

Capítulo 1

Introducción

1.1 INSTRUMENTACION. INSTRUMENTACION ELECTRONICA

La instrumentación es la ciencia que trata de los medios y métodos para obtener y procesar información sobre las diversas magnitudes físicas y químicas.

La instrumentación electrónica es aquella que se basa en principios eléctricos o electrónicos para realizar su función. Según su objetivo, pueden señalarse dos tipos de instrumentos electrónicos: los dedicados a la medida de magnitudes eléctricas (tensión, corriente, impedancia, etc.), y los destinados a la medida de otras magnitudes, empleando medios electrónicos y, en concreto, transductores. Este libro trata sobre algunos de los instrumentos básicos del primer tipo.

Para abordar el estudio de los instrumentos electrónicos se puede proceder clasificándolos en diversos grupos, y luego considerar cada uno de ellos por separado. Un primer criterio de clasificación puede ser el método de medida. Se habla de instrumentos analógicos, cuando la magnitud deseada se mide de forma continua. En los instrumentos digitales, en cambio, se realiza una medida discreta, es decir, en un instante o intervalo de tiempo. En este caso, si la magnitud medida evoluciona con el tiempo, para obtener un resultado correcto hay que medir con suficiente asiduidad.

Desde el mismo punto de vista, se pueden diferenciar los instrumentos que miden por comparación de los que miden por deflexión. En los primeros se compara la magnitud a medir con otra bien conocida, mientras que en los segundos lo que realmente se mide es el efecto de dicha magnitud sobre un dispositivo calibrado. Ejemplos respectivos son el puente de Wheatstone y un galvanómetro.

Según el método de presentación se distingue también entre instrumentos analógicos e instrumentos con presentación numérica (digitales). En los del primer tipo, el resultado de la medida se indica por medio de la posición de un

indicador sobre una escala, o a través de la posición de un punto en un sistema de presentación gráfica. A igualdad de tiempo, estos instrumentos dan mayor cantidad de información que los digitales. Compárese, si no, una curva con la tabla de valores que la describen. No obstante, los errores debidos a la posición relativa entre el operador y la escala (paralaje), y la escasa resolución que permiten los sistemas gráficos (unos 0,3 mm), los sitúan en posición desfavorable respecto a los instrumentos con presentación numérica.

Cualquiera de los criterios de clasificación anteriores es exhaustivo, si bien cada vez hay más instrumentos de tipo mixto. El criterio que se sigue aquí es distinto, pues hace referencia a la función realizada por el instrumento. Ciertamente, la variedad de instrumentos presentes en el mercado y sus cualidades permitirían crear numerosísimos grupos, y ello sería menos adecuado que seguir cualquiera de los criterios expuestos.

No obstante, prescindiendo de las cualidades singulares, se pueden señalar cinco grupos de instrumentos básicos: los osciloscopios, para presentar visualmente formas de onda; los multímetros, para medir tensiones continuas, y otras magnitudes eléctricas que puedan convertirse, de forma simple, en tensiones continuas; los frecuencímetros, para medir frecuencias y tiempos; los medidores de impedancias eléctricas, y parámetros asociados; y los generadores de señales, como instrumentos auxiliares para la medida. A cada uno de estos grupos se dedica un capítulo.

1.2 CONCEPTO DE MEDIDA. TERMINOLOGIA

La medida de una magnitud física es el proceso mediante el cual se asigna un valor numérico a la cualidad deseada, de acuerdo con una regla predeterminada, basada en la experimentación (no exclusivamente en el raciocinio). La medida permite representar dicha cualidad mediante señales, que pueden ser procesadas mediante instrumentos electrónicos.

Desde el punto de vista del usuario las medidas se pueden clasificar en directas e indirectas. En una medida directa, el valor numérico de la magnitud medida se obtiene a partir de una sola lectura en un instrumento. En una medida indirecta, dicho valor se obtiene a partir de una ley que relaciona los valores de otras magnitudes con la de interés. Es necesario, pues, hacer un cálculo para obtener el resultado. Las medidas directas no excluyen que, internamente, el instrumento convierta unas magnitudes en otras, o realice cálculos con determinados resultados, antes de la presentación del resultado final.

La exactitud de un instrumento de medida es la propiedad que caracteriza su capacidad de dar un resultado próximo al verdadero valor de la magnitud medida.

La repetibilidad de un instrumento de medida es la propiedad que caracteriza su capacidad de dar siempre el mismo resultado, al medir la misma magnitud, prescindiendo de si coincide o no con el verdadero valor de ésta. Esta cualidad se designa a veces con el término «precision» en inglés, pero, en

castellano, exactitud («accuracy» en inglés) y precisión se suelen considerar como sinónimos. Pero está claro que repetibilidad y exactitud son conceptos distintos.

La reproducibilidad se refiere al mismo hecho que la repetibilidad, pero cuando se determina el mismo parámetro con un conjunto de medidas a largo plazo, o realizadas por distintas personas con distintos aparatos.

La resolución de un instrumento de medida es la propiedad que caracteriza su capacidad de reaccionar a pequeños cambios de la magnitud medida. Tener buena resolución es una condición necesaria pero no suficiente para tener un instrumento de medida adecuado.

1.3 ERRORES DE MEDIDA

Se dice que en una medida hay un error cuando existe una discrepancia entre el resultado obtenido y el verdadero valor de la magnitud medida. Esta discrepancia no es sinónimo de incorrección, antes al contrario, es inevitable que en toda medida se tenga un cierto error. Precisamente del conocimiento de este error se pueden deducir informaciones tales como la validez del método de medida empleado, o la corrección en la utilización de los instrumentos.

Además de conocer el error, en todas las medidas suele interesar también su reducción. El método de reducción depende del tipo de error, de acuerdo con su clasificación en aberrantes, sistemáticos y aleatorios.

1.3.1 Errores aberrantes

Se consideran como errores aberrantes aquellos que aparecen un número reducido de veces, respecto al total de medidas de la misma magnitud realizadas. Se denominan también errores parásitos, groseros, ilegítimos, o, simplemente, equivocaciones. Tal como sugieren estas denominaciones, el resultado de una medida que esté afectado por un error de este tipo se considera que es falso. En consecuencia, debe ser eliminado del conjunto de resultados obtenidos, después de haber repetido reiteradamente la medida.

1.3.2 Errores sistemáticos

Se dice de un error que es sistemático cuando al realizar sucesivas medidas de una misma magnitud con un determinado valor, y en las mismas condiciones, o bien permanece constante, o bien varía de acuerdo con una ley definida al cambiar las condiciones de medida. Producen un sesgo (bias) en las medidas, que, si se detecta, se puede corregir.

La existencia de errores sistemáticos en un instrumento de medida se puede conocer a base de contrastar su lectura con la que ofrece un instrumento de referencia o patrón, proceso denominado «calibración». Normalmente, en todo instrumento hay simultáneamente errores sistemáticos multiplicativos, es decir, que dependen del valor de la magnitud medida, y aditivos, es decir, que no

dependen del valor de la magnitud medida. Por esto suelen expresarse como «tanto por ciento de la lectura más un tanto por ciento del valor de fondo de escala», o «tanto por ciento de la lectura más un umbral», o de alguna otra forma equivalente.

Las circunstancias de medida, tanto climáticas (temperatura, humedad,...), como mecánicas (posición, vibraciones,...) o eléctricas (tensión y frecuencia de red), entre otras, suelen influir en el valor de los errores sistemáticos de los instrumentos. Por ello, deben indicarse las circunstancias en las que son válidos los errores especificados, y los factores de corrección a considerar cuando éstas cambien.

La presencia de errores sistemáticos en una medida puede ser descubierta si para medir la misma magnitud se emplean dos instrumentos distintos, o dos métodos distintos, o si dan la lectura dos personas distintas (en instrumentos que no tengan presentación digital), o cambiando de forma ordenada las condiciones de medida, y viendo su repercusión en el resultado.

La causa de un error sistemático puede ser conocida y, en cambio, su eliminación puede que sea poco práctica o incluso imposible. Puede también que sea desconocida, pero en cambio haya sido establecida empíricamente en función de determinadas variables conocidas.

Cuando hay varias fuentes de errores sistemáticos conviene conocer el valor máximo del error debido a cada una de ellas. Entonces, para conocer el error global hay que combinar todos estos errores individuales. Si se procede a una suma de valores absolutos, los resultados pueden ser muy conservadores. Si se procede a una suma cuadrática, se está suponiendo que las fuentes de error son independientes, cosa que no siempre es cierta. No obstante, este último método suele ser el más habitual.

En cualquier caso, la expresión de la indeterminación en la medida debe ser coherente con el número de cifras del resultado de ésta. No se puede hablar, por ejemplo, de $4,5 \text{ V} \pm 20 \text{ mV}$, ni de $4,54 \text{ V} \pm 0,1 \text{ V}$, o de $50 \text{ Hz} \pm 0,1 \%$. Tampoco es lógico que dicha indeterminación se dé con un número de cifras elevado, puesto que no se conoce con la precisión necesaria.

1.3.3 Errores aleatorios

Los errores aleatorios son los que permanecen una vez eliminadas las causas de errores sistemáticos (y excluidos los errores aberrantes). Se manifiestan cuando se mide repetidamente la misma magnitud, con el mismo instrumento y el mismo método. Presentan las propiedades siguientes:

- 1) Los errores aleatorios positivos y negativos de igual valor absoluto, tienen igual probabilidad de producirse.
- 2) Los errores aleatorios son tanto menos probables cuanto mayor sea su valor.
- 3) Al aumentar el número de medidas, la media aritmética de los errores aleatorios de un conjunto de medidas tiende a cero.
- 4) Para un método de medida determinado, los errores aleatorios no exceden de cierto valor.

Los errores aleatorios se denominan también errores accidentales o fortuitos. Esto ya da a entender que pueden ser inevitables. La ausencia de variaciones de unas a otras lecturas, cuando se está realizando una serie de medidas de la misma magnitud con el mismo sistema de medida, no es necesariamente una indicación de ausencia de errores aleatorios. Puede suceder, por ejemplo, que el instrumento no tenga suficiente resolución. Esto es lo que sucede habitualmente con los instrumentos electrónicos comunes. No obstante, cuando se consideran varios instrumentos iguales, midiendo la misma magnitud, los errores sistemáticos de cada uno de ellos se tratan como errores aleatorios entre sí. Por ello, se sugiere al lector interesado en medidas de muy alta precisión que consulte un texto de estadística aplicada, o las normas ISO que se citan en la bibliografía.

La presencia de errores aleatorios hace que, después de realizar una o varias medidas de una determinada magnitud, se tenga una incertidumbre sobre el verdadero valor de ésta (valor «exacto»). Cuanto mayor sea dicha incertidumbre, más imprecisa es la medida. Si además hay errores sistemáticos, el resultado final diferirá del correcto y, por tanto, la medida será inexacta. Puede suceder, pues, que una medida sea exacta pero imprecisa, o que sea precisa pero inexacta.

En la práctica, pueden producirse errores sistemáticos y aleatorios simultáneamente. Incluso puede suceder que una misma fuente de error produzca un error sistemático o aleatorio según el caso. Lamentablemente, no hay una regla única para combinarlos (suma lineal, suma cuadrática,...), por lo que conviene especificarla al dar el resultado.

La consecuencia final de la presencia de errores de uno u otro tipo, o de ambos, es una discrepancia entre el resultado de la medida y el verdadero valor de la magnitud. La diferencia entre ambas cantidades se denomina error absoluto. Algunas veces se da en forma de porcentaje respecto al valor máximo de la lectura que puede dar el instrumento en la escala considerada. Se habla entonces de errores a fondo de escala. En cambio, el cociente entre el error absoluto y el verdadero valor de la magnitud medida se denomina error relativo, y suele expresarse en tanto por ciento.

El límite máximo del error relativo determina la denominada «clase de precisión» —exactitud— del instrumento. Si, por ejemplo, dicho límite es de $\pm 0,1\%$, se trata de un instrumento de clase 0,1. La cantidad 0,1 se designa entonces como «índice de clase».

1.4 PROPAGACION DE ERRORES EN MEDIDAS INDIRECTAS

Cuando el valor de la magnitud de interés no se obtiene directamente a partir de la lectura de un instrumento, sino a través de un cálculo realizado sobre las lecturas de dos o más instrumentos, cuyos errores son conocidos, surge el problema de conocer cuál es el error asociado al resultado final.

Limitándonos al caso de los errores sistemáticos, que son los de interés en los instrumentos que nos ocupan, la situación se puede formular del modo siguiente, en un caso concreto. Supóngase que una determinada magnitud z se

obtiene a partir del producto de otras dos, x e y . El error relativo en la medida de cada una de éstas se supone conocido. Se tiene entonces

$$z = x \cdot y$$

y tomando diferenciales

$$dz = y \cdot dx + x \cdot dy$$

Dividiendo ambos miembros por z , resulta

$$\frac{dz}{z} = \frac{dx}{x} + \frac{dy}{y}$$

Si los errores relativos en x y en y son suficientemente pequeños, se pueden sustituir las diferenciales por incrementos. Se obtiene así

$$\frac{\Delta z}{z} = \frac{\Delta x}{x} + \frac{\Delta y}{y}$$

Es decir, el error porcentual en z es igual a la suma de los errores porcentuales en x y en y . Obsérvese que se hubiera obtenido la misma expresión si se hubieran tomado logaritmos neperianos al principio, y luego se hubiera derivado. Si la relación entre magnitudes no es multiplicativa, sino de otro tipo, se puede proceder de forma similar.

Ejemplo:

Para medir la potencia entregada por una fuente de señal, se mide la caída de tensión que produce al conectarla a una carga de $50 \Omega \pm 5\%$. Si el resultado obtenido es de $12,0 \text{ V} \pm 1\%$, ¿cuál es la potencia que suministra?

Solución:

La potencia viene dada por:

$$P = V^2/R$$

Derivando, y sustituyendo después diferenciales por incrementos, resulta, si se considera el caso más desfavorable (incrementos de signos opuestos),

$$\frac{\Delta P}{P} = 2 \frac{\Delta V}{V} + \frac{\Delta R}{R}$$

Sustituyendo los valores numéricos, $\Delta P/P = 2 \cdot 0,01 + 0,05 = 0,07$. El resultado

será, pues: $2,88 \text{ W} \pm 7 \%$, o, de forma más correcta: $2,9 \text{ W} \pm 7 \%$, o, si se prefiere, $2,9 \text{ W} \pm 0,2 \text{ W}$.

En este mismo ejemplo, se puede observar que si el error relativo en la medida de tensión fuera de un 10% , el error en la potencia, según el método anterior, sería del 25% . Si en cambio se calcula directamente, mediante la expresión de P , cuando la tensión es de $(12 - 1,2) \text{ V}$, y la resistencia es $(50 + 2,5) \Omega$, se obtiene un error del $30,5 \%$. Esta discrepancia se debe al hecho apuntado anteriormente: no se pueden sustituir diferenciales por incrementos cuando éstos son grandes.

1.5 UNIDADES DE MEDIDA

La expresión completa del resultado de una medida implica dar, además del valor numérico y el margen de indeterminación, la unidad de la magnitud medida. En ingeniería se emplea habitualmente el Sistema Internacional de unidades (SI) junto con otras unidades que no son de este sistema, pero cuya utilización está aceptada.

Tabla 1.1 Algunas magnitudes y unidades del SI con sus símbolos.

<i>Magnitud</i>		<i>Unidad SI</i>	
<i>Nombre</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Nombre</i>	<i>Símbolo</i>
corriente eléctrica	I	amperio	A
carga eléctrica	Q	culombio	C
campo eléctrico	E	voltio por metro	V/m
potencial eléctrico	V	voltio	V
diferencia de potencial	$U (V)$	voltio	V
fuerza electromotriz	E	voltio	V
capacidad	C	faradio	F
permitividad	ϵ	faradio por metro	F/m
campo magnético	H	amperio por metro	A/m
inducción magnética	B	tesla	T
flujo magnético	Φ	weber	Wb
autoinductancia	L	henrio	H
inductancia mutua	M, L_{12}	henrio	H
permeabilidad	μ	henrio por metro	H/m
resistencia	R	ohmio	Ω
conductancia	G	siemens	S
resistividad	ρ	ohmio metro	$\Omega \cdot \text{m}$
conductividad	γ, σ	siemens por metro	S/m
desfase	Ψ, θ	radián	rad
impedancia	Z	ohmio	Ω
reactancia	X	ohmio	Ω
admitancia	Y	siemens	S
susceptancia	B	siemens	S
potencia	P	vatio	W
frecuencia	f, ν	hercio	Hz
frecuencia angular	ω	radián por segundo	rad/s

Tabla 1.2 Múltiplos y submúltiplos de las unidades del SI.

<i>prefijo</i>	<i>símbolo</i>	<i>valor</i>
exa	E	10^{18}
peta	P	10^{15}
tera	T	10^{12}
giga	G	10^9
mega	M	10^6
kilo	k	10^3
hecto	h	10^2
deca	da	10
deci	d	10^{-1}
centi	c	10^{-2}
mili	m	10^{-3}
micro	μ	10^{-6}
nano	n	10^{-9}
pico	p	10^{-12}
femto	f	10^{-15}
atto	a	10^{-18}

La magnitud eléctrica fundamental en el SI es la intensidad de corriente eléctrica y su símbolo I . La unidad, fundamental, correspondiente es el amperio (símbolo A). Las magnitudes derivadas, que tienen interés en este libro, así como sus símbolos, y las unidades correspondientes junto con sus símbolos respectivos figuran en la tabla 1.1.

Para los múltiplos y submúltiplos de las unidades del SI, los prefijos y sus símbolos aparecen en la tabla 1.2, junto con su valor. El prefijo junto con la unidad forma un nuevo símbolo con el que se pueden hacer cálculos o combinaciones con otros símbolos.

En la tabla 1.3 figuran algunas unidades que no son del SI, pero de utilización aceptada, así como sus símbolos. Se recomienda no formar nombres compuestos con unidades de esta tabla y unidades del SI. Por ejemplo, kWh.

Para la escritura de los símbolos de las unidades, y sus múltiplos, hay que tener en cuenta las siguientes reglas:

1) No deben emplearse prefijos compuestos. Es incorrecto escribir $1 \mu\mu\text{F}$. Hay que poner 1 pF .

Tabla 1.3 Unidades que no son del SI, pero de utilización aceptada.

<i>unidad</i>	<i>símbolo</i>
minuto	min
hora	h
día	d
grado	°
minuto	'
segundo	"

2) Los símbolos de unidades derivadas de nombres propios se escriben con mayúscula. Ejemplo: 10 V, no 10 v.

3) Los símbolos son invariables al plural. Ejemplo, 40 dB, y no 40 dBs.

4) Los símbolos no llevan punto final (no son abreviaturas). Poner 10 min., en vez de 10 min, es incorrecto.

5) Hay que dejar un solo espacio en blanco entre el valor numérico y el símbolo de la unidad. Por ejemplo, no debe escribirse 5s, sino 5 s. Como excepciones a esta regla, están los símbolos de las unidades de ángulo plano, el de tanto por ciento, y el de grados Celsius (en medidas de temperatura). Así, por ejemplo: 30°15'30'', 60%, y 20°C.

6) En unidades compuestas deben emplearse los símbolos de multiplicación o división. No hay que emplear, pues, cps, bps, ni ppm, sino Hz, b/s y partes/10⁶, respectivamente.