

## TEMA 1

# SISTEMAS DE UNIDADES DE MEDIDA

### Conceptos previos

Se define la *magnitud física* como aquella característica observable y medible de un fenómeno o cuerpo, caracterizado por su naturaleza, su unidad (de la misma naturaleza que ella), y su valor numérico o medida. De acuerdo con esto:

$$\begin{aligned} \text{Magnitud física} &= \text{medida} \times \text{unidad} \\ L &= 10 \times \text{m} \end{aligned}$$

El conjunto de magnitudes caracterizadas por el mismo atributo cualitativo, constituyen una *clase de magnitud*, como por ejemplo la fuerza. Se denomina en cambio *magnitud de influencia*, a cualquier magnitud que no es objeto de medición, pero que influye sobre el valor de la magnitud a medir o sobre el resultado de la medición. Estas magnitudes de influencia pueden clasificarse en general en cuatro grupos, según estén relacionadas con:

- El operador
- El instrumento de medida
- La propia pieza a medir
- Los agentes externos

*Medir* es determinar una magnitud comparando su extensión con otra de igual clase de magnitud determinada previamente, para ver cuantas veces contiene la una a la otra. Para que los resultados de las mediciones sean comparables, es necesario que la magnitud que se toma como referencia o término de comparación sea la misma y de valor constante. A estas magnitudes fijas es a las que se les da el nombre de *unidades de medida*. Su valor numérico se admite convencionalmente como uno. Por otra parte, se entenderá *medida* como aquel resultado obtenido en una medición.

Con los conceptos definidos podemos decir que la técnica de medición, con un grado de precisión adecuado, así como todos los aspectos relacionados con las unidades de medida (estudio, conservación, materialización, etc.) y los instrumentos de medición, forman el dominio de la *Metrología*.

El objetivo fundamental de cualquier trabajo metrológico, desde el realizado en un Laboratorio Patrón Nacional, pasando por los diferentes tipos de Laboratorios de Metrología, hasta el Servicio de Control de un Taller, es la determinación de una cierta medida de una magnitud física con referencia a una unidad, proporcionando siempre el margen de incertidumbre asociado a la medida para un determinado nivel de confianza.

Veamos un ejemplo: En una operación de medición de la clase de magnitud que se denomina longitud, se ha encontrado que el elemento sometido a ella era superior a la unidad milímetro en relación  $23,456 \div 1$ ; cuando un centro de medición proporciona un dato como éste:

$$L = 23,456 \text{ mm}$$

dicho centro ha realizado indudablemente una medida, cuyo resultado puede ser válido en un determinado número de situaciones, pero como se puede apreciar, no queda perfectamente acotada la precisión de dicho resultado. Únicamente cabe imaginar que, puesto que el último dígito representa micrómetros, dicho dígito podría oscilar entre el valor 5 y el valor 7, siendo por tanto la incertidumbre del resultado de  $\pm 0,001$  mm. Pero esto pudiera ser falso.

Por ello, en el caso de medidas de precisión se añade al resultado un término precedido del signo  $\pm$ , conocido como *incertidumbre* del resultado de medida, el cual viene a ser una cuantificación de la *precisión*, entendida esta como concepto cualitativo de la medida.

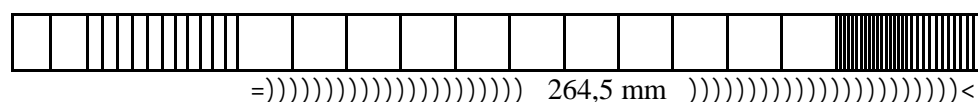
Dicha incertidumbre debe cuantificarse e interpretarse como una cantidad equivalente a una desviación típica, admitiéndose su multiplicación por un factor de incertidumbre (**k**), normalmente de valor contenido entre 1 y 3, y que debe especificarse como parte del resultado de la medida. Así:

$$\begin{array}{l} \text{Resultado} \quad = \quad \text{valor numérico} \quad \pm \quad u \quad \text{unidad (k=)} \\ \text{Ejemplo: L} \quad = \quad 23,456 \quad \pm \quad 0,005 \quad \text{mm} \quad (\text{k}=2) \end{array}$$

Puede afirmarse que si en principio bastó con *medir*, el desarrollo de la técnica exigió posteriormente *medir con precisión* hasta tal extremo que, así como en la fabricación mecánica actual una pieza que no se encuentra dentro de sus tolerancias de plano no es apta para cumplir su misión, una medida que no quede garantizada con excesiva precisión, puede suponer un gasto sin aportar ninguna utilidad.

## Evolución de los sistemas de unidades

Desde las épocas más primitivas de su historia, el hombre ha tenido necesidad de medir, ya fueran los campos que cultivaba, las telas que tejía, etc. Así se encuentran indicios de mediciones en todas las épocas. El más antiguo patrón de medida que se conoce se encuentra en el Museo del Louvre, una estatua caldea de 25 siglos A.C. titulada "el Arquitecto de la regla", que representa un hombre sobre cuyas rodillas descansa una regla graduada, la cual constituía el patrón de medida. La regla tiene sus dos trazos extremos a una distancia de 264,5 mm y está dividida en 16 partes iguales, de las que tres de un extremo están subdivididas a su vez en 2, 5 y 6 partes iguales y las dos del otro extremo en 12 y 18 partes iguales:



Otros pueblos de la antigüedad, Mesopotámicos, babilonios, Sumerios, comprendieron la utilidad de emplear un sistema de unidades sexagesimal, dado que el número 60 es divisible por 2, 3, 4, 5, 6, 10, 12, 15, 20 y 30; como herencia de los mismos todavía hoy se emplea este sistema para la medida del tiempo. Estos pueblos llegaron a conocer la notación de posición de los números que tanto facilita su manejo, mientras que los Egipcios, empleando ya un sistema de base decimal, no tenían en cuenta la posición y era por tanto necesario repetirlos para incrementar su valor.

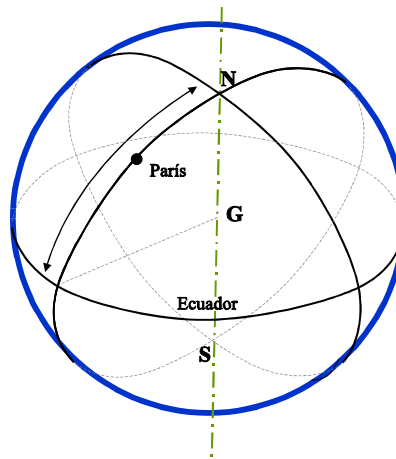
Es precisamente en la cultura egipcia, donde alcanzan gran difusión las llamadas medidas autocráticas, es decir, unidades de su propio cuerpo de quienes detentan el poder. Así aparecen la pulgada (anchura del pulgar), el pie, el Auna (longitud del antebrazo del faraón).

Criterios similares emplearon en el mundo Griego (el Estadio, equivalente a 200 pasos sencillo). Los Romanos continúan con la notación decimal sin posición, y tras ellos se inicia el sistema vigente hasta la actualidad, del doble valor de los números según el símbolo y según la posición. Los impulsores del moderno sistema numérico son los Árabes, basados a su vez en la cultura India.

Pero así como el sistema numérico queda ya por esta época definitivamente establecido, las unidades del Imperio Romano se pierden con la caída de aquel, empleándose referencias de todo tipo durante la Edad Media, hasta que el desarrollo comercial en el siglo XVI, creó una corriente de interés hacia el establecimiento de unas unidades concretas y bien definidas en Europa.

Así en el siglo XVII se adopta en Francia la *Toesa* como unidad de longitud, materializada por una barra de hierro empotrada en la fachada del "Gran Chatelet" de París, para que cada uno pudiese controlar su medida. Similar a la anterior se empleó, también en Francia, la *pila de Carlomagno*, consistente en 13 pesas de cobre empotradas una sobre otra.

En 1790, a propuesta de Talleyrand, la Asamblea Nacional Francesa decidió invalidar todas las unidades existentes y establecer una como patrón, que se acordó fuese la *diezmillonésima parte del cuadrante del meridiano terrestre que pasa por el observatorio de París*. Se midió éste a una latitud de  $9 \frac{2}{3}^{\circ}$  entre Dunkerke y Barcelona, utilizando como unidad la Toesa, resultando así la nueva unidad que se denominó *METRO* (36 pulgadas 11,296 líneas de Toesa). Esta unidad se materializó mediante una barra de platino a cantos de dimensiones 25 x 4,05 mm, que se depositó en el Archivo.

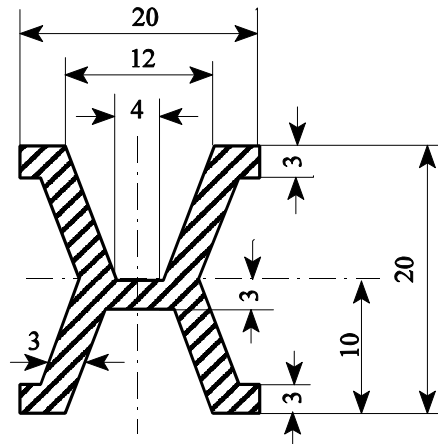


Pronto se reconoció que el meridiano terrestre no podía servir como base a la que recurrir, ya que la medida de éste no se podía realizar con la precisión requerida para definir los metros con un error inferior a una micra. Por ello se estableció como definición *la distancia, a 0 EC, comprendida entre los dos extremos del metro del archivo*. Así puede considerarse fundado el Sistema Métrico, el cual hacia mediados del siglo XIX implantaron oficialmente diversos países de dentro y fuera de Europa. Sin embargo, las discrepancias de los distintos patrones nacionales con el metro condujeron en 1875 a la conferencia diplomática en que 20 estados (entre ellos Inglaterra y Estados Unidos) firmaron la *Convención del Metro*, cuyas resoluciones más importantes fueron:

- La creación de *Bureau International de Pesas y Medidas* (B.I.P.M.)
- La creación de un lote de prototipos del metro

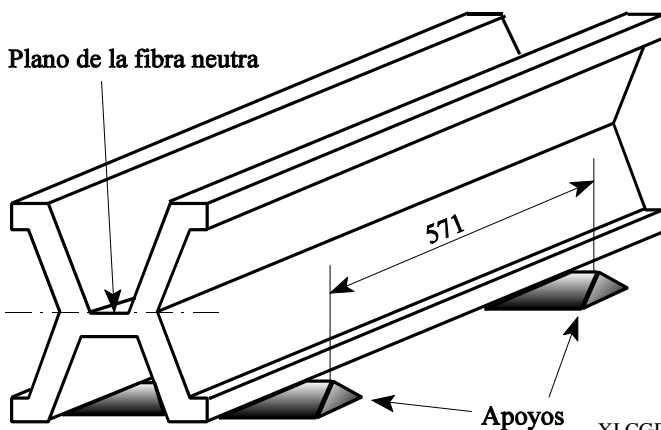
El B.I.P.M. es el organismo científico encargado de la conservación de los prototipos y su función está controlada por el *Comité Internacional de Pesas y Medidas* compuesto por 18 miembros y el Director del Bureau, y la *Conferencia General de Pesas y Medidas* formada por los Delegados de todas las naciones adheridas a la convención del metro.

Uno de los primeros trabajos de este organismo se centró en la sustitución del antiguo metro, para lo cual se construyeron 30 barras de platino-iridio en proporción 90-10, con un perfil en equis asimétrica calculado por H.TRESCA. La longitud del metro quedaría grabada por medio de trazos de 0,006 mm de grueso con dos trazos auxiliares uno a cada lado de 0,5 mm de distancia principal sobre la fibra neutra protegida por las ramas de la equis. De las 30 barras se eligió la número 6, con denominación <M> como *Metro Prototipo Internacional*, por ser el que discrepaba menos del "metro del archivo", repartiéndose las otras 29 entre los diferentes países miembros.

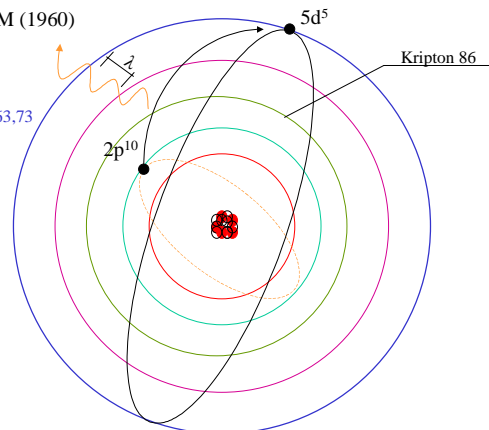


El metro debe observarse cuando se encuentra apoyado sobre dos soportes simétricos situados a 571 mm uno del otro. Esta distancia es aquella en la que la diferencia de longitud entre una fibra neutra y su proyección es mínima. Resulta así que una pequeña desviación de los soportes respecto a sus posiciones teóricas no tiene influencia apreciable sobre la longitud a medir, así como tampoco la tiene el hecho de que los dos trazos de medida no se encuentren estrictamente sobre el plano neutro.

Está especificado que el metro se coloque en posición horizontal y se encuentre sometido a la presión atmosférica normal; si se trabaja con él en vertical, apoyado sobre uno de sus extremos, sufriría un acortamiento de  $0,55 \mu\text{m}$ , y si se trabajase con él en el vacío atmosférico se alargaría  $0,21 \mu\text{m}$  en función de la compresibilidad del metal. En cuanto a la temperatura ha de trabajarse a la del hielo fundente; este valor se eligió para que fuese independiente de toda definición de escalas termométricas, pero sin embargo las medidas efectuadas a dicha temperatura no son tan precisas como las que se pueden realizar a la temperatura estabilizada de un laboratorio, y de hecho el prototipo no ha sido observado a 0 EC en muy contadas ocasiones. En la actualidad los metros se observan a 20 EC y se corrigen, con lo que puede cometerse un error sistemático no superior a  $0,1 \mu\text{m}$ .



XI CGPM (1960)



De cualquier forma el elemento que limita la precisión de un patrón de trazos propios trazos, cuya calidad de grabado fija precisión del mismo: los del antiguo internacional, grabados en 1887, presentan dades fácilmente visibles al microscopio y limitan la precisión del metro a un máximo  $0,2 \mu\text{m}$ .

m á s  
son los  
l a  
prototipo  
irregulari  
q u e  
de 0,1 a

Sin embargo esta definición del

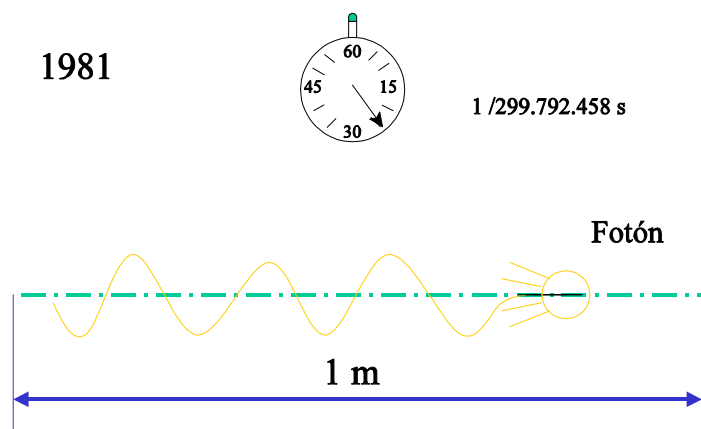
metro

basada en un elemento material nunca satisfizo a los metrologos que, en beneficio de la precisión, se inclinaban más por una definición física. Así, la XI Conferencia General de Pesas y Medidas acordó, en 1960, reemplazar la definición del metro, basada en el Prototipo Internacional, por la siguiente:

*El metro es la longitud de 1.650.763,73 longitudes de onda en el vacío de la radiación correspondiente a la transición entre los niveles  $2p_{10}$  y  $5d_5$  del átomo de Kriptón 86.*

Tras amplias consultas, la XVII Conferencia General de Pesas y Medidas, en 1983, decidió derogar la definición del metro de 1960 y reemplazarla por la siguiente:

*El metro es la longitud del trayecto recorrido por la luz en el vacío durante un tiempo de  $1/299.792.458$  s.*



## El Sistema Internacional de Unidades (S.I.)

A lo largo del tiempo han existido, y en parte aún perduran, gran número de sistemas de unidades basados en criterios y magnitudes diferentes. Los principales sistemas conocidos son:

Sistema MKS basado en la unidad de fuerza	Sistema CGS
Sistema MKSA-Giorgi basado en la unidad de masa	Sistema MTS
Sistema CGS mixto o gaussiano	Sistema CGS generalizado
Sistema CGS electromagnético	Sistema CGS electrostático

La XI Conferencia General de Pesas y Medidas, definió en 1960 el *Sistema Internacional de Unidades S.I.* como el más adecuado y completo, recomendado a todos los países miembros su adopción como único sistema a emplear a partir de entonces. En España fue declarado de uso legal por la *Ley de Pesas y Medidas* de 8 de Noviembre de 1967, y declarado de enseñanza obligatoria.

Las bases teóricas para establecer este sistema de unidades, completo y coherente, son las siguientes:

- Determinación de todas las ecuaciones de la Física que sean independientes y compatibles entre sí, lo cual permite a su vez conocer el número total de magnitudes para las que necesario establecer unidades de medida.

- Determinación del número de magnitudes fundamentales para las que puede definirse una unidad arbitrariamente. Este número es la diferencia entre el número total de magnitudes relacionadas y el de ecuaciones que las ligan, y en el Sistema Internacional resulta igual a seis.
- Elección de las magnitudes fundamentales y definición de sus correspondientes unidades, atendiendo a la facilidad de reproducción y diseminación. Todas las restantes unidades se derivan de las fundamentales, atendiendo al criterio de que los coeficientes de las ecuaciones de ligazón entre ellas se reduzcan a la unidad.

La puesta en práctica de los principios enunciados plantea numerosos problemas de orden físico, hasta el punto de que para algunas unidades no se ha decidido si considerarlas como fundamentales o derivadas, por lo que se las engloba en un tercer apartado de unidades suplementarias hasta que se llegue a una conclusión.

## **Clases de unidades**

A continuación se describe el contenido de la Norma *UNE 82103-96: Unidades SI y recomendaciones para el empleo de sus múltiplos y submúltiplos y de algunas otras unidades*. Esta norma es equivalente a la norma internacional ISO 1 000 de 1992.

El SI comprende tres clases de unidades, cuyo conjunto forma un sistema coherente de unidades llamado unidades SI. Los símbolos de las unidades deben estar escritos en minúsculas; sin embargo, la primera letra será mayúscula cuando el nombre de la unidad derive de un nombre propio.

A) *Unidades básicas*, cuyas definiciones y símbolos se recogen en la siguiente tabla.

MAGNITUD	UNIDAD	SÍMBOLO	DEFINICIÓN
<b>Longitud</b>	<i>metro</i>	m	El metro es la longitud del trayecto recorrido en el vacío por la luz durante $1/299\,792\,458$ de segundos.
<b>Masa</b>	<i>kilogramo</i>	kg	El kilogramo masa es igual a la masa del prototipo internacional del kilogramo.
<b>Tiempo</b>	<i>segundo</i>	s	El segundo es la duración de $9\,192\,631\,770$ períodos de la radiación correspondiente a la transición entre los dos niveles hiperfinos del estado fundamental del átomo de cesio 133.
<b>Intensidad de corriente eléctrica</b>	<i>amperio</i>	A	El amperio es la intensidad de una corriente constante que, mantenida en dos conductores paralelos, rectilíneos, de longitud infinita, de sección circular despreciable y colocados a una distancia de un metro el uno de otro en el vacío, produce entre estos conductores una fuerza igual a $2 \times 10^{-7}$ newton por metro de longitud.
<b>Temperatura termodinámica</b>	<i>kelvin</i>	K	El kelvin es la fracción $1/273,16$ de la temperatura termodinámica del punto triple del agua. Este mismo nombre se utiliza para expresar un intervalo o una diferencia de temperatura. Se utiliza también la temperatura Celsius definida por la ecuación $t=T - T_0$ donde $T_0 = 273,15\text{K}$ por definición.
<b>Intensidad luminosa</b>	<i>candela</i>	cd	La candela es la intensidad luminosa, en una dirección dada, de una fuente que emite una radiación monocromática de frecuencia $540 \times 10^{12}$ Hz cuya intensidad radiante, en esta dirección, es $1/683$ Wb/sr.
<b>Cantidad de sustancia</b>	<i>mol</i>	mol	El mol es la cantidad de sustancia de un sistema que contiene tantas entidades elementales como átomos hay en $0,012$ kg de carbono 12. Cuando se emplea el mol, las entidades elementales deben ser especificadas y pueden ser átomos, moléculas, iones, electrones, otras partículas o agrupamientos especificados de tales partículas.

B) *Unidades suplementarias*, que no han sido clasificadas por la Conferencia General de Pesas y Medidas ni como unidades básicas ni como unidades derivadas. Aunque en principio pueden ser tratadas como unidades básicas o como unidades derivadas, en Octubre de 1980, el Comité Internacional de Pesas y Medidas clasificó a las unidades suplementarias como unidades derivadas adimensionales. Estas unidades se recogen en la siguiente tabla.

MAGNITUD	UNIDAD	SÍMBOLO	DEFINICIÓN
Ángulo plano	<i>radián</i>	rad	El radián es el ángulo plano que, teniendo su vértice en el centro de un círculo, intercepta sobre la circunferencia de este círculo un arco de longitud igual al del radio.
Ángulo sólido	<i>estereorradián</i>	sr	El estereorradián es el ángulo sólido que, teniendo su vértice en el centro de una esfera, delimita sobre la superficie esférica correspondiente un área igual a la de un cuadrado que tiene como lado el radio de la esfera.

C) *Unidades derivadas*, se escriben algebraicamente en función de las unidades básicas y de las unidades suplementarias. Sus símbolos se obtienen utilizando los signos matemáticos de multiplicación y división. Para ciertas unidades existen nombres y símbolos especiales, que han sido aprobados en la Conferencia General de Pesas y Medidas, los cuales se indican en la tabla siguiente. A veces es ventajoso expresar las unidades derivadas en función de otras unidades derivadas que tienen nombres especiales.

MAGNITUD	NOMBRE	SÍMBOLO	EXPRESION
Frecuencia	<i>hercio</i>	Hz	1 Hz = 1 s <sup>-1</sup>
Fuerza	<i>newton</i>	N	1 N = 1 kg·m/s <sup>2</sup>
Presión, Tensión mecánica	<i>pascal</i>	Pa	1 Pa = 1 N/m <sup>2</sup>
Energía, trabajo, Cantidad de calor	<i>julio</i>	J	1 J = 1 N·m
Potencia	<i>vatio</i>	W	1 W = 1 J/s
Carga eléctrica, Cantidad de electricidad	<i>culombio</i>	C	1 C = 1 A·s
MAGNITUD	NOMBRE	SÍMBOLO	EXPRESION
Potencial eléctrico, Diferencia de potencial, Tensión eléctrica, Fuerza electromotriz	<i>voltio</i>	V	1 V = 1 J/C
Capacidad eléctrica	<i>faradio</i>	F	1 F = 1 C/V
Conductancia eléctrica	<i>siemens</i>	S	1 S = 1 Ω <sup>-1</sup>
Flujo de inducción magnética, Flujo magnético	<i>weber</i>	Wb	1 Wb = 1 V·s
Densidad de flujo magnético, Inducción magnética	<i>tesla</i>	T	1 T = 1 Wb/m <sup>2</sup>
Inductancia	<i>henrio</i>	H	1 H = 1 Wb/A
Temperatura Celsius	<i>grado celsius</i>	EC	EC = K - 273
Flujo luminoso	<i>lumen</i>	lm	1 lm = 1 cd·sr



<b>Iluminancia</b>	<i>lux</i>	lx	1 lx = 1 lm/m <sup>2</sup>
<b>Resistencia eléctrica</b>	<i>ohmio</i>	Ω	1 Ω = 1 V/A

*Múltiplos y submúltiplos de las unidades SI*

Para formar los nombres y los símbolos de los múltiplos y submúltiplos decimales de las unidades SI, se utilizan los prefijos de las siguientes tablas.

<b>MÚLTIPLOS</b>		
<b>Factor por el que se multiplica la unidad</b>	<b>PREFIJO</b>	
	<b>NOMBRE</b>	<b>SÍMBOLO</b>
10 <sup>18</sup>	<i>Exa</i>	E
10 <sup>15</sup>	Peta	P
10 <sup>12</sup>	tera	T
10 <sup>9</sup>	giga	G
10 <sup>6</sup>	mega	M
10 <sup>3</sup>	kilo	k
10 <sup>2</sup>	hecto	h
10	deca	da

SUBMÚLTIPLOS		
Factor por el que se multiplica la unidad	PREFIJO	
	NOMBRE	SÍMBOLO
$10^{-1}$	deci	d
$10^{-2}$	centi	c
$10^{-3}$	mili	m
$10^{-6}$	micro	$\mu$
$10^{-9}$	nano	n
$10^{-12}$	pico	p
$10^{-15}$	femto	f
$10^{-18}$	atto	a

El múltiplo o submúltiplo puede ser elegido habitualmente de tal manera que el valor numérico esté comprendido entre 0,1 y 1000. Por ejemplo:

$$1,2 \times 10^4 \text{ N conviene escribirlo como } 12 \text{ kN}$$

*Unidades ajenas al SI que pueden ser utilizadas con las unidades SI y sus múltiplos y submúltiplos*

El Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM) ha reconocido que hay ciertas unidades fuera del SI que deben mantenerse por razones prácticas o por su interés en campos especializados. En la siguiente tabla se recogen algunas de ellas.

MAGNITUD	NOMBRE DE LA UNIDAD	SÍMBOLO DE LA UNIDAD	DEFINICIÓN
<b>Tiempo</b>	<i>minuto</i> <i>hora</i> <i>día</i>	min h d	1 min = 60 s 1 h = 60 min 1 d = 24 h
<b>Ángulo plano</b>	<i>grado</i> <i>minuto</i> <i>segundo</i>	E ' "	1E = ( $\pi/180$ ) rad 1' = (1/60)E 1" = (1/60)'
<b>Volumen</b>	<i>litro</i>	l, L	1 l = 1 dm <sup>3</sup>
<b>Masa</b>	<i>tonelada</i>	t	1 t = 10 <sup>3</sup> kg

Por último la norma recoge en su anexo ejemplos de múltiplos y submúltiplos de unidades SI, así como de otras unidades cuyo uso está permitido, aunque desaconsejado, correspondiente a una serie de magnitudes. Algunos de ellos son: nudo, bar, angstrom (Å), decibelio (dB), etc.

## El sistema de medida anglosajón

Tanto Inglaterra como Estados Unidos firmaron la Convención del Metro en 1875 y recibieron sus prototipos correspondientes. Sin embargo, como los acuerdos no eran obligatorios, los países anglosajones no declararon obligatorio el Sistema Métrico en sus respectivos países, lo cual ha supuesto incalculables trastornos en la técnica universal y miles de millones de pérdidas a la economía mundial. Este error podía haberse subsanado a principios del siglo XX, cuando el cambio de sistema habría sido económicamente viable. Actualmente el costo que supondría realizar el cambio es tan elevado que retrasa a los Gobiernos para realizar dicha transformación.

La unidad oficial de la metrología anglosajona es la *yarda*.

$$1 \text{ yarda} = 3 \text{ pies} = 36 \text{ pulgadas} = 0,9144 \text{ metros}$$

El primer patrón de la yarda fue realizado en 1760 y se trataba de una barra de latón con dos pastillas de oro marcadas con un pequeño agujero entre los cuales se definía la yarda a una temperatura de 62 EF (16,67 EC). Este prototipo denominado Imperial Standard Yarda desapareció en el incendio del Parlamento de 1834.

El prototipo actual data de 1845 y es una barra de bronce, de sección cuadrada de 25,4 mm (1 pulgada) de lado, taladrándose la misma hasta la mitad de su espesor, y situándose en el fondo de dicho taladro unas pequeñas pastillas de oro sobre las que se grabaron los trazos que definían la unidad, cuando la temperatura de la barra era de 62 grados Fahrenheit. La yarda inglesa supuso una mejora importante sobre los patrones anteriores, pero este patrón poseía otros defectos que limitaban notablemente su valor metrológico. Por ejemplo fue definido a 62 EF, pero no se tuvo cuidado en definir con precisión la propia escala termométrica Fahrenheit, la cual tuvo lugar mucho más tarde.

El gran defecto de este patrón era el de la inestabilidad; en efecto, se ha demostrado que tal barra de bronce sufría un acortamiento de 4  $\mu\text{m}$  por siglo: Además los trazos grabados en el fondo de los orificios no poseían una calidad que permitiera la ejecución de medidas de la más alta precisión. La yarda se define en la actualidad, tanto en la ley inglesa como en la americana, a partir del metro.

La distancia entre los trazos marcados sobre el oro que definen la yarda resulto

$$1 \text{ yarda} = 0,9143992 \text{ m a } 62 \text{ EF}$$

Pero la verdadera longitud de la yarda no es la de la barra patrón sino su equivalente con el metro que el *National Physical Laboratory* fijó definitivamente, en

$$1 \text{ yarda} = 0,914398416 \text{ m a } 68 \text{ EF}$$

Los EE.UU. adquirieron los prototipos del metro de platino-iridio y, reconociendo la superioridad del metro como base del sistema de medidas han dado a la yarda el valor:

$$1 \text{ yarda} = 0,914401829 \text{ m a } 68 \text{ EF}$$

Y todavía hay una tercera yarda denominada industrial propuesta por los industriales anglosajones en el Congreso de Normalización de 1926 que fija como medida base la pulgada, que se define a partir del valor redondeado de su equivalencia en mm:

$$1 \text{ pulgada} = 25,4 \text{ mm a } 68 \text{ EF}$$

Con lo cual el valor de la yarda será:

$$1 \text{ yarda} = 0,914400000 \text{ m a } 68 \text{ EF}$$

Por tanto, en el sistema anglosajón existen cuatro yardas, y se llega a la curiosa conclusión de que está, en último término, fundamentado en el Sistema Internacional.

## Patrones

En metrología, un patrón es aquel objeto, instrumento o fenómeno físico que permite materializar y reproducir las unidades de medida o los múltiplos y submúltiplos de ellas. A él podemos referirnos para controlar la exactitud de los resultados dados por un aparato de medida. La *exactitud* de un resultado de medida es la concordancia entre el valor obtenido y el “valor verdadero” de la magnitud medida, dentro de los límites de incertidumbre aceptables.

Es necesario distinguir entre el *patrón* y la *unidad* mediante la cual se expresa el valor de la magnitud de la misma naturaleza que la que representa el patrón. La unidad es un concepto ideal, definido en un texto resultante de una Convención (Resolución de la Conferencia General de Pesas y Medidas, ley o decreto que define las unidades legales de medida en cada país). El patrón es una materialización o realización práctica de la unidad.

Puede hablarse de *patrones primarios* cuando materializan o reproducen las unidades básicas del SI, de acuerdo con la definición existente, y de *patrones secundarios* cuando materializan o reproducen unidades derivadas, o básicas por métodos diferentes a su definición.

Históricamente se ha estado interesado siempre en que los patrones tuvieran como características principales *precisión* en la materialización de la unidad e *invariabilidad* del propio patrón. Por ello, ha habido una clara evolución en la determinación de las unidades fundamentales de los sistemas, que comenzaron por ser elementos materiales concretos y determinados que se suponían prácticamente invariables y que durante mucho tiempo cumplieron perfectamente su misión. De ellos queda todavía una unidad, el kilogramo.

La evolución de la técnica, y sobre todo las exigencias de precisión cada vez mayores, han hecho que estos patrones se vayan cambiando por fórmulas de realización de un determinado experimento natural o físico. Con dicha evolución se ha conseguido otra de las características fundamentales que todo patrón debe poseer, su *posibilidad de reproducción y diseminación*.

Cuando el metro patrón era una determinada barra depositada en Sèvres, su posibilidad de reproducción y diseminación era nula, y evidentemente alguna variación de su longitud se producía constantemente, aunque fuera inapreciable. Sin embargo, en cada momento el patrón era único y su valor en dicho momento definía la unidad. El metro era por tanto, algo real.

En 1927 se propuso por primera vez la utilización de una longitud de onda como patrón de longitud, época en la que las medidas de longitud por medio de ondas luminosas alcanzaron una precisión comparable a las efectuadas a partir del prototipo en platino-iridio. Cuando en 1960 se cambió la unidad y se refirió a la transición de un electrón entre dos niveles determinados del átomo de Kr86, se consiguieron múltiples ventajas: El nuevo patrón era reproducible en cualquier instante y lugar con una exactitud más de diez veces superior a la del patrón anterior. Permitía además efectuar mediciones de mayor exactitud en el campo de la espectroscopía. Garantizaba la medición de patrones a trazos con mayor precisión gracias a los métodos interferenciales que habían sido desarrollados en paralelo y que permitían su medición en longitudes de onda. Con la misma fecha, el Comité Internacional de Pesas y Medidas dictó instrucciones precisando las condiciones de temperatura, tipo de lámpara, intensidad de excitación, etc., necesarias para reproducir lo mejor posible dicha radiación patrón.

Sin embargo, y dado que no existen dos fenómenos idénticos en la naturaleza, se comprende que nunca dos experiencias del metro patrón darán exactamente la misma longitud de onda (aunque por supuesto se siga siendo incapaz de apreciar la diferencia), por ello puede decirse que "no existe" un patrón primario único real.

Desde 1983, la definición del metro se asienta sobre la velocidad de la luz. La invención de los láseres, con su radiación de gran monocromaticidad e intensidad, ha sido un paso fundamental para ello. En lugar de elegir la longitud de onda de una radiación particular como patrón de longitud, se ha preferido escoger un valor conveniente para la velocidad de la luz  $c$ , constante fundamental de la física, y definir el metro a partir del tiempo  $t_0 = l_0/c$  necesarios para que una radiación cualquiera pueda recorrer un trayecto de longitud  $l_0 = 1$  metro.

Como consecuencia, actualmente disponemos pues, de una serie de patrones de longitud de onda que podrían considerarse como patrones primarios. Esta serie puede mejorarse y enriquecerse en el

futuro, cuando sea posible medir nuevas frecuencias ópticas, o bien cuando se disponga de nuevas mediciones, más exactas de estas mismas frecuencias, sin que sea necesario modificar la definición del metro. Este es el principal argumento a favor de esta nueva definición del metro frente a otra, que podría haberse basado por ejemplo, en la radiación emitida por un láser en particular; este láser, que hubiera sido considerado el mejor en un momento determinado, habría sido destronado por otro tarde o temprano.

## Jerarquización de patrones

Dependiendo de las incertidumbres admisibles en los resultados de medida, la *calidad metrológica* que se exige a los patrones puede ser diferente. Por ejemplo, aquellos patrones existentes en una fábrica deben ser controlados periódicamente por el Departamento de metrología de la propia fábrica, el cual verificará sus propios patrones en un laboratorio oficial nacional, que a su vez, asegurará la exactitud de los suyos mediante comparaciones periódicas con el laboratorio primario nacional, y éste contrastará los suyos a intervalos de tiempo con el Bureau Internacional de Pesas y Medidas. Puede apreciarse pues cómo existe un *esquema jerárquico de patrones*.

Así aparece el término *diseminación*, definido como el proceso, en sucesivos escalones, que tiene por objeto facilitar a empresas y organismos a partir de patrones primarios u otros aceptados como tales, patrones de nivel de precisión inferior.

En el vértice de esta pirámide jerárquica se encuentran los patrones que materializan la unidad básica del SI (patrones primarios); estos no pueden verificarse por comparación con otro patrón de clase superior, ya que su realización es conforme al propio texto que define la unidad. A partir de ellos, mediante mediciones relativas, se recorre hacia abajo la cadena jerárquica de patrones, la cual debe establecerse con el mayor cuidado.

Como hemos visto anteriormente, salvo para la masa cuyo único primario absoluto es el depositado en Francia, de todas las demás unidades existe patrón primario o patrón prototipo internacional siempre que se disponga de un equipo que permita realizar la definición del mismo, con las especificaciones suficientes para alcanzar la precisión adecuada. Estos equipos pueden evolucionar y por tanto ir mejorando el grado de precisión del patrón primario, en función de la capacidad de apreciación o resolución de los mismos, y del grado de concordancia que, al comparar el resultado de varios de estos instrumentos, se consiga.

A este respecto, la misión del B.I.P.M. ha ido también evolucionando, de depositario de los patrones primarios a centro de intercomparación de los mismos para tratar de asegurar para estos patrones primarios, tanto *exactitud* (conformidad con la definición de la unidad correspondiente), como *incertidumbre mínima*, y *uniformidad* (que patrones similares concuerden entre sí en todo el mundo).

De esta forma el Bureau Internacional de Pesas y Medidas coordina los trabajos de intercomparación de los principales laboratorios mundiales: National Institute of Standards and Technology (EE.UU.), National Physical Laboratory (Gran Bretaña), Physikalisch-Technische Bundesanstalt (Alemania), Instituto de Metrología D.I. Mendeliev (URSS), National Research Laboratory of Metrology (Japón), etc.

A partir de los primarios depositados en el Laboratorio Nacional, se derivan todos los restantes patrones o instrumentos secundarios para atender a las necesidades de medición industrial de cada país.

No existe un modelo único de organización metrológica, para la diseminación de patrones sino que cada país ha ido creando la suya adecuada a sus necesidades. Respecto al tamaño de esta organización, depende fundamentalmente del grado de desarrollo tecnológico alcanzado en el país, pues cuanto más crecen las necesidades de precisión en la industria, más laboratorios y centros metrológicos han de irse creando que permitan diseminar la precisión desde los patrones nacionales, descargando al

laboratorio principal del trabajo de dar calibración a los centros de fabricación. Esto a su vez crea problemas de pérdida de precisión al aparecer más niveles de calibración ya que nunca se puede asignar a un patrón una precisión igual a la del patrón contra el que se compara, sino que como es lógico ha de tenerse en cuenta los errores introducidos por el propio proceso de calibración.

En la página siguiente puede verse el esquema de una organización metrológica nacional.

El laboratorio nacional posee, tras el *patrón primario* un grupo de *patrones nacionales de referencia* de alta estabilidad y precisión muy similar a la del primario, que sirven para reservar a aquel. Estos son los que dan una calibración más frecuente a los *patrones nacionales de calibración*, a los que tienen acceso los centros de orden intermedio que realizan la diseminación y que pueden ser las cabeceras de los grandes sectores del país.

En algunos casos ocurre que tanto los patrones nacionales de calibración como los patrones de referencia de estos centros intermedios de metrología son sistemas complejos o delicados, y por tanto no desplazables, por lo que se recurre a unos patrones de menor calidad pero móviles que permiten el enlace entre los dos patrones superiores en sus instalaciones fijas. Generalmente estos se asignan al Laboratorio Nacional pues son los mismos para todas las cabeceras intermedias y se denominan *patrones nacionales de transferencia*.

El centro intermedio de metrología establece a su vez sus cadenas de calibración desde sus patrones de referencia hasta los de calibración, a los que tienen acceso los diferentes centros de producción de él dependientes.

Este esquema puede tener innumerables variaciones, de las cuales la más destacada consiste en que no todos los patrones primarios estén concentrados en un laboratorio nacional único, sino repartidos entre diferentes centros coordinados.

