

1

Introducción a la instrumentación

Jaime Planas Rosselló

Septiembre de 2000

Cuando uno mira a su alrededor percibe que los instrumentos de medida están en todas partes. El más ubicuo es el reloj, pero en las calles abundan los termómetros y los salpicaderos de los coches están llenos de *indicadores*: velocidad, revoluciones, nivel de gasolina, etc.

El común de los mortales está familiarizado con los indicadores que constituyen el extremo visible de la cadena de medida, como quien dice la punta del iceberg. Poca gente conoce, ni siquiera a grandes rasgos, el funcionamiento interno de un sistema o aparato de medida.

Aunque el saber no ocupa lugar, un usuario ordinario no tiene porqué conocer como funciona por dentro un aparato, siempre que ese conocimiento no sea preciso para poder hacer un uso adecuado del mismo. Este es el caso de aparatos “cerrados”, cuyo correcto funcionamiento está certificado por el fabricante o por una empresa que realiza el mantenimiento y calibrado del mismo. Este es el caso de los instrumentos de un coche, de la balanza electrónica de un supermercado o del medidor de un surtidor de gasolina.

Sin embargo, un ingeniero de materiales, igual que otros profesionales, debe conocer algo más acerca de como funcionan los sistemas de medida que se utilizan en la caracterización de los materiales y en los procesos de fabricación de los mismos, tanto para poder juzgar lo adecuado de los sistemas utilizados por otros, como para poder seleccionar un sistema adecuado de medida para un uso particular.

Denominaremos *instrumentación* al conjunto de instrumentos que hacen posible la medida de una variable física particular y, por extensión, también al conjunto de instrumentos de medida que permite seguir la evolución de un sistema físico, cualquiera que sea el número de variables físicas involucradas.

Denominaremos también *instrumentación* a la disciplina que estudia las técnicas de diseñar, construir y utilizar correctamente los sistemas de medida.

En este curso introductorio vamos a ceñirnos a los conceptos mínimos necesarios para comprender el funcionamiento de los sistemas eléctricos o electrónicos de medida a efectos, fundamentalmente, de poder utilizarlos correctamente.

En este capítulo se describen los aspectos más generales de un sistema de medida, sus componentes y propiedades estáticas.

1.1 Componentes de un sistema generalizado de medida

La Fig. 1.1.1 muestra el esquema simplificado de un sistema de medida en forma de bloques funcionales. A la izquierda de la cadena de medida se encuentra el *sistema físico*, alguna de cuyas magnitudes físicas se quiere medir. En el extremo opuesto se encuentra el sistema que permite al usuario tomar nota o almacenar la medida, es decir el sistema de *presentación o toma de datos*.

En los sistemas modernos, la presentación y/o toma de datos se hace de forma electrónica, por lo que la variable física a medir debe transformarse previamente en una señal eléctrica. Aunque en

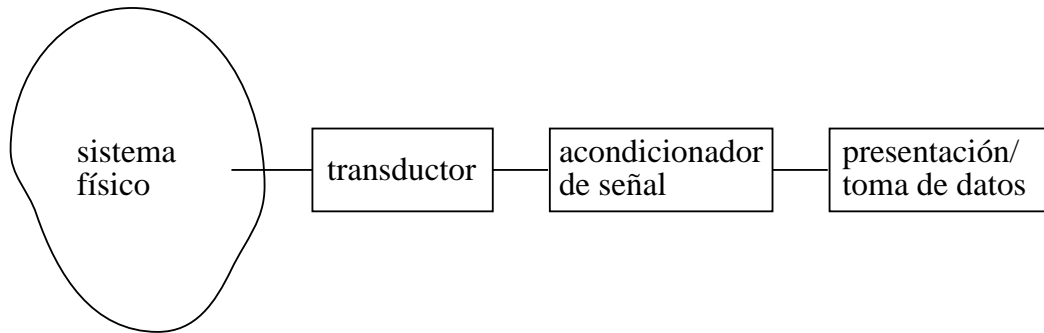


Figura 1.1.1 Componentes de un sistema generalizado de medida

ciertos sistemas la señal eléctrica en cuestión es una intensidad de corriente, supondremos aquí que en general se trata de una tensión eléctrica.

La conversión de la magnitud física de interés en una señal eléctrica del nivel adecuado para la presentación y/o toma de datos se realiza en dos etapas. En la primera etapa dicha magnitud física se convierte, mediante un *transductor* en otra magnitud de tipo eléctrico (por ejemplo una resistencia eléctrica). En la segunda etapa, un *acondicionador de señal* incluye la circuitería necesaria para convertir la magnitud característica del transductor en una señal eléctrica de nivel adecuado.

Es de notar que en algunos sistemas las tres etapas del sistema de medida están totalmente integradas, de forma que un único aparato realiza las tres funciones de una manera transparente al usuario. Este es el caso, por ejemplo de un termómetro clínico electrónico, en el cual el transductor, el acondicionador de señal y el indicador digital están integrados en un elemento del tamaño de un bolígrafo. En otras ocasiones, particularmente en el caso de instrumentación de laboratorio, las etapas están físicamente diferenciadas, y se dispone de un transductor que se conecta (enchufa) a la entrada de un acondicionador de señal a cuya salida se conecta un aparato para presentar o tomar los datos. La disposición modular complica la utilización, pero a su vez la hace más versátil ya que permite combinar transductores, acondicionadores y lectores en formas adecuadas a diversos objetivos.

1.2 Transductores

Como ya se ha indicado un transductor podría definirse en general como un dispositivo que convierte una magnitud física en otra más conveniente para los propósitos de la medida. Aunque la conversión puede ser a magnitudes de tipo mecánico (por ejemplo desplazamiento o presión hidráulica o neumática), en la mayoría de las aplicaciones se utilizan transductores de tipo eléctrico ya que ello permite un mejor tratamiento de la información.

En la literatura técnica se puede encontrar el término *sensor* como sinónimo de transductor. De acuerdo con el Vocabulario Científico y Técnico de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, se denomina sensor a todo “dispositivo que detecta variaciones en una magnitud física y las transforma en señales útiles para un sistema de medida o control” mientras que un transductor es un “dispositivo que convierte una magnitud física en otra distinta”. Los dos conceptos no son en general equivalentes, pero en el campo de la instrumentación pueden tomarse como tales si el contexto lo permite. En muchos textos se reserva el término sensor para el elemento que realiza la conversión de magnitudes y el transductor pasa a ser el dispositivo completo que incorpora el sensor y todos los componentes necesarios para su completo funcionamiento. Por ejemplo un transductor de fuerzas está constituido por un elemento que, bajo la acción de la fuerza que se quiere medir, se deforma en régimen elástico. Sobre dicho elemento se pegan elementos llamados *bandas extensométricas* que convierten la deformación en variación de la resistencia de un hilo metálico. Estrictamente hablando, el sensor sería el filamento metálico de la banda extensométrica y el transductor de fuerza todo el conjunto, incluidos los cables que permiten conectar el transductor a un acondicionador de

Tabla 1.2.1 Tipos de transductores eléctricos

pasivos	resistencia (R)	potenciómetro banda extensométrica termo-resistencia (RTD) termistor foto-resistencia
	impedancia (Z)	inductivo de núcleo deslizante inductivo de entrehierro variable transformadores diferenciales (LVDT y RVDT) capacitivos magnetoestricción
	especiales	célula Hall célula fotoemisiva cámara de ionización
activos	generación f.e.m.	termopar sensor piezoeléctrico tacómetro eléctrico célula fotovoltaica

señal. Esta es la interpretación que aquí seguiremos cuando sea estrictamente necesario distinguir entre uno y otro, aunque, en general, tomaremos como equivalentes las denominaciones sensor y transductor.

La Tabla 1.2.1 resume los tipos más corrientes de transductores eléctricos. Existen dos grandes grupos: el de los transductores *pasivos*, que necesitan alimentación externa para efectuar la medida, y los *activos*, que generan por sí mismos una fuerza electromotriz y no necesitan alimentación externa.

Dentro de los transductores pasivos, los transductores pueden clasificarse por el tipo de variable eléctrica ligada al transductor. Los tipos fundamentales son:

1. Transductores en los que varía la **resistencia eléctrica**: potenciómetros (variación de la resistencia inducida por un desplazamiento), bandas extensométricas (variación de la resistencia debida a la deformación mecánica), termo-resistencias (RTD) y termistores (variación de la resistencia con la temperatura).
2. Transductores en los que varía la **impedancia eléctrica**, debido a un cambio en la autoinducción del transductor (transductores inductivos de núcleo deslizante o de entrehierro variable), debido a un cambio de inducción mutua entre dos bobinas (LVDT: *linear variable differential transformer*; o RVDT: *rotary variable differential transformer*), debido a un cambio de la permeabilidad magnética (magnetoestricción), o debido a un cambio en la capacidad eléctrica (transductores capacitivos).
3. Transductores especiales, que se basan en efectos no incluidos en lo anterior, como la célula Hall (basada en el efecto Hall), la célula fotoemisiva (basada en el efecto fotoeléctrico) o la cámara de ionización (contador de centelleo para la medida de radiaciones ionizantes).

Dentro de los transductores activos, se consideran en la Tabla 1.2.1 los siguientes:

1. Los *termopares*, circuitos formados por dos metales diferentes en el que se genera una fuerza electromotriz cuando las uniones de los dos metales se encuentran a temperaturas diferentes (efecto termoelectrico).
2. El *generador eléctrico* que usa el efecto de inducción magnética para generar una corriente eléctrica cuyas características están directamente relacionadas con la velocidad de rotación (tacómetro).
3. Los transductores *piezoeléctricos* que usan un cristal que al ser deformado genera una separación de las cargas positivas y negativas que produce una diferencia de potencial entre caras

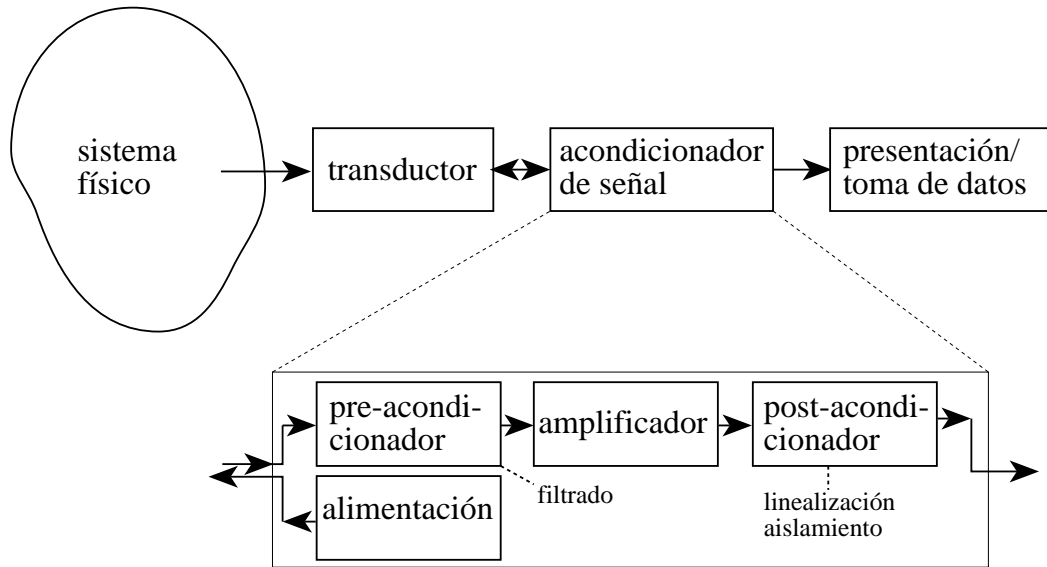


Figura 1.3.1 Bloques funcionales en un acondicionador de señal genérico.

del cristal relacionada con la deformación experimentada.

4. La *célula fotovoltaica* que genera una fuerza electromotriz cuando se ilumina una unión semiconductor (efecto fotovoltaico).

La anterior relación de transductores dista mucho de ser exhaustiva. Además, en este curso se tratarán con cierto detalle sólo los transductores cuyo nombre aparece sombreado en la Tabla 1.2.1. Para otros tipos de transductores debe consultarse la bibliografía recomendada.

1.3 Acondicionadores de señal

En muchas ocasiones la salida suministrada por el transductor es inadecuada para atacar los sistemas de presentación y toma de datos y debe ser modificada de alguna manera, o incluso generada en el caso de los transductores pasivos.

En la Figura (1.3.1) se ha esquematizado el diagrama de bloques funcionales de un acondicionador de señal. Puede advertirse que el acondicionador puede tener una alimentación que aplica una tensión al transductor (flecha hacia la izquierda) que será operativa siempre que se trate de un transductor pasivo. La tensión de salida del transductor puede sufrir a continuación un pre-acondicionamiento (por ejemplo un filtrado para eliminar ruidos). Si la señal es de bajo nivel (de unas décimas de voltio), será necesario amplificar la señal. La señal amplificada se puede someter a continuación a un post-acondicionamiento que puede consistir, por ejemplo, en una linealización (para conseguir una salida cuyas variaciones sean proporcionales a las variaciones de la magnitud física a medir) y en un aislamiento (para conseguir que la señal de salida sea independiente de los instrumentos de lectura que de ella se alimentan). En ciertos casos, el post-acondicionamiento puede incluir la conversión de la señal análogica en una señal digital (conversión analógica digital; ADC en siglas inglesas de *analog to digital converter*).

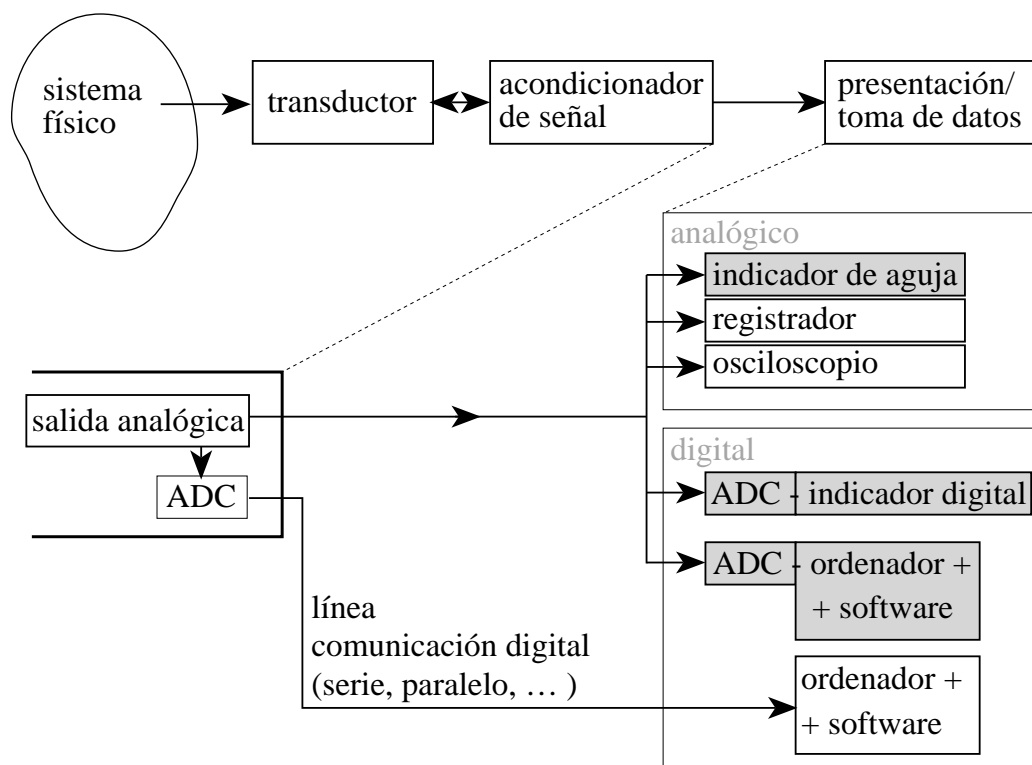


Figura 1.4.1 Dispositivos de presentación y toma de datos.

1.4 Presentación y toma de datos

La última etapa en la cadena de medida es la presentación y/o toma de datos. La figura 1.4.1 muestra algunas de las posibilidades. En primer lugar cabe distinguir la forma en que se transmite la señal desde la salida del acondicionador de señal hasta los dispositivos de presentación o toma de datos. Hay dos tipos fundamentales de transmisión de señal: analógico y digital. En el tipo analógico la señal es una diferencia de potencial entre el conductor de señal y el de referencia (tierra analógica). En el tipo digital la señal analógica se convierte en un valor digital mediante un ADC (convertor analógico digital) y a continuación se transmite siguiendo alguno de los protocolos de comunicación existentes.

En segundo lugar, los dispositivos de presentación y toma de datos pueden clasificarse también en los tipos analógico y digital. En este caso la denominación “analógico” hace referencia a que se establece una analogía entre la variable a medir y el desplazamiento de un indicador móvil. Es el caso de un indicador de aguja en el que la aguja se desplaza sobre un limbo graduado en las unidades adecuadas. También es el caso del registrador en el que una plumilla se desplaza proporcionalmente a la señal en una dirección y proporcionalmente a otra señal (o al tiempo) en la dirección perpendicular. Con ello se pueden dibujar en un papel las curvas x-t (variable x-tiempo) o x-y (variable x-variable y).

El osciloscopio es similar al registrador pero en este caso la plumilla se sustituye por un pincel de rayos catódicos que “dibuja” la curva en un tubo de rayos catódicos, con lo que la velocidad de respuesta es mucho mayor que la que puede dar un registrador.

Hoy en día resultan más económicos y más efectivos los sistemas digitales. El indicador digital es el dispositivo más sencillo. En él se hace una primera conversión analógica-digital y a continuación se presenta el valor correspondiente en formato decimal. Cuando se trata de almacenar datos, la salida digital del ADC se introduce en un ordenador que lee el dato y lo almacena en la forma que requiera el usuario. Hoy en día existe una gran variedad de software de toma de datos que permite no solo el almacenamiento y tratamiento de los datos, sino también la presentación en pantalla en

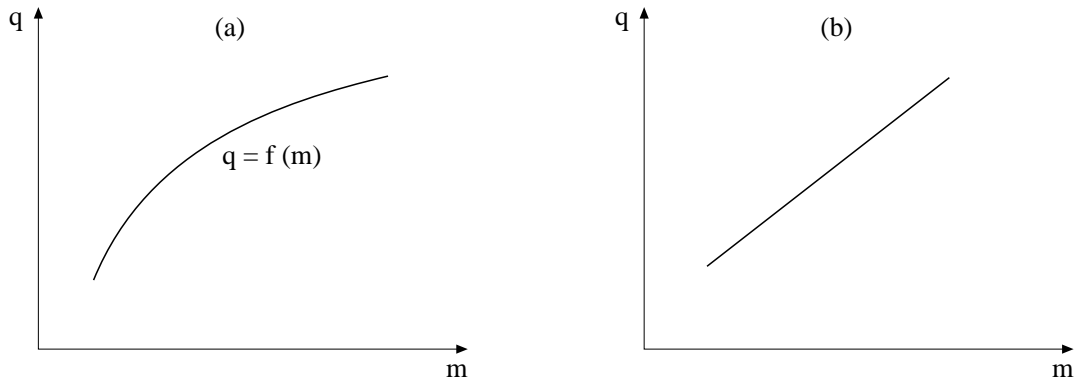


Figura 1.5.1 Curvas de respuesta estática: (a) general, (b) lineal

cualquier formato, incluyendo aparatos analógicos simulados.

Si la transmisión desde el acondicionador se realiza en forma digital, la señal puede dirigirse a un ordenador que, con el software adecuado, podrá efectuar la presentación y toma de datos.

1.5 Características estáticas de un transductor y de un sistema de medida

Como hemos visto, un sistema electrónico de medida está formado por un transductor y por los circuitos eléctricos que acondicionan y presentan o toman la señal. En sentido genérico, la *respuesta* del transductor o del sistema hace referencia a la relación que existe entre la magnitud física que queremos medir m y la salida del transductor q o del sistema M .

En general la respuesta en un instante t depende de las variaciones experimentadas por la variable m en instantes anteriores a t . Cuando m se ha mantenido a un valor constante durante un tiempo suficientemente largo (se dice entonces que se ha estabilizado el sistema) la relación entre m y q o M es unívoca. La función que relaciona m con q o con M en estas condiciones se denomina *función de respuesta estática* $f(m)$ y escribimos

$$q = f(m) \text{ o } M = f(m) \quad (1.5.1)$$

La representación gráfica de la función $f(m)$ en un diagrama como el de la Fig. 1.5.1a se denomina *curva de respuesta estática*. La curva de respuesta estática debería determinarse para cada transductor y sistema por comparación con aparatos patrón (aparatos cuya calibración ha sido garantizada por laboratorios oficialmente reconocidos). Cuando esto de verdad se lleva a cabo, la curva de respuesta estática coincide con la *curva de calibración*. En muchos casos se utiliza una función de respuesta estática teórica o promedio para un cierto tipo de transductores. En este caso el proceso de calibración se limita a comprobar (por comparación con aparatos patrón) que la respuesta real difiere de la teórica en menos de una cierta cantidad que se tiene por aceptable para este tipo de transductor.

Ejemplo 1.5.1 Un transductor muy utilizado en la medida de temperaturas es el termómetro de resistencia de platino. En los transductores de este tipo la función de respuesta estática viene dada por

$$R = \begin{cases} R_0 [1 + AT + BT^2 + C(T - T_e)T^3] & \text{para } -200 \text{ }^\circ\text{C} \leq T \leq 0 \text{ }^\circ\text{C} \\ R_0 [1 + AT + BT^2] & \text{para } 0 \text{ }^\circ\text{C} \leq T \leq 650 \text{ }^\circ\text{C} \end{cases} \quad (1.5.2)$$

donde R es la resistencia del transductor, T la temperatura Celsius, R_0 la resistencia del transductor a $0 \text{ }^\circ\text{C}$, y A , B , C y T_e son constantes iguales, respectivamente, a $3.90802 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, $-5.802 \times 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-2}$, $-4.27350 \times 10^{-12} \text{ }^\circ\text{C}^{-4}$ y $100 \text{ }^\circ\text{C}$.

Obviamente la función anterior es la respuesta de un transductor ideal. Para un transductor real, las normas establecen la máxima desviación admisible. Por ejemplo, la norma ASTM E 1137 define, por su precisión, dos clases de termómetros de resistencia de platino: los de clase A y los de clase B. Los de clase A son los que cumplen que la temperatura determinada usando la función anterior no difiere de la temperatura real (medida mediante un termómetro calibrado contra un patrón) en más de $(0.13 \text{ °C} + 0.0017|T|)$. Los de clase B admiten una diferencia de $(0.25 \text{ °C} + 0.0042|T|)$. □

Una clase de transductores interesantes desde el punto de vista de su aplicación es la de los transductores *lineales*, que son aquellos en los que la salida q varía linealmente con la magnitud a medir, es decir aquellos en los que

$$q = f(m) = Sm + q_0 \quad (1.5.3)$$

donde S y q_0 son constantes. Obviamente la curva de respuesta estática es una recta, tal como se esquematiza en la figura 1.5.1b.

La función de respuesta es la característica básica de un transductor o sistema de medida, pero no la única. A continuación se describen algunas de las características adicionales que deben tenerse en cuenta a la hora de seleccionar y utilizar un sistema.

1.5.1 Rango

El rango es el intervalo (limitado en ambos sentidos) en el que el transductor o sistema de medida puede utilizarse para realizar medidas. Se expresa especificando los límites inferior m_{\min} y superior m_{\max} del intervalo en cuestión. El rango puede quedar limitado por el transductor o por el sistema de acondicionamiento y presentación de señal. Por ejemplo, los termómetros de resistencia de platino pueden utilizarse en el intervalo cubierto por las funciones definidas en la ecuación (1.5.2), es decir, el rango de cualquier termómetro de resistencia de platino industrial es $[-200, 650] \text{ °C}$. Sin embargo, es posible encontrar equipos electrónicos cuyo rango esté limitado por las prestaciones de la electrónica (usualmente por la electrónica de linealización), por lo que el sistema de medida tendrá un rango de, por ejemplo $\pm 200 \text{ °C}$, indicándose de esta manera que el intervalo es $[-200, 200] \text{ °C}$.

En ciertos instrumentos de acondicionamiento de señal que dan la salida en tensión, es conveniente definir también el rango de salida. Por ejemplo, el dispositivo antes mencionado con un rango de entrada de $\pm 200 \text{ °C}$, podría tener un rango de salida de $[0, 10] \text{ V}$. Esto implica que cuando el instrumento está bien ajustado, a una temperatura de -200 °C corresponde una salida de 0 V , y a una temperatura de 200 °C una salida de 10 V .

Se define la escala total de medida (en inglés *span*) como la longitud del intervalo de medida, es decir como $m_{\max} - m_{\min}$. Muchos fabricantes utilizan la escala total para ajustar sus instrumentos, en particular para ajustar el factor de amplificación electrónica (la ganancia o *gain*). En el ejemplo anterior la escala total de medida es de 400 °C . La escala total de salida sería de 10 V para las condiciones supuestas y la amplificación se ajusta de modo que los 400 °C correspondan a los 10 V .

1.5.2 Sensibilidad estática

La sensibilidad estática de un transductor mide la variación de la magnitud de salida por unidad de variación de la magnitud a medir, en condiciones de medida estabilizada. En consecuencia, definimos la sensibilidad S , para un valor dado de m , como la derivada de la función de respuesta, es decir:

$$S = \frac{dq}{dm} = \frac{df(m)}{dm} = f'(m) \quad (1.5.4)$$

Obviamente, la sensibilidad es la pendiente de la tangente a la curva de respuesta en el punto considerado (véase la figura 1.5.2a). Como es obvio, la sensibilidad es constante si y sólo si la respuesta es lineal.

En algunos casos es interesante definir una sensibilidad media en un intervalo (m_1, m_2) como el

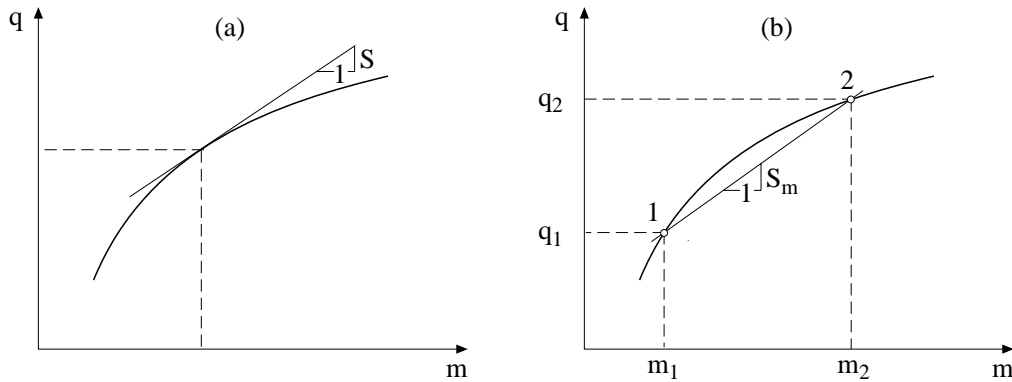


Figura 1.5.2 Definición de la sensibilidad: (a) sensibilidad en un punto (o sensibilidad tangente); (b) sensibilidad media (o sensibilidad secante).

cociente entre las variaciones de q y de m :

$$S_m = \frac{\Delta q}{\Delta m} = \frac{q_2 - q_1}{m_2 - m_1} = \frac{f(m_2) - f(m_1)}{m_2 - m_1} \quad (1.5.5)$$

En particular, la sensibilidad media en la escala total S_{met} viene dada por

$$S_{\text{met}} = \frac{q_{\text{max}} - q_{\text{min}}}{m_{\text{max}} - m_{\text{min}}} \quad (1.5.6)$$

Como puede verse en figura 1.5.2b, la sensibilidad media coincide con la pendiente de la secante que pasa por los puntos 1 y 2, por lo que se también se denomina en ocasiones *sensibilidad secante*. Dicha denominación se contrapone entonces a la de *sensibilidad tangente* para S .

En algunos casos es interesante definir la sensibilidad relativa al valor de la magnitud de salida en una situación de referencia. Por ejemplo la sensibilidad relativa referida a un punto (m_0, q_0) puede escribirse como

$$S_{r0} = \frac{S}{q_0} \quad (1.5.7)$$

De forma similar puede definirse la sensibilidad relativa media.

Ejemplo 1.5.2 En los termómetros de resistencia de platino del ejemplo anterior, la sensibilidad varía ligeramente con la temperatura. La ecuación que da la sensibilidad en función de la temperatura se obtiene de derivar la ecuación (1.5.2) con respecto a T :

$$S = \begin{cases} R_0 [A + 2BT + C(4T - 3T_e)T^2] & \text{para } -200^\circ\text{C} \leq T \leq 0^\circ\text{C} \\ R_0 [A + 2BT] & \text{para } 0^\circ\text{C} \leq T \leq 650^\circ\text{C} \end{cases} \quad (1.5.8)$$

siendo R_0 , A , B y C los definidos en el ejemplo anterior.

Como puede verse, la sensibilidad es proporcional a R_0 , por lo que resulta interesante definir la sensibilidad relativa al valor para 0°C , $S_{r0} = S/R_0$. Los valores de resistencia y de la sensibilidad relativa se recogen en la tabla que sigue para algunos valores de la temperatura.

T ($^\circ\text{C}$)	-200	0	100	300	600
R/R_0	0.18493	1.0000	1.3850	2.1202	3.1359
S/R_0 ($^\circ\text{C}^{-1}$)	0.0043281	0.0039080	0.0037920	0.0035599	0.0032118

Como puede verse la sensibilidad disminuye con la temperatura de forma apreciable. La sensibilidad relativa media entre 0 y 100 °C puede calcularse simplemente escribiendo

$$S_{mr0} = \frac{R(100) - R(0)}{R_0 100} = \frac{1.3850 - 1}{100} = 0.00385 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \quad (1.5.9)$$

que es un valor intermedio entre los de la sensibilidad para 0 y para 100 °C. \square

En algunos tipos de transductores pasivos, la señal de salida q es proporcional a la tensión de alimentación, y, en consecuencia, la sensibilidad es también proporcional a la misma. Para este tipo de transductor puede definirse un factor de sensibilidad α_S definido como

$$\alpha_S = \frac{q_{\max} - q_{\min}}{V_a} \quad (1.5.10)$$

donde V_a es la tensión de alimentación. Obviamente el factor de sensibilidad está relacionado con la sensibilidad media en la escala total

$$S_{\text{met}} = \alpha_S \frac{V_a}{m_{\max} - m_{\min}} \quad (1.5.11)$$

Es de notar que en los cuadros de características de transductores de este tipo aparece α_S con la denominación de sensibilidad. En todos los casos prácticos puede reconocerse que se hace referencia la factor de sensibilidad por las unidades. Por ejemplo si el cuadro de características de un transductor de desplazamiento con un rango de medida de ± 10 mm indica que tiene una sensibilidad de 2 mV/V, es obvio que el fabricante se refiere al factor de sensibilidad (puesto que incluye las dimensiones de voltio en el denominador). Si este transductor va a usarse en un acondicionador de señal con una tensión de alimentación de 5 Voltios, la sensibilidad media correspondiente será $S_{\text{met}} = 2 \times 5/20 = 0.5$ mV/mm (de lo que deducimos también que la señal de salida se expresa en mV).

1.5.3 Linealidad

La curva de calibración más sencilla es la lineal. Los transductores cuya salida es lineal requieren electrónicas más sencillas (y por tanto más baratas) y se encuentran frecuentemente en el mercado.

Ningún transductor es *exactamente* lineal. De hecho, hay transductores que son claramente no-lineales en intervalos amplios de medida y que, sin embargo, son aproximadamente lineales en intervalos reducidos.

La máxima desviación entre la curva de respuesta verdadera y la aproximación lineal utilizada es la no-linealidad del transductor o sistema, tal como ilustra la figura 1.5.3 en la que Δq es la no linealidad expresada en la variable de salida y Δm es la no-linealidad expresada en la variable a medir. Debe tenerse en cuenta que en la figura la no-linealidad está muy exagerada y que en la mayor parte de los casos prácticos la curva de respuesta es muy próxima a una recta.

Las hojas de características de los instrumentos suelen expresar la no-linealidad en porcentaje de la escala total.

Ejemplo 1.5.3 Como se ha visto en el primer ejemplo, la resistencia de un termómetro de platino varía con la temperatura de forma no lineal. Sin embargo, si nos interesa sólo el intervalo de temperaturas entre 0 y 100 °C, por ejemplo, podemos aproximar la ecuación no lineal por la ecuación

$$R = R_0[1 + (A + 100B)T] = R_0(1 + 0.00385T) \quad (1.5.12)$$

que coincide exactamente con la curva verdadera a 0 °C y a 100 °C. La diferencia x entre la aproximación lineal y la curva verdadera es

$$x = R_0[1 + (A + 100B)T - 1 - AT - BT^2] = R_0BT(100 - T)$$

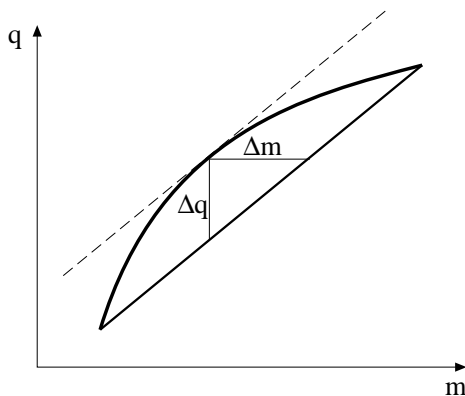


Figura 1.5.3 No-linealidad de un sistema de medida

El valor máximo de la diferencia se obtiene para $T = 50\text{ °C}$ y vale (en módulo)

$$\Delta R = 2500R_0B = 0.001451R_0$$

Esta es la no-linealidad del transductor en el rango considerado expresado en resistencia. Expresado en temperaturas, podemos utilizar la aproximación lineal (1.5.12) escrita en la forma $\Delta R = R_0(A + 100B)\Delta T$ y despejar ΔT :

$$\Delta T = \frac{\Delta R}{R_0(A + 100B)} = \frac{0.001451}{0.00385} = 0.377\text{ °C}$$

En términos porcentuales la no-linealidad es, por tanto, del 0.38% de la escala total (nótese que aceptamos que el rango de utilización de la expresión linealizada es válida en el rango de 0 a 100 °C). □

1.5.4 Resolución y umbral

La resolución de un transductor o sistema de medida es la variación mínima de la entrada para la que puede observarse una variación en la salida. En los indicadores analógicos está directamente relacionado con la graduación de la escala de lectura (las divisiones de una regla). En los instrumentos digitales está relacionado con el valor del dígito menos significativo (el situado más a la derecha en el indicador digital).

Los indicadores digitales se clasifican por el número de dígitos que incluyen en la presentación. Prescindiendo de la situación del punto decimal, un indicador de 3 dígitos, por ejemplo, puede presentar resultados desde -999 hasta 999. La resolución es de ± 1 , por lo que la resolución relativa es de $\pm 1/999 \approx 0.001$. Un indicador digital es de 3 dígitos y medio ($3\frac{1}{2}$ dígitos) cuando puede presentar cuatro dígitos de los cuales el de mayor orden puede tomar sólo los valores 0 y 1. Esto significa que puede representar números desde -1999 a 1999. En este caso la resolución relativa es de $\pm 1/1999 \approx 0.0005$.

El concepto de umbral es similar al de resolución, cuando la variación de señal tiene lugar a partir de cero. En buena parte de los transductores eléctricos el umbral coincide con la resolución, pero existen aparatos de medida, particularmente con elementos mecánicos, en los que el umbral es superior a la resolución.

1.5.5 Repetibilidad, histéresis y estabilidad

Para que una medida sea fiable, el sistema que se utiliza para efectuarla tiene que tener unas ciertas características que, dicho en general, garanticen que si el valor de la magnitud física no cambia, la medida será la misma independientemente de cómo y cuando se realice la medida.

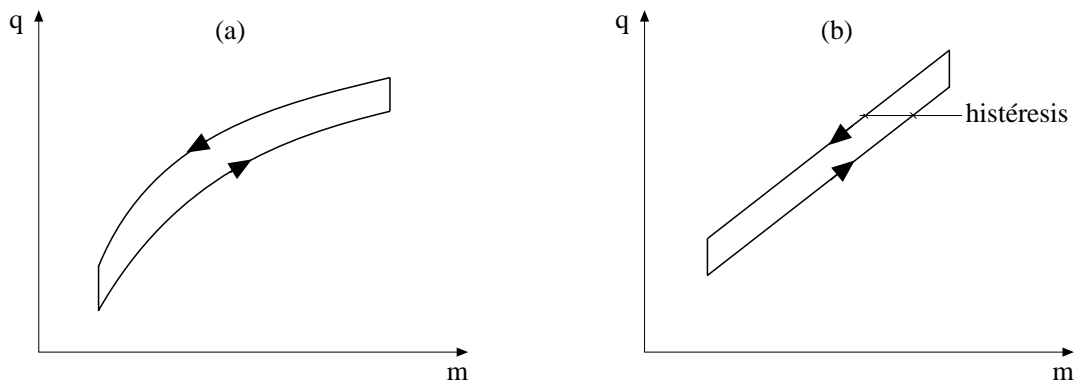


Figura 1.5.4 Histéresis: (a) caso general; (b) sistema lineal con histéresis constante

La repetibilidad es la capacidad del sistema de dar el mismo valor de la magnitud medida cuando se realizan distintas medidas en las mismas condiciones. La repetibilidad está caracterizada por la desviación típica σ de la medida.

La histéresis es el fenómeno por el cual el valor medido depende del sentido en el que se alcance el punto de medida. Por ejemplo, un transductor de desplazamiento puede no medir lo mismo si el desplazamiento está aumentando o disminuyendo. Esto significa que hay dos curvas de respuesta, una cuando la variable a medir está creciendo y otra cuando está decreciendo (Fig. 1.5.4). En sistemas lineales ideales la histéresis es constante (Fig. 1.5.4b) y está caracterizada por la distancia horizontal entre la rama ascendente y la descendente. En general la histéresis se caracterizará por la máxima distancia horizontal entre las ramas ascendente y descendente.

La estabilidad de un transductor o sistema de medida es su capacidad de mantener fija la curva de respuesta estática a lo largo del tiempo. En sistemas lineales la estabilidad puede cuantificarse dando la deriva del cero (cambio a lo largo del tiempo del término independiente en la función de respuesta) y la deriva de la sensibilidad (cambio a lo largo del tiempo de la sensibilidad).

En muchos casos es importante no sólo la estabilidad temporal, sino también la estabilidad térmica, que se define de forma similar a la estabilidad temporal como la capacidad de mantener fija la curva de respuesta estática cuando cambia la temperatura del entorno donde se realiza la medida.

La deriva térmica del cero suele expresarse como un porcentaje de la escala total por grado de variación de temperatura y la deriva térmica de la sensibilidad como un porcentaje del valor de la sensibilidad a 20°C por grado de variación de temperatura.

Bibliografía

- Daly, J. W., Riley, W. F., and McConnell, K. G. (1984) *Instrumentation for Engineering Measurements*. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Fraile, J. y García, P. (1995) *Instrumentación aplicada a la ingeniería*. Servicio de publicaciones de la ETS de I. de Caminos, Canales y Puertos.
- Johnson, C. D. (1997) *Process Control Instrumentation Technology*. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- Morris, A. S. (1993) *Principles of Measurement and Instrumentation*. Prentice Hall, New York.
- Nachtigal, C. L. Ed. (1990) *Instrumentation and Control; Fundamentals and Applications*. John Wiley & Sons, Inc., New York.