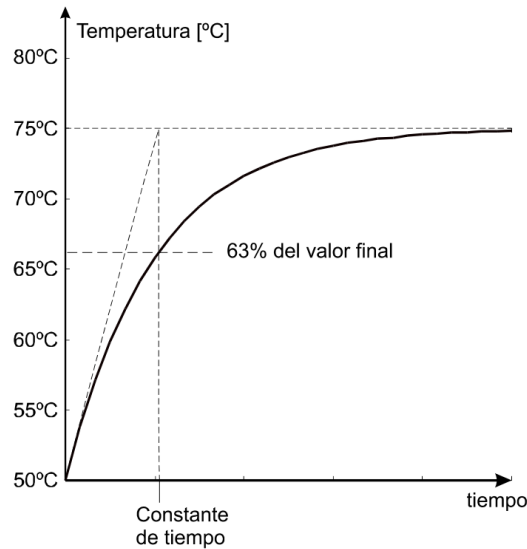


Fig. 5: Respuesta de un instrumento de primer orden

El número de equipos de medida que presentan una característica de primer orden es muy elevado. En los sistemas de regulación automática, cuando el equipo de medida forma parte de una cadena de realimentación, el efecto producido por este retardo o desfase entre la entrada y la salida debe ser cuidadosamente tenido en cuenta, ya que puede dar lugar a problemas en el funcionamiento del lazo de regulación. Cuanto más próxima se halle la constante de tiempo del equipo de medida a las constantes de tiempo del resto de los elementos de la cadena, más problemático será el empleo de dicho equipo de medida.

5.3 Segundo orden

Se trata de equipos de medida que presentan una cierta inercia interna a la horade seguir los cambios de la señal de entrada. Estos sistemas tienen como característica en su dinámica la aparición de oscilaciones o sobrepasamiento de la señal, [Figura 6](#). Para cuantificar sus propiedades dinámicas, se emplean dos parámetros:

- El factor de amortiguamiento ζ , que mide la atenuación que tiene lugar en las oscilaciones. Un factor de amortiguamiento nulo $\zeta = 0$, supone una respuesta oscilatoria sin amortiguamiento: la medida empieza a oscilar ante cualquier variación en la entrada. Cuando el factor de amortiguamiento se halla entre $0 < \zeta < 1$, se tiene que el sistema presenta oscilaciones,

que estarán más amortiguadas cuanto mayor sea éste. A partir de $\zeta = 1$, el sistema deja de presentar oscilaciones. En la Figura 1.6 se muestra la respuesta de un instrumento de medida para dos valores distintos del factor de amortiguamiento.

- La frecuencia natural ω_n , que es la frecuencia a la que oscila la respuesta cuando el sistema no presenta amortiguamiento. Cuanto mayor sea dicha frecuencia, más rápidas serán las oscilaciones presentes en la lectura.

Cuando se realiza un ensayo sobre el equipo de medida y se desea conocer estos parámetros, es práctica habitual hacerlo indirectamente a través de la medida de otros dos parámetros, relacionados con los anteriores y que son de lectura directa más simple. Estos son:

- Sobreoscilación o sobrepasamiento M_p , mide el valor de pico, es decir, el de la primera oscilación, expresado en porcentaje respecto al valor final.
- Tiempo de establecimiento t_s , mide el tiempo que tarde el sistema en alcanzar en régimen permanente, considerándose que esto ocurre cuando la respuesta entra de forma permanente en una banda del $\pm 2\%$ del valor final. Es, por tanto, una medida de la velocidad del equipo de medida.

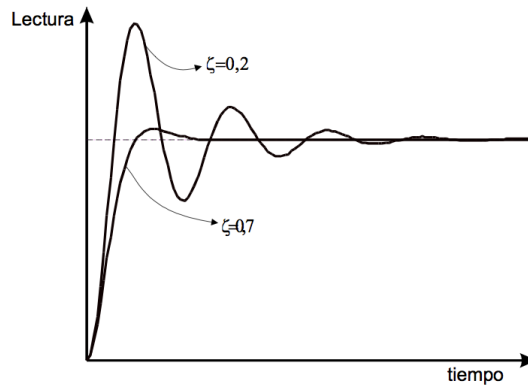


Fig. 6: Respuesta de sistemas de segundo orden

La relación existente entre estos últimos parámetros y los anteriores viene dada por:

$$\frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} = -\frac{1}{\pi} \ln \frac{M_p}{100} \quad (2)$$

$$\zeta \omega_n \approx \frac{4}{t_s}$$

Estas oscilaciones en la respuesta plantean problemas cuando el equipo de medida forma parte de un sistema de regulación. Los lazos de control que los empleen deben ser diseñados cuidadosamente, ya que dan lugar a retardos entre la señal medida y la lectura, limitando así la frecuencia máxima a la que es posible obtener una lectura de la salida del equipo.

En general, un sistema de segundo orden se puede modelar mediante una ecuación diferencial ordinaria lineal de coeficientes constantes:

$$\ddot{y}(t) + 2\zeta\omega_n \dot{y}(t) + \omega_n^2 y(t) = K_e \omega_n^2 u(t) \quad (3)$$

Donde $y(t)$ es la salida y $u(t)$ la entrada. Aplicando la transformada de Laplace a ambos términos de la ecuación (3) obtenemos:

$$\mathcal{L} [\ddot{y}(t) + 2\zeta\omega_n \dot{y}(t) + \omega_n^2 y(t)] = \mathcal{L} [K_e \omega_n^2 u(t)]$$

$$(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2) Y(s) = K_e \omega_n^2 U(s)$$

Y agrupando términos obtenemos la llamada función de transferencia del sistema:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K_e \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (4)$$

Obsérvese que la ganancia estática es K_e :

$$\lim_{s \rightarrow 0} G(s) = K_e$$

La transformada de Laplace es una transformación integral (una aplicación) que hace corresponder una función en el dominio de la frecuencia compleja $F(s)$ para una función en el dominio del tiempo $f(t)$:

$$f(t) \longrightarrow F(s)$$

$$F(s) = \mathcal{L} [f(t)]; \quad s = \sigma + j\omega$$

Dada una función continua del tiempo, $f(t) : f(t) = 0 \forall t < 0$, se define la transformada de Laplace de la siguiente manera:

$$F(s) = \mathcal{L} [f(t)] = \int_0^{\infty} f(t) e^{-s t} dt$$

donde $s = \sigma + j\omega$ es la variable compleja de Laplace.

Otra forma de representar el modelo de un sistema de segundo orden es mediante las ecuaciones de estado:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_n^2 & -2\zeta\omega_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ K_e \omega_n^2 \end{bmatrix} u(t) \quad (5)$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix}$$

5.4 Retardo puro

Algunos equipos de medida presentan en su respuesta un retardo puro. Esto significa que existe un tiempo muerto desde que empieza a variar la variable medida hasta que a su vez empieza a variar la salida. Posteriormente, la dinámica de la respuesta del equipo de medida puede ser de orden cero, de primer orden o segundo orden, según se ha visto en apartado anteriores.

En la variable de Laplace, el retardo puro se puede modelar mediante la función exponencial. Por ejemplo, el sensor de temperatura con función de transferencia:

$$G(s) = \frac{V(s)}{T(s)} = \frac{K_e}{\tau s + 1} e^{-t_d s} \quad (6)$$

presenta una ganancia estática K_e , una constante de tiempo τ y un retardo puro t_d .

Referencias bibliográficas

Griful, E., & Canela, M. (1998). El control metrológico y su papel en el aseguramiento de la calidad. *Automática e instrumentación*, (285), 54.

Hilario Caballero, A. (2020). *Calibración de un transmisor de presión*. Consultado el 19 de diciembre de 2023, desde <https://media.upv.es/#/portal/video/d120fc50-2004-11eb-9463-339a8e543e47>

Lope, M., Aguilar, J., Torres, F., & Isasi, O. (1998). Los instrumentos de metrología y la calidad de fabricación. *Automática e Instrumentación*, 93.

Pallás Areny, R. (2004). *Sensores y acondicionadores de señal: prácticas*. Marcombo.

UNE-EN 30012-1. (1994). Requisitos de aseguramiento de la calidad de los equipos de medida. Parte 1: Sistema de confirmación metrológica de los equipos de medida (ISO 10012-1: 1992). *Normas UNE*.