

1.- Introducción a los Sistemas de Medida y Control

1.1.- Introducción

La palabra Sistema se utiliza en muy diversas áreas, pero en todas ellas su definición podría ser: *"Conjunto de dos o más elementos interconectados entre sí para formar un todo unificado que tiene por objeto realizar una o varias funciones"*.

El Sistema de Medida y Control es aquel que realiza funciones de medición de magnitudes físicas, químicas, biológicas, ... procesando estas informaciones para regular el funcionamiento del sistema físico que pretende controlar, según los datos obtenidos en el proceso de adquisición de datos y medición.

Algunos ejemplos de medida a efectuar por un sistema de control pueden ser: medida de la temperatura interna de un horno, medida de la posición o del esfuerzo en un brazo robot, etc.

Un esquema general para la gran mayoría de los sistemas de control se puede observar en la figura 1.1:

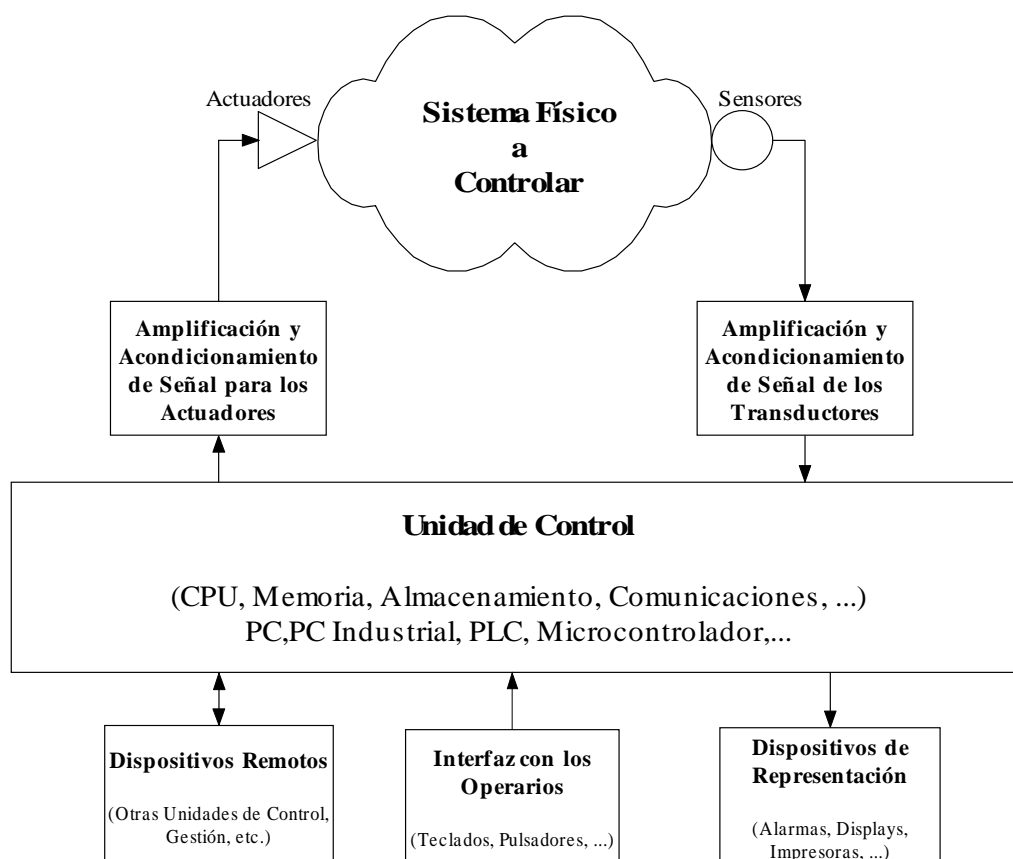


Figura 1.1 Esquema general de un sistema de medida y control.

En primer lugar el sistema de control capta las magnitudes del sistema físico (presión, temperatura, caudal, ...) mediante los Transductores (también denominados de una forma no muy exacta, Sensores). Los transductores generan una señal eléctrica que será amplificada y acondicionada para su correcta transmisión a la Unidad de Control. Para que la transmisión sea más inmune al ruido, normalmente se hace de forma digital, lo que requiere una conversión previa Analógica/Digital. Una vez recibidos, los datos serán tratados por la unidad de control (PC, autómata programable, microcontrolador,...), que generará unas actuaciones de acuerdo con los objetivos previstos para el sistema. Ya que estas señales son de baja potencia se amplifican y envían a los Actuadores. La transmisión hacia los actuadores también puede ser digital, lo que requeriría de una conversión Digital/Analógica.

1.2.- Etapas de un Sistema de Medida y Control

Las etapas fundamentales de un Sistema de Medida y Control son:

- 1) Transducción
- 2) Acondicionamiento de Señal
- 3) Conversión Analógica Digital
- 4) Transmisión de Datos
- 5) Procesado
- 6) Visualización y Registro
- 7) Transmisión de Órdenes
- 8) Conversión Digital Analógica
- 9) Acondicionamiento de la Salida
- 10) Actuación

Cada uno de los puntos anteriores supone un sistema completo que puede llegar a alcanzar una enorme complejidad. A continuación se van a describir someramente y en los temas posteriores se estudiarán más a fondo.

1.2.1) Transducción

Un Transductor es aquel dispositivo que transforma una magnitud física (mecánica, térmica, magnética, eléctrica, óptica, etc.) en otra magnitud, normalmente eléctrica. Es necesario diferenciar el elemento sensor del transductor, ya que este último es un dispositivo más complejo que puede incluir un amplificador, un conversor A/D, etc. El Sensor es el elemento primario que realiza la transducción, y por tanto, la parte principal de todo transductor.

La señal de salida de los transductores suele ser eléctrica, ya que esto supone una serie de ventajas:

- 1) Debido a la estructura electrónica de la materia, cualquier variación de un parámetro no eléctrico de un material vendrá acompañada de la variación de un parámetro eléctrico. Escogiendo un material adecuado a cada caso, es posible realizar transductores con salida eléctrica para medir cualquier magnitud física.
- 2) Dado que no es conveniente absorber energía del sistema a medir, es muy ventajoso la utilización de transductores de salida eléctrica, que puede ser amplificada posteriormente.
- 3) Las señales eléctricas pueden ser filtradas, moduladas, etc. gracias al gran número de circuitos integrados que facilitan estos recursos.

- 4) Existen multitud de recursos para registrar y presentar información de forma electrónica (LEDs, displays, bancos de memoria, PCs,...).
- 5) La transmisión de señales eléctricas es más versátil que la de otro tipo de señales, como las neumáticas o hidráulicas, que requieren equipos más costosos y difíciles de mantener. No obstante, se utilizarán estos sistemas en lugares donde el riesgo de incendio o explosión lo requieran.

1.2.2) Acondicionamiento de Señal

Los Acondicionadores de Señal o adaptadores, son los elementos del sistema de medida y control que reciben la señal de salida de los transductores y la preparan de forma que sea una señal apta para usos posteriores (principalmente su procesamiento en un PLC o PC Industrial).

Los acondicionadores no sólo amplifican la señal, sino que también pueden filtrarla, adaptar impedancias, realizar una modulación o demodulación, etc.

1.2.3) Conversión Analógica Digital

La mayoría de sensores generan una señal de salida analógica. Si el controlador es un sistema digital, por ejemplo un PC, un autómatas programable o un microcontrolador, habrá que digitalizar las señales para que éste pueda interpretarlas.

La conversión analógico-digital se realiza en dos etapas: primero se cuantifica la señal (representar la magnitud de la señal mediante un número finito de valores) y, posteriormente, se codifica (representar el valor mediante un código determinado: binario, Gray,...).

1.2.4) Transmisión de Datos

Una vez que las lecturas de los sensores han sido adaptadas al sistema de transmisión, se envían mediante éste al sistema de control para su procesamiento. La transmisión puede realizarse mediante líneas independientes o por buses. En función de la complejidad del sistema de control, la transmisión puede ser a corta distancia o incluso a nivel mundial a través de redes WAN (*Wide Area Network*) e Internet.

1.2.5) Procesado

Una vez que los datos han sido recogidos del sistema y enviados al sistema de control, éste los analiza y calcula las actuaciones necesarias para cumplir los objetivos que se hayan especificado. Dada la potencia de los sistemas actuales, se pueden controlar sistemas mediante métodos de control avanzados, realizar cálculos matemáticos altamente complejos, aplicar redundancia al sistema de control en casos críticos, etc.

1.2.6) Visualización y Registro

La visualización del estado del sistema y su registro es una tarea fundamental en todo sistema de instrumentación. La visualización de variables importantes del proceso permite a un operario cualificado valorar la calidad del control que está realizando el sistema, reajustarlo o tomar decisiones de otra índole. La presentación de alarmas de forma clara y llamativa permitirá a los operarios tomar medidas al respecto a la mayor brevedad posible.

El registro permite analizar la evolución del sistema más detalladamente para modificar estrategias, hacer estudios de rendimiento, etc.

1.2.7) Transmisión de Órdenes

Una vez que las actuaciones han sido calculadas, éstas han de enviarse al sistema para que sean aplicadas por los actuadores. Al igual que en la transmisión de datos, las órdenes pueden enviarse a los actuadores mediante líneas independientes, por buses específicos, o por los mismos buses utilizados para la transmisión de datos.

1.2.8) Conversión Digital Analógica

Si el controlador está implementado con un sistema digital, puede ser necesario (dependiendo de la naturaleza del actuador) una conversión previa de la señal.

1.2.9) Acondicionamiento de la Salida

Normalmente esta etapa está compuesta por un amplificador de potencia que adapta la señal de salida del controlador al actuador.

1.2.10) Actuación

Los Actuadores o Accionadores son aquellos elementos que realizan una conversión de energía con objeto de actuar sobre el sistema a controlar para modificar, inicializar y corregir sus parámetros internos.

La actuación es la etapa final del proceso de control. Las órdenes son enviadas por el controlador y se aplican al sistema físico a través de los actuadores. Esta actuación modificará el estado del sistema, que volverá a ser medido por los transductores para realizar un nuevo bucle de control.

1.3.- Tipos de Sistemas de Medida y Control

Dependiendo del criterio que se utilice para clasificar los sistemas de instrumentación, estos pueden ser:

a) Atendiendo a la Naturaleza de las Señales:

- Analógico.- El controlador es un sistema analógico, normalmente electrónico. Las ventajas principales de los controladores analógicos son su velocidad y robustez. Su principal inconveniente es la imposibilidad de controlar sistemas complejos e implementar controladores avanzados.

- Digital.- El controlador es un computador digital, normalmente un PC industrial o un autómata programable (PLC). La potencia de los sistemas digitales actuales permite que estos sistemas de control sean extremadamente eficientes, ya que se pueden resolver problemas de gran complejidad. Los sistemas digitales posibilitan la utilización de sistemas de registro como discos duros, cintas magnéticas, ..., así como dispositivos de representación como displays, monitores, etc.

- Híbrido.- Los controladores híbridos intentan aprovechar las grandes ventajas de los sistemas digitales y la velocidad y robustez de los analógicos. Esta cohabitación se consigue mediante la jerarquización del sistema de control, es decir, se divide el problema de control en distintas capas que siguen una estructura piramidal, de forma que las capas inferiores realizan un control más sencillo partiendo de los parámetros y ajustes enviados por las capas superiores a ellas.

b) Atendiendo al Bucle de Control:

- **Bucle Abierto.**- No existe realimentación con el sistema y, por tanto, no se ajusta el controlador a la evolución del sistema físico. Los sistemas en bucle abierto se emplean para la monitorización o registro del sistema a controlar, pero no para su control.

- **Bucle Cerrado.**- Las señales medidas por los transductores se comparan con una señal de referencia deseada, de forma que la discrepancia de estas señales implica la acción que debe tomar el controlador. Los controladores siempre deben ser en bucle cerrado para que se adapten a la evolución real del sistema.

c) Atendiendo a la Distribución del Sistema

- **Centralizado.**- El procesamiento y control corren a cargo de un único elemento central al cual han de llegar todas las medidas y del cual parten todas las actuaciones.

- **Descentralizado.**- El procesamiento se realiza en varios elementos coordinados entre sí, encargándose cada uno de ellos de un sector o zona.

- **Distribuido.**- La descentralización es aún mayor, siendo los sectores que controlan cada elemento mucho menores. La comunicación entre cada uno de estos controladores resulta fundamental.

1.4.- Características Estáticas de los Transductores

En muchos de los sistemas de medida, la variable de interés varía de forma lenta, así que basta con conocer las características estáticas del transductor. Si la evolución de la magnitud física es más rápida, será necesario conocer también las características dinámicas.

Algunas de las características estáticas más importantes se describen a continuación:

1.4.1) Exactitud o Precisión (Accuracy).

Representa la capacidad de un instrumento de medida de dar indicaciones que se aproximen al verdadero valor de la magnitud medida.

1.4.2) Fidelidad (Precision)

La fidelidad, es la capacidad de un instrumento de dar el mismo valor de la magnitud medida al realizar la medición varias veces en las mismas condiciones.



Figura 1.2 Fidelidad y Exactitud.

En la primera figura puede observarse una representación de un sistema con alta fidelidad pero baja exactitud, mientras que en la segunda el sistema es más exacto pero menos fiable. Dado que en un sistema fiable el error es predecible y corregible, es más adecuado el primer caso que el segundo.

1.4.3) Repetibilidad (Reapeatibility)

Es el mismo concepto que la fidelidad, salvo que nos referimos a repetibilidad cuando las medidas se realizan en un corto espacio de tiempo. Se expresa con:

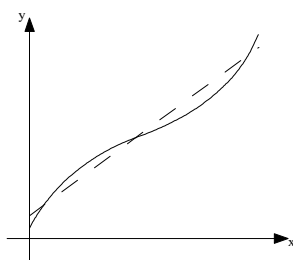
$$\text{Repetibilidad} = 2 \sqrt{\frac{S_i - S_n}{N}} \quad (1.1)$$

Siendo ' S_i ' el resultado de las lecturas individuales, ' S_n ' la media de las lecturas realizadas y ' N ' el número total de lecturas.

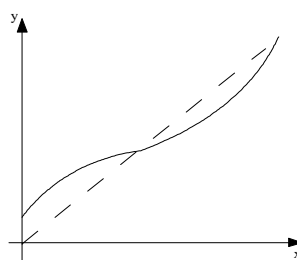
1.4.4) Linealidad (Linearity)

En muchos casos se asume que la respuesta de los transductores es lineal, facilitando el diseño del sistema de medida y control. Esta suposición introduce errores debido a la no linealidad. Existen varios tipos de linealidad, en función de qué recta se toma como referencia:

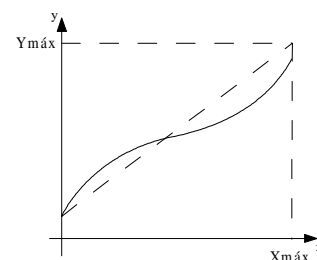
- Linealidad Independiente.- La línea de referencia se define según el método de los mínimos cuadrados. Suele ser la mejor forma de representación.
- Linealidad ajustada a cero.- La recta se define por el método de los mínimos cuadrados, pero imponiendo que ésta pase por el origen.
- Linealidad terminal.- La recta se define entre los puntos de respuesta teórica del transductor con la mínima y la máxima entrada admisible.
- Linealidad a través de los extremos.- La recta se define entre los puntos de respuesta real del transductor con la mínima y la máxima entrada admisible.
- Linealidad teórica.- La recta se define en función de las previsiones teóricas formuladas al diseñar el transductor.



a)



b)



c)

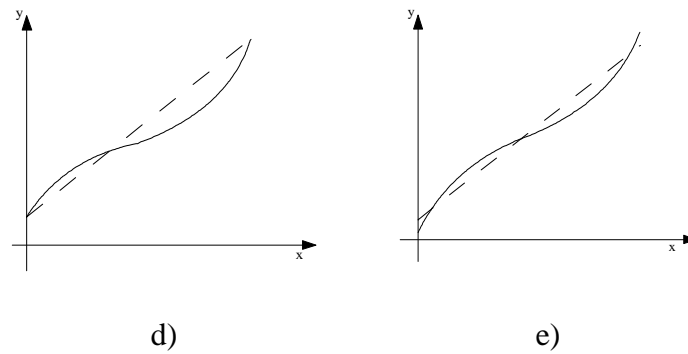


Figura 1.3 Tipos de linealidad.

1.4.5) Sensibilidad (Sensitivity)

Se define la sensibilidad como la pendiente de la curva de calibración que relaciona la salida eléctrica del transductor con la magnitud física. Para un transductor cuya salida 'y' esté relacionada con la entrada 'x' mediante la ecuación $y=f(x)$, la sensibilidad en el punto ' x_p ' es:

$$S_{xp} = \left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=x_p} \quad (1.2)$$

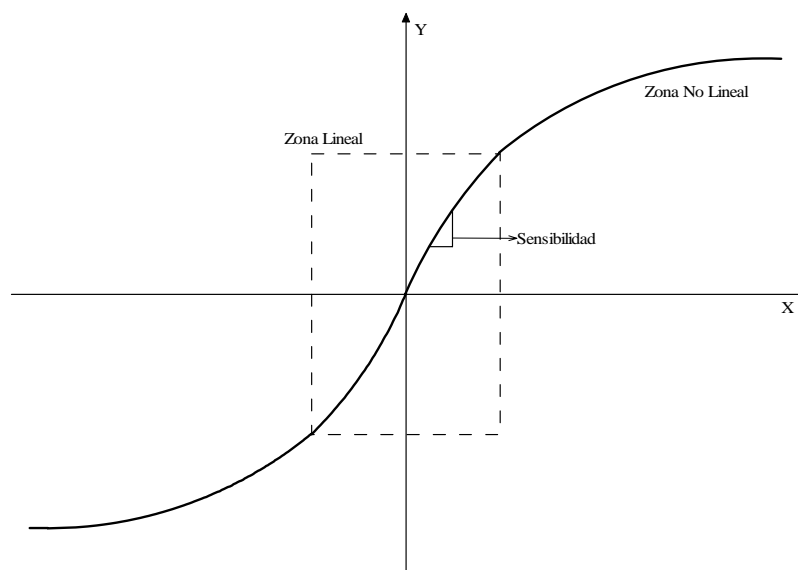


Figura 1.4 Curva de calibración de un transductor.

Interesa que la sensibilidad del transductor sea alta y lo más constante posible. Si la respuesta del transductor no es lineal, la sensibilidad variará a lo largo del rango de medida. Esto no es deseable.

En los transductores activos, la sensibilidad viene reflejada como $\frac{\text{Magnitud Eléctrica}}{\text{Magnitud Física}}$, mientras que en los transductores pasivos viene dada como la relación entre dos señales eléctricas $\frac{\text{Salida a Fondo de Escala}}{\text{Tensión de Alimentación}}$.

1.4.6) Resolución (Resolution)

La resolución de un transductor es la variación más débil de la magnitud física capaz de detectar. Si la mínima variación detectable es cero, se dice que el transductor tiene resolución infinita, y los límites de resolución vendrán impuestos por el aparato de medida. Es importante que el transductor tenga la resolución necesaria, ya que en defecto perjudicaría la calidad del sistema de instrumentación, y en exceso supondría un coste innecesario.

1.4.7) Rango (Range)

El rango define los límites superior e inferior entre los cuales puede realizarse la medida. No respetar el rango de medida de un transductor o un instrumento puede ocasionar un error grave en el sistema.

1.5.- Características Dinámicas de los Transductores

En los transductores y en los sistemas de medida se pueden encontrar elementos almacenadores de energía. Dichos elementos hacen que la respuesta del transductor a señales de entrada variables, sea distinta de la que presenta cuando las señales son constantes (Características Estáticas), por lo que se hace necesario describir las unas propiedades relacionadas con la evolución temporal de las salidas de los transductores, estas son las Características Dinámicas.

- 1) Error Dinámico.- Es la diferencia entre el valor indicado y el valor exacto de la variable medida, siendo nulo el error estático.
- 2) Velocidad de Respuesta.- Indica la rapidez con que el sistema de medida responde a los cambios en la variable de entrada.
- 3) Tiempo de Subida o Rise Time (tr).- En los sistemas de primer orden y sobreamortiguados, es el tiempo transcurrido desde que la salida tiene el 10% de su valor final hasta que llega al 90% de dicho valor, aplicando un escalón a la entrada. En los sistemas subamortiguados, es el tiempo que tarda la salida en alcanzar su valor final por primera vez, aplicando un escalón a la entrada.
- 4) Tiempo de Establecimiento o Settling Time (ts).- Es el tiempo que requiere el sistema para que su salida se asiente en un margen del valor final, normalmente el 2 ó 5%.
- 5) Sobreimpulso (Mp).- Es el valor máximo que sobrepasa la salida del sistema a su valor final. Se suele expresar en %.

Las características dinámicas se estudian mediante la aplicación al transductor de señales de entradas variables tipo, como son la entrada impulsiva, escalón, rampa o sinusoidal. Una vez obtenida la respuesta del sensor, ésta se ha de comparar con las de los sistemas dinámicos, para así hallar la descripción matemática que lo modela. Los sistemas dinámicos más empleados son los de orden cero, uno y dos.

1.5.1) Sistemas de Orden Cero

La relación entrada-salida está caracterizada por la ecuación 1.3, así su comportamiento se caracteriza por su Sensibilidad Estática, ecuación 1.4, que se mantiene constante con independencia de las variaciones de la entrada. El error dinámico y el retardo son nulos.

$$y(t) = Kx(t) \quad (1.3)$$

Un sistema sólo es de orden cero si no posee ningún elemento almacenador de energía, por ejemplo, es el caso de los potenciómetros empleados para la medida de desplazamientos lineales o angulares.

$$S = \frac{dy}{dx} = K \quad (1.4)$$

1.5.2) Sistemas de Orden Uno

En un sistema de primer orden hay un elemento almacenador de energía y otro que la disipa. La relación entrada salida viene caracterizada por la ecuación 1.5, ó 1.6 realizando la transformada de Laplace sobre ésta.

$$a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = x(t) \quad (1.5)$$

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (1.6)$$

Operando:

$$a_1 s Y(s) + a_0 Y(s) = X(s) \rightarrow G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{a_1 s + a_0} = \frac{1/a_0}{\frac{a_1}{a_0} s + 1}$$

Comparando la ecuación 1.6 con la expresión anterior, se obtienen la sensibilidad estática K (característica estática) y la Constante de Tiempo del Sistema τ (características dinámicas). La frecuencia propia del sistema se define como la inversa de τ .

$$K = \frac{1}{a_0} \quad (1.7)$$

$$\tau = \frac{a_1}{a_0} \quad (1.8)$$

En los sistemas de primer orden no existe sobreimpulso en la salida, y el tiempo de establecimiento se corresponde con 3τ para el criterio del 5% o 5τ para el del 2%. El error dinámico dependerá de la señal de entrada aplicada. Se va a estudiar para la entrada escalón ($1/s$ en el dominio de la frecuencia), introduciendo este valor en la función de transferencia y resolviendo posteriormente la transformada inversa:

$$Y(s) = \frac{K/\tau}{s(s+1/\tau)} = \frac{A}{s} + \frac{B}{s+1/\tau} = K\left(\frac{1}{s} - \frac{1}{s+1/\tau}\right) \Rightarrow y(t) = K(1 - e^{-t/\tau})$$

$$A = \frac{s(K/\tau)}{s(s+1/\tau)} \Big|_{s=0} = K \quad B = \frac{(K/\tau)(s+1/\tau)}{s(s+1/\tau)} \Big|_{s=-1/\tau} = -K$$

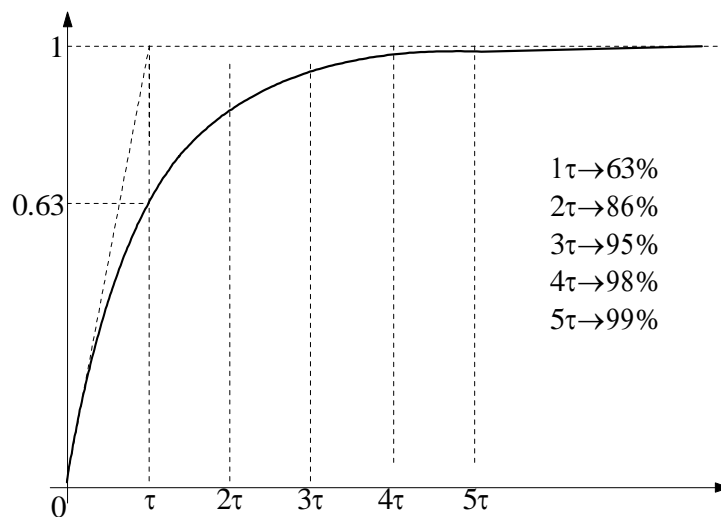


Figura 1.5 Respuesta de un sistema de 1^{er} orden a una entrada escalón.

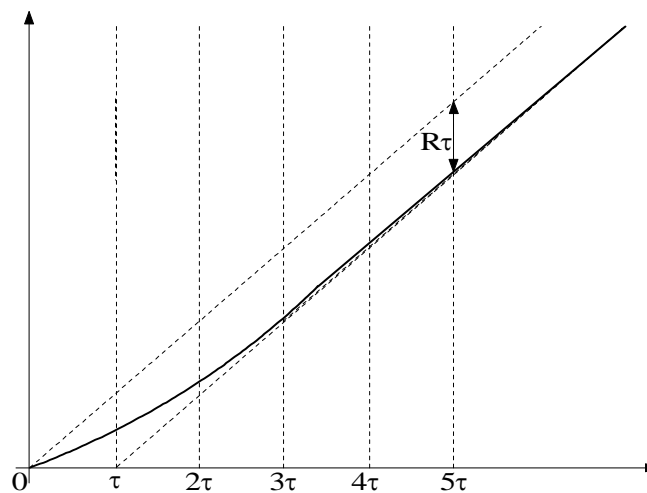


Figura 1.6 Respuesta de un sistema de 1^{er} orden a una entrada rampa.

En la figura 1.5 se observa la respuesta de un sistema con constante de tiempo de 1 unidad, nótese que la pendiente de la curva en el origen se corresponde con $1/\tau$, y que cuando $t=1$ la salida ha alcanzado el 63% de su valor final. En la gráfica puede observarse cómo el error dinámico es cero.

Cuando la entrada es una señal rampa, el error dinámico ya no es nulo, sino $R\tau$. El retardo sigue siendo τ al igual que en el caso anterior.

En la tabla 1.1 se muestran los valores del error dinámico y retardo de los sistemas de primer orden en función de las entradas tipo escalón, rampa y senoidal.

Entrada	Error Dinámico	Retardo
Escalón=1	0	τ
Rampa= Rt	$R\tau$	τ
Senoidal= $A \sin(\omega t)$	$1 - \frac{1}{\sqrt{(1 + \omega^2 \tau^2)}}$	$\frac{\text{atan}(\omega \tau)}{\omega}$

Tabla 1.1 Características dinámicas de un sistema de 1^{er} orden con distintas entradas.

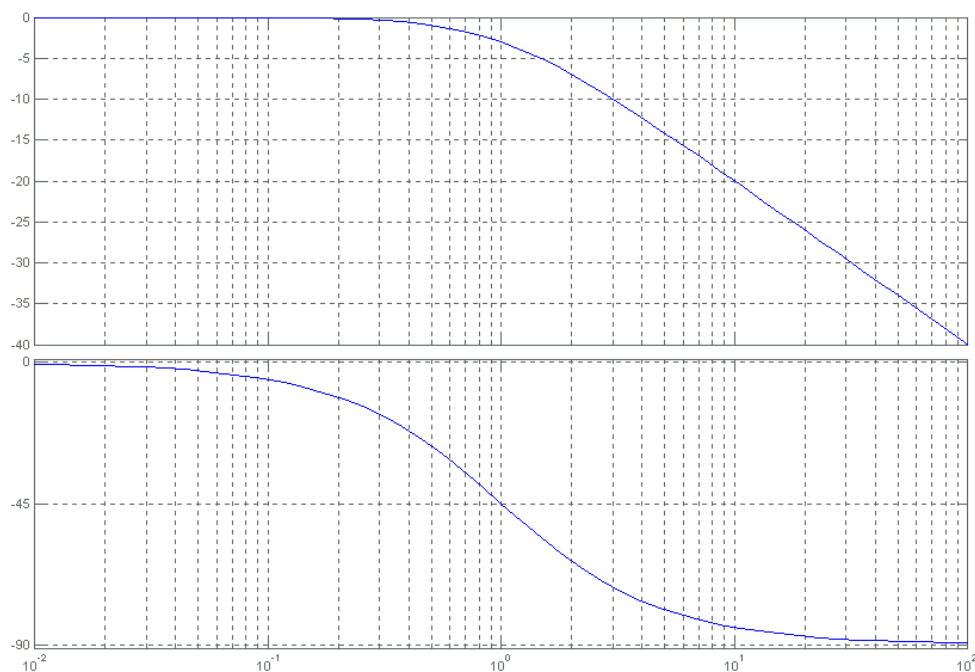


Figura 1.7 Respuesta de un sistema de 1^{er} orden a una entrada senoidal.

Entrada	Salida
Escalón, $u(t)$	$k(1 - e^{-t/\tau})$
Rampa, Rt	$Rkt - Rk\tau u(t) + Rk\tau e^{-t/\tau}$
Senoidal, A, ω	$\frac{kA\tau\omega e^{-t/\tau}}{1 + \tau^2 \omega^2} + \frac{kA}{(1 + \tau^2 \omega^2)^{1/2}} \text{sen}(\omega t + \theta)$ $\theta = \arctan(-\omega\tau)$

Figura 1.8 Respuestas de un sistema de 1^{er} orden frente a varias entradas tipo.

Ejemplo.- Un termómetro se introduce en un recipiente cuyo líquido está a una temperatura conocida. El tiempo que tarda en alcanzar el 63% de la lectura final es de 28 s. ¿Qué retardo tendrá dicho termómetro al medir la temperatura de un horno que cambia cíclicamente 2 veces por minuto? Suponer que el termómetro tiene una dinámica de primer orden.

Lo primero será obtener la constante de tiempo del termómetro. Ya que el ensayo ha consistido en aplicar una entrada escalón, τ coincidirá con el retardo del termómetro en este ensayo, es decir, 28 segundos.

Dado que la frecuencia de cambio de la temperatura del horno es de 2/60 Hz, y aplicando las fórmulas de la tabla 1.1, se deduce:

$$\omega = 2\pi f = \frac{4\pi}{60} = \frac{\pi}{15} \Rightarrow tr = \frac{\text{atan } \omega \tau}{\omega} = \frac{\text{atan}\left(\frac{\pi}{15} 28\right)}{\frac{\pi}{15}} = 6,7s$$

1.5.3) Sistemas de Orden Dos

En un sistema de segundo orden hay dos elementos almacenadores de energía y, al menos, uno que la disipa. La relación entre la entrada y la salida viene dada por la ecuación diferencial de segundo orden siguiente:

$$a_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = x(t) \quad (1.9)$$

Aplicando la transformada de Laplace se obtiene la función de transferencia:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{a_2 s^2 + a_1 s + a_0} = \frac{1/a_2}{s^2 + \frac{a_1}{a_2} s + \frac{a_0}{a_2}} = \frac{K \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta \omega_n s + \omega_n^2} \quad (1.10)$$

Se definen los siguientes parámetros:

- $\omega_n = \sqrt{\frac{a_0}{a_2}}$.- Frecuencia Natural del Sistema.
- $K = 1/a_0$.- Sensibilidad Estática.
- $\zeta = \frac{a_1}{2\sqrt{a_0 a_2}}$.- Coeficiente de Amortiguamiento.

La respuesta de los sistemas de segundo orden depende fuertemente del coeficiente de amortiguamiento, ζ . Existen tres comportamientos claramente diferenciados que pueden observarse en la figura 1.9.

El retardo y el error dinámico en los sistemas de segundo orden no sólo dependen de la entrada, sino también de los valores del coeficiente de amortiguamiento y de la frecuencia natural del sistema. Este análisis es mucho más complejo, por lo que se expone un resumen de las conclusiones que pueden obtenerse:

1) Sistema Subamortiguado ($0 < \zeta < 1$).- La respuesta presenta un sobreimpulso y cierta oscilación. El error dinámico es nulo, pero la velocidad de respuesta y el sobreimpulso están relacionados, de forma que a mayor velocidad generalmente implica mayor sobreimpulso. Los valores característicos pueden calcularse empleando las siguientes expresiones:

$$t_{s(2\%)} = \frac{4}{\zeta \omega_n} \quad (1.11)$$

$$t_{s(5\%)} = \frac{3}{\zeta \omega_n} \quad (1.12)$$

$$M_p = e^{-(\sigma/\omega_d)\Pi} = e^{-(\zeta\Pi)/(\sqrt{1-\zeta^2})} \quad (1.13)$$

$$t_r = \frac{\Pi - \beta}{\omega_d} \quad (1.14)$$

$$t_p = \frac{\Pi}{\omega_d} \quad (1.15)$$

siendo t_p el tiempo en el que se da la máxima sobreelongación y

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (1.16)$$

$$\cos \beta = \zeta \quad (1.17)$$

$$\sigma = \zeta \omega_n \quad (1.18)$$

En general, la velocidad de respuesta es óptima para $0,5 < \zeta < 0,8$, aunque esto represente un sobreimpulso en la respuesta de salida. En principio puede dar la sensación de que los sobreimpulsos son completamente indeseables, pero en la práctica las entradas no van a ser escalones puros, de forma que el comportamiento real del transductor puede ser aceptable.

2) Sistema Críticamente Amortiguado ($\zeta = 1$).- El sistema no presenta sobreimpulso, es la situación límite entre los casos 1 y 3. El error dinámico es nulo.

3) Sistema Sobreamortiguado ($\zeta > 1$).- El sistema no presenta sobreimpulso ni oscilación, y el error dinámico es nulo.

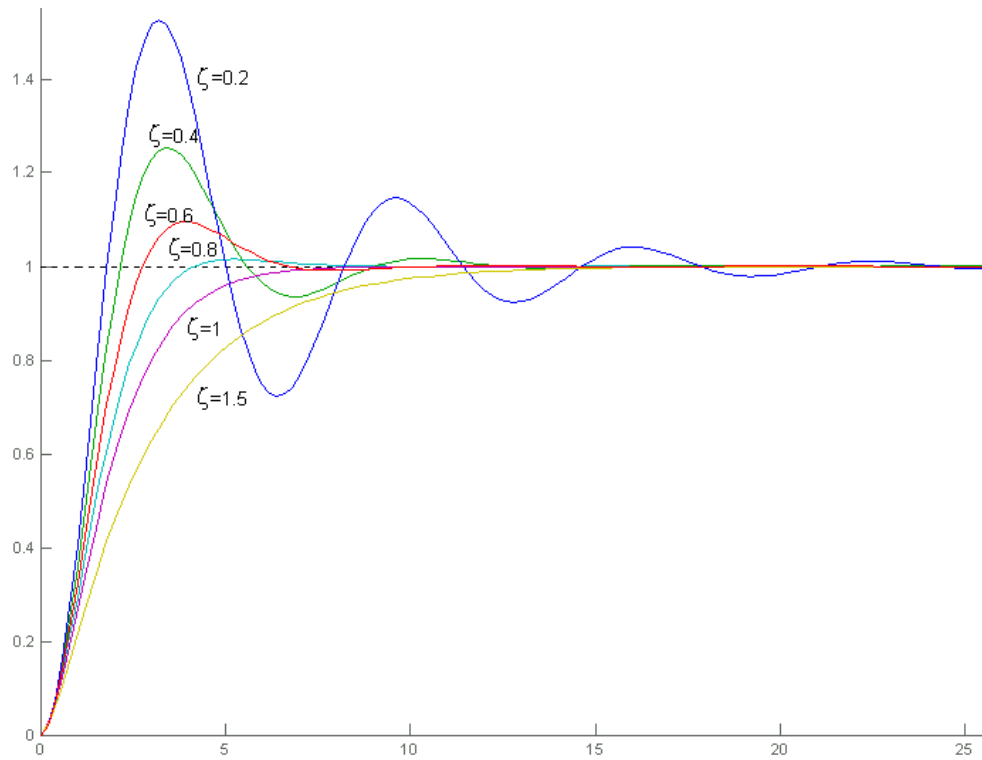


Figura 1.9 Respuesta a una entrada escalón de los sistemas de 2º orden.

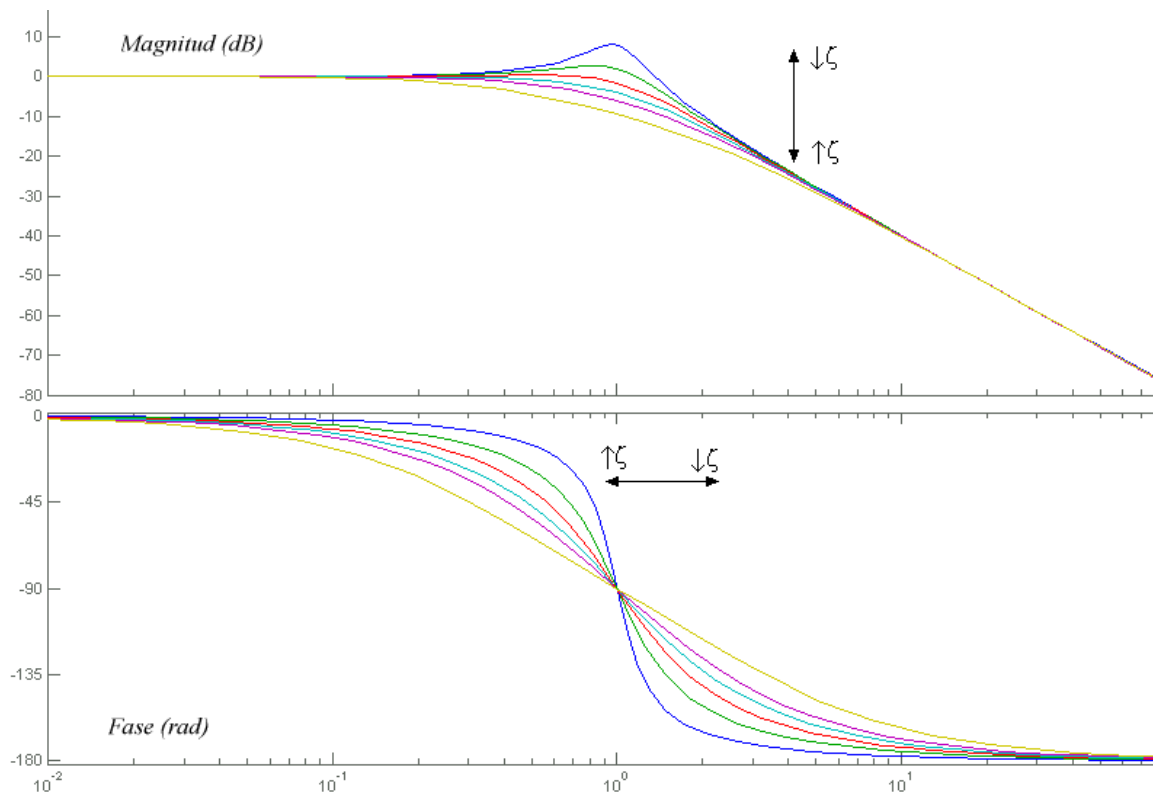


Figura 1.10 Respuesta en frecuencia de los sistemas de 2º orden.

Entrada	Error Dinámico	Retardo
Escalón = 1	Ver análisis anterior y ecuaciones 1.11 a 1.18	
Rampa = Rt	$2\zeta R/\omega_n$	$2\zeta/\omega_n$
Entrada	Frecuencia de Resonancia	Amplitud de Resonancia
Senoidal = $A \sin(\omega t)$, para $0,5 < \zeta < 0,7$	$\omega_r = \omega_n \sqrt{1 - 2\zeta^2}$	$M_r = \frac{1}{2\zeta \sqrt{1 - \zeta^2}}$

Tabla 1.2 Características dinámicas de un sistema de 2º orden con distintas entradas.

Entrada	Salida
Escalón, $u(t)$	
$0 < \zeta < 1$	$1 - \frac{e^{-\sigma t}}{(1 - \zeta^2)^{1/2}} \sin(\omega_d t + \alpha)$ $\sigma = \zeta \omega_n$ $\omega_d = \omega_n (1 - \zeta^2)^{1/2}$ $\alpha = \arcsen \omega_d / \omega_n$
$\zeta = 1$	$1 - e^{-\sigma t} (1 + \omega_n t)$
$\zeta > 1$	$1 + \frac{\omega_n}{2(\zeta^2 - 1)^{1/2}} \left(\frac{e^{-at}}{a} - \frac{e^{-bt}}{b} \right)$ $a = \omega_n [\zeta + (\zeta^2 - 1)^{1/2}]$ $b = \omega_n [\zeta - (\zeta^2 - 1)^{1/2}]$
Rampa, Rt	
$\zeta > 1$	$R \left\{ t - \frac{2\zeta}{\omega_n} \left[1 + \frac{2\zeta[-\zeta - (\zeta^2 - 1)^{1/2}] + 1}{4\zeta(\zeta^2 - 1)^{1/2}} e^{-at} + \frac{2\zeta[\zeta - (\zeta^2 - 1)^{1/2}] - 1}{4\zeta(\zeta^2 - 1)^{1/2}} e^{-bt} \right] \right\}$
$\zeta = 1$	$R \left\{ t - \frac{2\zeta}{\omega_n} \left[1 - \left(1 + \frac{\omega_n t}{2} \right) \exp(-\omega_n t) \right] \right\}$
$0 < \zeta < 1$	$R \left\{ t - \frac{2\zeta}{\omega_n} \left[1 - \frac{\exp(-\zeta \omega_n t)}{2\zeta(1 - \zeta^2)^{1/2}} \sin[(1 - \zeta^2)^{1/2} \omega_n t + \theta] \right] \right\}$ $\theta = \arctan [2\zeta(1 - \zeta^2)^{1/2} / (2\zeta^2 - 1)]$
Senoidal, A, ω	$\frac{kA}{[(1 - \omega^2/\omega_n^2)^2 + (2\zeta\omega/\omega_n)^2]^{1/2}} \sin(\omega t - \theta)$ $\theta = \arctan \frac{2\zeta\omega/\omega_n}{1 - (\omega/\omega_n)^2}$

Figura 1.11 Respuestas de un sistema de 2º orden frente a varias entradas tipo.

1.6.- Otras Características

Las características estáticas y dinámicas definen bastantes propiedades de los sistemas dinámicos, pero no son suficientes. Por ejemplo, se emplea un termómetro de masa apreciable para medir la temperatura de un transistor de pocas micras de tamaño, el hecho de hacer contacto produciría alteraciones en la medida. Este error se denomina Error de Carga.

1.6.1) Impedancia de Entrada

El concepto de impedancia de entrada permite evaluar si se produce o no un error por efecto de carga. En el proceso de medida de una variable ' X_1 ' siempre interviene otra variable ' X_2 ' tal que ' $X_1 \cdot X_2$ ' tiene dimensiones de potencia: Fuerza-Velocidad, Temperatura-Flujo de Calor, Tensión-Corriente, etc.

Si las variables son mecánicas se definen:

- 1) Variables Esfuerzo.- Se miden en un punto o región del espacio. (Ej. fuerza)
- 2) Variables Flujo.- Se miden entre dos puntos o regiones del espacio (Ej. velocidad)

y si no lo son:

- 1) Variables Esfuerzo.- Se miden entre dos puntos o regiones del espacio (Ej. tensión)
- 1) Variables Flujo.- Se miden en un punto o región del espacio. (Ej. corriente)

Así, la Impedancia de Entrada, $Z(s)$, se define como el cociente de las transformadas de Laplace de una variable esfuerzo y la variable flujo asociada, siempre que se pueda describir mediante relaciones lineales.

$$Z(s) = \frac{X_1(s)}{X_2(s)} \quad (1.19)$$

Otro término que se suele emplear frecuentemente es el de Admitancia, $Y(s)$, que se define como la inversa de la impedancia.

Para tener un error por carga mínimo es necesario que la impedancia de entrada sea lo más alta posible, de forma que la potencia, $P = X_1 X_2$, sea mínima. Si medimos la variable esfuerzo, X_1 , tendremos que hacer mínima la variable flujo, X_2 ; y si medimos la variable flujo, se deberá minimizar la variable esfuerzo, X_1 .

Como norma general, no se debe introducir un transductor en un sistema sin antes estudiar el efecto de su presencia en éste.

1.7.- Errores en las Medidas

Los errores en un sistema de medida pueden producirse en cualquiera de las fases del proceso. Los transductores e instrumentos de medida conllevan un error implícito a su construcción, hay errores debidos a las conversiones analógico-digitales y digitales-analógicos, los conductores, buses de conexión,... pueden verse afectados por el ruido eléctrico del entorno, etc.

También el sistema de control y la transmisión y aplicación de actuaciones se ven afectados por distintos errores inherentes al proceso.

La discrepancia entre el valor medido y el real se denomina Error Absoluto. Es común encontrar este valor reflejado en porcentaje respecto al Valor de Fondo de Escala del instrumento (máximo valor que puede medir).

$$\text{Error Absoluto} = \text{Resultado Medida} - \text{Valor Verdadero} \quad (1.20)$$

Se denomina Error Relativo al cociente entre el error absoluto y el valor verdadero.

$$\text{Error Relativo} = \frac{\text{Error Absoluto}}{\text{Valor Verdadero}} \quad (1.21)$$

Ejemplo.- Un sensor de temperatura debería proporcionar una tensión de salida de 0V a 0°C y de 20mV a 100°C. Al hacer la medida a 10°C se obtienen 1.03mV, y a 30°C, 4.45mV. Calcular los errores absoluto, relativo y a fondo de escala cometidos por el sensor.

Para la 1ª medida:

$$\text{Error Absoluto} = 2 - 1,03 = 0,97mV$$

$$\text{Error Relativo} = \frac{0,97}{2} \times 100\% = 48,5\%$$

$$\text{Error a Fondo de Escala} = \frac{0,97}{20} \times 100\% = 4,85\%FE$$

Para la 2ª medida:

$$\text{Error Absoluto} = 6 - 4,45 = 1,55mV$$

$$\text{Error Relativo} = \frac{1,55}{6} \times 100\% = 25,83\%$$

$$\text{Error a Fondo de Escala} = \frac{1,55}{20} \times 100\% = 7,75\%FE$$

Nota: A pesar de ser mayor el error absoluto y el error a fondo de escala en la segunda medida, se puede observar que el error relativo en ésta es menor. Esto explica la importancia que tiene el conocimiento de la forma en la cual el fabricante define el error elemento.

Muchos de los errores son fácilmente evitables si se implementa el sistema de instrumentación y control correctamente, por lo que su estudio es fundamental para el diseño de dichos sistemas. En los siguientes apartados se presenta una clasificación de los errores según su procedencia o naturaleza y, posteriormente, se estudian los errores más importantes de los transductores y sistemas de medida.

1.7.1) Naturaleza de los Errores

Los errores que se presentan en un sistema de medida pueden clasificarse en tres tipos:

1) Errores Sistemáticos.- Son errores propios del operario, del método empleado para tomar las medidas o de las circunstancias en las que estas se realizan. Se pueden corregir durante el proceso de calibración del sensor. Estos errores se reproducen en el curso de varias medidas hechas en las mismas condiciones. Si el valor medido permanece constante o varía de acuerdo a una ley definida según las condiciones de medida, el error será de tipo sistemático.

Algunos ejemplos son: Errores de medida, de calibración, de montaje, de alimentación o de ruido eléctrico debido a un mal apantallamiento.

2) Errores del Sistema.- Si las condiciones de funcionamiento de los sensores cambian pueden producirse errores en sus medidas. Estos errores pueden deberse a modificaciones del entorno (humedad, temperatura, polvo, etc.) o al propio sistema (fricciones, no linealidades, roturas, etc.). Para su detección y corrección es necesario monitorizar el sistema adecuadamente, comparando las medidas realizadas con la media estándar de éstas.

3) Errores Aleatorios.- Son errores producidos de forma fortuita y por tanto inevitables. Ya que siguen un patrón aleatorio, su media en el tiempo será nula, por lo que pueden evitarse realizando varias medidas. El valor absoluto de estos errores suele ser pequeño, de forma que no afectan de forma significativa a la medida.

Teniendo en cuenta los posibles errores presentados anteriormente, para la calibración de los sensores se deberá proceder eliminando en primer lugar los errores sistemáticos (realizando sucesivas medidas en las mismas circunstancias) y, posteriormente, tomar varias medidas para la calibración (estas tendrán errores aleatorios pero su media será nula).

En la práctica puede que los errores sistemáticos no se puedan anular en su totalidad.

1.7.2) Errores Característicos de los Transductores y Sistemas de Medida

1) No Linealidad.- Es la máxima desviación de la curva característica respecto a la línea recta que une el cero y el fondo de escala, en tanto por ciento. Viene expresada por:

$$\text{No Linealidad} = \frac{100 \text{ AB}}{\text{Valor a Fondo de Escala}} \quad (1.22)$$

En la figura 1.12, el tramo 'AB' representa la máxima diferencia en valor absoluto entre las salidas teórica y real de la señal eléctrica en un mismo punto de la curva de calibración.

2) Histéresis.- Es la máxima diferencia entre las salidas correspondientes a un punto de las magnitudes crecientes y decrecientes entre el cero y el fondo de escala, expresada en % del valor de fondo de escala. Ver figura 1.13.

$$\text{Histéresis} = \frac{100 \text{ DB}}{\text{Valor a Fondo de Escala}} \quad (1.23)$$

3) Umbral.- El umbral es la mínima variación del estimo de entrada del transductor capaz de generar una variación en la salida del mismo.

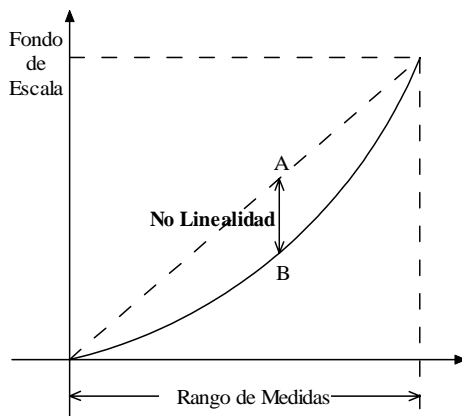


Figura 1.12 No Linealidad.

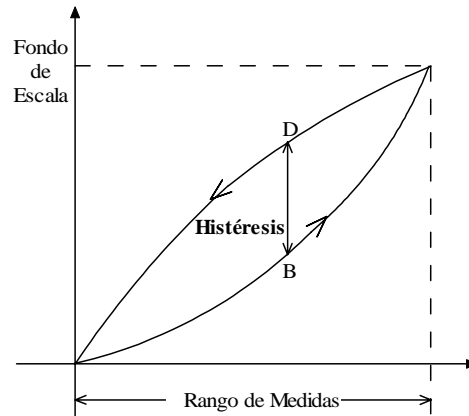


Figura 1.13 Histéresis.

4) Deriva Térmica de Cero.- Normalmente un transductor sin carga y en condiciones normales de temperatura, da salida nula o el valor que se haya establecido como origen (4 mA en transductores normalizados). Si se varía la temperatura de funcionamiento del sensor manteniéndolo sin carga, la salida no debería de variar, pero sí lo hace por el error de deriva de cero. Este error se define como la mayor salida que se obtiene a lo largo de todo el rango de temperatura de operación, cuando el transductor debería dar salida nula. Se representa en porcentaje de fondo de escala.

$$\text{Deriva Térmica de Cero} = \frac{100(V_{T_a} - V_{T_{op}})_{\max}}{\text{Valor a Fondo de Escala}} \quad (1.24)$$

Siendo $(V_{T_a} - V_{T_{op}})_{\max}$ la máxima diferencia, expresada en voltios, entre las lecturas a temperatura ambiente y a la temperatura máxima de operación (positiva o negativa), tomadas a salida cero.

5) Deriva Térmica de Fondo de Escala.- Esta deriva, también llamada *span*, es análoga a la anterior, pero aplicada con el máximo valor de carga especificado con rango a fondo de escala. También se emplea para su cálculo la ecuación 1.24, salvo que en este caso $(V_{T_a} - V_{T_{op}})_{\max}$ representa la máxima diferencia, expresada en voltios, existente entre las lecturas a temperatura ambiente y a la temperatura máxima de operación (la más desfavorable), tomadas con salida a fondo de escala con el máximo valor de carga permitido.

6) Deriva Térmica Total.- Se considera como error de deriva térmica total el mayor de los dos errores anteriores. Este error es el normalmente aparece reflejado en las hojas de características de los sensores.

7) Otros Errores.- Existen otros errores que definen la calidad de los transductores, como son el error de sensibilidad (si esta varía a lo largo del tiempo), el error de vuelta a cero, la estabilidad a corto y largo plazo, el tiempo de recuperación,...

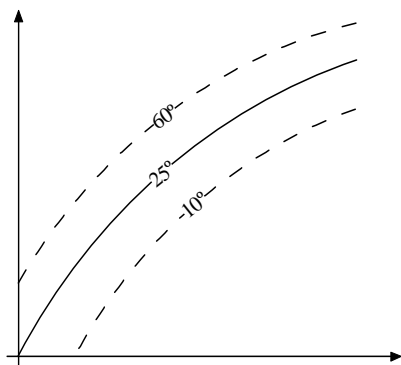


Figura 1.14 D.T. de Cero.

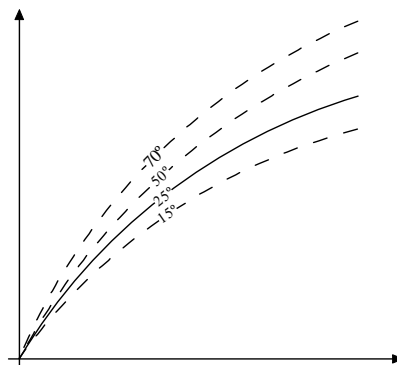


Figura 1.15 D.T. de Fondo de Escala.

1.8.- Evaluación Estadística de Medidas y Errores

Dado que es totalmente imposible eliminar todos los posibles errores en la adquisición de datos, se hace necesario la utilización de un método para determinar el valor más probable de las distintas medidas. Para este cometido se emplean métodos estadísticos, que permiten la eliminación de los errores de tipo aleatorio. Si el sistema tiene errores sistemáticos o propios del sistema, no se eliminarán, sino que requerirán de otro tipo de intervención (calibrado, ajuste, etc.).

- 1) Valor Medio.- Es la media aritmética de todas las medidas. Cuanto más medidas se tomen, más acertado será el resultado.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x}{n} \quad (1.25)$$

- 2) Desviación del Valor Medio.- Indica cuánto se desvía un valor del valor medio. Podrá ser positivo o negativo.

$$d_i = x_i - \bar{x} \quad (1.26)$$

- 3) Desviación Media.- Implica la precisión de la medida. Se calcula haciendo la media aritmética del valor absoluto de las desviaciones.

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n |d|}{n} \quad (1.27)$$

- 4) Desviación Estándar.- Es la desviación cuadrática media o RMS (*Root Mean Square*), y representa la medida perfecta de la dispersión de los datos. Esta forma es la más usual de dar el error de una medida, y viene representada por σ .

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n-1}} \quad (1.28)$$

5) Varianza.- Es el cuadrado de la desviación estándar, σ^2 .

6) Probabilidad de Error, distribución Gaussiana.- La distribución gaussiana representa la frecuencia con la que un error determinado se produce.

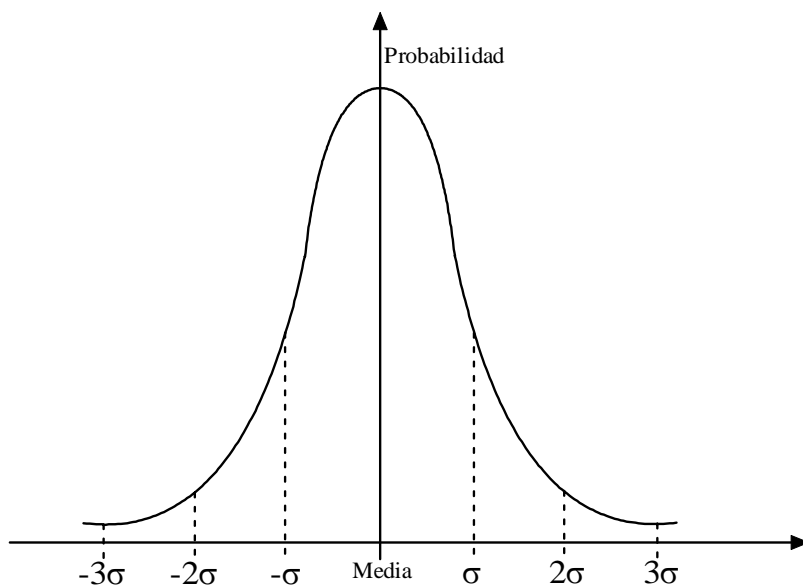


Figura 1.16 Probabilidad de Error

7) Error Probable.- Es posible evaluar el error que se puede cometer en un número determinado de medidas. El error probable si se realiza un sola medida es $\pm 0,675\sigma$.

Desviación (σ)	Área bajo la Curva de Probabilidad
0,6745	0,5000
1,0	0,6828
2,0	0,9546
3,0	0,9972

Tabla 1.3 Área bajo la Curva de Probabilidad.

8) Errores Límites.- En la mayoría de los instrumentos, la exactitud viene garantizada hasta un determinado porcentaje a fondo de escala; los componentes electrónicos se garantizan dentro de un rango de su valor nominal (*Tolerancia*), etc. Estos límites son los que se conocen como Errores Límites o Garantizados.

1.8.1) Ejemplos

Ejemplo 1.- Al medir una resistencia se obtuvieron los siguientes valores: 121Ω , 118.2Ω , 121.15Ω , 120.7Ω y 120.83Ω . Calcular el valor medio, la desviación promedia, la desviación estándar y el error probable del promedio de las lecturas, en porcentaje.

$$\bar{x} = \frac{121 + 118,2 + 121,15 + 120,7 + 120,83}{5} = 120,376\Omega$$

$$D = \frac{|-0,624| + |2,176| + |-0,774| + |-0,324| + |-0,454|}{5} = 0,8704\Omega$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{0,624^2 + 2,176^2 + 0,774^2 + 0,324^2 + 0,454^2}{5 - 1}} = 1,2283\Omega$$

$$r = \pm(0,6745\sigma) = \pm 0,8285\Omega$$

Ejemplo 2.- Se ha utilizado un voltímetro para medir la tensión existente en un punto de un determinado circuito, obteniéndose una lectura de $21.33V$. Dado que la tolerancia del voltímetro en la escala utilizada es $\pm 1\%$, calcular los errores límites de la medida realizada.

$$V_{cto} = 21,33 \pm 0,2133 \Rightarrow \begin{cases} V_{cto_max} = 21,5433V \\ V_{cto_min} = 21,1167V \end{cases}$$

Ejemplo 3.- Un voltímetro tiene un error del 1% en su escala $0-150V$. Si se mide una tensión de $83V$, ¿qué error límite puede cometer el voltímetro en $\%$? Si la escala $0-100V$ también tiene un error del 1% , ¿qué error límite se puede cometer ahora en $\%$?

$$150 \cdot 1\% = 1,5V$$

$$Elim_{\%} = \frac{1,5 \cdot 100V}{83V} = 1,8\%$$

$$100 \cdot 1\% = 1V$$

$$Elim_{\%} = \frac{1 \cdot 100V}{83V} = 1,2\%$$

Se puede observar que es importante ajustar la escala de medida al valor que se ha de medir, de esta forma el error cometido será menor.

2.- Sensores y Actuadores

2.1.- Introducción

Los sensores y actuadores son los dispositivos del sistema de medida y control que interactúan con el sistema físico que se pretende estudiar o controlar: los primeros permiten la toma de medidas de las distintas magnitudes físicas que se van a analizar; mientras que los actuadores posibilitan la modificación de dicho sistema.

Aunque es habitual emplear indistintamente los términos ‘sensor’ y ‘transductor’ hay que tener en cuenta que no son lo mismo. Un **sensor** es un dispositivo que a partir de la energía del medio, proporciona una señal de salida que es función de la magnitud que se pretende medir. Se denomina **sensor primario** al dispositivo que transforma la magnitud física a medir en otra magnitud transducible. Un **transductor** es el dispositivo que transforma una magnitud física (mecánica, térmica, magnética, eléctrica, óptica, etc.) en otra magnitud, normalmente eléctrica. El concepto de transductor es más amplio, ya que un transductor puede incluir, por ejemplo, un sensor y un acondicionador de señal o un conversor analógico-digital. Para obtener una determinada medida en un sistema físico puede utilizarse un sensor, un transductor o una combinación de un sensor primario con un transductor. Por ejemplo, una posible solución para medir la altura del agua de un depósito sería utilizar un flotador como sensor primario (convertiría el nivel de agua del depósito en un desplazamiento) y un potenciómetro como transductor (convertiría el desplazamiento en una variación de resistencia).

Magnitud Física	Transductor	Características
Posición (Lineal o Angular)	Potenciómetro	Analógico
	Encoder	Digital
	Sincro y Resolver	Analógico
Pequeños desplazamientos	Transformador diferencial	Analógico
	Galga Extensiométrica	Analógico
Velocidad (Lineal o Angular)	Dinamo tacométrica	Analógico
	Encoder	Digital
	Detector inductivo u óptico	Digital
Aceleración	Acelerómetro	Analógico
	Sensor de velocidad + calculador	Digital
Fuerza y Par	Galga Extensiométrica	Analógico
Temperatura	Termopar	Analógico
	Resistencias PT100	Analógico
	Termistores CTN	Analógico
	Termistores CTP	Todo-Nada
	Bimetales	Todo-Nada
Sensores de Presencia o Proximidad	Inductivos	Analógico o Todo-Nada
	Capacitivos	Todo-Nada
	Ópticos	Analógico o Todo-Nada

Tabla 2.1 Ejemplos de Transductores.

2.1.1) Efectos físicos utilizables en transductores

Aquellos efectos físicos que provocan un cambio en alguna de las características eléctricas de un material o dispositivo, pueden utilizarse para realizar la transducción de la magnitud física causante de la variación. Las variaciones eléctricas que pueden darse son: generación de tensión o intensidad por parte del dispositivo, o modificaciones en la resistencia, capacidad o inductancia del mismo.

a) Generación de Tensión o Intensidad

Al aplicar la magnitud física sobre el dispositivo, éste genera una tensión o intensidad dependiente del nivel de dicha magnitud, sin necesidad de alimentación eléctrica. Por ejemplo los termopares generan una tensión dependiente de la temperatura a la que está sometido.

b) Variación de la Resistencia

La **Resistencia** de un dispositivo es la medida de la oposición que este ofrece a ser atravesado por una corriente eléctrica. La resistencia es dependiente de la longitud (l), la sección (S) y la conductividad (σ) o resistividad (ρ) del material.

$$R = \sigma \cdot \frac{l}{S} = \frac{l}{\rho S} \quad (2.1)$$

c) Variación de la Capacidad

Dos conductores separados por un dieléctrico (aislante) constituyen un **Condensador**. La capacidad de dicho condensador es dependiente del área enfrentada de los conductores (A), de la distancia a la que se encuentran (d) y de la constante dieléctrica (ϵ).

$$C = \epsilon \cdot \frac{A}{d} \quad (2.2)$$

d) Variación de la Inductancia

La **Inductancia** de un dispositivo indica la magnitud del flujo magnético (Φ) que lo atraviesa cuando circula por el una corriente eléctrica (i). Esta magnitud es dependiente número de espiras del conductor (N). Si la corriente circula por el mismo conductor se habla de **autoinductancia**, y si lo hace por otro conductor acoplado se denomina **inductancia mutua**.

$$L = N \cdot \frac{d\Phi}{di} \quad (2.3)$$

2.2.- Clasificación de los Sensores

Existen multitud de métodos de clasificar los sensores según se atiende a una peculiaridad u otras de los sensores, de forma que según qué concepto se esté analizando se empleará una clasificación u otra.

2.2.1) Según requieran Alimentación Externa

Aquellos transductores cuyo funcionamiento se basa en la variación de alguno de sus parámetros eléctricos, requerirán de una alimentación externa para realizar la medida. Estos transductores se denominan Moduladores o Pasivos. Por el contrario, aquellos transductores capaces de generar tensión o intensidad a partir de la magnitud física que se desea medir, no requieren de alimentación externa y se denominan Activos o Generadores.

a) *Transductores Moduladores o Pasivos*

Los transductores pasivos pueden subdividirse en:

- Transductores Resistivos.- La magnitud a medir provoca un cambio de la resistencia del transductor. Según puede observarse en la ecuación 2.1, los parámetros modificables son la longitud, la sección y la conductividad. Ejemplos de este tipo de transductores son los potenciómetros y galgas extensiométricas (varía la longitud); las resistencias variables con la temperatura (RTD), transductores de efecto Hall y fotoresistencias (varía la conductividad); y los termistores CTN y CTP (variación de la resistencia con la temperatura en los semiconductores).

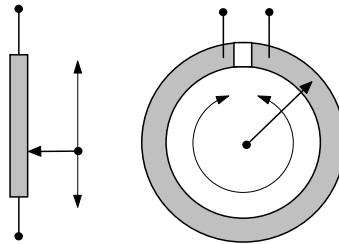


Figura 2.1 Potenciómetros

- Transductores Capacitivos.- Según la ecuación 2.2, hay tres formas de cambiar la capacidad de un dispositivo: modificando el área enfrentada de las dos capas, cambiando la distancia a la que se encuentran dichas capas, y con una variación en la constante del dieléctrico que las separa. Estas tres posibilidades pueden utilizarse para la construcción de transductores de desplazamiento lineales y rotacionales basados en el cambio de área, transductores de fuerza basados en la modificación de la distancia y medidores de nivel basados en la modificación de la constante dieléctrica.

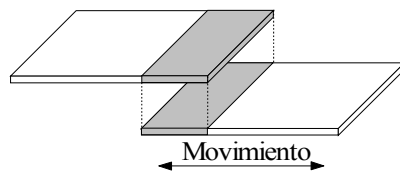


Figura 2.2 Transductor de Desplazamiento.

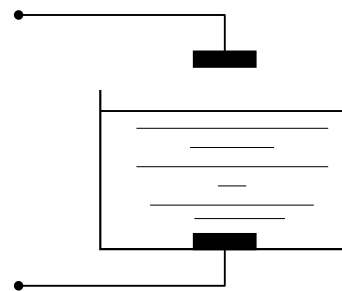


Figura 2.3 Medidor de Nivel.

Las principales ventajas de los transductores capacitivos son su mínimo error de carga, ya que no existe contacto mecánico, la alta estabilidad, reproductividad y resolución; y el no provocar grandes campos eléctricos ni magnéticos como los transductores inductivos. Como inconvenientes hay que mencionar la posibilidad de interferencias capacitivas, la pérdida de sensibilidad que se produce al apantallar los cables de conexión, y la no linealidad (se reduce empleando condensadores diferenciales).

· Transductores Inductivos.- La ecuación 2.3 muestra que la inductancia depende de la variación del flujo con respecto a la intensidad, pero el flujo es función de la inducción mutua y de la reluctancia magnética. Como esta depende parámetros

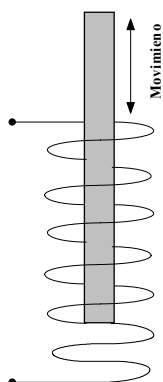


Figura 2.4 Transductor de Desplazamiento Inductivo.

como el número de vueltas de la inductancia, la permeabilidad del núcleo, la distancia de entrehierro existente, etc., se pueden diseñar transductores inductivos para la medición de desplazamientos, cambiando el número de vueltas o mediante núcleo móvil; detectores de presencia, etc.

Las principales ventajas de este tipo de transductores es su sensibilidad y lo poco que son afectados por la humedad.

Como inconvenientes cabe destacar que la temperatura de funcionamiento debe ser siempre inferior a la T^a de Curie, lo que limita el margen de utilización; y que la inductancia se ve afectada por campos magnéticos, lo que requiere el apantallamiento de los conductores.

· Transductores Electromagnéticos.- Cuando la magnitud medir provoca una alteración sobre el campo eléctrico o magnético, se pueden emplear este tipo de transductores. Principalmente se basan en la Ley de Faraday y en el Efecto Hall.

Ley de Faraday.- Cuando se produce una variación del flujo magnético sobre una bobina, se induce una tensión en sus extremos. Esta variación puede estar provocada por la variación de la intensidad o por el movimiento del núcleo de la bobina.

Efecto Hall.- Si por un conductor circula una corriente y existe un campo magnético aplicado perpendicularmente a este, aparece una diferencia de potencial transversal al conductor.

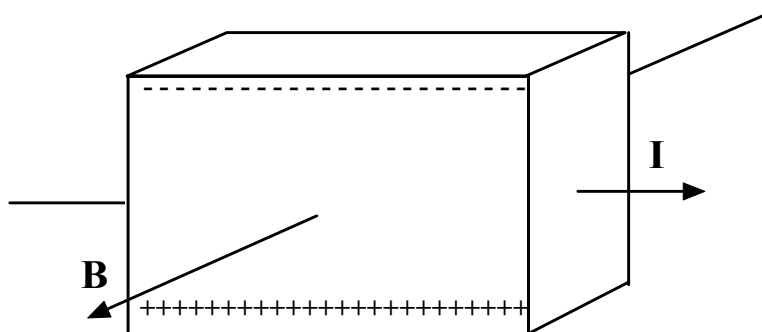


Figura 2.5 Efecto Hall.

Estas propiedades permiten la construcción de transductores de desplazamiento, tanto lineales como rotacionales, detectores de proximidad, etc.

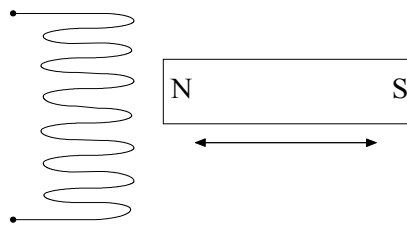


Figura 2.6 Transductor de Desplazamiento Lineal.

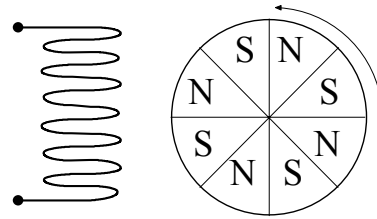


Figura 2.7 Transductor de Desplazamiento Angular.

b) Transductores Generadores o Activos

Los transductores activos son aquellos que generan una señal eléctrica a partir de la magnitud física que miden, sin necesidad de alimentación externa. Se pueden subdividir según el efecto utilizado para la generación:

- Efectos Termoeléctricos.- Los transductores termoeléctricos se basan en los efectos reversibles Seebeck, Peltier y Thomson.

Efecto Seebeck.- En un circuito con dos metales distintos y homogéneos con dos uniones a distinta temperatura, aparece una corriente eléctrica o una fuerza termo-electro-motriz (f.t.e.m.) si se abre el circuito.

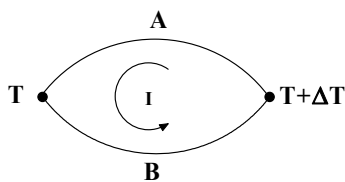


Figura 2.8 Efecto Seebeck.

$$S_{AB} = S_A - S_B = \frac{dE_{AB}}{dT} \quad (2.4)$$

Siendo E_{AB} la f.t.e.m., T la temperatura, S_A y S_B la potencia termoeléctrica absoluta de los metales A y B, respectivamente. S_{AB} es el coeficiente de Seebeck para la unión de los metales A y B.

Efecto Peltier.- La unión de dos metales distintos se calienta o enfría al ser atravesada por una corriente eléctrica, según el sentido de ésta. El calentamiento o enfriamiento de la unión no depende de la forma de los metales, si no de sus propiedades.

Sea Q_p el calor generado en la unión, I la corriente que la atraviesa, T la temperatura, y π_{AB} el coeficiente de Peltier, se verifica:

$$dQ_p = \pm \pi_{AB} \cdot I \cdot dT \quad (2.5)$$

$$\pi_{AB} = -\pi_{BA} \quad (2.6)$$

Efecto Thomson.- Un conductor homogéneo expuesto a una temperatura no homogénea, absorbe o libera calor cuando circula por él una corriente eléctrica. El calor liberado o absorbido es proporcional a la corriente que circula por él.

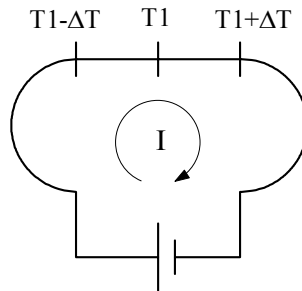


Figura 2.9 Efecto Thomson.

Utilizando los efectos anteriores se construyen los Termopares para la medida de temperatura. Poseen un alcance de medida muy amplio, gran estabilidad, fiabilidad, exactitud, una alta velocidad de respuesta y son muy robustos.

· **Efecto Piezoeléctrico.**- En determinados materiales denominados anisótropos, como el cuarzo, aparece una polarización eléctrica al ser deformados bajo la acción de un esfuerzo, este es el denominado efecto piezoeléctrico (es reversible).

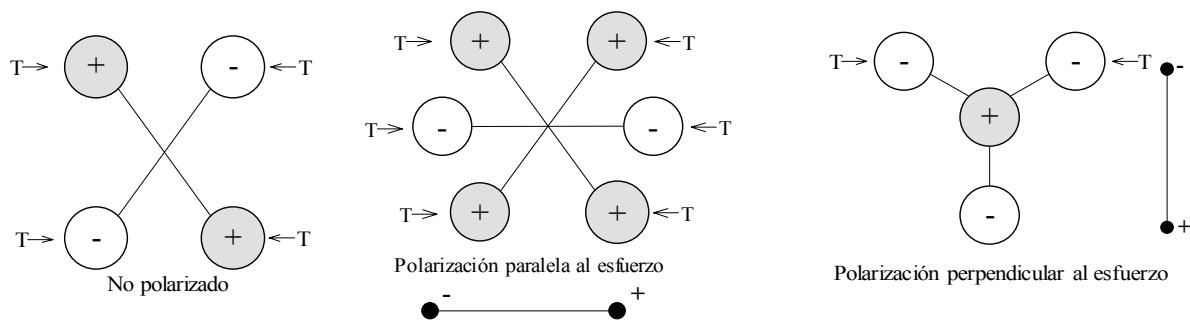


Figura 2.10 Efecto Piezoeléctrico.

Los transductores contruidos bajo este efecto se emplean principalmente para la medición de fuerza y presión, son muy sensibles, de bajo coste y poseen gran rapidez mecánica, lo que los hace capaces de detectar deformaciones de micras. Sus mayores inconvenientes son la alta resistencia eléctrica que ofrecen y la desaparición gradual del efecto si el material se somete a esfuerzos constantes. También son sensibles a la temperatura, no funcionan por encima de la temperatura de Curie, y su salida ha de ser amplificada.

· **Efecto Piroeléctrico.**- El efecto piroeléctrico provoca la aparición de cargas superficiales en una dirección determinada debidas al cambio de polarización espontánea, cuando un material experimenta un cambio de temperatura. Este efecto se emplea para la medición de flujos de térmicos a temperatura ambiente.

· **Efecto Fotovoltaico.**- El efecto fotovoltaico provoca la generación de un potencial eléctrico cuando una radiación ioniza una zona en la que existe una barrera de potencial. Se utiliza en fotodiodos, fototransistores, etc.

2.2.2) Según el Modo de Funcionamiento

En función del modo que tenga el transductor para establecer la medida, se puede diferenciar entre transductores de deflexión y transductores de comparación.

- Transductores de Deflexión.- Son aquellos en los que la magnitud medida produce algún efecto físico que ocasiona una reacción en el sensor, asociada a una variable útil fácilmente medible. Por ejemplo, en un potenciómetro, el desplazamiento del cursor provoca un cambio de la resistencia eléctrica proporcional al movimiento producido.
- Transductores de Comparación.- Se denominan así a los transductores que comparan la variable a medir con otra conocida y que se emplea como referencia de la medida. Debe haber un detector del desequilibrio producido, que será la medida proporcionada por el transductor. El ejemplo más sencillo sería la balanza, en la que se compara un peso conocido con el que se desea conocer.

2.2.3) Según el Parámetro Variable

En función de qué parámetro físico del transductor sea utilizado para realizar la medida, se diferencian entre transductores resistivos, inductivos, capacitivos, transductores de tensión, de corriente, etc. Esta clasificación es especialmente útil desde el punto de vista de la ingeniería electrónica, ya que permite tener pocos grupos de clasificación y se adapta correctamente al estudio de los circuitos acondicionadores asociados, similares para transductores en los que el parámetro variable sea el mismo.

2.2.4) Según sea la Señal de Salida

Según se codifique la señal de salida existen tres tipos de transductores:

- Transductores Analógicos.- La salida del transductor es un nivel de tensión o intensidad que varía de forma continua con la variable a medir dentro del rango de medida del transductor. Es frecuente que estos transductores incluyan una etapa para adaptar su salida a los valores normalizados (0-10 V ó 4-20 mA).
- Transductores Digitales.- La señal de salida de este tipo de transductores es una codificación del valor medido, bien sea en forma de pulsos o como un valor representado según código binario, BCD, Gray, o cualquier otro sistema.
- Transductores Todo-Nada.- En este tipo de transductores, la salida sólo puede presentar dos estados: activa o no activa. No son estrictamente un tipo distinto de transductor, ya que son un caso particular de los transductores de salida digital con sólo dos estados posibles; pero son de gran importancia en la industria. Un ejemplo de transductor todo-nada muy utilizado son los detectores de presencia en sus distintos tipos (inductivos, capacitivos, ópticos,...)

2.2.5) Según la Magnitud a Medir

En la industria existen gran variedad de transductores para detectar multitud de magnitudes físicas, como por ejemplo posición, velocidad, aceleración, fuerza, par, temperatura, un largo etcétera.

2.2.6) Transductores Modificadores

Existen magnitudes físicas de las que es difícil obtener la variación de alguno de los parámetros eléctricos vistos en 2.1.1), sin embargo, se puede transducir esta magnitud a otra que a su vez sea transducible a una señal eléctrica.

Los **Sensores Primarios** son dispositivos que permiten obtener una señal transducible a partir de la magnitud física que se desea medir. Éstos se clasifican en función de la señal que detectan:

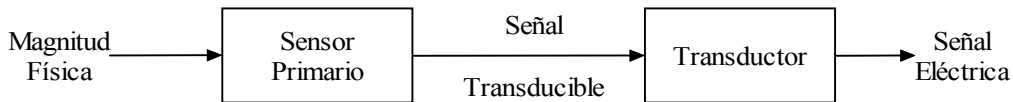


Figura 2.11 Sensores Primarios

a) Sensores Primarios de Temperatura, Bimetales

Se denomina **Bimetal** a la pieza formada por dos metales con distinto coeficiente de dilatación térmica (α). Cuando se produce un cambio de temperatura, la pieza se deforma según un arco circular, cuyo radio es inversamente proporcional al incremento de temperatura.

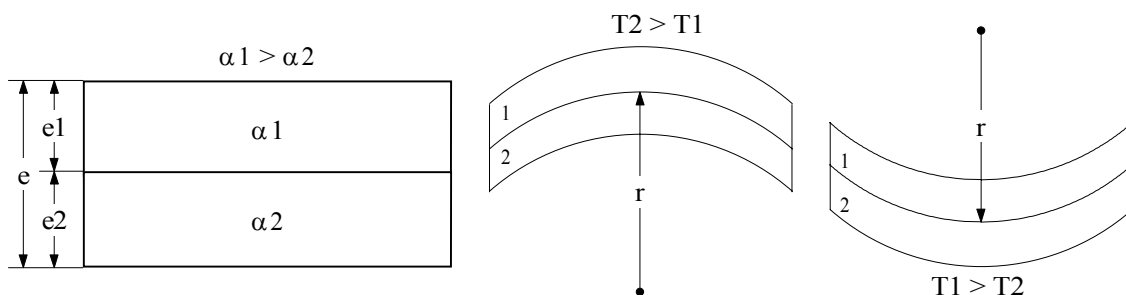
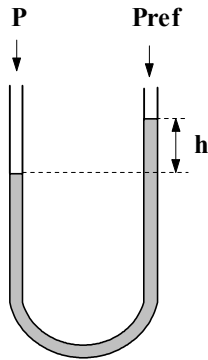


Figura 2.12 Bimetal.

$$r \approx \frac{2e}{3(T_2 - T_1)(\alpha_1 - \alpha_2)} \quad (2.7)$$

Los bimetales se pueden utilizar para abrir o cerrar contactos siempre que el rango de temperaturas esté comprendido entre -75 °C y 540 °C, y más particularmente entre 0 °C y 300 °C, utilizándose ampliamente para la protección de circuitos eléctricos (el calentamiento se produce al circular corriente por el bimetal debido al efecto Joule). Si se une el bimetal a un transductor de posición, puede obtenerse una señal eléctrica a partir de la temperatura a la que se encuentra el bimetal.

b) Sensores Primarios de Presión



· Comparación con una presión conocida.- La diferencia entre la presión que desea medirse (P) y la presión de referencia (P_{ref}) provoca un desplazamiento del líquido contenido en el tubo. Siendo g la aceleración de la gravedad y ρ la densidad del líquido, el desnivel provocado (h) es:

$$h = \frac{P - P_{ref}}{\rho \cdot g} \quad (2.8)$$

· Efecto de la presión sobre un elemento elástico.- Al ejercer presión sobre un elemento elástico este se deforma, provocando un desplazamiento función de la presión ejercida medible mediante un transductor de posición. Algunos ejemplos de estos sensores primarios son el Diafragma y el Tubo de Bourdon.

c) Sensores Primarios de Flujo y Caudal

El **Flujo** es el movimiento de fluidos por canales o conductos, mientras que el **Caudal** es la cantidad de material (en peso y volumen) que fluye por unidad de tiempo.

· Tubo de Pitot.- Tubo en ángulo recto con una apertura, el líquido sube hasta que la presión de la columna se equilibra con la del líquido. Midiendo la altura alcanzada por el líquido se puede obtener la velocidad del mismo, y con ésta el caudal.

$$v^2 = 2gh \quad (2.9)$$

· Mediante incremento de presión.- Se introduce una placa con un orificio de sección S_2 en la tubería, de sección S_1 . La velocidad del líquido será función del incremento de presiones a cada extremo de la placa. Una vez conocida la velocidad se puede calcular el caudal.

$$v_2^2 = \frac{2\Delta P/\rho}{1 - A_2/A_1} \Rightarrow Q = A_2 v_2 \quad (2.10)$$

· Mediante la variación de la sección (Rotámetro).- Se intercala en la tubería un tramo con sección variable que contiene un flotador. La altura alcanzada por dicho flotador será función del caudal que circula por dicha tubería.

· Mediante flujo magnético.- Si el fluido es conductor, al circular a través de un campo magnético provocará una fuerza electromotriz inducida que variará con la velocidad del fluido.

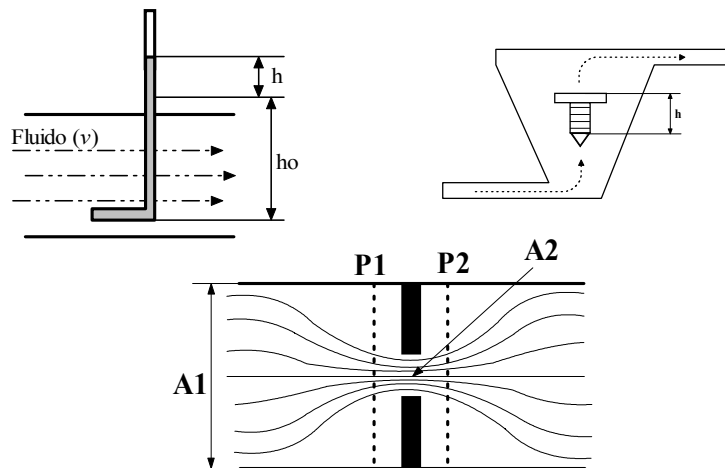


Figura 2.13 Tubo de Pitot. Figura 2.14 Incremento de Presión. Figura 2.15 Rotámetro.

d) Sensores Primarios de Nivel

Una polea con un flotador y un contrapeso es un sensor primario muy simple que convierte el nivel de líquido en un desplazamiento angular. Otra posibilidad es medir la diferencia de presión entre el fondo y la superficie del líquido.

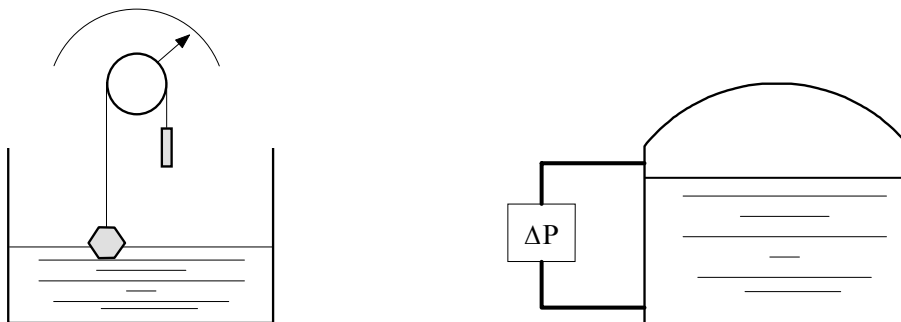


Figura 2.16 Sensores primarios de nivel.

e) Sensores Primarios de Fuerza y Par

Se puede transducir una fuerza/par comparándola con otra conocida, como por ejemplo en una balanza, o aplicándola a un elemento elástico denominado **Célula de Carga**. En las células de carga eléctricas el efecto es una deformación que se medirá normalmente con galgas extensiométricas, en las hidráulicas y neumáticas, el efecto es un aumento de la presión de un líquido o gas respectivamente.

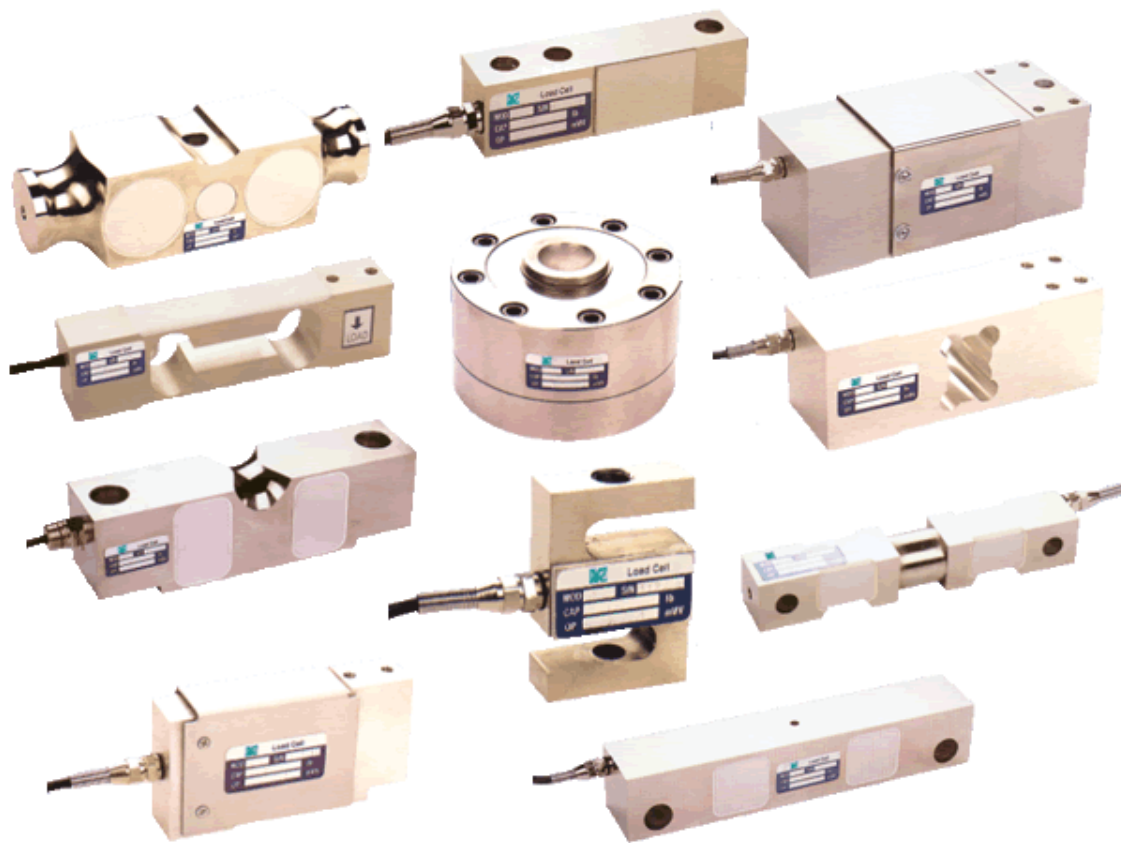


Figura 2.17 Algunas Células de Carga.

2.2.7) Transductores Monolíticos

Los transductores monolíticos se basan en las características de las uniones semiconductoras para realizar las medidas de multitud de parámetros físicos. Algunos ejemplos de importancia son los sensores de temperatura integrados, fototransistores, magnetodiodos y detectores de gases basados en transistores MOSFET.

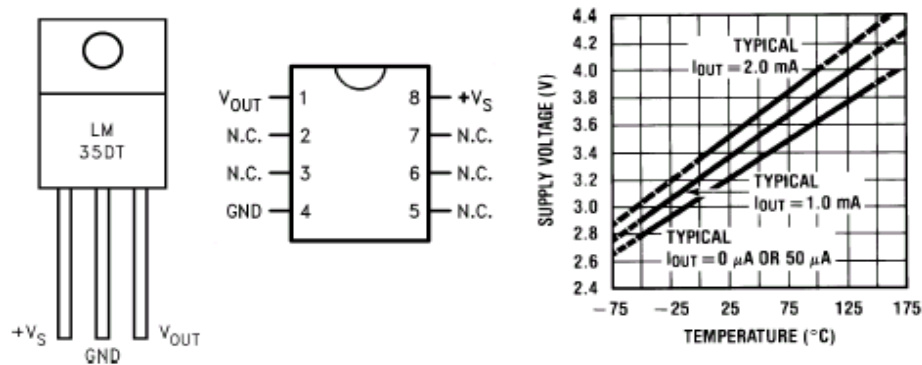


Figura 2.18 Sensor de temperatura integrado LM35.

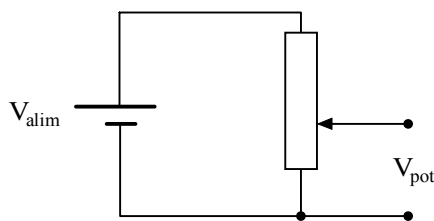
2.3.- Estudio de Algunos Sensores

2.3.1) Transductores de Posición

a) Potenciómetros

El potenciómetro es una resistencia variable lineal o angular con tres terminales, dos de ellos en los extremos de dicha resistencia y el tercero conectado a un cursor móvil (ver figura 2.1). Su funcionamiento se basa en la ecuación 2.1, donde el parámetro variables es la longitud del elemento resistivo (l). La construcción del potenciómetro puede basarse en un hilo bobinado o en una pista de material conductor. Son elementos bastante lineales, con dinámica de tipo 0 y de coste bastante económico, lo que lo convierte en un transductor bastante utilizado.

El principal inconveniente del potenciómetro es su dependencia de una alimentación muy estable para obtener la medida, ya que esta será directamente proporcional a la tensión suministrada por la fuente. Este defecto puede corregirse si se realiza la medición de la relación existente entre la tensión de alimentación y la salida proporcionada por el transductor. Siendo l la longitud o α la posición angular en la que se sitúa el potenciómetro, y l_t o α_t la máxima longitud o posición angular del potenciómetro respectivamente, se cumple:



$$V_{pot} = V_{alim} \frac{l}{l_t} \quad (2.11)$$

$$V_{pot} = V_{alim} \frac{\alpha}{\alpha_t} \quad (2.12)$$

$$\frac{V_{pot}}{V_{alim}} = \frac{l}{l_t} \quad (2.13)$$

$$\frac{V_{pot}}{V_{alim}} = \frac{\alpha}{\alpha_t} \quad (2.14)$$

Figura 2.19 Potenciómetro.

b) Encoders

Los encoders son transductores digitales de posición lineales o angulares. Existen dos tipos: incrementales o relativos y absolutos. En los primeros es necesario conocer la posición inicial, ya que el transductor proporciona el desplazamiento realizado en incrementos; mientras que en los encoders absolutos, cada posición tiene asociada una salida. Pueden ser eléctricos, magnéticos u ópticos, siendo los dos últimos los más utilizados.

Los **encoders incrementales** son más pequeños sólo emplean 1 ó 2 pistas. Una pista para indicar los incrementos de posición y la otra para determinar el sentido de giro. Normalmente incluyen una marca que se activa 1 vez por vuelta, muy útil para inicializar la medida o realizar cuentas de vueltas completas. La resolución viene dada por el número de pulsos por vuelta del transductor, de forma que se puede incrementar disminuyendo el ancho de las bandas.

Los **encoders absolutos** disponen de varias bandas que codifican la posición en la que se encuentra el transductor, normalmente mediante códigos en los que sólo cambia un bit, minimizando la posibilidad de error, como el código Gray. La resolución del transductor depende del número de bandas, por lo que un aumento de precisión requiere un aumento del tamaño del transductor.

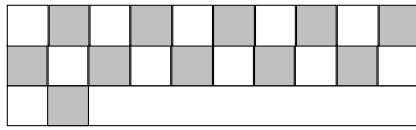


Figura 2.20 Encoder Lineal Incremental.



Figura 2.21 Encoder Angular Absoluto.

Posición	Código
1/8	000
2/8	001
3/8	011
4/8	010
5/8	110
6/8	111
7/8	101
8/8	100

Tabla 2.2 Código Gray de 8 bits.

c) LVDT y RVDT

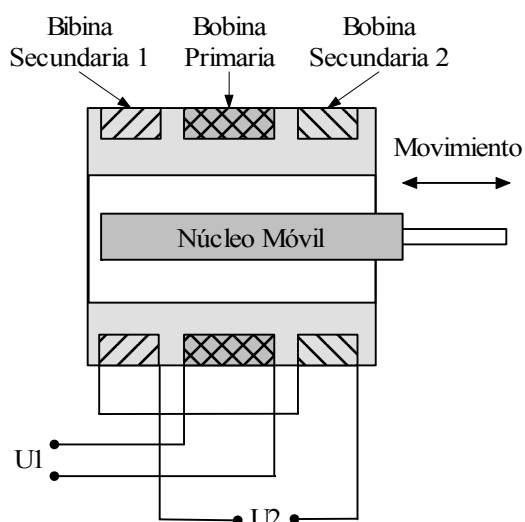


Figura 2.22 Esquema LVDT.

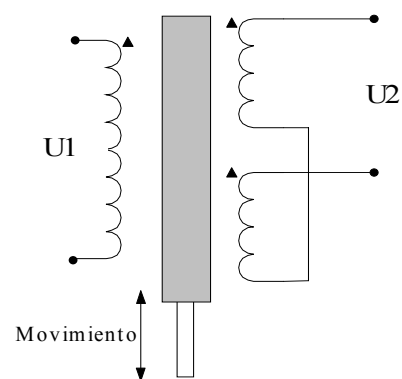


Figura 2.23 Construcción LVDT.

El transformador Diferencial Variable Lineal (LVDT) es un transductor de posición utilizado para la medición de pequeños desplazamientos, extremadamente lineal y muy preciso. Además, proporciona aislamiento eléctrico entre el primario y los secundarios y el rozamiento del elemento móvil es prácticamente nulo.

Los RVDTs siguen el mismo principio de funcionamiento, salvo que el núcleo está dispuesto de forma que el desplazamiento sea angular. El rango de funcionamiento lineal de este tipo de transductores está definido entre 40° y 60°.

Existen circuitos integrados diseñados para proporcionar la alimentación a los LVDTs y RVDTs y acondicionar la señal de salida del transductor; por ejemplo el AD698.