

UNIDAD 1

Conceptos generales de medición

Objetivo:

El alumno describirá los conceptos generales de las mediciones y de los instrumentos

1.1 EL SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES

El sistema internacional de unidades (SI) es la base de la Metrología moderna, algunas veces también es conocido como "Sistema Métrico Moderno". Los nombres de algunas de las siguientes unidades fueron cuidadosamente tomadas del Sistema Internacional de Unidades francés establecido en 1960 por la 11a General Conference of Weights and Measures. Los Estados Unidos de América y la mayoría de otras naciones se suscribieron a esta conferencia y al uso del SI para propósitos legales, científicos y técnicos.

El sistema internacional de medidas se usa a nivel mundial y es la base de todas las medidas modernas.

El ente máximo encargado de la comprobación física de todas las unidades base es la National Physical Laboratory for Physical Measurements (NPL), su sede se encuentra en el Reino Unido y sus laboratorios trabajan con normas primarias.

www.npl.co.uk

Unidades básicas

Magnitud: longitud

Unidad básica: metro: longitud del trayecto recorrido por la luz en el vacío, durante un intervalo de tiempo $1/299\,792\,458$ en un segundo. (17a CGPM (1983), resolución 1).

Símbolo **m**

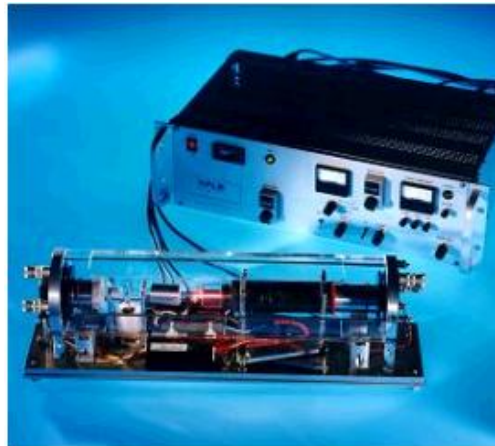


Fig. 1.1 Sistema para medir la unidad básica metro.

Magnitud: Masa

Unidad básica: kilogramo: es la unidad de masa; es igual a la masa del prototipo internacional del kilogramo (3ª CGPM (1901)).

El prototipo está hecho de platino (90%) e iridio (10%) y está localizado en Sevres, Francia.

Símbolo **kg**



Fig. 1.2 Prototipo del kilogramo

Magnitud: tiempo

Unidad básica: segundo: es la duración de 9 192 631 770 periodos de la radiación correspondiente a la transición entre los dos niveles hiperfinos del estado fundamental del átomo de Cesio-133 (13ª. CGPM (1967), resolución 1).

Símbolo **s**

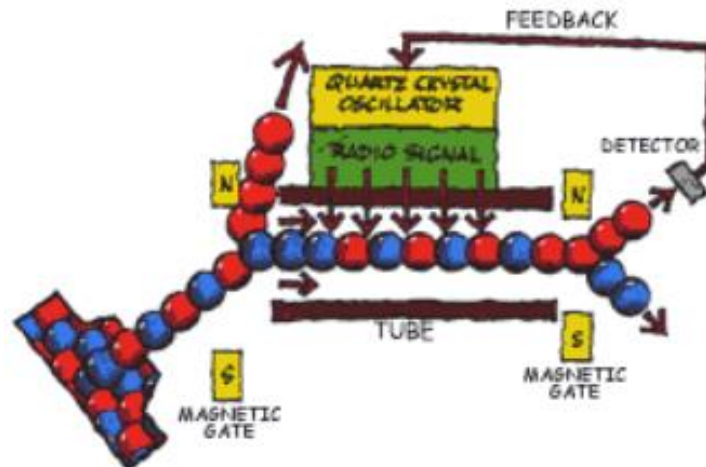


Fig. 1.3 Representación simbólica de la medida del segundo

Magnitud: Corriente eléctrica

Unidad básica: Amper: es la intensidad de corriente eléctrica constante que, si se mantiene en 2 conductores rectos paralelos de longitud infinita, de sección transversal circular despreciable, y distanciados un metro en el vacío, produciría entre estos dos conductores una fuerza igual a 2×10^{-7} Newton por metro de longitud. (CIPM (1946), resolución 2 aprobada por la 9ª .CGPM (1948)).

Símbolo **A**

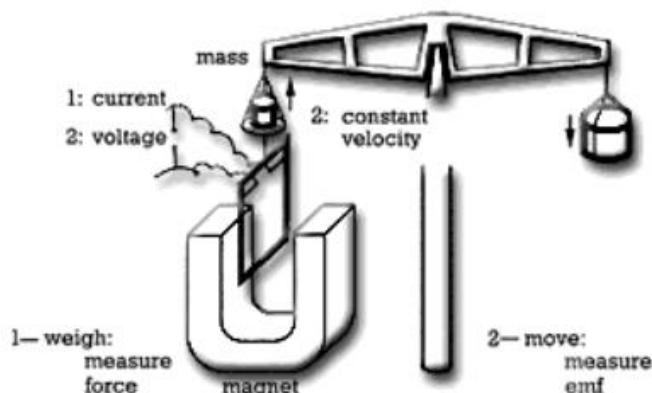


Fig. 1.4 Representación esquemática para la medida estándar de Ampere.

Magnitud: Temperatura termodinámica

Unidad básica: Kelvin: unidad de temperatura, es $1/273.16$ de la temperatura termodinámica del punto triple de agua. (13 CGPM (1967), resolución 4).

Símbolo **K**

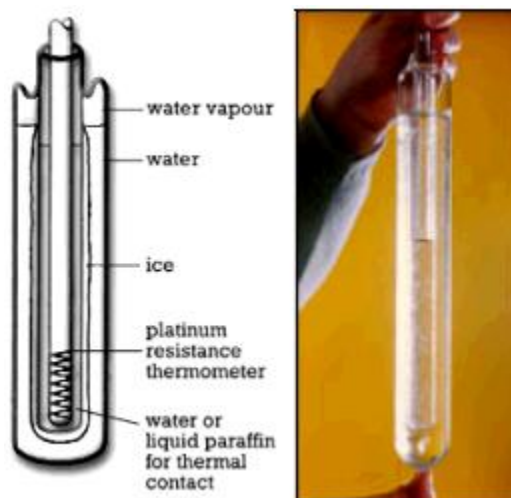


Fig. 1.5 Sistema para la medición de la temperatura termodinámica.

Magnitud: Cantidad de sustancia

Unidad básica: Mol: es la cantidad de sustancia de un sistema que contiene tantas unidades elementales como átomos existen en 0.012 kilogramos de carbono 14. Cuando se utiliza el mol, las unidades elementales se deben identificar y pueden ser átomos, moléculas, iones electrones, otras partículas, o grupos de tales partículas. (14 CGPM (1971), resolución 3).

Símbolo **mol**

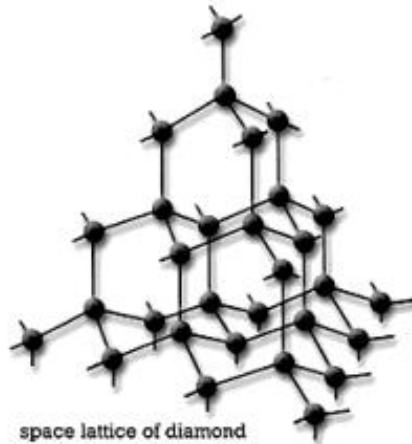


Fig. 1.6 Representación simbólica del mol.

Magnitud: Intensidad luminosa

Unidad básica: Candela: es la intensidad luminosa en una dirección determinada, de una fuente que emite una radiación monocromática con una frecuencia de 540×10^{12} Hz y cuya intensidad radiante, en la dirección determinada es de $1/683$ watts por estereorradián. (16ª. CGPM (1979), resolución 3).

Símbolo **cd**

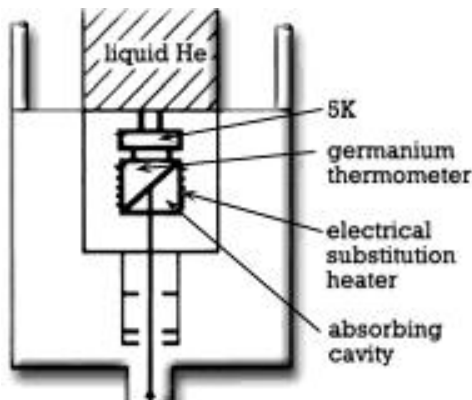


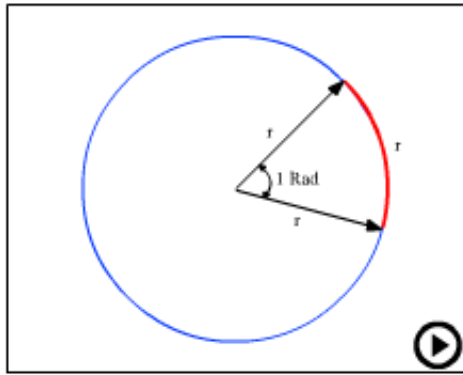
Fig. 1.7 Representación simbólica de la medida de intensidad luminosa.

Unidades suplementarias

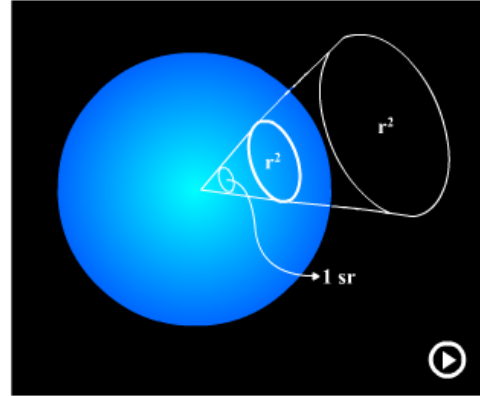
Existen dos unidades suplementarias dentro del SI, el ángulo plano y el ángulo sólido, ambas son adimensionales.

La unidad de medida de un ángulo plano es el **radian (rad)**, este es definido como el ángulo plano con vértice en el centro de un círculo que es soportado por un arco igual en longitud al radio.

$$1 \text{ rad} = 1\text{m (arco)} / 1\text{m (radio)} = 1$$



a) Radián



b) Esterradián

Fig. 1.8 Representación simbólica de a) radian y b) esterradián

Unidades suplementarias

Ángulo sólido: La unidad de medida de un ángulo sólido es el **estereorradián (sr)**. Este es definido como el ángulo sólido con vértice en el centro de una esfera que comprende el área igual a r^2 .

$$1 \text{ sr} = 1\text{m}^2 (\text{área}) / 1\text{m}^2 (\text{esfera})=1$$

Unidades Derivadas

Estas unidades se obtienen a partir de las unidades de base y de las unidades suplementarias y se expresan utilizando los símbolos matemáticos de multiplicación y división.

Tabla No. 1.1 algunas unidades derivadas

Parámetro	unidad	Abreviatura	Valor
Frecuencia	Hertz	Hz	1/s
Fuerza	Newton	N	Kg.m/s ²
Presión	Pascal	Pa	N/m ²
Energía, trabajo, cantidad de calor	Joule	J	N.m
Potencia	Vatio	Watt	J/s
Potencial eléctrico, diferencia de potencial, tensión fuerza electromotriz.	Voltio	Volt	W/A
Resistencia eléctrica	Ohm	Ω	V/A
Carga eléctrica, cantidad de electricidad	Coulomb	C	A.s
Capacitancia eléctrica	Farad	F	C/V
Conductancia	Siemens	S	A/V
Flujo de inducción magnético, Flujo magnético	Weber	Wb	V.s
Densidad de flujo magnético, Inducción magnética	Tesla	T	Wb/m ²
Inductancia	Henrio	H	Wb/A
Temperatura en Celsius	Grado Celsius	°C	K
Flujo luminoso	Lumen	lm	cd.sr
Iluminancia	Lux	lx	lm/m ²
Actividad (núcleo radioactivo)	Becquerel	Bq	1/s
Dosis absorbida, energía específica impartida kerma, índice absorbida	Gray	Gy	J/kg
Dosis equivalente	Sievert	Sv	M ² s ⁻²

1.2 PATRONES DE MEDIDA Y CALIBRACIÓN

Patrón: Representación física de una unidad de medición. Una unidad se realiza con referencia a un patrón material arbitrario o un fenómeno natural incluyendo constantes físicas o atómicas.

- Patrón Internacional
- Patrón Primario
- Patrón secundario
- De trabajo o laboratorio

Calibración

Es aquel conjunto de operaciones con las que se establece, en unas condiciones específicas la correspondencia entre los valores indicados en el instrumento, equipo o sistema de medida, o por los valores representados por una medida materializada o material de referencia, y los valores conocidos correspondientes a una magnitud de medida o patrón, asegurando así la trazabilidad de las medidas a las correspondientes unidades básicas del Sistema Internacional (SI).

Trazabilidad

Se define como la propiedad de medición física o química, o del valor de un patrón por medio de la cual estos pueden ser relacionados o con referencias establecidas, en este caso los patrones nacionales, a través de una cadena interrumpida de comparaciones.

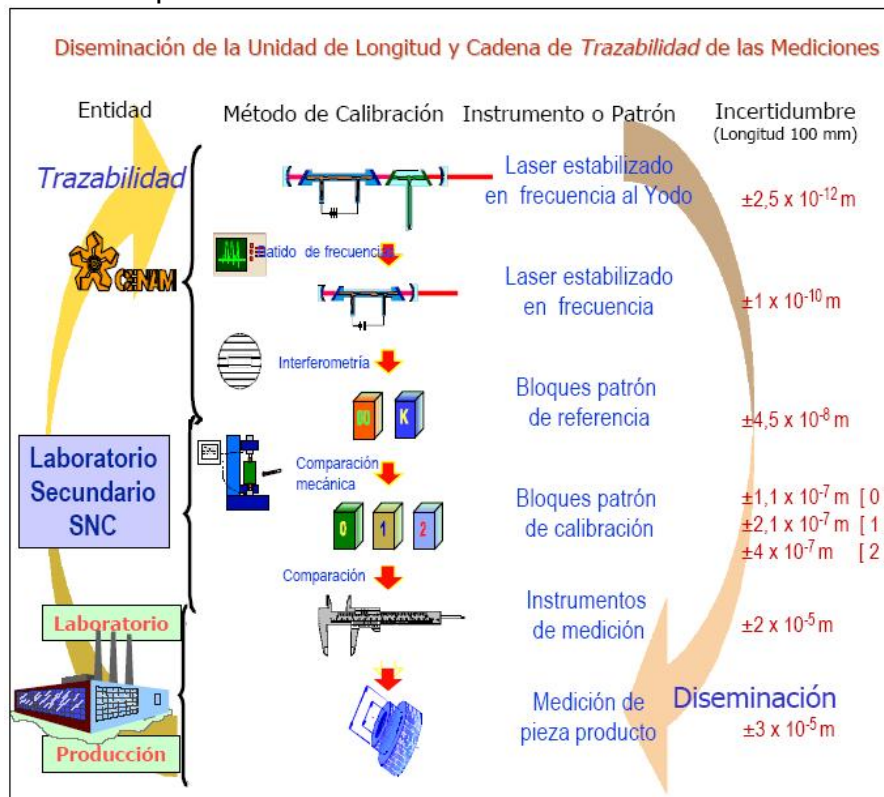


Fig. 1.9 Trazabilidad para el patrón nacional de la unidad de longitud.

1.3 CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE MEDICIÓN

La operación de un sistema de medición se define en términos de las características estáticas y dinámicas.

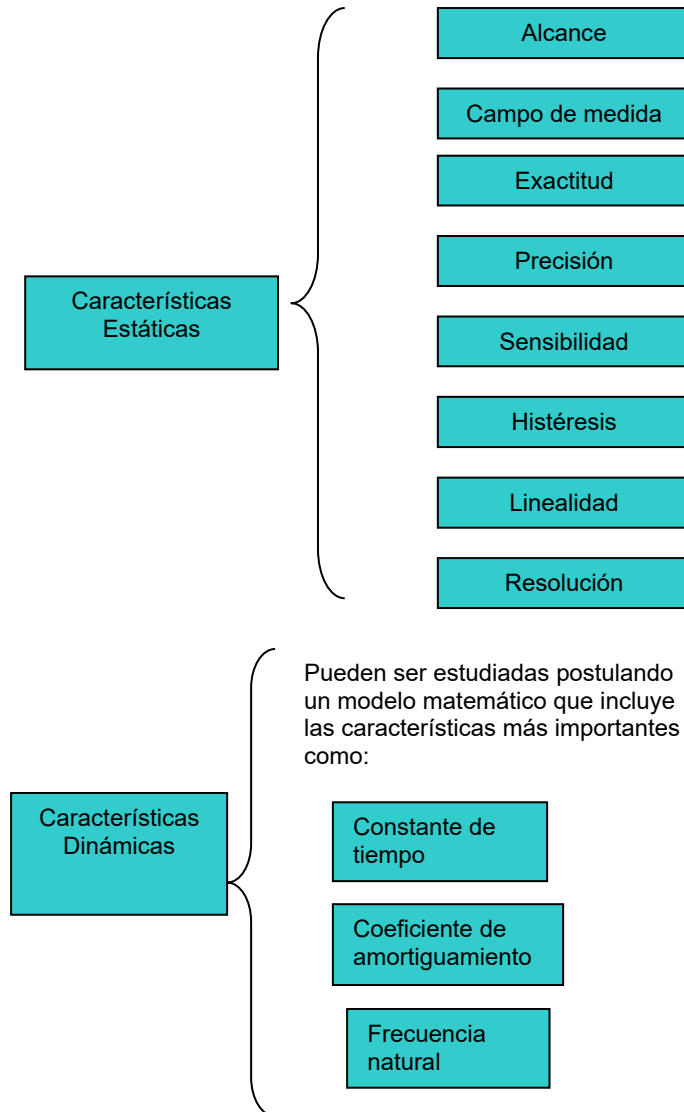


Fig. 1.10 Características estáticas y dinámicas de un sistema de medición.

- **Alcance:** Se especifica como los valores máximo y mínimo que un instrumento que es capaz de medir. También se le conoce como el término de “fondo de escala”. Por ejemplo el sensor LM35 tiene la capacidad de detectar temperaturas de -55°C a 150°C .
- **Campo de medida (range):** Es el intervalo dinámico de operación de un instrumento y se refiere al conjunto de valores comprendidos entre los

límites superior e inferior, siguiendo con el ejemplo del sensor de temperatura el campo de medida sería de 205 °C.

- **Exactitud:** La cercanía con la cual la lectura de un instrumento se aproxima al valor verdadero de la variable medida.
- **Precisión:** Reproducibilidad de la magnitud y al número de cifras con las que se pueden expresar con seguridad el resultado, incertidumbre relativa de la magnitud.
- **Sensibilidad:** o factor de escala es la pendiente de la curva de calibración que puede o no ser constante a lo largo de la escala de medida. Ejemplo: para un sensor cuya salida este relacionada con la entrada x mediante la ecuación $y = f(x)$, la sensibilidad en el punto x_0 , es

$$S(x_0) = \left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=x_0}$$

- **Histéresis:** Es la desviación de la señal de salida del sensor en el punto específico de la señal de entrada. Se puede obtener de la siguiente manera:

$$H(I) = O(I)_{I\downarrow} - O(I)_{I\uparrow}$$

donde: O es la salida

I es la entrada

- **Linealidad:** Es la exactitud de un sistema de medición en todo el intervalo en el cual es capaz de medir lecturas pequeñas o grandes al principio de la escala o al final de la escala. Se dice también que un elemento es lineal si los valores correspondientes de entrada y salida están sobre una línea recta. Por otro lado la no linealidad puede definirse en términos de una función $N(I)$ que es la diferencia entre el comportamiento de la línea recta real y la ideal, es decir:

$$N(I) = O(I) - (KI + a)$$

Donde:

$O(I)$ = Es el valor real de la salida.

$(KI + a)$ = Salida ideal dado por la ecuación de la recta, K es la pendiente, I es la variable de entrada y a es la ordenada al origen.

- **Resolución:** En algunos elementos se caracteriza por una salida que crece en una serie de escalones o saltos discretos en respuesta en un aumento continuo en la entrada. Se define como el mayor cambio en la entrada que puede ocurrir sin cambio correspondiente en la salida.

1.4 Clasificación de instrumentos

Al querer realizar una clasificación de instrumentos de medida se puede partir desde varios puntos de vista,

Instrumentos de medida analógicos

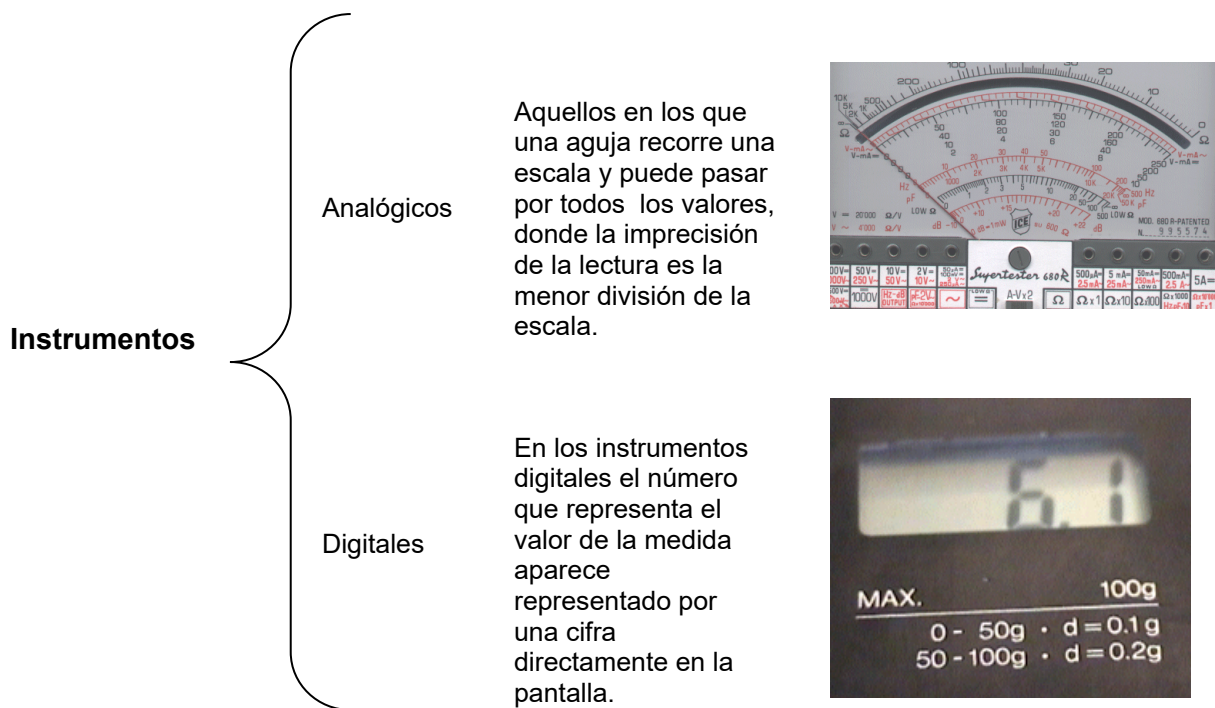
Son aquellos que presentan la medida mediante una aguja móvil que se desplaza por escala graduada. En los instrumentos de medida se puede leer como una cifra numérica (dígitos) en una pantalla. Los instrumentos de medida analógicos tuvieron una gran demanda en sus inicios y aunque en la actualidad todavía son utilizados el desarrollo de los circuitos integrados está haciendo que estos queden cada vez más relegados por los digitales.

En principio general de funcionamiento de los aparatos analógicos es el siguiente. Por lo general, la corriente a medir se hace circular por una bobina que puede girar sobre un eje. Esta bobina se introduce en el seno de un campo magnético, que puede ser generado por un imán. La corriente a medir genera en la bobina en la bobina móvil en un determinado sentido. Solidaria a la bobina móvil se fija la aguja medidora sobre una escala graduada. Además, se incluye un muelle, generalmente de forma circular, que se opone al movimiento de la aguja. Cuando los pares de fuerza de la bobina y del muelle antagonista se igualan se obtiene la medida leyendo el desplazamiento de la aguja sobre la escala graduada.

Tienden a ser sustituidos cada vez más por los digitales, sobre todo en los aparatos de medida portátiles. Sin embargo, en los aparatos de medida que son de control, mando y distribución de las instalaciones eléctricas, se siguen empleando los instrumentos analógicos. Hay que pensar que los aparatos de cuadro suelen estar dispuestos para que un operario con una visualización rápida revise el estado de todas. Las magnitudes eléctricas. Siempre es más visual, fotográfico y rápido de interpretar la situación en una determinada posición de una aguja sobre una escala de un aparato de medida analógico que la interpretación de una cifra numérica en uno digital.

Instrumentos de medida digitales

En los instrumentos digitales no existe ningún elemento mecánico. La medida se realiza gracias a complejos circuitos electrónicos en forma de circuitos integrados. El resultado de la medida se presenta en una pantalla o display en forma de cifra numérica o dígitos. Presentan varias ventajas que les hace ideales para la mayoría de las aplicaciones. Por lo general, son más precisos que los analógicos. La lectura de la medida es mucho más cómoda, ya que se lee directamente la cifra en la pantalla sin tener que interpretar una escala graduada. Esto les hace ideales en uso como aparatos portátiles, donde es muy importante una lectura rápida y precisa de la medida. Son muy robustos, aguantan fuertes impactos y vibraciones de su funcionamiento. Esto último se debe a que en su estructura no existen elementos móviles.



1.5 Errores en la medición

Un principio básico de todo sistema de medición es el de medir una magnitud con el menor error posible. Siempre existe un grado de incertidumbre puesto que es imposible realizar una medición sin modificar en mayor o menor grado aquello que se mide¹. Así mismo existen variables incontroladas como el ambiente, el envejecimiento de los componentes, el ruido, etc, que añaden nuevos errores. Los términos más generales para cuantificar el error en una medición son el error absoluto y el error relativo.

Error: Desviación a partir del valor real de la variable medida.

Error absoluto = valor medido – valor verdadero

Error relativo= Error absoluto / valor verdadero

¹ Hasta la llegada de la mecánica cuántica se pensaba que la exactitud de una medida estaba únicamente limitada por la exactitud del instrumento empleado para realizarla, pero en 1927 el físico W. Heisenberg demostró que no se podía en un instante dado la posición y el momento de un electrón por muy exactos que fueran los instrumentos empleados y, por tanto, no se podría determinar con exactitud cuál sería el movimiento o la posición en un instante posterior, salvo en términos de probabilidad.

Por otro lado, los errores se suelen clasificar en errores sistemáticos y aleatorios. Ambos son en principio independientes por lo que si el error sistemático de una magnitud x es $\pm k_1 x$ y el aleatorio es $\pm k_2 x$, el error total es:

$$error = \sqrt{(k_1 x)^2 + (k_2 x)^2}$$

Errores sistemáticos { Ambientales (humedad, presión, temperatura)
Instrumentales (donde existe fricción)

Errores aleatorios: Se manifiestan cuando se mide repetidamente la misma magnitud con el mismo instrumento y método. Para cuantificarlos se emplean métodos estadísticos.

Propagación de errores

Los sistemas de medición están compuestos por subsistemas que presentan errores. ¿Cómo cuantificar el error total? Supongamos que se tienen dos resistores en serie con un valor de $1000\Omega \pm 5\%$ y otro de $100\Omega \pm 10\%$. ¿Cuál es el valor total de la resistencia? Si consideramos el valor máximo y mínimo de la resistencia equivalente como:

$$R_{eq_max} = (1000 + 0.5 * 1000) + (100 + 0.1 * 100) = 1100 + 60$$

$$R_{eq_min} = (1000 - 0.5 * 1000) + (100 - 0.1 * 100) = 1100 - 60$$

Podríamos decir que la resistencia equivalente es de $1100 \pm 60\Omega$, equivalente a $1100\Omega \pm 5.5\%$. Sin embargo, es muy improbable que ambas resistencias presenten sus valores máximos y mínimos simultáneamente. (Depende de la distribución estadística del error) por lo que se estaría sobrestimando el error. En general cuando se suman dos números con errores $a \pm k_1 a$ y $b \pm k_2 b$, el resultado debería cuantificarse en términos estadísticos. Una aproximación al resultado teniendo en cuenta una distribución del error normal es: $(a + b) \pm e_r$, donde:

$$e_r = \sqrt{(k_1 a)^2 + (k_2 b)^2} \quad \text{-----}(1.1)$$

Así aplicando la ecu. 1.1 al ejemplo anterior el resultado sería: $1100\Omega \pm 4.64\%$.

Tabla 1.2 Resultados de operaciones básicas de números con errores.

Operación		Resultado	Resultado corregido
Suma	$(a \pm k_1 a) + (b \pm k_2 b)$	$(a + b) \pm (k_1 a + k_2 b)$	$(a + b) \pm \sqrt{(k_1 a)^2 + (k_2 b)^2}$
Diferencia	$(a \pm k_1 a) - (b \pm k_2 b)$	$(a - b) \pm (k_1 a + k_2 b)$	$(a - b) \pm \sqrt{(k_1 a)^2 + (k_2 b)^2}$
Producto*	$(a \pm k_1 a) \cdot (b \pm k_2 b)$	$ab \pm ab(k_1 + k_2)$	$ab \pm ab\sqrt{k_1^2 + k_2^2}$
Cociente*	$\frac{a \pm k_1 a}{b \pm k_2 b}$	$\frac{a}{b} \pm \frac{a}{b}(k_1 + k_2)$	$\frac{a}{b} \pm \frac{a}{b}\sqrt{k_1^2 + k_2^2}$

*Resultados cuando los errores porcentuales son pequeños

Ejercicio 1.1 Se pretende determinar la potencia consumida por un equipo midiendo la corriente y el voltaje, el ampermetro presenta un campo de medida de 0-50 A. y un error sobre la lectura de un $\pm 2\%$. El voltmetro presenta un fondo de campo de medida de 0-100V y un error sobre la lectura del $\pm 1\%$. Al efectuar la medición el instrumento indica 15 A y 60 V, por lo que la potencia consumida es en principio de 900 W. ¿Cuál es el error? (Guíese con la tabla 1.2)

Solución

Sin corrección del error

$$P = VI$$

$$P = (60)(15) \pm (60)(15)(0.02 + 0.01)$$

$$P = 900 \pm 27 \text{ Watts}$$

$$P = 900 \pm 3\%$$

Corrección del error utilizando la tabla 1.2

$$P = VI$$

$$P = (60)(15) \pm (60)(15)\sqrt{(0.02)^2 + (0.01)^2}$$

$$P = 900 \pm 20.125 \text{ Watts}$$

$$P = 900 \pm 2.236\%$$

$$P = 900 \pm 2.24\%$$

Ejercicio 1.2 Un sensor de nivel de líquido tiene un alcance de entrada de 0 a 15 cm. Utilice los resultados de calibración dados en la tabla para calcular la histéresis máxima como un porcentaje de deflexión de escala completa.

Nivel h (cm)	0.0	1.5	3.0	4.5	6.0	7.5	9.0	10.5	12.0	13.5	15.0
O/P Volts creciente	0.00	0.35	1.42	2.40	3.43	4.35	5.61	6.50	7.77	8.85	10.2
O/P Volts decreciente	0.14	1.25	2.32	3.55	4.43	5.7	6.78	7.8	8.87	9.65	10.2

Solución:

De la tabla se obtiene la histéresis máxima aplicando la siguiente expresión:

$$H(I) = O(I)_{I\downarrow} - O(I)_{I\uparrow}$$

$$\hat{H}(I) = 5.7 - 4.35 = 1.35 \quad \text{Esta es la histéresis máxima}$$

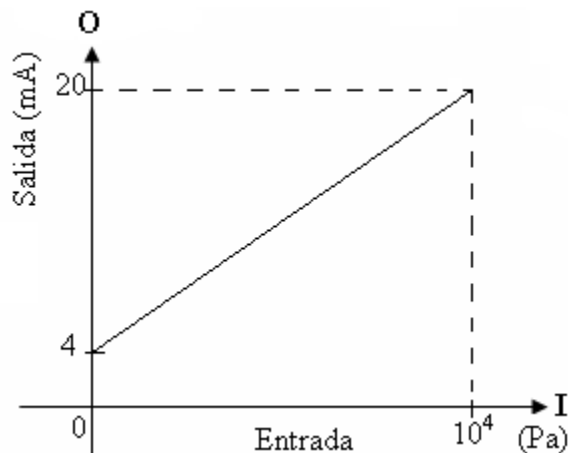
La Histéresis máxima como porcentaje de deflexión a escala completa se obtiene de la siguiente manera:

$$H(I)_{d.e.c} = \frac{\hat{H}}{O_{MAX} - O_{MIN}} \times 100\%$$

$$H(I)_{d.e.c} = \frac{1.35}{10.2 - 0} \times 100\%$$

$$H(I)_{d.e.c} = 13.23\%$$

Ejercicio 1.3 Obtenga la sensibilidad que tiene un transductor de presión que presenta el siguiente comportamiento de la grafica de calibración.



Solución

De la grafica del sensor se obtiene el modelo matemático que describe el comportamiento del sensor el cual corresponde a la siguiente ecuación:

$$O = (1.6 \times 10^{-3} I + 4) mA$$

La sensibilidad se obtiene derivando la ecuación del transductor

$$\frac{dO}{dI} = 1.6 \times 10^{-3} \text{ mA/Pa}$$