

CAPÍTULO DOS

CONCEPTOS BÁSICOS

2-1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se explica parte de la terminología usada en los métodos experimentales y se muestra el arreglo generalizado de un sistema experimental. También se exponen en forma breve los estándares disponibles y la importancia de la calibración en cualquier medición experimental. Una parte importante de la exposición de los errores experimentales aparece en el capítulo 3, aquí sólo se dan las definiciones de ciertos términos.

2-2 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS

La facilidad de lectura de un instrumento es objeto de frecuente interés. Este término indica la proximidad o cercanía con la cual puede leerse la escala del instrumento; un instrumento con una escala de 12 pulgadas tiene una legibilidad más alta que un instrumento con una escala de 6 pulgadas y la misma gama. La cuenta mínima es la diferencia más pequeña entre dos indicaciones detectables en la escala del instrumento. Ambas, facilidad de lectura y cuenta mínima, dependen de la longitud de la escala, espaciamiento de las graduaciones, tamaño del indicador (o pluma si se usa un registrador) y efectos de paralaje.

La sensibilidad de un instrumento es la razón del movimiento lineal del indicador en el instrumento al cambio en la variable medida que causa este movimiento: por ejemplo: un registrador de 1 mV puede tener una escala con 25 cm de longitud, su sensibilidad sería de 25cm/mV, suponiendo que la medición es lineal en toda la escala. Para la lectura de un instrumento digital, el término "sensibilidad" no tiene el mismo significado, porque pueden aplicarse diferentes factores de escala con solo oprimir un botón. Sin embargo, el fabricante por lo general especifica la sensibilidad para una cierta posición en la escala, es decir, 100 nA en una escala de 200 μ A para medición de corriente.

Se dice que un instrumento exhibe histéresis cuando hay una diferencia en las lecturas, dependiendo de que el valor de la cantidad medida se acerque de arriba o de abajo. La histéresis puede ser el resultado del rozamiento mecánico, efectos magnéticos, deformación elástica o efectos térmicos.

La exactitud de un instrumento indica la desviación de la lectura respecto de una entrada conocida. Es común expresar la exactitud como un porcentaje de la lectura de la escala completa, de modo que un manómetro de 100 KPa con una exactitud del 1%, es exacto dentro ± 1 KPa a plena escala del manómetro.

La precisión de un instrumento indica su capacidad para reproducir cierta lectura con una exactitud dada. Como ejemplo de la distinción entre precisión y exactitud, considérese la medición de una tensión conocida de 100 volts (V) con un cierto medidor. Se toman cinco lecturas y los valores encontrados son 104, 103, 105, 103 y 105 V. Con estos valores adviértase que no puede dependerse del instrumento para obtener una exactitud mejor del 5% (5 V), en tanto que se indica una precisión de $\pm 1\%$, ya que la desviación máxima de la lectura media de 104 V es 1 V nada más. Obsérvese que el instrumento puede calibrarse de modo que se puede usar con dependencia para medir tensiones dentro de ± 1 V. Este ejemplo muestra un punto importante: la exactitud puede mejorarse por calibración, pero no más allá de la precisión del instrumento. Por lo general la precisión de un instrumento está sujeta a muchos factores complicados y requiere técnicas especiales de análisis, las que se exponen en el capítulo 3.

En esta ocasión, conviene alertar al lector acerca de ciertos términos de análisis de datos que aparecen en el capítulo 3. La exactitud se acaba de definir como la relación de la desviación de la lectura de un instrumento respecto de un valor conocido. La desviación se llama error. En muchas situaciones experimentales no se tiene un valor conocido para compararlo con las lecturas del instrumento; sin embargo, se puede confiar en que el instrumento esté dentro de un margen mayor o menor del valor real.

En tales casos, se dice que el margen expresa la incertidumbre de las lecturas del instrumento. Muchos investigadores no son muy cuidadosos con las palabras "error" e "incertidumbre". Como se verá en el capítulo 3, la incertidumbre es el término que debe aplicarse con más frecuencia a los instrumentos.

2-3 CALIBRACIÓN

La calibración de todo instrumento es importante, porque permite verificar el instrumento contra un patrón (o estándar) conocido y reducir, por lo tanto, los errores de exactitud. Los procedimientos de calibración implican una comparación del instrumento particular con: 1) un patrón primario; 2) un patrón secundario con una mayor exactitud que la del instrumento que se calibra, o 3) con una fuente de entrada conocida. Por ejemplo, un medidor de flujo puede calibrarse por 1) comparación con una tabla estándar de medición de flujo del National Bureau of Standards; 2) comparándolo con otro medidor de flujo de exactitud conocida, o 3) calibración directa con una medición directa primaria como el peso de cierta cantidad de agua en un recipiente y el registro del tiempo transcurrido para que esta cantidad fluya a través del medidor. En el punto 2, las palabras claves son "exactitud conocida". El significado aquí es que la exactitud del medidor debe especificarse mediante una fuente confiable. La importancia de la calibración no puede dejar de recalcarse ya que establece la exactitud de los instrumentos. Mejor que aceptar la lectura de un instrumento, es preferible efectuar cuando menos una calibración de verificación para asegurarse de la validez de las mediciones. Aun las especificaciones o calibraciones de los fabricantes no siempre pueden tomarse como idóneas. La mayoría de los fabricantes de instrumentos son confiables, pero algunos no. El libro proporciona más información acerca de los métodos de calibración, conforme se exponen los diversos instrumentos y sus exactitudes.

2-4 ESTÁNDARES

Con objeto de que los investigadores en diferentes partes del mundo puedan comparar los resultados de sus experimentos con bases consistentes, es necesario establecer ciertas unidades patrón o estándares de longitud, peso, temperatura, tiempo y magnitudes eléctricas. El National Bureau of Standards tiene la responsabilidad de mantener esos estándares en Estados Unidos.

El metro y el kilogramo se consideran unidades fundamentales sobre las cuales, mediante factores apropiados de conversión, se basa el sistema inglés de longitud y masa. El metro patrón o estándar se define como la longitud de una barra de platino e iridio mantenida en condiciones muy exactas en el International Bureau of Weights and Measures, en Sévres, Francia. En forma similar, el kilogramo se define en términos de una masa de platino e iridio y se conserva en esa misma oficina.

Los factores de conversión de los sistemas inglés y métrico en Estados Unidos los fija la ley como:

$$\begin{aligned}1 \text{ metro} &= 39.37 \text{ pulgadas} \\1 \text{ libra-masa} &= 453.59237 \text{ gramos}\end{aligned}$$

Los estándares secundarios de longitud y masa se mantienen en el National Bureau of Standards para fines de calibración. En 1960, la Conferencia General de Pesas y Medidas definió el metro patrón en términos de la longitud de onda de la luz anaranjada de una lámpara de criptón 86. El metro patrón es, por tanto:

$$1 \text{ metro} = 1\,650\,763.73 \text{ longitudes de onda}$$

En el futuro cercano se espera que la definición se cambie a la distancia que la luz recorre en $1/299\,792\,458$ de segundo. Para la medición, la luz de un láser de helio-neón ilumina al yodo, el cual fluoresce a una frecuencia altamente estable.

La pulgada se define como:

$$1 \text{ pulgada} = 2.54 \text{ centímetros}$$

Las unidades estándar de tiempo se establecen en términos de frecuencias conocidas de la oscilación de ciertos dispositivos. Uno de los dispositivos más simples es un péndulo. También puede usarse un sistema vibracional torsional como un estándar de frecuencia. El sistema torsional se usa ampliamente en los relojes. En ciertas circunstancias, el voltaje de línea a 60 Hertz (Hz) puede usarse como un estándar de frecuencia. Un reloj eléctrico usa esta frecuencia como estándar, debido a que opera con un motor sincrónico cuya velocidad depende de la frecuencia de la línea. Un diapason de afinación es una fuente adecuada de frecuencia, como lo son los cristales piezoeléctricos. También pueden diseñarse osciladores electrónicos como fuentes de frecuencia muy precisas.

La unidad fundamental de tiempo, el segundo (s), se definió en el pasado como $1/86\,400$ del día solar medio. El día solar se mide como el intervalo de tiempo entre dos tránsitos sucesivos del Sol a través de un meridiano terrestre. El intervalo varía con la localidad en la tierra y el tiempo del año; sin embargo, el día solar medio para un año es constante. El año solar es el tiempo que la tierra requiere para completar una revolución alrededor del Sol. El año solar medio es de 365 días 5 h 48 min 48 s.

La definición anterior del segundo es bastante exacta, pero depende de las observaciones astronómicas con objeto de establecer el estándar. En octubre de 1967, la Decimotercera Conferencia General de Pesas y Medidas definió al segundo como la duración de 9 192 631 770 periodos de la radiación correspondiente a la transición entre dos niveles hiperfinos del estado fundamental del átomo de cesio 133 (referencia [7]). Este estándar puede reproducirse con facilidad en los laboratorios de estándares en todo el mundo. La exactitud estimada de este estándar es de dos partes en 10^9 .

La estación de radio WWV del National Bureau of Standards transmite estándares muy precisos de frecuencia y tiempo. Esta estación proporciona intervalos estándares de tiempo, señales de tiempo, tonos musicales, frecuencias de radio y pronósticos de propagación de radio. La exactitud de las frecuencias de radio y audio, como se transmiten, son mejores que una parte en cien millones, y el intervalo de tiempo es exacto a una parte de $100\,000\,000 \pm 1$ microsegundo (μs).

Las unidades estándares de cantidades eléctricas se derivan de las unidades mecánicas de fuerza, masa, longitud y tiempo. Estas unidades representan las unidades eléctricas absolutas y difieren ligeramente del sistema internacional de unidades eléctricas establecido en 1948. En las referencias [1] y [2] se da una descripción detallada del sistema internacional. La ventaja principal de este sistema es que permite establecer una pila patrón o estándar, cuya salida puede relacionarse en forma directa con las unidades eléctricas absolutas. La conversión del sistema internacional la establecen las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned}1 \text{ ohm internacional} &= 1.00049 \text{ ohms absolutos} \\1 \text{ volt internacional} &= 1.000330 \text{ volts absolutos} \\1 \text{ amper internacional} &= 0.99835 \text{ amper absoluto}\end{aligned}$$

Por lo general, la calibración en laboratorio se efectúa con la ayuda de patrones o estándares secundarios como pilas patrón para fuentes de tensión y resistencias patrón, como patrones de comparación para la medición de resistencia eléctrica.

En 1854, Lord Kelvin propuso una escala absoluta de temperatura, la cual establece las bases de los cálculos termodinámicos. Esta escala absoluta está definida de modo que se da significado particular a la segunda ley de la termodinámica cuando se usa esta escala de temperatura. La escala internacional práctica de temperatura de 1968 [2] suministra una base experimental para una escala de temperatura que se aproxima en lo posible a la escala absoluta de temperatura termodinámica. En la escala internacional, se establecen 11 puntos primarios, como se muestra en la tabla 2-1. También se establecen puntos secundarios, que están en la tabla 2-2. Además de los puntos fijos, se establecen procedimientos precisos a fin de interpolar entre estos puntos. Estos procedimientos de interpolación están en la tabla 2-3.

Ambas escalas, la Fahrenheit ($^{\circ}F$) y la Celsius ($^{\circ}C$), tienen un amplio uso y el investigador debe trabajar con cualquiera de ellas. La escala Fahrenheit absoluta se llama escala Rankine ($^{\circ}R$), en tanto que la escala absoluta Celsius se designa como escala Kelvin (K). Las relaciones entre éstas son:

$$^{\circ}\text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273.15$$

$$^{\circ}\text{R} = ^{\circ}\text{F} + 459.67$$

$$^{\circ}\text{F} = \frac{9}{5}^{\circ}\text{C} + 32.0$$

Tabla 2-1 (1968)

Puntos fundamentales para la escala práctica internacional de temperatura

Temperatura

Punto

Presión normal = 14.6959 psia = 1.032 x 10⁵ Pa

Punto triple de equilibrio del hidrógeno	-259.34	-434.81
Punto de ebullición de equilibrio del hidrógeno a 25/76 de presión normal	-256.108	-428.99
Punto normal de ebullición (1 atm) de equilibrio del hidrógeno	-252.87	-423.17
Punto normal de ebullición del neón	-246.048	-410.89
Punto triple del oxígeno	-218.7,89	-361.82
Punto normal de ebullición del oxígeno	-182.962	-297.33
Punto triple del agua	0.01	32.018
Punto normal de ebullición del agua	100	212.00
Punto normal de congelación del zinc	419.58	787.24
Punto normal de congelación de la plata	961.93	1763.47
Punto normal de congelación del oro	1064.43	1947.97

2-6 EL SISTEMA GENERALIZADO DE MEDIDAS

La mayor parte de los sistemas de medición pueden dividirse en tres partes:

1. Una etapa de detector-transductor, que detecta la variable física y realiza una transformación mecánica o eléctrica para convertir la señal en una forma más práctica. En sentido general, un transductor es un dispositivo que transforma un efecto físico en otro. Sin embargo, en la mayor parte de los casos la variable física se transforma en una señal eléctrica, debido a que ésta es la forma o señal que se mide con más facilidad.
2. Una etapa intermedia, que modifica la señal directa por amplificación, filtrado u otro medio, de modo que esté disponible una salida deseable.
3. Una etapa de terminación que indica, registra o controla la variable que se mide.

Como ejemplo de un sistema de medición, considérese la medición de una señal de bajo voltaje a alta frecuencia. Puede ser sólo un arreglo de resistencia y dos alambres. Ya que se ha indicado o registrado el voltaje, es necesario realizar cierta amplificación; entonces, la etapa de amplificación es la etapa 2 designada arriba. La etapa final del sistema de medición puede ser un voltímetro o un registrador que opere en la gama de voltaje de salida del amplificador; en realidad, un voltímetro electrónico es un sistema similar al descrito aquí. El amplificador y el voltímetro de lectura están contenidos en una caja, y los siguientes interruptores permiten que el usuario cambie la escala del instrumento por la variación de las condiciones de entrada al amplificador.

Figura 2.1 Manómetro de presión con tubo Bourdon como el sistema generalizado de medición.

Considérese el manómetro de presión con tubo Bourdon mostrado en la figura 2.1. Este medidor ofrece otro ejemplo del sistema generalizado de medición. En este caso, el tubo Bourdon es la etapa detector-transductor, ya que convierte a la señal de presión en un desplazamiento mecánico del tubo. La

etapa intermedia consiste en el arreglo de engranes, el cual amplifica al desplazamiento del extremo del tubo, de modo que un desplazamiento relativamente pequeño en este punto produce tres cuartos de revolución del engranaje central. La etapa indicadora final consiste en el indicador y el arreglo de la carátula, el cual, cuando se calibra con entradas conocidas de presión, indica la señal de presión inducida en el tubo de Bourdon. En la figura 2.2 se muestra un diagrama esquemático del sistema de medición generalizado.

Cuando un dispositivo de control se usa para la etapa final de medición, es necesario aplicar cierta señal de retroalimentación a la señal de entrada para realizar los objetivos de control. La etapa de control compara la señal que representa la variable medida con otra señal similar, la que representa el valor asignado que la variable medida debiera tener. El valor asignado lo da un ajuste predeterminado del controlador. Si la señal medida coincide con el ajuste predeterminado, entonces el controlador no hace nada. Si las señales no coinciden, el controlador emite una señal a un dispositivo, el cual actúa para alterar el valor de la variable medida. Este dispositivo puede ser muchas cosas, dependiendo de la variable que se controla. Si la variable medida es el gasto de un fluido, el dispositivo de control puede ser una válvula motorizada colocada en el sistema de flujo. Si el gasto del flujo medido es demasiado alto, entonces el controlador provoca que la válvula motorizada cierre, reduciendo el gasto. Si el gasto es demasiado bajo, la válvula se abre. Finalmente la operación cesa cuando se logra el gasto deseado. La función de retroalimentación para control se indica en la figura 2.2.

Figura 2.2 Esquema del sistema generalizado de medición.

Es muy importante advertir que la exactitud del control no es mejor que la exactitud de medición de la variable controlada; por lo tanto, se debe medir con exactitud una variable física antes de esperar controlar la variable. En el sistema de flujo mencionado, el controlador más elaborado no puede controlar el gasto mejor que la exactitud con la que el elemento sensor primario mide el flujo. Se abunda acerca de algunos sistemas simples de control en un capítulo posterior. En este punto se desea hacer hincapié en la importancia del sistema de medición en cualquier arreglo de control.

El esquema global del sistema generalizado de medición es bastante simple y, como puede intuirse, los problemas difíciles se encuentran cuando se buscan dispositivos adecuados para llenar los requisitos de cada una de las "cajas" del diagrama esquemático. La mayor parte de los otros capítulos del libro se ocupan de los tipos de detectores, transductores, etapas modificadoras, etc., que pueden llenar estas cajas.

2-7 CONCEPTOS BÁSICOS EN LAS MEDICIONES DINÁMICAS

Una medición estática de una cantidad física se efectúa cuando la cantidad no cambia con el tiempo. La deflexión de una viga con carga constante puede ser una deflexión estática; sin embargo, si se establecen vibraciones en la viga, la deflexión varía con el tiempo y el proceso de medición puede complicarse. Las mediciones de los procesos de flujo son más fáciles de realizar cuando el flujo está en estado estacionario, y se vuelve más difícil conforme ocurran cambios rápidos en el tiempo.

Muchas mediciones experimentales se realizan en circunstancias tales, que se cuenta con suficiente tiempo para que el sistema de medición alcance el estado estacionario y, por lo tanto, no es necesario preocuparse del comportamiento bajo condiciones de estado no estacionario. Sin embargo, en muchas otras situaciones puede ser deseable determinar el comportamiento de una variable física en un periodo de tiempo. Algunas veces el intervalo es corto, y algunas otras puede ser extenso. En cualquier circunstancia, el problema de medición se complica cuando se necesita considerar las características transitorias de un sistema. En esta sección se exponen algunas de las características más importantes y los parámetros aplicables a un sistema de medición bajo condiciones dinámicas.

Para iniciar la exposición, tómese un sistema amortiguador simple de una masa y un resorte, como se muestra en la figura 2.3. Puede considerársele como un sistema simple de medición mecánica, donde $x_3(t)$ es la variable de entrada del desplazamiento que actúa mediante el arreglo de resorte, masa y amortiguador, a fin de producir un desplazamiento de salida $x_2(t)$. Ambas, x_1 y x_2 , varían con el tiempo. Supóngase que se desea encontrar $x_2(t)$, conociendo $x_1(t)$, m , k , y la constante de amortiguación c . Se supone que la fuerza amortiguadora es proporcional a la velocidad, y que la ecuación diferencial que describe el sistema se obtiene mediante la segunda ley de Newton del movimiento:

$$k(x_1 - x_2) + c\left(\frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_2}{dt}\right) = m \frac{d^2 x_2}{dt^2} \quad (2.5)$$

Escrita de otra forma:

$$m \frac{d^2 x_2}{dt^2} + c \frac{dx_2}{dt} + kx_2 = c \frac{dx_1}{dt} + kx_1 \quad (2.6)$$

Ahora supóngase que $x_1(t)$ es la función armónica:

$$x_1(t) = x_0 \cos \omega_1 t \quad (2.7)$$

donde x_0 es la amplitud del desplazamiento y ω_1 es la frecuencia.

$$F(t) = F_0 \cos \omega_1 t \quad (2.8)$$

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = F_0 \cos \omega_1 t \quad (2.9)$$

La ecuación 2.9 tiene la solución:

$$x = \frac{(F_0/k) \cos(\omega_1 t - \phi)}{\left\{1 - (\omega_1/\omega_n)^2\right\}^2 + [2(c/c_c)(\omega_1/\omega_n)]^2}^{1/2} \quad (2.10)$$

donde:

$$\phi = \tan^{-1} \frac{2(c/c_c)(\omega_1/\omega_n)}{1 - (\omega_1/\omega_n)^2} \quad (2.11)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.12)$$

$$c_c = 2\sqrt{mk} \quad (2.13)$$