

La **Metrología**
también existe



1ª Edición

Diciembre 2019

La **Metrología**
también existe



1ª Edición

Diciembre 2019

La **Metrología** también existe

Una Publicación del Comité de Metrología del Instituto de la Ingeniería de España, en colaboración con el Centro Español de Metrología.

En esta publicación se ha utilizado papel de acuerdo con los criterios medioambientales de la contratación pública vigente.

1ª edición. Diciembre 2019
Edita: Centro Español de Metrología

Todos los derechos reservados. Prohibida la reproducción total o parcial de esta obra por cualquier medio o procedimiento, sin permiso expreso y escrito de los titulares del copyright.

© Centro Español de Metrología e Instituto de la Ingeniería de España

NIPO: 113-19-007-6 (papel)
NIPO: 11319010X (digital)
Depósito Legal: M-35674-2019

La figura de la portada «3i» representa tres características intrínsecas de la metrología: es invasiva, invisible e ignorada.

Contenido

Prólogo	11
---------------	----

PRIMERA PARTE *¿METROLOGÍA?*

1	Introducción	15
1.1	Definición y clasificación	18
1.2	El papel de la metrología en la sociedad	20
1.3	Impacto económico de la Metrología	39
1.4	Una mirada a los orígenes	42
2	Organización de la metrología	49
2.1	Internacional	49
2.2	Nacional	55

SEGUNDA PARTE *Introduciéndonos en la METROLOGÍA*

3	Algunos conceptos metrológicos básicos	61
3.1	Magnitud, medición, mensurando	61
3.2	Patrón de medida, material de referencia, material de referencia certificado	61

3.3	Exactitud, precisión	63
3.4	Error	65
3.5	Incertidumbre de medida	68
3.6	Repetibilidad, reproducibilidad	73
3.7	Calibración	74
3.8	Verificación	75
3.9	Validación	75
3.10	Trazabilidad metrológica	75
4	Unidades legales de medida. Sistema Internacional de unidades (SI)	78
4.1	Unidades básicas y derivadas	79
4.2	Múltiplos y Submúltiplos	80
4.3	Reglas de escritura	81
	<i>Reglas de escritura de los símbolos y nombres de las unidades</i>	82
	<i>Reglas de escritura para expresar los valores de las magnitudes</i>	84
	<i>Reglas para la formación de los múltiplos y submúltiplos decimales de las unidades del SI</i>	89
4.4	Revisión del SI. 26ª CGPM	91
4.5	Nuevas definiciones de las unidades básicas	93
5	Aceptación de los resultados de medida.	101
5.1	Acuerdos	102
5.1.1	CIPM-ARM	102
5.1.2	ILAC-ARM	104
5.1.3	IAF-MLA	105
5.2	Estructura MAN	106

Contenido

6	La Metrología del siglo XXI	111
7	Conclusiones	113
8	Referencias	115
9	Enlaces de interés	118

La Metrología es probablemente la ciencia más antigua del mundo (> 5000 años) y aún hoy en día, pocos de nosotros conocemos la relevancia de esta ciencia y su incidencia en la economía y la sociedad

Sumario

En un mundo cada vez más globalizado e interconectado, el funcionamiento y comportamiento de la sociedad actual está basado en la confianza mutua y ello depende en gran parte de que las medidas sean fiables. Asimismo, las medidas y su exactitud están presentes en el desarrollo de la ciencia y la tecnología, en la investigación, en la fabricación y el control de los procesos industriales, así como en la protección del medio ambiente y la gestión de la energía y los recursos naturales.

Esta obra se ha redactado como una herramienta de difusión de la metrología, que pueda ayudar tanto a usuarios de la metrología como a lectores que se acercan por primera vez a esta disciplina de la ciencia. Su finalidad principal es incrementar el conocimiento de la metrología y hacerla visible a la sociedad.

El contenido de la presente obra se distribuye en dos partes, una primera de visión general y concienciación, donde se introduce el concepto de metrología, se expone su utilidad, e informa sobre sus orígenes remotos, terminando por repasar las infraestructuras metrológica internacional y nacional, actualmente existentes. La segunda parte, más conceptual, recoge algunos conceptos metrológicos básicos, introduce el Sistema Internacional de Unidades y sus reglas de escritura, describe los acuerdos que potencian la aceptación de los resultados de medida, así como la denominada infraestructura MAN (metrología, acreditación y normalización), da una visión de la metrología del siglo XXI y por último cita algunas instituciones y organizaciones relevantes en la materia, con referencia a sus páginas web.

Prólogo

En relación con la metrología, las personas se pueden clasificar en dos categorías: metrólogo profesional y metrólogo aficionado. Es decir, todos somos usuarios y lo único que nos diferencia es la consciencia de ello y la capacitación que tengamos.

Desde que nos despertamos hasta que nos acostamos, estamos inmersos en un universo en donde se cuantifica o se tiende a cuantificar todo, incluyendo las sensaciones y sentimientos: nos despertamos con la alarma de nuestro reloj o teléfono móvil, salimos a la calle, vamos al mercado y nos pesan la fruta o la carne, pasamos por la gasolinera a repostar, pagamos el estacionamiento por tiempo, o circulamos por una carretera donde nos cruzamos con un cinemómetro o nos hacen un control de alcoholemia. En casa, rodeados de contadores de agua, luz, gas, Y así durante todo el día. Es hasta tal punto importante y necesario medir, que cuando ocurre algo inquietante se suele reaccionar diciendo «vamos a tomar medidas».

Prácticamente toda la ciencia y la tecnología, todos los avances en el conocimiento del entorno físico que nos rodea, desde el cosmos hasta las partículas subatómicas, están basados en mediciones.

Es de resaltar que el género humano midió bastante antes de escribir y, consiguientemente, de leer. Pues bien, para el desarrollo de cualquier actividad humana es importante medir, y medir bien, lo cual significa no solo saber qué es lo que hay que medir, sino saber medirlo e interpretar el resultado obtenido.

Para concienciarnos de estos menesteres, es para lo que se publica esta obra. Acógela, querido lector, como una compañera fiel que estará dispuesta a aclararte dudas y a ampliar conocimientos.

PRIMERA PARTE

¿METROLOGÍA?

¿Qué es?

¿Para qué sirve?

*El papel de la **Metrología** en el progreso humano es invasivo, pero discreto hasta el punto de que puede pasar tan desapercibido como la necesidad de un ambiente respirable para la inmensa mayoría de las especies vivientes.*

Prof. Carlos Enrique Granados (Introducción a la Historia de la Metrología)

1 Introducción

La «Metrología» (del griego: *Μέτρον*, medida y *λογία*, tratado) definida como «*ciencia que se ocupa de la medida*», está presente en todos los aspectos de la sociedad. Se trata de una ciencia básica, que juega un papel primordial en campos tales como la investigación y el desarrollo, la fabricación industrial, la medicina, las telecomunicaciones, el comercio, etc. Desde los albores de la civilización, las medidas han definido la sociedad, el gobierno y el progreso de los pueblos.

La Metrología es probablemente la ciencia más antigua del mundo (> 5000 años) y sin embargo, aún hoy en día, pocos de nosotros conocemos la relevancia de esta ciencia y su incidencia en la economía y la sociedad. De ahí, lo que algunos venimos en llamar las «**3i**» (anagrama de la portada) que la caracterizan: *invasiva, invisible e ignorada*.

Medir es comparar con algo (unidad) que se toma como base de comparación. La aproximación a la medida la tuvo el ser humano primitivo con las nociones de: cerca-lejos, rápido-lento, liviano-pesado, claro-oscuro, duro-suave, frío-caliente, silencio-ruido. Los registros más antiguos de la historia dan fe de la necesidad que tuvieron los pueblos de medir y crear unidades de medida para el intercambio comercial; así, las primeras unidades de medida que surgieron fueron empíricas, autocráticas, sin relación matemática entre ellas y basadas generalmente en características antropométricas («El hombre es la medida de todas las cosas», Protágoras, s. v a.C.), ya que resultaba la forma más sencilla y fácil de llegar a un entendimiento entre las personas que realizaban un intercambio comercial. Así por ejemplo, encontramos el «auna» definido como el antebrazo del faraón, en Egipto, el «estadio», que correspondía a la distancia recorrida por una persona dando 200

pasos sencillos para los romanos y griegos, el ritmo día/noche, la temperatura del cuerpo humano, etc.

Originalmente estas percepciones fueron individuales pero con el correr de las experiencias y de las civilizaciones surgieron las comparaciones entre las personas y en el transcurso de los milenios se han desarrollado bases de comparación generalmente aceptadas, que nos han llevado hasta la realidad de hoy con un Sistema Internacional de Unidades, SI, ampliamente utilizado en el mundo.

La conexión entre el hombre civilizado de nuestros días y las medidas es producto de un pensamiento abstracto y cuantitativo, altamente desarrollado

El inicio de la metrología, tal como la conocemos en la actualidad, surge después de la Revolución Francesa, con el decreto de la Asamblea Nacional Francesa, que instituye su sistema nacional de pesas y medidas, con la nomenclatura de sus unidades, los múltiplos y submúltiplos. En 1791, la Asamblea Nacional Francesa legalizó un sistema métrico decimal de medida, que utilizaba como unidad de medida de longitud, el metro, definido por la diezmillonésima parte del cuadrante del meridiano terrestre, y como unidad de masa, la del decímetro cúbico de agua a la temperatura de 4 °C, a la que su densidad es máxima. Ambas unidades se materializaron mediante una barra de platino a cantos (entre extremos) y un cilindro de platino que se depositaron en los Archivos del Imperio en el año 1799. Este sistema fue el antecesor de nuestro actual Sistema Internacional de Unidades, el SI.

Hasta entonces, las medidas tradicionales eran multilateralmente «humanas». Expresaban al hombre y su trabajo, dependían a veces de su voluntad, de su carácter y de sus relaciones con los demás. Por otra parte, las medidas tradicionales abrían un campo infinito para los abusos, daños y prepotencias del más fuerte en detrimento del más débil. La Revolución Francesa y sus ideólogos supieron iniciar el cambio hacia un «*sistema de unidades para todos los pueblos y para todos los tiempos*», no tan dependiente del hombre y sus habilidades o trabajos y basado en la naturaleza.

«...nada más grande ni más sublime ha salido de las manos del hombre que el sistema métrico decimal».

Antoine de Lavoisier

A través de la ciencia, las medidas han evolucionado y se han adaptado para dar respuesta a las necesidades de las diferentes civilizaciones hasta llegar al mundo que hoy conocemos con las comunicaciones por satélites, el desarrollo de nuevos materiales -alterando la materia a nivel atómico- que permiten la fabricación de productos «inteligentes», el conocimiento de planetas y astros a años luz de la tierra, o de nuestro propio cuerpo, con instrumentos y técnicas no invasivas como los escáneres cerebrales, la resonancia magnética, etc.

En Noviembre de 2018, la 26ª Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM) ha sancionado la revisión más importante del SI, ligando las definiciones de las unidades básicas a constantes universales.

1.1 Definición y clasificación

El Vocabulario Internacional de Metrología define a esta como la «Ciencia de las mediciones y sus aplicaciones». (VIM 2.2), incluyendo todos los aspectos teóricos y prácticos de las mediciones, cualesquiera que sean su incertidumbre de medida y su campo de aplicación

Tiene por objeto:

- el estudio de las propiedades medibles,
- los sistemas de unidades de medida,
- los patrones, métodos y técnicas de medición, y su evolución
- la trazabilidad metrológica,
- la valoración de la exactitud de las mediciones y su mejora y desarrollo constante.

Tradicionalmente, en función del campo de aplicación, la metrología se suele clasificar en tres categorías:

- *Metrología Fundamental o Científica*: su objetivo es el desarrollo y mantenimiento de los patrones de medida, realizaciones prácticas de las definiciones de las unidades correspondientes.
- *Metrología Aplicada o Industrial*: relacionada con el aseguramiento de la exactitud de los instrumentos de medida utilizados en los procesos productivos y de control de la industria.
- *Metrología Legal*: enfocada al aseguramiento de la exactitud de los instrumentos de medida cuyos resultados puedan tener influencia sobre la transparencia de las transacciones comerciales, la salud o la seguridad de consumidores y usuarios, así como sobre el medio ambiente.

En la figura 1 podemos ver los tres tipos de metrología, relacionados con su nivel tecnológico/metrológico y el número de usuarios a los que afecta directamente.

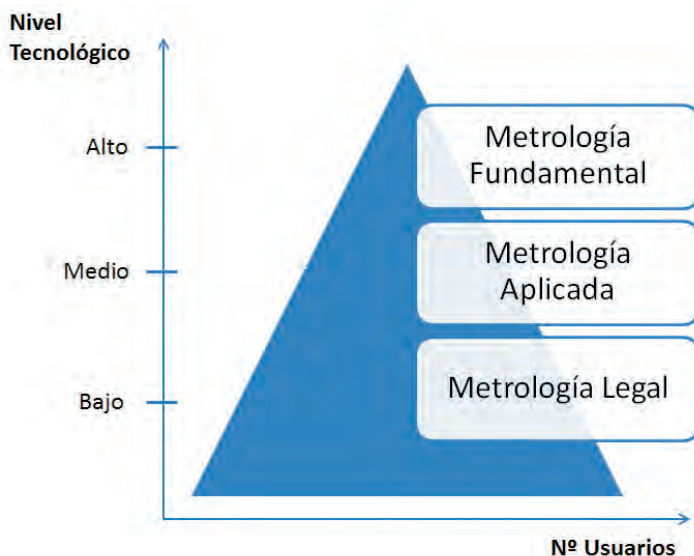


Fig. 1: Clasificación de la metrología

La metrología legal, dado su objetivo y campo de actuación, afecta a un gran número de usuarios y su nivel tecnológico es bajo. La metrología aplicada requiere de un nivel tecnológico medio y afecta a un colectivo no tan amplio, que incluye normalmente organismos y laboratorios que realizan ensayos y calibraciones en productos, incluyendo las propias industrias. La metrología fundamental se desarrolla en un colectivo muy limitado, usualmente institutos nacionales de metrología y organismos de investigación, aplicando desarrollos, técnicas y principios que requieren un alto nivel tecnológico.

1.2 El papel de la metrología en la sociedad

Uno de los aspectos de la metrología que más sorprende al profano cuando se acerca por primera vez, es el enorme impacto e implicaciones que tiene la metrología en la sociedad y en cada uno de los individuos que la conforman (*invasiva*). Pese a que la mayoría de las personas ni tan siquiera sabe de su existencia (*invisibilidad, inconsciencia*), la metrología está muy presente en nuestras vidas. Actos cotidianos como mirar el reloj, hablar por teléfono, consultar el navegador, adquirir bienes, someternos a un diagnóstico médico, etc., nos hacen, de manera inconsciente, usuarios de la metrología.

La sociedad confía en que los resultados de los instrumentos de medida sean fiables. Los ciudadanos vivimos en una sociedad multifacética, carecemos de los conocimientos necesarios para proteger siquiera una pequeña parte de nuestros intereses y necesitamos de la confianza mutua para desenvolvernos en la sociedad. Necesitamos creer que cuando nos hacemos un análisis clínico o nos sometemos a una dosis terapéutica de radiación, el resultado será correcto y la dosis la prescrita; también necesitamos creer que, cuando compramos productos, sus pesos (masas) o volúmenes se corresponden con los que nos facturan; consumimos gas, agua, energía eléctrica, medidos por contadores, y confiamos en que las cantidades facturadas se correspondan con nuestro consumo real; creemos que nuestras autoridades sancionan justamente a quienes cometen infracciones contra la seguridad vial o contra la hacienda pública.

Así pues, en bien del interés de la sociedad se necesita una base legal que sustente las mediciones y es por ello que los gobiernos legislan en materia de metrología («pesas y medidas») para garantizar la corrección de las mediciones en aras del interés

público. Las legislaciones metroológicas deben garantizar y favorecer la confianza en los resultados de medida y evitar, en lo posible, conflictos de intereses entre partes, o resultados incorrectos de las mediciones que puedan afectar adversamente a los individuos y a la propia sociedad.

La metrología establece las bases para disponer de los patrones adecuados para las unidades de medida, verificar que los instrumentos de medida utilizados en servicios y en el comercio diario, y los procedimientos de medición aplicados, sean correctos, así como verificar las características de los productos (evaluación de la conformidad) en relación a los requisitos establecidos o a normas que les afectan.

El progreso de la ciencia siempre ha estado íntimamente ligado a los avances en la capacidad de medición. Desarrollar y mejorar las capacidades de medida disponibles en un país, es esencial para potenciar y apoyar los procesos de innovación tecnológica y desarrollo industrial como elementos diferenciadores de las economías emergentes. Los avances en metrología son básicos para la innovación, y potencian todas las áreas de la ciencia.

«La Ciencia comienza donde empieza la medición, no siendo posible la ciencia exacta en ausencia de mediciones».
Mendeleyev

El funcionamiento y comportamiento de la sociedad actual está basado en la confianza mutua, tal como se ha mencionado y ello depende en gran parte de que las medidas sean fiables.

De igual manera, las medidas y su exactitud son parte fundamental en el desarrollo de la ciencia y la tecnología, en la investigación, en la fabricación y control de los procesos industriales, así como en la protección del medioambiente y en la gestión de los recursos naturales.

A continuación comentamos algunos de los impactos de la metrología en ciertos sectores:

TRANSACCIONES COMERCIALES

En la mayoría de los países se comercializan productos por un valor que puede oscilar entre el 60% y el 80% del PIB, sobre los que, en el camino que va desde el productor al consumidor, se realizan repetidas medidas con instrumentos. Aquí la metrología juega un papel relevante ayudando a evitar conflictos de intereses entre las partes de una transacción, reduciendo los costes de los litigios que ello podría conllevar. Una buena aplicación de la metrología favorece el principio de competitividad y fomenta la ética entre las transacciones. En este aspecto es de especial relevancia la cobertura que aportan los acuerdos de reconocimiento mutuo (ARM) o multilaterales (MLA), tanto entre Institutos Nacionales de Metrología (INM) (CIPM-ARM) como entre laboratorios de ensayo y calibración (ILAC-ARM) y organismos de evaluación de la conformidad, que contribuyen a eliminar posibles barreras técnicas.

El comercio internacional depende cada vez más de la metrología, aumentando anualmente en un 15%, con alrededor de un 80% relacionado con patrones o normativas, según la OCDE.

El consumidor final de productos adquiridos o servicios facturados por magnitudes medidas (masa, longitud, volumen, energía consumida, etc.), no tiene ni los medios ni los conocimientos

necesarios para verificar las cantidades de producto o la medida de las magnitudes involucradas en la transacción y la única alternativa con que cuenta es confiar en que las actuaciones de la metrología, a través de los controles metrológicos e inspecciones que establecen los Estados, aseguren la exactitud de las transacciones.

Ejemplos:

Gas natural

La UE tiene 210 millones de consumidores de gas natural que se suministra a través de 1,4 millones de kilómetros de tuberías. El consumo anual es de 500 000 millones de metros cúbicos, con un coste de cientos de miles de millones de euros.

El gas es una materia prima cara que se comercializa en toda Europa y está sujeta a cargas fiscales; por ello es importante que los consumidores, los países importadores y exportadores y las autoridades tributarias tengan confianza en que las mediciones son justas, consistentes y fiables. Además, el comercio del gas está sujeto a las regulaciones de la metrología legal y, para ello, los instrumentos de medida relevantes deben sufrir controles metrológicos con referencia a patrones de medida.

El pago del gas se realiza de acuerdo al volumen y el contenido energético (valor calorífico) del gas, lo que se determina mediante medidores de caudal y mediciones de la composición del gas. Las mediciones se realizan en muchos lugares de la red de transporte de gas de forma diaria, semanal, mensual y anual y son un requisito específico en los puntos de transferencia; esto es, donde la propiedad del gas de un conducto cambia de manos, como, por ejemplo, en las fronteras. La composición del gas se

mide mediante cromatografía de gases y el valor calorífico se calcula automáticamente por el cromatógrafo de acuerdo a normas técnicas internacionales. La exactitud en las mediciones es fundamental para garantizar el comercio justo en un lugar y la instrumentación de los distintos suministradores tiene que concordar para evitar disputas comerciales. (Fuente: EURAMET)

Facturación de los recorridos en ciudad por taxímetros

Los taxímetros son «instrumentos de medida» muy particulares, que aunque miden tiempo (en segundos) y distancia (en metros), no lo indican de forma directa en su pantalla de visualización. En realidad es un dispositivo calculador que, a partir de las diferentes señales que recibe de los diferentes sensores, referentes a las distancias recorridas y, por debajo de determinada velocidad, al tiempo durante el que se ocupa el vehículo, y teniendo en cuenta los suplementos autorizados por los reglamentos en vigor y la tarifa aplicable, calculan automáticamente e indican en todo momento el importe a pagar.

Para su funcionamiento efectivo, necesitan estar instalados en un vehículo, a partir del cual reciben la señal de velocidad (el vehículo hace de transductor de la señal de distancia) para calcular el recorrido del servicio y así su importe. Es por ello, que las características del vehículo en el que se instalan repercuten en el importe a cobrar a los usuarios.

Uno de estas características determinante es el diámetro de los neumáticos y la presión de los mismos. Con el paso del tiempo, los cambios de temperatura y los efectos de la propia rodadura sobre la carretera, la presión de los neumáticos desciende y por ello es necesario su revisión y corrección periódica.

Veamos un ejemplo: para un vehículo taxi en el que se instala un neumático convencional 215/50 R17 91V, la presión de inflado definida por el fabricante es 2,3 bar. Estimando que la presión de los neumáticos disminuya 0,5 bar en el eje que el vehículo toma de referencia para medir la distancia (eje de captadores) y se sitúe en 1,8 bar, se puede comprobar que la distancia que deben recorrer los neumáticos para un valor monetario fijo es menor; o lo que es lo mismo, para recorrer una distancia fija, la facturación será mayor. En este caso concreto, cada 2700 m se facturarían unos 0,05 € de más para una tarifa tipo gran ciudad como la de Madrid del año 2019.

Esta cantidad puede que no parezca importante, pero considerando el número de licencias de taxi en una gran ciudad y en un periodo anual, quizás los valores puedan sorprender.

Si tomamos como ejemplo el Ayuntamiento de Madrid:

- El ayuntamiento de Madrid tiene concedidas 15 723 licencias de taxi. De todos estos vehículos vamos a suponer que un tercio (5000 aproximadamente) de los conductores de taxi no revisa la presión de sus vehículos habitualmente y la presión cae hasta 0,5 bar menos.*
- Es conocido que de los 208 km que recorre un taxi diariamente, solo 94 km se realizan aplicando tarifa y que un taxi está operativo 337 días al año (valores promedios).*

Con todos estos datos podemos valorar que se produce un sobrecoste cercano a los 3 millones de euros anuales (estimados) para el caso de que un tercio de las licencias del Área de Prestación Conjunta del Ayuntamiento de Madrid presente una presión de inflado por debajo del valor marcado por el fabricante del vehículo en tan solo 0,5 bar.

Este tipo de instrumentos está sometido a control metrológico del Estado y ello garantiza la fiabilidad de la medida y la protección del consumidor.

Facturación de la energía eléctrica consumida en los hogares

El 20% de la energía que se consume en España se gasta en los hogares, siendo el consumo eléctrico el 25% de la electricidad consumida en el país. El impacto de dicho consumo en el presupuesto de cada ciudadano es cada vez más apreciable, de ahí que una gestión adecuada y eficiente del mismo sea fundamental.

La facturación se realiza por los contadores de energía eléctrica (clase A). Desde un enfoque metrológico nos preguntamos: ¿Qué puede suponer un error en la medida del +2,0% en un contador de energía eléctrica (Clase A) para un hogar medio en nuestro país?

Si partimos de datos del INE como:

- Consumo medio anual de un hogar tipo piso en zona continental: 10 045 kWh*
- Consumo medio en España: 59 983 GWh*
- Precio del kWh de energía consumida, incluido el acceso a la energía: 0,137 €/kWh*

Podemos estimar que un aumento del error de los contadores de energía en un 2% significaría:

- para un hogar en zona continental: 27,52 €*
- para todo el país: 164,4 millones de euros*

Como se aprecia, el impacto económico que supone un incremento del error de medida del +2,0% en el contador de energía eléctrica,

no es muy grande para un único usuario, pero para todo el país es ya considerable. Hay que tener en cuenta que un error del +2,0% en un contador de energía eléctrica es el máximo error permitido reglamentariamente en condiciones de referencia para un contador clase A (usualmente el que se instala en los contadores domésticos) y es posible que este porcentaje se vea superado en ocasiones por las variaciones de temperatura u otros factores externos en el cuarto de contadores.

La metrología legal es la herramienta que defiende a los consumidores y, a través de sus controles, verificaciones e inspecciones, garantiza que los errores de medida no superen el máximo permitido.

SALUD

Otro de los campos de actuación relevante de la metrología es el control y la calibración de los instrumentos de medida utilizados en diagnósticos y tratamientos médicos. Estamos hablando de instrumentos como termómetros clínicos, esfigmomanómetros o tensiómetros, electrocardiógrafos, aparatos para medir el ritmo de los pulsos (pulsómetros), tonómetros, audiómetros, etc. La metrología acompaña y apoya a las técnicas y métodos de diagnosis y tratamiento. Las medidas en el campo de la salud son una herramienta básica para mejorar y asegurar la calidad de vida.

En este campo, los profesionales de la salud se apoyan en los instrumentos de medida como una herramienta, pero no son expertos en los mismos, por lo que la metrología debe garantizarles que las medidas que obtengan con ellos sean fiables, exactas y reproducibles, dado que no disponen ni de medios ni de conocimientos para contrastarlas. La incidencia que se puede derivar de una medida inexacta, como por ejemplo en una radiación terapéutica, puede

llegar a ser perjudicial para un paciente. Lo mismo puede ocurrir en análisis clínicos no rigurosos que llevarían a tratamientos inadecuados.

En la protección de la salud, la metrología también es una herramienta decisiva en otros casos que no son tan obvios, como puede ser la medida y control de la composición de los productos de consumo, como por ejemplo el contenido en metales pesados como cadmio, plomo y mercurio, u otras sustancias, que en determinadas proporciones hacen de un producto consumible un verdadero veneno.

Ejemplos:

Hipertensión arterial

La hipertensión arterial (HTA), el término médico para la presión arterial alta, es conocida como «la muerte silenciosa». La tensión arterial es la variable fisiológica más comúnmente medida y no por ello en la cuantía que sería deseable. Los diagnósticos de hipertensión arterial (HTA) dependen completamente de la medida de la tensión arterial. Alrededor del 43% de la población adulta española sufre hipertensión arterial (HTA), uno de los factores de riesgo más prevalente de enfermedad cardiovascular y el 37,4% de los hipertensos está sin diagnosticar, según un estudio de Di@bet.es de la Fundación Española del Corazón (FEC).

En España, un total de 12 153 personas murieron en 2016 a causa de enfermedades hipertensivas, según los datos del Instituto Nacional de Estadística (INE) sobre las causas de muerte en España.

La exactitud con que se mida esta variable fisiológica es fundamental para el buen diagnóstico y disminuir los posibles falsos positivos o la falta de tratamiento cuando en realidad sí lo necesitaría el paciente.

Tratamiento del Cáncer

En Europa, entre el 25% y el 33% de todos los ciudadanos sufrirá cáncer en algún momento de su vida; cada año aparecen 3 millones de casos nuevos de cáncer y se producen 1,7 millones de fallecimientos en la UE. La radioterapia es un tratamiento importante, tanto para los cuidados terapéuticos como para los paliativos. Se utiliza para tratar a un tercio de todos los pacientes de cáncer y cura a más personas que el conjunto de todos los medicamentos existentes. El éxito del tratamiento mediante radioterapia depende del suministro de la dosis correcta de radiación; si la dosis es demasiado baja el tratamiento no es efectivo, si es demasiado alta o su localización no es lo suficientemente exacta dentro del cuerpo, el paciente sufre de innecesarios y desagradables efectos secundarios. Por lo tanto, la confianza en la medición y suministro de las dosis es crítica y la medición exacta de las dosis de radioterapia es fundamental. (Fuente: EURAMET)

DEFENSA Y SEGURIDAD

La metrología ha sido un elemento clave en la defensa desde tiempos remotos y más recientemente en el campo de la seguridad, como se refleja en las acciones de la Comisión Europea orientadas a impulsar dicho sector.

El desarrollo técnico incrementa continuamente las posibilidades de defender mejor los intereses nacionales y las fronteras. El nivel tecnológico de los sistemas de detección empleados en el control de fronteras y la lucha antidroga, requiere instrumentos de medida exactos, con trazabilidad adecuada, para garantizar la correcta aplicación de la ley, con las consiguientes repercusiones nacionales, comunitarias e internacionales.

La metrología actúa asimismo en el aspecto de la seguridad de los ciudadanos. Un caso de especial relevancia en los países industrializados es la seguridad vial. Las medidas efectuadas con instrumentos de medida como manómetros para el inflado de los neumáticos, frenómetros, alineadores al paso, etc., son de suma importancia para nuestra seguridad en las carreteras. A su vez aquellos instrumentos utilizados por las autoridades públicas para controlar la velocidad (cinemómetros), la tasa de alcohol (etilómetros), etc., necesitan proporcionar medidas fiables y exactas, a fin de respetar los derechos de los ciudadanos y aplicar las posibles sanciones de una forma justa.

Otro de los diversos sectores de incidencia es el de los transportes públicos (aéreos, terrestres y marítimos), en donde se debe disponer de instrumentos cuyos resultados garanticen la seguridad de los pasajeros, como aquellos destinados al pesaje, que permitan cuantificar la carga así como su distribución, instrumentos de navegación, desarrollo de sistemas automáticos activos de protección de peatones en casos de colisión, sistemas automáticos de frenado, etc.

Un sector asimismo relevante es el de la seguridad laboral, en donde muchas de las actuaciones relacionadas con la seguridad e higiene en el trabajo dependen de las medidas realizadas por instrumentos específicos, como en la medida de parámetros de confort y estrés térmico (niveles de ruido, temperatura, radiación, etc.), o el contenido de nanopartículas en suspensión en ambientes laborales.

Ejemplos:

Regulación de inflado de neumáticos de vehículos a motor

El parámetro de la presión de los neumáticos del automóvil es fundamental en la seguridad vial; así por ejemplo una presión

excesiva disminuye la adherencia en la carretera e incluso aumenta el riesgo de que ocurra un reventón. Además, la banda de rodamiento de un neumático sobreinflado se desgastará mucho más rápido en el centro y será más vulnerable si circula por una mala calzada.

Por otro lado, una rueda con una presión baja tiene una mayor tendencia al aquaplaning, aumenta la distancia de frenado e incrementa el consumo de combustible. Los neumáticos con 1 bar menos de presión de inflado de la recomendada tienen una resistencia mayor a la rodadura, lo que puede suponer hasta un 6 % más de consumo de carburante.

Desde el punto de vista de la velocidad y su indicación en el velocímetro, la presión de inflado afecta también a la distancia entre el eje de giro de la rueda y la calzada, que es el radio efectivo de giro de la rueda, por lo que repercute en la referida indicación del velocímetro, y esto puede llevar a una infracción inconsciente en el límite velocidad.

De ahí la necesidad de controlar periódicamente la presión de los neumáticos con dispositivos de medida de presión de neumáticos fiables que suelen estar sometidos a los controles de la metrología legal.

Control de velocidad en carreteras

El incumplimiento de los límites de velocidad es un grave problema para la seguridad vial, tal como demuestran los datos estadísticos de la DGT. La velocidad inadecuada o excesiva es factor concurrente en uno de cada tres accidentes mortales en las carreteras españolas.

Una de las medidas disuasorias que mundialmente se utiliza es el control de velocidad a través de los cinemómetros, entendiéndose

por tal cualquier instrumento destinado a medir la velocidad de circulación de los vehículos a motor. Pueden utilizar diferentes tecnologías: doppler, láser, de cables piezoeléctricos, y diferentes tipologías: estáticos, móviles, de tramo, instalados en aeronave, etc.

Los errores máximos permitidos (EMP) relativos a los cinemómetros vienen reflejados en las correspondientes órdenes de aplicación, siendo diferentes dependiendo de su tipo, pero en cualquier caso cubriendo el riesgo asociado y garantizando siempre lecturas a favor del conductor y por lo tanto la protección de sus derechos.

SOSTENIBILIDAD

Medioambiente

El cuidado del medio ambiente es esencial para nuestro bienestar y el futuro de nuestro planeta. Sus cambios nos afectan a todos y es motivo de preocupación, ya que se cree cada vez con mayor convicción, que la actividad humana actual le está afectando negativamente, como prueban los diferentes informes y tratados internacionales.

La calidad de vida de la población, y más concretamente de las grandes urbes, está experimentando un fuerte deterioro debido a la contaminación:

- gases de combustión y partículas emitidas por los tubos de escape de los vehículos automóviles,
- ruido generado por el tráfico rodado, o recibido por el entorno de las instalaciones productivas o en las cercanías de aeropuertos y ferrocarriles,
- vertidos industriales, asimilables a urbanos no tratados adecuadamente,

- contaminación del agua potable, ya sea de cauces naturales o de acuíferos y mares con sustancias químicas con contenido tóxico, tales como detergentes, pesticidas, y otros, con el consiguiente impacto sobre la fauna o la contaminación del suelo y su efecto sobre la agricultura en términos económicos y de salud,
- altas concentraciones de radón en sótanos y estacionamientos subterráneos,
- radiación ultravioleta excesiva, por daños en la capa de ozono,
- campos electromagnéticos de baja frecuencia al operar aparatos eléctricos, o de alta frecuencia en las transmisiones de radio.

Por esta razón, las mediciones sobre la calidad del medio ambiente son más importantes que nunca, pues nos ayudan a vigilar los cambios en él y a determinar sus efectos futuros sobre los organismos vivos y los recursos naturales del planeta.

Se cree que la contaminación del aire es responsable de más de 400 000 muertes prematuras cada año en Europa, dañando también la vegetación y los ecosistemas. La Directiva Europea de Calidad de Aire Ambiental y la Directiva de Límites Nacionales de Emisión (NEC, «National Emission Ceilings») establecen límites estrictos en los niveles permitidos de contaminantes en el aire. La metrología ayuda a la supervisión de los valores límites establecidos y con ello al cumplimiento de las normativas aplicables en esta materia.

Ejemplos:

Abonado de tierras

El consumo excesivo de fertilizantes es costoso para los agricultores y aumenta la contaminación y el daño debido a los residuos que los campos cultivados vierten en los arroyos, ríos y tierras adyacentes. El consumo excesivo a menudo no es intencionado y

es el resultado de una falta de conocimiento preciso sobre la calidad del suelo, el uso de fertilizante y los tipos de fertilizantes.

Soluciones innovadoras basadas en la metrología han contribuido al desarrollo de esparcidores inteligentes de abono y al objetivo más general de la «agricultura de precisión». La solución incluye la medición en tiempo real de la masa de fertilizante distribuido por hectárea, combinado con una información de localización exacta (mediante GPS) y datos de la calidad del suelo. Esto permite adaptar la cantidad de fertilizante a las necesidades del suelo y del cultivo en diferentes lugares. Mientras que en la actualidad los niveles de fertilizante se estiman mediante análisis y cartografiado de la productividad de los campos cosechados en años previos, a la larga los sistemas inteligentes utilizarán datos de calidad del suelo a partir de los sistemas de observación terrestre y otras herramientas de teledetección. (Fuente: EURAMET).

Aseguramiento de la calidad del aire

Para el seguimiento de los contaminantes del medio ambiente (NO_x , SO_x , CO , CO_2 , % de Ozono, etc.) se necesitan datos precisos y fiables, tanto para la gestión de las medidas a adoptar, como para la emisión e implementación de regulaciones y políticas efectivas.

Es necesario que los datos ambientales medidos sean robustos y consistentes en todas las redes de seguimiento, tanto nacionales como europeas. Para ello, Europa cuenta con más de 6000 estaciones de seguimiento, que deben ser calibradas periódicamente, y nuevos métodos y capacidades de medida, desarrollados para los nuevos contaminantes que están apareciendo.

La contaminación del aire, por ejemplo, se estima que es responsable de más de 400 000 muertes prematuras en Europa cada año, dañando también a la vegetación y los ecosistemas.

Cambio Climático

El clima es la condición promedio de la atmósfera en una época dada del año y se acepta cada vez más que algunas actividades humanas pueden tener consecuencias sobre el clima de nuestro planeta y ser parcialmente responsables de fenómenos como el deshielo de los polos y la ocurrencia creciente de tormentas.

Para comprender y predecir el cambio climático se requiere la vigilancia del clima, y para que las predicciones climáticas sean creíbles, se requieren modelos evolutivos de calidad, con datos metrologicamente trazables que incluyan balances de incertidumbre.

Los resultados de las mediciones en este ámbito pueden tener consecuencias muy importantes a nivel social y económico.

Control y supervisión de recursos naturales

Conforme el planeta ve reducidos muchos de los preciados recursos básicos para la producción de energía y alimentos, tales como el agua, los minerales, el petróleo, el gas, la pesca, etc., se tiende a aumentar el interés político en el control de dichos recursos. Ello exige incrementar el número de mediciones, su exactitud y su credibilidad. Hay una creciente concienciación sobre cómo la metrología puede contribuir de forma efectiva a esta tarea.

La importancia de la metrología en este ámbito vino ya secundada por la Resolución 1ª de la 20ª Conferencia General de Pesas y Medidas de 1995, sobre la necesidad de utilizar el Sistema Internacional de Unidades en el campo de los estudios de los recursos, para que los resultados de medida pudiesen ser contrastables, comparables y aceptados internacionalmente.

DESARROLLO INDUSTRIAL

La metrología es una herramienta que protege a la industria de medidas incorrectas y promueve el desarrollo comercial al fomentar la competencia leal y prohibir la comercialización de productos que no satisfacen los requisitos técnicos y metrológicos establecidos en las regulaciones de los Estados.

Los instrumentos de medida se utilizan para determinar las propiedades de los componentes y de los productos terminados y se emplean cada vez más también para controlar, regular, automatizar y monitorizar procesos (metrología en proceso). Se emplean mediciones para verificar las tolerancias de fabricación y la operatividad funcional de los productos. Las mediciones son un componente crucial del aseguramiento de la calidad.

La metrología ayuda a la industria a:

- Mejorar la calidad de los productos, a partir de la mejora de las mediciones y métodos de control.
- Aumentar la competitividad. Promueve el desarrollo de sistemas de medida, análisis y ensayo y proporciona instrumentos de medida para la I+D+i.
- Disminuir las pérdidas por defectos (pocos rechazos).
- Asegurar la intercambiabilidad de las partes y componentes a través de medidas trazables. Mayor normalización internacional.
- Proporcionar confianza en los productos a través de las mediciones realizadas con incertidumbres reducidas y conocidas, y la utilización de procedimientos apropiados de evaluación de la conformidad.
- Reconocimiento y aceptación de productos en los distintos mercados (mercado globalizado).
- Generar conocimiento.

La medición sistemática, con un nivel de incertidumbre conocido, es una de las bases del control de calidad industrial y, en general, en las industrias más modernas, el coste de las mediciones supone del 10% al 15% de los costes de producción.

Ejemplo:

Fabricación con exactitud e intercambiabilidad de componentes

Para la construcción del avión Airbus A380, diferentes partes se fabrican en España, Reino Unido, Alemania y Francia. Posteriormente son transportadas a Francia, donde se ensamblan. Para poder realizar este proceso de ensamblaje, se necesitó que la metrología evolucionase y diese apoyo a la industria, de forma que permitiera fabricar los componentes con exactitudes de 50 micrómetros (0,000 050 m).

En la actualidad las áreas tradicionales de la industria han evolucionado hacia una mayor complejidad, requiriendo tolerancias de fabricación más exigentes y campos de medida más amplios con menores incertidumbres. La metrología es un elemento clave en la llamada «Industria 4.0». (Fuente: EURAMET)

DESARROLLO CIENTÍFICO Y TÉCNICO

La investigación en metrología es un pilar a tener en consideración para ayudar a resolver los retos sociales del milenio. Así por ejemplo, la investigación en nuevos métodos, procesos e instrumentación de medida es fundamental para el avance de sectores como el espacial, o los de comunicaciones, seguridad y protección, salud, industria, energía, medioambiente y muy especialmente para la monitorización del cambio climático. Además, la investigación en metrología y su desarrollo es básica

para respaldar técnicamente a los gobiernos en sus reglamentaciones y decisiones.

El desarrollo de proyectos específicos de I+D en metrología permite disponer de patrones y métodos de medida que favorecen la ruptura de algunas de las actuales barreras tecnológicas existentes en materia de reproducibilidad y aceptación de resultados en cualquiera de las aplicaciones industriales, como es el caso de la nanotecnología, donde las tolerancias e incertidumbres demandadas son del orden de mil veces menores a las actualmente existentes en la fabricación de precisión.

Los avances en metrología son básicos para la innovación, y potencian todas las áreas de la ciencia.

En metrología, la evolución es constante y se retroalimenta del avance de la tecnología y en general de la ciencia. Los patrones y procedimientos de medida no son estáticos, evolucionan continuamente reflejando el avance de la ciencia y en respuesta a las necesidades de la industria y de la sociedad.

Desarrollar y mejorar las capacidades de medida disponibles en un país, es esencial para potenciar y apoyar los procesos de innovación tecnológica y desarrollo industrial como elementos diferenciadores de las economías emergentes.

Ejemplo:

Desarrollo de relojes ópticos

Nuestra vida diaria, dentro de una sociedad altamente tecnológica, digitalizada y conectada, no sería una realidad si no dispusiésemos de una sincronización del tiempo a escala mundial.

Así, por ejemplo, se necesita disponer de una sincronización de los relojes de los satélites, para que los usuarios puedan tener una

geolocalización precisa. Un error de 1 nanosegundo supone un error de posición de 30 cm. Este dato, por ejemplo, nos indica la necesidad de mejora que se requiere para poder llegar a los vehículos autónomos sin conductor. En la actualidad se están desarrollando nuevos instrumentos y patrones primarios de tiempo basados en tecnologías ópticas (trampas de iones, redes ópticas) que sustituirán en menos de una década a los tradicionales relojes atómicos de Cesio, mejorando su exactitud hasta en dos o tres niveles.

1.3 Impacto económico de la Metrología

La *metrología* se considera un *vector de competitividad* en las sociedades tecnológicamente avanzadas. Debido a ello, desarrollar y mejorar la capacidad de medición de un país es esencial para potenciar y apoyar los procesos de innovación tecnológica y desarrollo industrial como elemento diferenciador de las economías emergentes. La capacidad de medición de un país define las posibilidades de desarrollo industrial. Lo que no se puede medir, generalmente no se entiende suficientemente y no puede producirse con exactitud ni controlarlo con garantías y, por supuesto, no puede mejorarse ni evolucionar.

«La espina dorsal de nuestro mundo de alta tecnología es la metrología, la ciencia de la medición. Todos los aspectos de nuestra vida cotidiana están afectados por ella. Unas mediciones cada vez más precisas y fiables son esenciales para impulsar la innovación y el crecimiento económico en nuestra economía basada en el conocimiento. La medición fiable y trazable permite a la comunidad científica en general construir mejores instrumentos y hacer una mejor ciencia. Abre nuevos territorios a la industria, creando espacio y oportunidades para innovar. Es imprescindible

para sustentar y hacer avanzar el conocimiento y los acuerdos con respecto a retos mundiales como la atención sanitaria y el cambio climático.

La resolución de importantes retos sociales depende a menudo de las soluciones que aporta la metrología. Tal es particularmente el caso en los ámbitos de la salud, el medio ambiente y la energía, pero también en otros, como el transporte (vehículos guiados de forma automática, reducción de las emisiones), la agricultura (seguridad de los alimentos) o la seguridad (mediciones de radiación y sustancias químicas, mejora de la seguridad de los datos)» (Documento de la Comisión Europea, relativo a la evaluación del impacto de la propuesta del programa EMPIR).

La infraestructura metrológica nacional y en concreto el desarrollo y mantenimiento de los patrones nacionales de medida suelen ser financiados con fondos públicos, por lo que en una economía de libre mercado como la europea, cada vez es más necesario evaluar las políticas de financiación pública a la metrología y su aportación a la economía y bienestar del país. En este sentido, merece la pena destacar el informe emitido por el CIPM donde se recogen a grandes rasgos resultados de cuatro grandes estudios que se han realizado en el pasado por el NIST (EEUU), DTI (Reino Unido), NRC (Canadá) y la Unión Europea. Cada uno de estos estudios ha utilizado diferentes supuestos económicos.

De los estudios mencionados anteriormente se deduce que, en las sociedades industriales modernas, el valor anual de las transacciones en donde las medidas juegan un papel fundamental es del 50 % del PIB. Este dato es muy significativo e importante para valorar lo que significaría una reducción de la infraestructura metrológica. Un aumento en el error medio de las medidas del 0,1 % significaría un coste social del orden del 0,05 % del PIB, que es mucho mayor

que el coste que destinan los Estados a mantener una infraestructura de metrología. (Para el PIB de España de 2017, 1.166.319 M€, supondría 583 M€). Asimismo, se indica que la UE gasta alrededor del 1% del PIB en actividades de medida, estimándose que por cada euro dedicado a actividades relacionadas con la medición se generan 3 euros. Así pues, el ratio coste/beneficio es de 1/3, esto sin tener en cuenta las externalidades.

Ejemplos:

Repetición de análisis clínicos

La directiva de diagnóstico in vitro (IVD) exige que los análisis llevados a cabo en laboratorios de hospitales y clínicas médicas sean «trazables a un método de referencia o a materiales de referencia de orden superior». Uno de los beneficios de la implementación completa de esta directiva es que los análisis no tendrán que ser repetidos innecesariamente, lo que significa un ahorro en el gasto sanitario de al menos 25 euros per cápita, o lo que es igual, 125 millones de euros para un país de cinco millones de habitantes.

El coste de los análisis médicos redundantes se estima que supone de un 15% a un 33% del gasto total de un laboratorio médico. En un laboratorio moderno el coste típico es del orden del 7,9% del tratamiento médico, siendo los tratamientos un tercio del coste sanitario total, lo que es considerable para muchos países. (EURAMET)

Sincronización y exactitud del tiempo

En el sector financiero, se necesita disponer de un tiempo certificado (stamped time) inmediato y sincronizado, para evitar errores involuntarios en la ejecución de las órdenes. Errores de sincronización de 15 milisegundos pueden suponer pérdidas/ganancias de 28 millones de dólares.

En el pasado se descubrieron en algunos bancos algunas conductas dudosas, al introducir un período de espera de algunos microsegundos entre la recepción del pedido de un cliente y su ejecución. Los organismos internacionales han tomado medidas para evitar estas situaciones y exigen en sus regulaciones disponer de un tiempo preciso y trazable al UTC (Tiempo Universal Coordinado). (Fuente: Noël Dimarcq, CNRS. Charla 26ª CGPM)

«Las medidas son algo más que una creación de la sociedad, ellas crean la sociedad». Ken Alder. «La medida de todas las cosas»

1.4 Una mirada a los orígenes

La medición, como una actividad necesaria, se estima que surgió desde los primeros momentos de la aparición de la humanidad y en concreto cuando apareció la división del trabajo, produciéndose el intercambio de bienes. Se desarrolló en paralelo con la aparición de las primeras sociedades urbanas en Mesopotamia y Egipto, así como en China.

Uno de los primeros ejemplos conocidos de un patrón universalmente aceptado para las transacciones diarias, era el antebrazo egipcio (codo) (aproximadamente alrededor del 3000 a.C.), igual a la distancia entre el codo y el fin de los dedos y equivalente a unos 457 mm. Para evitar la falta de uniformidad, los egipcios adoptaron a partir de la III dinastía un modelo de codo real, que equivalía a unos 525 mm, en forma de una barra, de granito negro, que todo el mundo podía utilizar para la «certificación de» su propia barra patrón. La unidad más pequeña era el «meh ni-sout», igual a la anchura de un dedo. Un codo se fijó igual a 24 meh ni-sout, un palmo era equivalente a 4 meh ni-sout, etc.

El próximo período cronológicamente importante fue el de los babilonios (alrededor del 1700 a.C.), quienes también usaron el codo como su unidad de longitud, ligeramente más largo que los codos egipcios (530 mm en vez de 525 mm de su homólogo egipcio), dividido en 30 kus, un número compatible con 60, lo que constituye la base del sistema babilónico de numeración.

Muchos de los antiguos sistemas de medida eran decimales, por la obvia razón de que nosotros, como seres humanos, tenemos diez dedos, que se utilizan con frecuencia para la numeración. Harappa es la primera civilización conocida, que utilizó el sistema decimal con subdivisiones.

La civilización de Harappa se desarrolló entre el 2500 y el 1700 a.C. en la provincia de Punjab, India. Los Harappas parece ser que fueron los primeros en aplicar un sistema coherente de pesos y medidas, con submúltiplos y múltiplos de $5/100$, $1/10$, $2/10$, $5/10$, 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200 y 500. Las excavaciones, por ejemplo, descubrieron una escala de medida de longitud, basada en las pulgadas indias (igual a 3,35 cm), cuyos múltiplos (de 10 y 100) se utilizaron con éxito para las construcciones.

Las medidas de peso en un principio, muy posiblemente solo estuviesen limitadas a metales nobles y piedras preciosas, tal como puede desprenderse de la información dada por Berrimann sobre que en la China antigua, el patrón de peso era un lingote de oro de dimensiones conocidas. La primera balanza de brazos iguales, muy rudimentaria que se tiene evidencia es del 9000 a.C. y presumiblemente se utilizaría en Mesopotamia. Hay evidencias de que en la época babilónica se utilizaba un patrón de peso denominado «mina».

El comercio en general se realizaba por medio de unidades de capacidad ya que las balanzas y sus patrones de peso de referencia eran costosos y no ampliamente disponibles por la sociedad.

Siguiendo con la cronología histórica, merece la pena resaltar el papel de la cultura y civilización griega y posteriormente la del imperio romano.

El esplendor de la cultura griega fue consecuencia de la difusión de los conocimientos y prácticas de culturas precedentes y su consolidación y desarrollo por la sociedad griega. Es por ello, que muchas de las unidades utilizadas tenían procedencias egipcias o babilónicas, entre otras. La primera información sobre medidas procede del poeta Homero, con referencias a unidades también encontradas en el periodo clásico (πήχης, οργυιά, πλέθρο). En los siglos siguientes, con el crecimiento del mercado y el comercio, el sistema de unidades griego se exportó a los países vecinos y territorios extranjeros, llegando a un grado de complejidad sin precedentes.

Los griegos utilizaron unidades de longitud, así como unidades de peso o volumen, algunas de las cuales procedían de las unidades

correspondientes de los egipcios y babilonios como ya se ha mencionado anteriormente.

Como unidad de longitud, los griegos tomaron el *pie* (equivalente a 308,3 mm, evaluada a partir de la longitud de las pistas de los estadios (600 pies), excepto el de Olimpia). Otras unidades eran el *coto* o *palmo menor* (1/4 pie), *la braza* (6 pies o 4 codos), *el codo* (1/4 pie), y *el dedo* (1/16 pies).

Las distancias se calculan en días de marcha (de un hombre, de una fuerza expedicionaria, de un caballo o de un barco). (Según Herodoto, la capacidad de marcha de un hombre era igual a 200 estadios y la de una fuerza expedicionaria de 150 estadios). Unidades usuales para grandes distancias eran el *canal* (equivalente a 2 estadios), la *caballería* (equivalente a 4 estadios) y el *dolichos* (equivalente a 12 estadios).

Para la medición de la superficie, se utilizó el *plethro cuadrado*, con lados de 30,83 m de longitud. Otras unidades de superficie fueron las *aroura* (1/4 de «plethro») y el *hectos* (1/6 de «plethro»).

Los pesos están frecuentemente asociados a la moneda, en tanto que las unidades de moneda implican un peso establecido de un metal determinado. Así, los atenienses impusieron a las ciudades de la Alianza ateniense el uso de *dracma Attica*, con base en una resolución de fecha entre 458-446 a.C., junto con un sistema de pesas y medidas. Cada ciudad se vio obligada a levantar en su «mercado» (Ἀγορά) un obelisco con una inscripción de esa resolución.

Durante el periodo de dominación romana, en todo su imperio, se impulsó y desarrolló la construcción de edificios y obras públicas y se avanzó considerablemente en el diseño y construcción de

instrumentos de medida. Las matemáticas y las ciencias naturales no ocuparon un primer puesto pero mantuvieron el legado griego. Su espíritu pragmático les permitió adoptar a su conveniencia y mejorar en algunos casos, los diferentes sistemas de medida que encontraron en los países conquistados.

Los sistemas europeos de medida se basaron inicialmente en los pesos y medidas romanos que, a su vez, se basan en los correspondientes griegos. Los romanos adoptaron el sistema griego con la unidad básica de longitud el *pes* (pie) (0,2962 m), subdividido en 12 *unciae* (pulgadas). Los romanos utilizaron el *gradus* (paso simple) (0,7405 m) y el *passus* (paso doble), igual a cinco pies (1,481 m), el *stadium* (estadio), equivalente a 625 pies (185,125 m), la *milia passuum* (milla romana), equivalente a 5000 pies (1481 m), y la *leuga* (legua romana) equivalente a 15 000 pies (4443 m). Otras unidades de longitud fueron: *digitus* (dedo) (1/16 pies), *palmus* (palmo) (1/4 pies), *palmipies* (mano) (1,25 pies), *ulna* o *cubitus* (codo) (1,5 pies) y *pértica* (10 pies).

La medida de superficie básica era el *pes quadratus*, aunque en la vida cotidiana se utilizaban el *acta geodésica* (equivalente al trabajo de medio día) y el *jugerum* (2518,2 m²) (yugada, que equivalía al trabajo de un día completo). Otras unidades fueron: *scripulum* (100 pies cuadrados), *clima* (3600 pies cuadrados), *actus* (14400 pies cuadrados), *heredium* (57600 pies cuadrados), *centuria* (5 760 000 pies cuadrados) y *saltus* (23 040 000 pies cuadrados).

En cuanto a capacidad, las medidas más usuales eran el *modius* (8,754 L), con sus divisores el *semodii* (0,5 modius); el *congius* (1/3 modius), la *hemina* (1/32 modius = 0,274 L), *acetabulum* (1/4 hemina), *cyathus* (1/192 modius), *quartarii* (1/64 modius = 0,137 L) y el *sextarius* (1/16 modius).

El *congius*, el *sextarius*, y el *cyathus* eran medidas de líquidos, y las dos últimas servían también para los sólidos.

En cuanto al peso, la unidad era la *libra*, que se dividía en doce *onzas* (unzia), y la onza a su vez se dividía en 24 *escrúpulos*. Otras unidades eran; *deunx* (11/12 libra), *dextans* (10/12 libra); *septunx* (7/12 libra); *semis* (6/12 libra); *sextans* (2/12 libra).

En el templo de Juno de Roma, se guardaban a disposición de los ciudadanos, un modelo de todas las medidas, fabricadas en bronce o hueso.

Antes del Renacimiento, el Imperio Bizantino jugó también un papel importante, por ser su metrología el germen de los módulos árabes posteriores. Todos los módulos empleados por Bizancio derivan de los griegos y de las aportaciones romanas posteriores, éstas «helenizadas», conduciendo a nombres griegos en su totalidad.

La Ciencia, entendida como tal, llegó al Islam con la dinastía de los Omeyyas, que en el año 661 trasladaron su capital a Damasco, tras haber estado afincados en Siria y haber vivido «helenizados». En el año 827, el califa Al-Ma'mun ordenó volver a medir el grado de meridiano, tratando de cotejar el cálculo efectuado en su tiempo por Ptolomeo.

Entre el final del siglo xv y el xviii, se consiguieron importantes avances en la astronomía, la geodesia y la medida del tiempo. La aparición de nuevas ideas marca para siempre el devenir de la ciencia en los países desarrollados. La metrología acompaña y precede en muchos casos a los avances científicos. Todo esto tiene lugar cuando se establece con firmeza la superioridad del método experimental frente a la especulación. Aunque todos los

descubrimientos e innovaciones en este periodo, tienen más importancia en campos como la astronomía y la geodesia, también en la metrología aparece, a cargo de Galileo, una clara e importante distinción entre propiedades mensurables y no mensurables de la materia.

A su vez con el desarrollo y el crecimiento del comercio, las medidas paulatinamente proliferaron e incluso algunas con el mismo nombre tenían diferente valor entre regiones o ciudades o incluso entre gremios y profesiones. Aparecieron las medidas especializadas adecuadas para uso comercial y científico. En Francia, antes de la Revolución Francesa, se estima que bajo la cobertura de unos ochocientos nombres, existían casi 250 000 unidades de medida en uso. En España ocurría algo similar aunque con menor número de unidades (Véase la obra de D. José Vicente Aznar García: *La unificación de los pesos y medidas en España durante el siglo XX*).

En Europa, la constitución de los estados nacionales y la creciente expansión del comercio impusieron gradualmente el uso de un sistema de unidades ampliamente aceptado y definido con precisión, sobre la base de las constantes naturales y así se llegó a la prevalencia progresiva de dos sistemas de unidades. Uno claramente evolucionario, que se desarrolló involuntariamente, conocido como Sistema Imperial británico, que se utiliza hoy en día solamente en Gran Bretaña y sus antiguas colonias americanas, y otro generado en base a su relación con las constantes de la naturaleza, conocido como «Sistema Internacional», proveniente del Sistema Métrico Decimal, que es el más extendido en todo el mundo.

2 Organización de la metrología

2.1 Internacional

El mercado global y el comercio tienen una gran dependencia de las medidas y ensayos de productos, debiendo ser estas fiables y aceptadas internacionalmente. La metrología ofrece un soporte fundamental para la eliminación de las barreras técnicas y para el desarrollo de las ciencias físicas, la ingeniería, la química, las ciencias biológicas y áreas afines tales como el medio ambiente, la medicina, la agricultura, la alimentación, etc. y con todo ello contribuye al desarrollo económico y social de los países.

Para la aceptación y confianza de las medidas a nivel internacional se necesita una estructura metrológica internacional que potencie la armonización y el reconocimiento en el plano internacional, coordinando las diferentes infraestructuras metrológicas de los países. Esta estructura, que ha ido evolucionando con la sociedad, podemos decir que tuvo sus inicios a finales del siglo XIX, con la Convención del Metro (segundo tratado internacional más antiguo en vigor).

La estructura Metrológica Internacional está compuesta primordialmente por la Convención del Metro (*Convention du Mètre*), la Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM), el Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM), la Oficina Internacional de Pesas y Medidas (BIPM) y el conjunto de Institutos Nacionales de Metrología (INM) del mundo, que se agrupan en Organizaciones Regionales de Metrología (EURAMET, COOMET, APMP, SIM, AFRIMETS, GULFMET, ...).

A continuación veamos de forma resumida qué son estos organismos:

Convención del Metro: La Convención del Metro es un tratado diplomático establecido entre 60 naciones (a 7 de agosto de 2018), las cuales dan autoridad a la Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM), al CIPM y al BIPM como entes reguladores respecto a temas metroológicos.

La CGPM se reúne en París una vez cada cuatro años y está compuesta por representantes de Gobiernos de los Estados Miembros, y por observadores de otros Estados y Economías Asociadas. Cada Conferencia General analiza los informes del Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM), discute y examina el trabajo realizado por los Institutos Nacionales de Metrología (INM) y el BIPM, y aprueba recomendaciones y resoluciones internacionales sobre nuevas determinaciones metroológicas fundamentales y sobre cuestiones importantes relativas al propio BIPM, incluyendo el presupuesto de gastos para el siguiente periodo de cuatro años.

Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM): El Comité Internacional de Pesas y Medidas está conformado por 18 miembros a título personal de países firmantes de la Convención del Metro. Su principal función es la de asegurar la unificación y uniformidad de las unidades de medida, lo cual se realiza en acción conjunta con la CGPM. El CIPM cumple las funciones de consejo directivo para el BIPM. Esto lo realiza por la autoridad recibida de la Convención del Metro y opera a través de una serie de Comités Consultivos (CC). El CIPM tiene establecidos diez Comités Consultivos, donde participan como asesores en temas científicos y técnicos, expertos mundiales en sus campos específicos. Entre las tareas de estos Comités está el análisis

detallado de los avances en el mundo de la física y la química, que puedan influir directamente sobre la metrología, la preparación de Recomendaciones para su discusión por el CIPM, la consideración de si se necesitan nuevas redefiniciones de las unidades de medida, el seguimiento de las actividades de los institutos nacionales y la búsqueda de oportunidades de colaboración o de recomendación de nuevos desarrollos, la identificación, planificación y ejecución de comparaciones clave de patrones nacionales de medida y aconsejar al CIPM sobre el trabajo científico a desarrollar por el BIPM.

Los Comités Consultivos existentes en la actualidad son los siguientes:

- CCAUV (1998): Comité Consultivo de Acústica, Ultrasonidos y Vibración
- CCEM (1927): Comité Consultivo de Electricidad y Magnetismo
- CCL (1952): Comité Consultivo de Longitud
- CCM (1980): Comité Consultivo de Masa y Magnitudes Relacionadas
- CCPR (1933): Comité Consultivo de Fotometría y Radiometría
- CCQM (1993): Comité Consultivo de Cantidad de Sustancia – Metrología Química
- CCRI (1958): Comité Consultivo de Radiaciones Ionizantes
- CCT (1937): Comité Consultivo de Termometría
- CCTF (1956): Comité Consultivo de Tiempo y Frecuencia
- CCU (1964): Comité Consultivo de Unidades

Cada vez es mayor el papel estratégico que tienen los CC en el aseguramiento de la consistencia de la metrología mundial y del sistema internacional de unidades (SI).

Oficina Internacional de Pesas y Medidas (BIPM, por sus siglas en francés, *Bureau International des Poids et Mesures*): La Oficina Internacional de Pesas y Medidas fue establecida por la Convención del Metro y se ubica en Sèvres, cerca de París, Francia. Está financiada por los miembros de la Convención del Metro y bajo la exclusiva supervisión del CIPM.

La función del BIPM es la de asegurar la uniformidad de las medidas y su trazabilidad al Sistema Internacional de Unidades (SI). Esta tarea se lleva a cabo de formas variadas, desde la diseminación directa de las unidades (caso de la masa y el tiempo) a la coordinación de comparaciones internacionales de patrones nacionales de medida (como en química, electricidad o radiaciones ionizantes). Una de las tareas más importante del BIPM es la coordinación internacional de la metrología, principalmente a través de los Institutos Nacionales de Metrología (INM), que realizan la diseminación de las unidades de medida proporcionando trazabilidad al SI a los laboratorios de calibración y finalmente a la industria. Además, coordina las investigaciones científicas dirigidas a mantener al día el SI.

Como resumen de los órganos de la Convención del Metro hasta aquí expuestos, se presenta la Fig. 2 en la que se recoge la organización de la Convención del Metro.

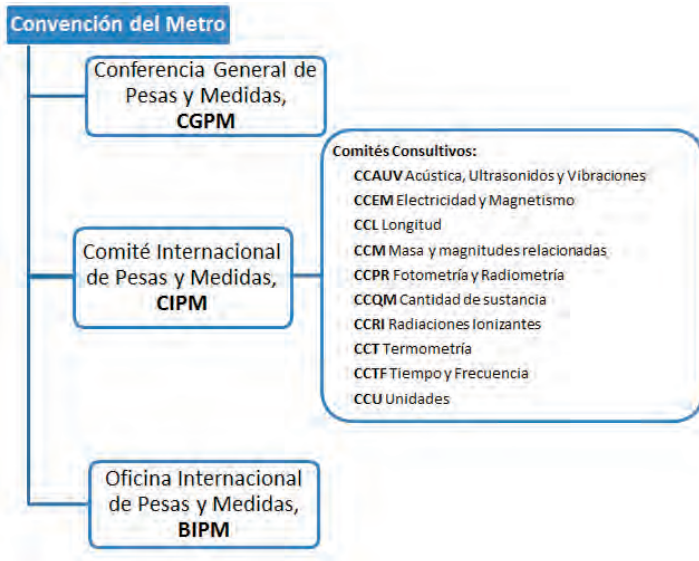


Fig. 2: Órganos de la Convención del Metro

Organizaciones Regionales de Metrología: el conjunto de Institutos Nacionales de Metrología (National Metrology Institutes, NMI) del mundo, se agrupan en Organizaciones Regionales de Metrología (RMO en sus siglas en inglés). Varios factores motivaron su creación:

- Mejorar y estrechar las relaciones e intercambios entre los INM de los países vecinos en las regiones geográficas,
- Fortalecer la cooperación científica en metrología
- Facilitar el uso de instalaciones singulares y proporcionar servicios en la región
- Apoyar el desarrollo del acuerdo CIPM-ARM, principalmente a través de comparaciones y el apoyo a los países menos desarrollados.

Las primeras RMO se crearon entre 1970 y 1980, existiendo en la actualidad 6 reconocidas en el marco del acuerdo de reconocimiento mutuo CIPM-ARM del que más adelante se habla:

- AFRIMET: Intra-Africa Metrology System;
- APMP: Asia Pacific Metrology Programme;
- COOMET: Euro-Asian Cooperation of National Metrological Institutions;
- EURAMET: European Association of Metrology Institutes;
- SIM: Inter-American Metrology System.
- GULFMET: engloba a los Institutos Nacionales de Emiratos Árabes Unidos, Reino de Bahrein, Reino de Arabia Saudita, Sultanado de Omán, Estado de Qatar, Estado de Kuwait y República del Yemen.

La distribución geográfica de las organizaciones metrologías regionales (RMO) se muestra en la figura 3.



Fig. 3: Organizaciones Regionales de Metrología
(Cortesía BIPM)

Esta estructura metroológica internacional se complementa con una infraestructura en metrología legal liderada por la Organización Internacional de Metrología Legal (OIML) y el conjunto de organismos e institutos de metrología legal de los países agrupados en organizaciones regionales similares a la de los institutos nacionales (WELMEC, COOMET, APLM, SIM, ...).

2.2 Nacional

La Metrología en España está coordinada por el Consejo Superior de Metrología (CSM), órgano superior de asesoramiento y coordinación en materia de Metrología Científica, Técnica, Histórica y Legal. Tiene carácter interministerial, con la posibilidad de representación de las administraciones autonómica y local. Sus órganos (Fig. 4) son:

- El Pleno, presidido por el Secretario General de Industria.
- La Comisión de Laboratorios Asociados al CEM.
- La Comisión de Metrología Legal.
- La Secretaría Técnica, asignada al CEM.



Fig. 4: Órganos del CSM

El rol fundamental del CSM en el ámbito científico es consolidar, coordinar y potenciar el conjunto de instituciones y laboratorios españoles con responsabilidades metrológicas, y generar políticas de cooperación entre ellos. En el ámbito legal o regulatorio es proporcionar el marco de coordinación, e impulsar y fomentar la armonización de la aplicación de las regulaciones metrológicas.

En España, las realizaciones prácticas de las unidades de medida (patrones nacionales) y su diseminación al resto de usuarios de la metrología se realiza por el Centro Español de Metrología y sus Laboratorios Asociados, según se ilustra en la figura 5.

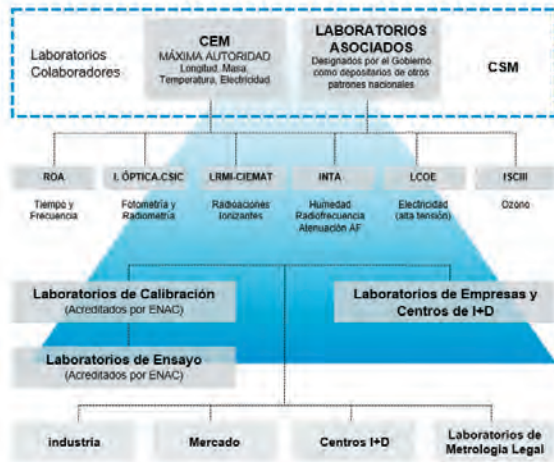


Fig. 5: Estructura Metrológica en España

Todos ellos forman la cúspide de la pirámide metrológica nacional, donde se establecen y mantienen los patrones primarios de las unidades de medida correspondientes al Sistema Internacional de Unidades (Sistema SI), declarado de uso legal en España por Ley 32/2014, de 22 de diciembre, de Metrología.

Las competencias en Metrología Legal están claramente separadas en:

- Legislativas: Corresponden al Estado, siendo el CEM el organismo encargado de su preparación.
- Ejecutivas: Corresponden a las Comunidades Autónomas.

El actual marco legislativo, manteniendo las competencias referidas, define los organismos que actúan en el denominado Control Metrológico del Estado, estableciendo los requisitos que han de satisfacer. Estos organismos, autorizados por las Comunidades Autónomas, a nivel nacional, operan apoyándose en sistemas de calidad y acreditación por la entidad nacional.

SEGUNDA PARTE

Introduciéndonos en la METROLOGÍA

«contar lo que se puede contar, medir lo que se puede medir y, lo que no se puede medir, hacerlo medible».

Galileo GALILEI (1564 a 1642)

3 Algunos conceptos metroológicos básicos

El Vocabulario Internacional de Metrología (VIM) es el documento que proporciona las definiciones de los conceptos metroológicos básicos que hay que conocer. En este apartado se recogen algunos de ellos. (VIM disponible en www.bipm.org y en su traducción al español en www.cem.es)

3.1 Magnitud, medición, mensurando

Magnitud. Propiedad de un fenómeno, cuerpo o sustancia, que puede expresarse cuantitativamente mediante un número y una referencia.

Habitualmente, dicha referencia suele ser una unidad de medida.

Medición. Proceso que consiste en obtener experimentalmente uno o varios valores que pueden atribuirse razonablemente a una magnitud.

Mensurando. Magnitud que se desea medir.

3.2 Patrón de medida, material de referencia, material de referencia certificado

Patrón de medida: realización de la definición de una magnitud dada, con un valor determinado y una incertidumbre de medida asociada, tomada como referencia

Un **patrón de medida**, o simplemente patrón, es una medida materializada, un instrumento de medida, un material de referencia o un sistema de medida concebido para definir, realizar, conservar o reproducir una unidad, o uno o más valores de una magnitud, de modo que sirva de referencia.

Ejemplo: El metro se *define* como la longitud del trayecto recorrido por la luz en el vacío durante un intervalo de tiempo de $1/299\,792\,458$ s. El patrón primario es pues una longitud de onda, por ejemplo la de un láser estabilizado de helio-neón. En niveles metroológicos inferiores se utilizan patrones materializados, como los bloques patrón, asegurándose la trazabilidad mediante el empleo de interferometría óptica para determinar la longitud de los bloques patrón con *referencia* a la longitud de onda de la luz láser mencionada anteriormente.

Material de referencia: material suficientemente homogéneo y estable con respecto a propiedades especificadas, establecido como apto para su uso previsto en una medición o en un examen de propiedades cualitativas.

Pueden ser sustancias puras, soluciones y mezclas de alta pureza, utilizadas para la calibración en procedimientos de análisis, o matriciales, materiales naturales y/o materiales naturales adicionados usados para la verificación de procedimientos analíticos y en casos específicos para la calibración de instrumentos de medida. Pueden presentarse bajo la forma de un gas, un líquido o un sólido, puro o compuesto.

Los materiales de referencia, entre otros usos, son utilizados, básicamente, para: calibrar instrumentos o equipos de medición; validar métodos analíticos; comprobar la equivalencia de métodos; verificar el correcto uso del método o detectar errores en su aplicación; contrastar la exactitud de los resultados; asignar valores a un material o sistema.

Material de Referencia Certificado (MRC): material de referencia donde una o más de sus propiedades están certificadas

por un procedimiento que establece su trazabilidad a una realización de la unidad en la que se expresan los valores de la propiedad. Cada valor certificado viene acompañado de su incertidumbre a un nivel declarado de confianza. El término material de referencia patrón, en inglés SRM, también se utiliza en algunas partes del mundo como sinónimo de MRC.

Los MRC generalmente se preparan en lotes. Los valores de la propiedad se determinan dentro de los límites de las incertidumbres declaradas por medio de medidas, sobre muestras representativas del lote completo.

Ejemplos de MRC:

Suero humano liofilizado:

- Intervalo o Matriz: Suero humano liofilizado
- Magnitud : Colesterol 185,3 mg/dL Glucosa 198,6 mg/dL Urea 89,6 mg/dL Ácido úrico 5,39 mg/dL Creatinina 4,37 mg/dL
- Presentación: Frasco ámbar con 3 g de suero Ampolleta ámbar con 3 mL de agua desionizada

Leche entera en polvo:

- Intervalo o Matriz: Leche entera en polvo
- Magnitud: Varía según el analito
- Presentación: Bolsa con 130 g
- Uso: para el control en el aseguramiento de la calidad de los laboratorios que realizan mediciones analíticas de proteína, grasa, cenizas, lactosa, vitamina A, vitamina E, humedad y calcio

3.3 Exactitud, precisión

Exactitud. Proximidad entre un valor medido y un valor verdadero (de un mensurando).

Precisión. Proximidad entre las indicaciones o los valores medidos obtenidos en mediciones repetidas de un mismo objeto, o de objetos similares bajo condiciones especificadas.

El concepto de exactitud de un instrumento de medida se refiere a la capacidad de dar valores o indicaciones próximas al valor verdadero de la magnitud medida. Una medición, o el resultado, es más exacto cuanto más pequeño es el error sistemático de medida; es decir, cuanto menor es la diferencia entre el valor medio de los sucesivos resultados obtenidos y el valor convencionalmente verdadero de la magnitud.

La idea de precisión de un instrumento de medida refleja la capacidad de dar valores o indicaciones próximas entre sí al efectuar mediciones repetidas. Una medición, o el resultado, es más preciso cuanto más pequeño es el error aleatorio de medida; es decir, cuanto menor es la dispersión que presentan entre sí los sucesivos resultados obtenidos.

De lo anterior se deduce que el resultado de una medición, o un instrumento, puede ser:

Exacto y preciso	Exacto pero no preciso	Preciso pero no exacto	Ni preciso ni exacto
Resultados muy próximos entre sí, con un valor medio muy cercano al valor verdadero (1)	Valor medio muy cercano al valor verdadero, pero gran dispersión de los resultados en torno al valor medio (2)	Resultados muy próximos entre sí pero valor medio alejado del valor verdadero (3)	Gran dispersión de los resultados en torno al valor medio y valor medio alejado del valor verdadero (4)

Como puede observarse, aunque en el lenguaje de la calle, exactitud y precisión suelen tomarse como sinónimos, en metrología, la diferenciación entre ambos es muy clara. En la figura 6, el centro de la diana representa el valor convencionalmente verdadero y los distintos puntos, los resultados de medida obtenidos en una serie de repeticiones.

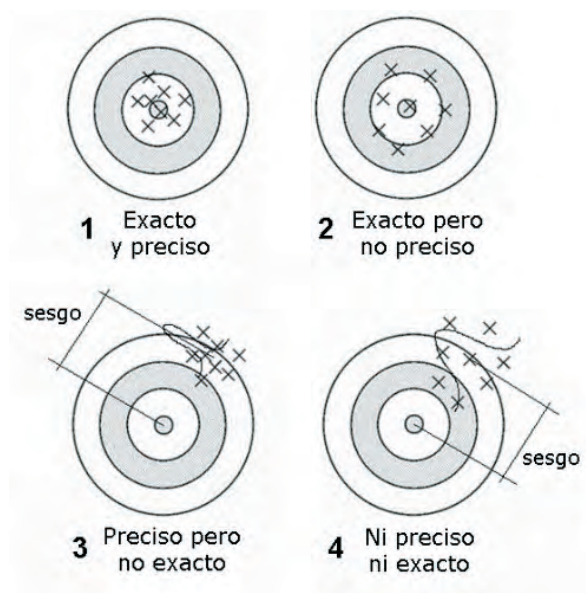


Fig. 6: Conceptos de exactitud y precisión

3.4 Error

Durante cualquier medición tienen lugar una serie de errores provenientes de distintas fuentes: el propio mensurando (definición y/o realización práctica), el instrumento de medida, las condiciones

ambientales, el operador, etc., los cuales se clasifican en sistemáticos y aleatorios. Los primeros pueden cancelarse o corregirse, si se conocen sus causas, mientras que sobre los segundos, de comportamiento impredecible, no puede actuarse de la misma manera. Ambos tipos de error contribuyen a la incertidumbre de medida, aunque debe quedar bien claro que son distintos de ésta.

Error de medida. Diferencia entre un valor medido de una magnitud y un valor de referencia.

Error aleatorio. Componente del error de medida que, en mediciones repetidas, varía de manera impredecible.

El error aleatorio oscila en torno a un valor medio y se supone que procede de variaciones temporales y espaciales de las magnitudes de influencia (temperatura, humedad, presión, etc.). No es posible compensar el error aleatorio de un resultado de medida, pero puede reducirse incrementando el número de observaciones, a fin de reducir la dispersión en torno al valor medio.

Error sistemático. Componente del error de medida que, en mediciones repetidas, permanece constante o varía de manera predecible.

El error sistemático no puede eliminarse totalmente, pero frecuentemente puede reducirse o incluso corregirse, si se identifican sus causas. Por ejemplo, el error obtenido al medir una pieza a una temperatura distinta de la de referencia, puede corregirse teniendo en cuenta la dilatación o contracción sufrida por la pieza ($\Delta L = \alpha \cdot \Delta T \cdot L$). Cuando no es posible aplicar una corrección, debe sumarse todo el error sistemático a la incertidumbre de medida expandida.

Corrección. Compensación de un efecto sistemático estimado.

La compensación puede tomar diferentes formas: aditiva, multiplicativa, o deducirse de una tabla.

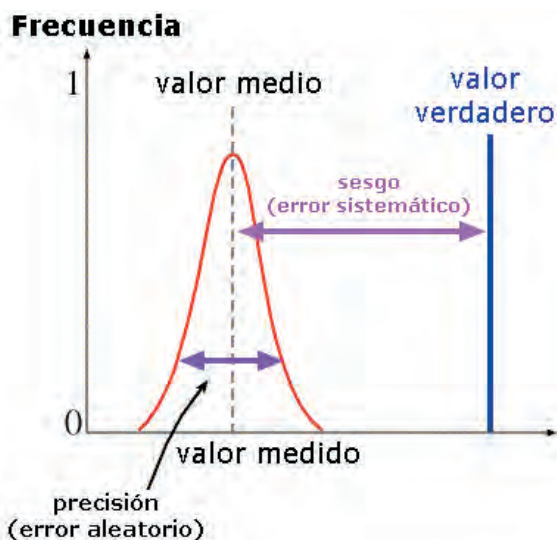


Fig. 7: Errores

Errores absoluto y relativo. Cualquier error puede expresarse en valor absoluto (error absoluto) o en valor relativo (error relativo). Así, si al medir una magnitud M , se encuentra un valor distinto M' , más o menos cercano a M , la diferencia $M' - M$ se denomina error absoluto (ε_a). El error absoluto puede ser positivo o negativo (no hay que confundirlo con el valor absoluto del error) y tiene las mismas dimensiones que la magnitud que se mide. En algunas mediciones, como las de longitud, este error suele denominarse desviación del valor nominal. El error relativo, definido como $\varepsilon_r = \frac{M' - M}{M} = \frac{\varepsilon_a}{M}$, da mayor idea de la dimensión del error absoluto, al compararlo con el valor M de la magnitud medida.

3.5 Incertidumbre de medida

Parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de los valores atribuidos a un mensurando, a partir de la información que se utiliza.

A la hora de expresar el resultado de una medición de una magnitud física, es obligado dar alguna indicación cuantitativa de la calidad del mismo o, dicho de otro modo, de la confianza que se tiene en él. Sin dicha indicación, las mediciones no pueden compararse entre sí, ni con otros valores de referencia. Esto se indica en la forma $R \pm U$, donde R es el resultado más probable y U es la incertidumbre de medida asociada al mismo.

Ejemplo: Si medimos nuestra estatura y decimos que tenemos una altura de 180,63 cm es un dato que no expresa la fiabilidad de la medida ni la exactitud con que se ha medido. En cambio si añadimos el parámetro incertidumbre de medida y decimos que medimos: 180,63 cm \pm 0,1 cm ($k=2$) ya estamos dando información que permite conocer la calidad de esa medida. Estamos informando de que con una probabilidad del 95% nuestra altura estará comprendida en el intervalo que va de 180,53 cm a 180,73 cm.

El concepto de incertidumbre es relativamente nuevo en la historia de la medición, por lo que muchos libros de texto continúan utilizando únicamente conceptos como error y análisis de errores, los cuales han formado parte desde hace mucho tiempo de la práctica de la medición. Sin embargo, estos conceptos, sin llegar a desaparecer, han evolucionado.

En la metrología actual sigue hablándose de error, pero no tanto de análisis de errores, en el sentido que a este se le daba hasta hace unos años, sino de *estimación de incertidumbres*. Es claro que hay

que indagar sobre los posibles errores existentes en una medición, con objeto de eliminarlos o corregirlos, pero ninguna corrección es total, por lo que existirá una incertidumbre asociada al resultado final; esto es, una duda acerca de la bondad con que el resultado final representa el valor de la magnitud medida. El concepto de incertidumbre se sitúa pues más allá del de error, existiendo métodos internacionalmente aceptados para su estimación.

De la misma manera que la utilización casi universal del Sistema Internacional de Unidades (SI) ha dado coherencia a todas las mediciones científico-técnicas, un consenso internacional sobre la evaluación y expresión de la incertidumbre de medida ha permitido dar significado a una gran variedad de resultados de medida en los campos de la ciencia, la ingeniería, el comercio, la industria y la reglamentación, para que fueran fácilmente entendidos e interpretados adecuadamente. En esta era del mercado global, es imprescindible que el método de evaluación y expresión de la incertidumbre sea uniforme en todo el mundo, de manera que las mediciones realizadas en diferentes países puedan ser comparadas fácilmente.

La estimación de la incertidumbre de medida se realiza conforme a lo estipulado en la *Guía para la expresión de la incertidumbre de medida* (GUM, en su expresión inglesa), versión española, 3ª ed., 2009, publicada por el CEM.

De manera sucinta, el proceso general a seguir es el siguiente:

- 1) Expresar matemáticamente la relación existente entre el mensurando Y y las magnitudes de entrada X_i de las que éste depende según $Y=f(X_1, X_2, \dots, X_N)$. La función f debe contener todas las magnitudes, incluyendo todas las correcciones y factores de corrección que pueden contribuir significativamente a la incertidumbre del resultado de medición.

- 2) Obtener una estimación y del mensurando Y , utilizando las estimaciones de entrada x_1, x_2, \dots, x_N de las magnitudes X_1, X_2, \dots, X_N , tal que

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N)$$

- a) Para magnitudes de entrada X_i estimadas a partir de n observaciones repetidas e independientes $X_{i,k}$, tomar como estimación de entrada x_i la media aritmética \bar{X}_i y como incertidumbre típica $u(x_i)$ de dicha estimación la desviación típica experimental de la media:

$$u(x_i) = s(\bar{X}_i) = \sqrt{\frac{s^2(x_k)}{n}}$$

[El valor de $u(x_i)$ así evaluado se denomina *incertidumbre típica tipo A*]

- b) Para magnitudes de entrada X_i no estimadas a partir de observaciones repetidas, la estimación x_i y la incertidumbre típica $u(x_i)$ derivan de decisiones científicas basadas en el conocimiento disponible sobre la posible variabilidad de X_i , lo que permite asociarle un determinado tipo de distribución (normal, rectangular, etc.). Este conocimiento puede provenir de:

- resultados de mediciones anteriores;
- experiencia o conocimientos generales sobre el comportamiento y las propiedades de los materiales e instrumentos utilizados;
- especificaciones del fabricante;
- datos de certificados de calibración u otros tipos de certificados;

- incertidumbres asignadas a valores de referencia o constantes naturales, procedentes de libros y manuales.

[Los valores de $u(x_i)$ así evaluados se denominan *incertidumbres típicas Tipo B*].

- 3) Obtener la incertidumbre típica combinada $u_c(y)$ como raíz cuadrada positiva de la varianza combinada $u_c^2(y)$, dada por:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i) = \sum_{i=1}^N [c_i u(x_i)]^2$$

donde f es la función que liga las magnitudes de entrada X_i con el mensurando Y . Cada $u(x_i)$ es una incertidumbre típica evaluada como se describe en a) (*evaluación Tipo A*) o en b) (*evaluación Tipo B*). La incertidumbre típica combinada $u_c(y)$ es una desviación típica estimada y caracteriza la dispersión de los valores que pueden ser razonablemente atribuidos al mensurando Y .

Las derivadas parciales $\partial f / \partial x_i$ son iguales a $\partial f / \partial X_i$, calculadas para $X_i = x_i$. Estas derivadas, denominadas *coeficientes de sensibilidad*, describen cómo varía la estimación de salida y , en función de las variaciones de las estimaciones de entrada x_1, x_2, \dots, x_N .

Cuando las magnitudes de entrada no son independientes, sino que están correlacionadas, la expresión adecuada para la varianza combinada $u_c^2(y)$ asociada al resultado de medida es

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j)$$

donde x_i y x_j son las estimaciones de X_i y X_j , y $u(x_i, x_j) = u(x_j, x_i)$ es la covarianza estimada asociada a x_i y x_j . El grado de correlación entre x_i y x_j viene dado por el coeficiente de correlación

$$r(x_i, x_j) = \frac{u(x_i, x_j)}{u(x_i)u(x_j)}$$

donde $r(x_i, x_j) = r(x_j, x_i)$ y $-1 \leq r(x_i, x_j) \leq +1$.

Puede existir una correlación significativa entre dos magnitudes de entrada si, por ejemplo, se utiliza para su determinación el mismo instrumento de medida, el mismo patrón o la misma referencia con incertidumbre típica significativa. Las correlaciones entre magnitudes de entrada no pueden ignorarse, siempre que existan y sean significativas.

Las expresiones de la incertidumbre típica combinada, tanto para las magnitudes independientes como para las correlacionadas, se basan en el desarrollo en serie de Taylor de primer orden de $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N)$, y expresan lo que en la *Guía* se denomina *ley de propagación de la incertidumbre*.

- 4) Obtener la incertidumbre expandida U multiplicando la incertidumbre típica combinada $u_c(y)$ por un *factor de cobertura* k , habitualmente entre 2 y 3, elegido en función del nivel de confianza requerido (normalmente un 95%) para el intervalo $[y-U, y+U]$ en torno al resultado de medida.
- 5) Indicar el resultado de la medición en la forma $Y = y \pm U$, indicando las unidades de y y de U . Indicar asimismo el valor de k utilizado para obtener U y el nivel de confianza asociado al intervalo $y \pm U$.

Ejemplo: $m_s = (100,021\ 47 \pm 0,000\ 79)$ g, con U determinada a partir de $u_c = 0,35$ mg y $k = 2,26$, basada en la distribución t de Student para $n = 9$ grados de libertad, y definiendo un intervalo con un nivel de confianza del 95%.

Para ver ejemplos concretos sobre la aplicación de la Guía GUM, se recomienda consultar los procedimientos de calibración disponibles en www.cem.es.

3.6 Repetibilidad, reproducibilidad

Repetibilidad (de los resultados de las mediciones)

Grado de concordancia entre resultados de sucesivas mediciones del mismo mensurando, efectuadas con aplicación de la totalidad de las mismas condiciones de medida.

NOTAS:

1. Estas condiciones se denominan condiciones de repetibilidad.
2. Las condiciones de repetibilidad comprenden:
 - El mismo procedimiento de medida
 - El mismo observador
 - El mismo instrumento de medida utilizado en las mismas condiciones
 - El mismo lugar
 - Repetición durante un corto periodo de tiempo
3. La repetibilidad puede expresarse cuantitativamente por medio de las características de dispersión de los resultados.

Reproducibilidad (de los resultados de las mediciones)

Grado de concordancia entre los resultados de las mediciones del mismo mensurando, efectuadas bajo diferentes condiciones de medida.

NOTAS:

1. Para que una expresión de la reproducibilidad sea válida, es necesario especificar las condiciones que han variado.
2. Las condiciones variables pueden comprender:
 - principio de medida
 - método de medida
 - observador
 - instrumento de medida
 - patrón de referencia
 - lugar
 - condiciones de utilización
 - tiempo
3. La reproducibilidad puede expresarse cuantitativamente por medio de las características de dispersión de los resultados.
4. Los resultados aquí considerados son habitualmente resultados corregidos.

3.7 Calibración

Calibración es aquella operación que bajo condiciones especificadas establece, en una primera etapa, una relación entre los valores y sus incertidumbres de medida asociadas, obtenidas a partir de los patrones de medida, y las correspondientes indicaciones con sus incertidumbres asociadas y, en una segunda etapa, utiliza esta información para establecer una relación que permita obtener un resultado de medida a partir de una indicación.

NOTA 1 Una calibración puede expresarse mediante una declaración, una función de calibración, un diagrama de calibración, una curva de calibración o una tabla de calibración. En algunos casos, puede consistir en una corrección aditiva o multiplicativa de la indicación con su incertidumbre correspondiente.

OJO: No hay que confundir calibración con ajuste; son acciones diferentes. El ajuste consiste en el conjunto de operaciones realizadas sobre un sistema de medida para que proporcione indicaciones prescritas, correspondientes a valores dados de la magnitud a medir. Ejemplo: el ajuste a cero de un micrómetro.

3.8 Verificación

Verificación: aportación de evidencia objetiva de que un elemento dado satisface los requisitos especificados.

NOTA 1: Los requisitos especificados pueden ser, por ejemplo, las especificaciones del fabricante.

NOTA 2 En metrología legal, la verificación, tal como la define el Vocabulario internacional de metrología legal (VIML) (Procedimiento de evaluación de la conformidad (demostración de que los requisitos específicos relativos a productos, procesos, sistemas personas u organismos se cumplen) y cuyo resultado es la colocación de una marca de verificación y/o la emisión de un certificado de verificación.) y en general en la evaluación de la conformidad, puede conllevar el examen, marcado o emisión de un certificado de verificación de un sistema de medida.

NOTA 3: No debe confundirse la verificación con la calibración. No toda verificación es una validación.

3.9 Validación

Validación: verificación de que los requisitos especificados son adecuados para un uso previsto.

3.10 Trazabilidad metrológica

Propiedad de un resultado de medida por la cual el resultado puede relacionarse con una referencia mediante una cadena ininterrumpida

y documentada de calibraciones, cada una de las cuales contribuye a la incertidumbre de medida.



Fig. 8: Trazabilidad metrológica

Esta propiedad es uno de los pilares para que los resultados de medida sean comparables entre sí, independientemente del lugar y tiempo en que se hayan realizado, facilitando su aceptación universal y reduciendo las potenciales barreras técnicas al comercio.

La cadena ininterrumpida de comparaciones, desde el patrón de mayor nivel metrológico hasta el instrumento de medida habitual, se denomina cadena de trazabilidad metrológica y en la conexión entre sus eslabones tienen lugar los procesos de calibración mencionados, conforme a procedimientos documentados, en donde se tienen en cuenta, entre otros, los factores de influencia y los condicionantes del medio donde se realiza la calibración, realizados por personal formado y cualificado, con la frecuencia necesaria para garantizar la estabilidad de los valores de referencia.

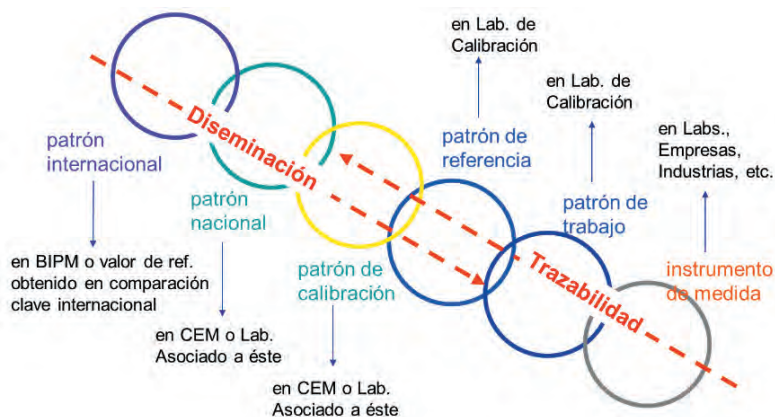


Fig. 9: Cadena de trazabilidad metroológica

La trazabilidad metroológica, en general, se refiere al Sistema Internacional de Unidades (SI); no obstante si tal trazabilidad no es posible, puede ser a otras referencias internacionales aceptadas, como puede ser el caso de las escalas de dureza o los patrones de referencia establecidos por la Organización Mundial de la Salud.

La trazabilidad metroológica es un atributo del resultado de medida y, por lo tanto, expresiones como «equipo trazable» o «trazable a la organización ...» son incorrectas en el ámbito de la metrología. La trazabilidad no debe referirse a un instrumento o a un certificado de calibración, ni se obtiene siguiendo un procedimiento de calibración específico o utilizando un equipo especial. Sólo los resultados de medida y los valores definidos por los patrones de medida son trazables metroológicamente.

4 Unidades legales de medida. Sistema Internacional de unidades (SI)

El Sistema Internacional de Unidades, SI, es el sistema adoptado internacionalmente, utilizado en la práctica científica y el único legal en España, en la Unión Europea y en numerosos otros países. El SI parte de un pequeño número de unidades denominadas *básicas* (metro, kilogramo, segundo, amperio, kelvin, mol y candela), correspondientes a otras tantas magnitudes. A partir de ellas, se obtienen las denominadas *derivadas*, como producto de potencias de las básicas. Cuando este producto de potencias no incluye ningún factor numérico distinto de la unidad, las unidades derivadas se denominan *coherentes*. Así pues, el SI es un sistema coherente de unidades, que permite cuantificar cualquier magnitud mensurable de interés en la investigación, la industria, el comercio o la sociedad, en campos tan variados como pueden ser la salud, la seguridad, o la protección del medio ambiente.

El SI es uno de los grandes logros del siglo XX. Es una herramienta imprescindible en la globalización.

Las ventajas que ofrece el SI sobre todos los demás sistemas de unidades son múltiples y evidentes. Podemos destacar entre otras las siguientes:

- es universal, porque abarca todos los campos de la ciencia, la técnica, la economía y el comercio,
- es coherente, porque no necesita de coeficientes de conversión y todas sus unidades guardan proporcionalidad entre sí; es decir, es un sistema de unidades ligadas entre sí por reglas de

multiplicación y división sin otro factor numérico más que el 1, simplificando la estructura de las unidades de medida y sus cálculos, lo que evita errores en su interpretación,

- utiliza prefijos para la determinación de los múltiplos y submúltiplos de la unidad básica de cada magnitud; elimina así la multiplicidad de nombres diferentes para una misma magnitud,
- cada magnitud física sólo tiene una unidad SI, aunque esta se puede expresar de diferentes formas,
- permite formar unidades derivadas con mayor facilidad a partir de combinaciones de las unidades básicas según relaciones algebraicas que ligan las magnitudes correspondientes,
- establece una clara delimitación entre los conceptos de masa y fuerza (peso),
- integra en uno solo varios subsistemas de medidas y facilita así el proceso de entendimiento y aprendizaje.

4.1 Unidades básicas y derivadas

Las unidades básicas del SI son siete y se detallan en la tabla 1

Unidades básicas del SI		
Magnitudes básicas	Nombre	Símbolo
longitud	metro	m
masa	kilogramo	kg
tiempo	segundo	s
corriente eléctrica	amperio	A
temperatura termodinámica	kelvin	K
cantidad de sustancia	mol	mol
intensidad luminosa	candela	cd

Tabla 1: Unidades básicas

Las unidades derivadas son unidades que pueden expresarse a partir de las unidades básicas mediante símbolos matemáticos de multiplicación y división. Ciertas unidades derivadas han recibido nombres especiales y símbolos particulares, que pueden utilizarse con los símbolos de otras unidades básicas o derivadas para expresar las unidades de otras magnitudes. Algunos ejemplos: para la magnitud presión el pascal (Pa), para la magnitud fuerza, el newton (N), para la energía el julio (J).

Magnitud derivada	Nombre especial de la unidad	Unidad expresada en unidades básicas	Unidad expresada en otras unidades SI
ángulo plano	radián	rad = m/m	
ángulo sólido	estereorradián ^(c)	sr = m ² / m ²	
frecuencia	hercio	Hz = s ⁻¹	
fuerza	newton	N = kg m s ⁻²	
presión, tensión	pascal	Pa = kg m ⁻¹ s ⁻²	
energía, trabajo, cantidad de calor	julio	J = kg m ² s ⁻²	N m
potencia, flujo radiante	vatio	W = kg m ² s ⁻³	J/s
carga eléctrica	culombio	C = A s	

Tabla 2: Ejemplos de unidades derivadas

4.2 Múltiplos y Submúltiplos

El SI define una serie de prefijos y símbolos de prefijos, en total veinte, para formar nombres y símbolos de múltiplos y submúltiplos decimales de las unidades SI, que van desde 10²⁴ a 10⁻²⁴.

En la tabla 3 se recogen los prefijos y sus símbolos.

Factor	Prefijo	Símbolo	Factor	Prefijo	Símbolo
10^1	deca	da	10^{-1}	deci	d
10^2	hecto	h	10^{-2}	centi	c
10^3	kilo	k	10^{-3}	mili	m
10^6	mega	M	10^{-6}	micro	μ
10^9	giga	G	10^{-9}	nano	n
10^{12}	tera	T	10^{-12}	pico	p
10^{15}	peta	P	10^{-15}	femto	f
10^{18}	exa	E	10^{-18}	atto	a
10^{21}	zetta	Z	10^{-21}	zepto	z
10^{24}	yotta	Y	10^{-24}	yocto	y

Tabla 3: Prefijos del SI

4.3 Reglas de escritura

Las reglas facilitan la comprensión de las publicaciones científicas y técnicas, su seguimiento es obligado en el caso de las magnitudes y unidades de medida y muy recomendado en el caso de notaciones algebraicas o matemáticas. Las reglas obligatorias están incluidas en el Sistema Internacional (SI), las voluntarias proceden del mundo de la normalización y están recogidas en las normas internacionales ISO 80000-1 a ISO 80000-13 y la serie española correspondiente UNE-EN 80000-1 a UNE-EN 80000-13.

Los epígrafes siguientes resumen y agrupan el conjunto de reglas aplicables. Se incluyen también algunos ejemplos para facilitar la comprensión.

Reglas de escritura de los símbolos y nombres de las unidades

1. Los símbolos de las unidades se escriben en caracteres romanos (rectos), independientemente del tipo de letra empleada en el texto adyacente. Se escriben en minúsculas excepto si derivan de un nombre propio, en cuyo caso la primera letra es mayúscula. Como excepción se permite el uso de la letra L mayúscula o l minúscula como símbolos del litro, a fin de evitar la confusión entre la cifra 1 (uno) y la letra l (ele).

Ejemplos:

m	metro	g	gramo	L	litro
cm	centímetro	μg	microgramo	mL	mililitro

2. Un prefijo de múltiplo o submúltiplo, si se usa, forma parte de la unidad y precede al símbolo de la unidad, sin espacio entre el símbolo del prefijo y el símbolo de la unidad. Un prefijo nunca se usa aislado y nunca se usan prefijos compuestos.

3. Los símbolos de las unidades son entidades matemáticas y no abreviaturas. Por tanto, no van seguidos de un punto, salvo al final de una frase, ni se usa el plural, ni se pueden mezclar símbolos de unidades con nombres de unidades en una misma expresión, pues los nombres no son entidades matemáticas.

4. Para formar los productos y cocientes de los símbolos de las unidades, se aplican las reglas habituales de multiplicación o de división algebraicas. La multiplicación debe indicarse mediante un espacio o un punto centrado a media altura (\cdot), para evitar que ciertos prefijos se interpreten erróneamente como un símbolo de unidad. La división se indica mediante una línea horizontal, una barra oblicua ($/$), o mediante exponentes negativos. Cuando se combinan varios

símbolos de unidades, hay que tener cuidado para evitar toda ambigüedad, por ejemplo utilizando corchetes o paréntesis, o exponentes negativos. En una expresión dada sin paréntesis, no debe utilizarse más de una barra oblicua, para evitar ambigüedades.

5. No se permite emplear abreviaturas para los símbolos y nombres de las unidades, tales como seg (por s o segundo), mm cuad. (por mm² o milímetro cuadrado), cc (por cm³ o centímetro cúbico) o mps (por m/s o metro por segundo). De esta forma se evitan ambigüedades y malentendidos respecto a los valores de las magnitudes.

6. Los nombres de las unidades se escriben en caracteres romanos (rectos) y se consideran como nombres (sustantivos) comunes; se escriben en minúscula (incluso cuando su nombre es el de un científico eminente y el símbolo de la unidad comienza por mayúscula), salvo que se encuentren situados al comienzo de una frase o en un texto en mayúsculas, como un título. Para cumplir esta regla, la escritura correcta del nombre de la unidad cuyo símbolo es °C es «grado Celsius» (la unidad grado comienza por la letra g en minúscula y el atributo Celsius comienza por la letra C en mayúscula, porque es un nombre propio). Los nombres de las unidades pueden escribirse en plural.

7. Aunque los valores de las magnitudes se expresan generalmente mediante los nombres y símbolos de las unidades, si por cualquier razón resulta más apropiado el nombre de la unidad que su símbolo, debe escribirse el nombre de la unidad completo.

8. Cuando el nombre de la unidad está combinado con el prefijo de un múltiplo o submúltiplo, no se deja espacio ni se coloca guión entre el nombre del prefijo y el de la unidad. El conjunto formado por el nombre del prefijo y el de la unidad constituye una sola palabra.

9. Cuando el nombre de una unidad derivada se forma por multiplicación de nombres de unidades individuales, conviene dejar un espacio o un punto centrado a media altura (\cdot), para separar el nombre de cada unidad.

Reglas de escritura para expresar los valores de las magnitudes

1. El valor de una magnitud se expresa como el producto de un número por una unidad: el número que multiplica a la unidad es el valor numérico de la magnitud expresada en esa unidad. El valor numérico de una magnitud depende de la unidad elegida. Así, el valor de una magnitud particular es independiente de la elección de unidad, pero su valor numérico es diferente para unidades diferentes.

2. Los símbolos de las magnitudes están formados generalmente por una sola letra en cursiva, pero puede darse información adicional mediante subíndices, superíndices o paréntesis. Así C es el símbolo recomendado para la capacidad calorífica, C_m para la capacidad calorífica molar, $C_{m,p}$ para la capacidad calorífica molar a presión constante y $C_{m,V}$ para la capacidad calorífica molar a volumen constante. Las constantes suelen ser magnitudes físicas y, por lo tanto, sus símbolos se escriben en cursiva.

Ejemplos:

$t = 3 \text{ s}$	t tiempo, s segundo	$T = 22 \text{ K}$	T temperatura, K kelvin
$r = 11 \text{ cm}$	r radio, cm centímetro	$\lambda = 633 \text{ nm}$	λ longitud de onda, nm nanómetro
e	carga elemental	m_e	m masa e electrón

Esta reglas implican que el subíndice o superíndice del símbolo de una magnitud se escriba en letra recta si es descriptivo (por ejemplo, si es un número o representa el nombre de una persona o partícula); pero que se escriba en cursiva si representa una magnitud, o es una variable como x en E_x , o un índice como i en $\sum_i X_i$ que representa un número consecutivo.

Ejemplos de subíndices y superíndices en caracteres rectos (descriptivos):

N_A A	constante de Avogadro, Avogadro	R	constante universal de los gases
θ_D D	temperatura de Debye, Debye	Z	número atómico
$\epsilon_0^{(ir)}$ ir	irracional	V_m^l l m	fase líquida molar
E_k, E_c k, c	cinética	μ_B B	Bohr

Ejemplos de subíndices en cursiva (representan magnitudes o variables):

c_p p	presión	σ_Ω Ω	ángulo sólido
q_m m	masa	ω_z z	coordenada z

3. Se escriben en carácter romano recto los símbolos de los elementos químicos y aquellos símbolos que representan constantes matemáticas que nunca cambian, por ejemplo π .

Ejemplo:

Ar	argón	B	boro	C	carbono
----	-------	---	------	---	---------

4. Mientras que para los símbolos de las magnitudes sólo existen recomendaciones, es obligatorio emplear los símbolos correctos de las unidades. Cuando, en circunstancias particulares, se prefiera usar un símbolo no recomendado para una magnitud dada, por ejemplo para evitar una confusión resultante del uso del mismo símbolo para dos magnitudes distintas, hay que precisar claramente qué significa el símbolo.

5. Los símbolos de las unidades se tratan como entidades matemáticas. Cuando se expresa el valor de una magnitud como producto de un valor numérico por una unidad, el valor numérico y la unidad pueden tratarse de acuerdo con las reglas ordinarias del álgebra. Este procedimiento constituye el cálculo de magnitudes, o álgebra de magnitudes. Por ejemplo, la ecuación $T = 293 \text{ K}$ puede escribirse también como $T/\text{K} = 293$.

6. Al igual que el símbolo de una magnitud no implica la elección de una unidad particular, el símbolo de la unidad no debe utilizarse para proporcionar información específica sobre la magnitud y no debe nunca ser la única fuente de información respecto de la magnitud. Las unidades no deben ser modificadas con información adicional sobre la naturaleza de la magnitud; este tipo de información debe acompañar al símbolo de la magnitud y no al de la unidad.

7. El valor numérico precede siempre a la unidad y siempre se deja un espacio entre el número y la unidad. Así, el valor de una magnitud es el producto de un número por una unidad, considerándose el espacio como signo de multiplicación (igual que el espacio entre unidades). Las únicas excepciones a esta regla son los símbolos de las unidades grado, minuto y segundo de ángulo plano, °, ' y ", respectivamente, para los cuales no se deja espacio entre el valor numérico y el símbolo de la unidad. Esta regla implica que el símbolo °C para el grado Celsius debe ir precedido de un espacio para expresar el valor de la temperatura Celsius t .

8. En cualquier expresión, sólo se emplea una unidad. Una excepción a esta regla es la expresión de los valores de tiempo y ángulo plano mediante unidades no pertenecientes al SI. Sin embargo, para ángulos planos, es preferible generalmente dividir el grado de forma decimal. Así, se escribirá 22,20° mejor que 22° 12', salvo en campos como la navegación, la cartografía, la astronomía, y para la medida de ángulos muy pequeños.

9. El símbolo utilizado para separar la parte entera de su parte decimal se denomina «separador decimal». El símbolo del separador decimal es la coma, en la propia línea de escritura. Si el número está comprendido entre +1 y -1, el separador decimal va siempre precedido de un cero.

10. Los números con muchas cifras pueden repartirse en grupos de tres cifras separados por un espacio, a un lado y otro del separador decimal, a fin de facilitar la lectura. Estos grupos no se separan nunca por puntos ni por comas. En los números de una tabla, el formato no debe variar en una misma columna.

11. La unidad SI coherente de las magnitudes sin dimensión o magnitudes de dimensión uno, es el número uno, símbolo 1. Los valores de estas magnitudes se expresan simplemente mediante números. El símbolo de unidad 1 o el nombre de unidad «uno» no se menciona explícitamente y no existe símbolo particular ni nombre especial para la unidad uno, salvo algunas excepciones que se indican en las tablas. Como los símbolos de los prefijos SI no pueden unirse al símbolo 1 ni al nombre de unidad «uno», para expresar los valores de magnitudes adimensionales particularmente grandes o particularmente pequeñas, se emplean las potencias de 10.

En las expresiones matemáticas, el símbolo % (por ciento), reconocido internacionalmente, puede utilizarse con el SI para representar al número 0,01. Por lo tanto, puede usarse para expresar los valores de magnitudes sin dimensión. Cuando se emplea, conviene dejar un espacio entre el número y el símbolo %. Cuando se expresan de esta forma los valores de magnitudes adimensionales, es preferible utilizar el símbolo % mejor que la expresión «por ciento». Cuando se expresan valores de fracciones adimensionales (por ejemplo fracción másica, fracción en volumen, incertidumbre relativa, etc.), a veces resulta útil emplear el cociente entre dos unidades del mismo tipo. También se usa el término «ppm» que significa 10^{-6} en valor relativo, o 1×10^{-6} , o «partes por millón», o millonésimas. Cuando se emplea alguno de los términos %, ppm, etc., es importante especificar cuál es la magnitud sin dimensión cuyo valor se está empleando.

Reglas para la formación de los múltiplos y submúltiplos decimales de las unidades del SI

1. Los símbolos de los prefijos se escriben en caracteres romanos (rectos), como los símbolos de las unidades, independientemente del tipo de letra del texto adyacente, y se unen a los símbolos de las unidades, sin dejar espacio entre el símbolo del prefijo y el de la unidad. Con excepción de da (deca), h (hecto) y k (kilo), todos los símbolos de prefijos de múltiplos se escriben con mayúsculas y todos los símbolos de prefijos de submúltiplos se escriben con minúsculas. Todos los nombres de los prefijos se escriben con minúsculas, salvo al comienzo de una frase.

2. El grupo formado por un símbolo de prefijo y un símbolo de unidad constituye un nuevo símbolo de unidad inseparable (formando un múltiplo o un submúltiplo de la unidad en cuestión) que puede ser elevado a una potencia positiva o negativa y que puede combinarse con otros símbolos de unidades compuestas.

Ejemplos:

- pm (picómetro), mmol (milimol), $G\Omega$ (gigaohm), THz (terahercio)
- $2,3 \text{ cm}^3 = 2,3 (\text{cm})^3 = 2,3 (10^{-2} \text{ m})^3 = 2,3 \times 10^{-6} \text{ m}^3$
- $1 \text{ cm}^{-1} = 1 (\text{cm})^{-1} = 1 (10^{-2} \text{ m})^{-1} = 10^2 \text{ m}^{-1} = 100 \text{ m}^{-1}$
- $1 \text{ V/cm} = (1 \text{ V})/(10^{-2} \text{ m}) = 10^2 \text{ V/m} = 100 \text{ V/m}$
- $5000 \mu\text{s}^{-1} = 5000 (\mu\text{s})^{-1} = 5000 (10^{-6} \text{ s})^{-1} = 5 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$

3. Los nombres de los prefijos son inseparables de los nombres de las unidades a las que se unen. Así, por ejemplo, milímetro, micropascal y meganewton se escriben en una sola palabra. Los símbolos de prefijos compuestos, es decir, los símbolos de prefijos formados por yuxtaposición de dos o más símbolos de prefijos, no están permitidos;

por ejemplo, debe escribirse nm (nanómetro) y no mµm. Esta regla se aplica también a los nombres de los prefijos compuestos. Los símbolos de los prefijos no pueden utilizarse solos o unidos al número 1, símbolo de la unidad uno. Igualmente, los nombres de los prefijos no pueden unirse al nombre de la unidad uno, es decir a la palabra «uno».

4. Los nombres y símbolos de prefijos se emplean con algunas unidades fuera del SI, pero nunca se utilizan con unidades de tiempo: minuto, min; hora, h; día, d. Sin embargo, los astrónomos usan el milisegundo de arco (o de grado), símbolo «mas», y el microsegundo de arco, símbolo «µas», como unidades de medida de ángulos muy pequeños.

5. Entre las unidades básicas del Sistema Internacional, la unidad de masa, kilogramo, es la única cuyo nombre, por razones históricas, contiene un prefijo. Los nombres y los símbolos de los múltiplos y submúltiplos decimales de la unidad de masa se forman añadiendo los nombres de los prefijos al nombre de la unidad «gramo» y los símbolos de estos prefijos al símbolo de la unidad «g», respectivamente. Por ejemplo, 10^{-6} kg se escribe miligramo, mg, no microkilogramo, µkg.

6. Los prefijos SI representan estrictamente potencias de 10. No deberían utilizarse pues para expresar potencias de 2 (por ejemplo, un kilobit representa 1000 bits y no 1024 bits). Los prefijos adoptados para las potencias binarias no pertenecen al SI. Los nombres y símbolos utilizados para los prefijos correspondientes a 2^{10} , 2^{20} , 2^{30} , 2^{40} , 2^{50} , 2^{60} , 2^{70} y 2^{80} son, respectivamente, kibi (Ki), mebi (Mi), gibi (Gi), tebi (Ti), pebi (Pi), exbi (Ei), zebi (Zi) y yobi (Yi). Así, por ejemplo, un kibibyte se escribe: $1 \text{ KiB} = 2^{10} \text{ B} = 1024 \text{ B}$. Estos prefijos pueden emplearse en el campo de las tecnologías de la información a fin de evitar un uso incorrecto de los prefijos SI.

4.4 Revisión del SI. 26ª CGPM

Las actuales unidades de medida, objetivas, independientes de los humanos y sus actividades, y acordadas por convenio, facilitan el entendimiento y la colaboración entre las personas, pero en un entorno altamente innovador y disruptivo como el actual, donde concurren varias revoluciones tecnológicas, es necesaria una revisión conceptual, de gran calado, del SI. Por ello, las unidades fundamentales se han redefinido a partir de una serie de constantes físicas, por definición invariables, haciéndolas válidas en forma atemporal, y dejando abiertas sus realizaciones prácticas a mejoras futuras. Es un cambio sustancial, conceptual y paradigmático del Sistema Internacional de Unidades. Las realizaciones prácticas de las unidades están separadas conceptualmente de sus definiciones de modo que las unidades pueden, por principio, realizarse independientemente en cualquier lugar y en cualquier momento, y con ello se pueden añadir nuevas realizaciones a medida que se desarrollen las tecnologías, sin la necesidad de redefinir la unidad. Tenemos un sistema de unidades de base sólida y confiable basado en constantes físicas, con independencia de nuestras posibilidades de medición.

En el SI revisado, en vigor desde el 20 de mayo de 2019, el **kilogramo**, el **amperio**, el **kelvin** y el **mol** se han redefinido, respectivamente, a partir de los valores numéricos fijos de las siguientes constantes:

- La constante de Planck (h),
- La carga elemental (e),
- La constante de Boltzmann (k),
- La constante de Avogadro (N_A).

Asimismo se ha procedido a adaptar las definiciones del metro, segundo y candela, ya basadas en la actualidad respectivamente en las constantes:

- velocidad de la luz en el vacío (c)
- frecuencia de la transición hiperfina del estado fundamental no perturbado del átomo de cesio 133 ($\Delta\nu_{\text{Cs}}$)
- eficacia luminosa de una fuente emitiendo a 540 THz (K_{cd})

Las definiciones de todas las unidades básicas del SI se expresan ahora de manera uniforme utilizando una formulación de constante explícita, apareciendo en ellas el valor numérico fijo de dichas constantes, de forma que el Sistema Internacional de Unidades, SI, queda definido como aquel en el que:

- la frecuencia de la transición hiperfina del estado fundamental no perturbado del átomo de cesio 133, $\Delta\nu_{\text{Cs}}$, es 9 192 631 770 Hz,
- la velocidad de la luz en el vacío, c , es 299 792 458 m/s,
- la constante de Planck, h , es $6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$ J s,
- la carga elemental, e , es $1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$ C,
- la constante de Boltzmann, k , es $1,380\,649 \times 10^{-23}$ J/K
- la constante de Avogadro, N_{A} , es $6,022\,140\,76 \times 10^{23}$ mol⁻¹,
- la eficacia luminosa de la radiación monocromática de 540×10^{12} Hz, K_{cd} , es 683 lm/W.

donde hercio, julio, culombio, lumen y vatio, con símbolos Hz, J, C, lm y W se relacionan, respectivamente, con las unidades segundo, metro, kilogramo, amperio, kelvin, mol y candela, con símbolos s, m, kg, A, K, mol y cd, en la forma $\text{Hz} = \text{s}^{-1}$, $\text{J} = \text{kg m}^2 \text{s}^{-2}$, $\text{C} = \text{A s}$, $\text{lm} = \text{cd m}^2 \text{m}^{-2} = \text{cd sr}$ y $\text{W} = \text{kg m}^2 \text{s}^{-3}$.

Como en el caso de cualquier magnitud, el valor Q de una constante fundamental también puede expresarse como el producto de un número $\{Q\}$ y una unidad $[Q]$, de forma que $Q = \{Q\} [Q]$.

Por ejemplo, el valor de la velocidad v de un objeto móvil puede expresarse como $v = 25$ m/s o como $v = 90$ km/h, donde m/s y km/h son unidades alternativas para el mismo valor de la magnitud velocidad.

Si se fija la unidad a priori, tal como se hacía hasta ahora, el valor numérico debe deducirse mediante experimentación. Ahora se fija el valor numérico exacto, en base a multitud de experimentos realizados en todo el mundo, resultando definida la unidad, ya que el producto del valor numérico $\{Q\}$ y la unidad $[Q]$ tiene que ser igual al valor Q de la constante, que se postula como invariante.

El uso de constantes físicas para definir las unidades de medida, permitirá a la comunidad científica y a la industria obtener y diseminar con mayor exactitud sus mediciones, desde las más pequeñas hasta las más grandes, cumpliendo así con los requisitos de medición modernos. Vinculará además, con mayor precisión, las mediciones a escala atómica y cuántica con las de nivel macroscópico.

*Aplicando las reglas de la naturaleza
para crear las reglas de las mediciones*

4.5 Nuevas definiciones de las unidades básicas

A partir de la anterior definición del SI en función de los valores numéricos fijos de las constantes elegidas, se deducen las definiciones de cada una de las siete unidades básicas, utilizando, según corresponda, una o más de estas constantes definitorias, lo que conduce al siguiente conjunto de definiciones:

El segundo

El segundo, símbolo s, es la unidad SI de tiempo. Se define al fijar el valor numérico de la frecuencia de la transición hiperfina del estado fundamental no perturbado del átomo

de cesio 133, $\Delta\nu_{\text{Cs}}$, en 9 192 631 770, cuando se expresa en la unidad Hz, igual a s^{-1} .

Esta definición implica la relación exacta $\Delta\nu_{\text{Cs}} = 9\,192\,631\,770 \text{ s}^{-1}$. Invertiendo esta relación se obtiene la expresión para la unidad segundo, en función del valor de la constante $\Delta\nu_{\text{Cs}}$:

$$1 \text{ Hz} = \frac{\Delta\nu_{\text{Cs}}}{9\,192\,631\,770} \quad \text{o bien,} \quad 1 \text{ s} = \frac{9\,192\,631\,770}{\Delta\nu_{\text{Cs}}}.$$

A resultas de esta definición, 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 no perturbado del átomo de ^{133}Cs .

NOTAS:

La referencia a un átomo no perturbado pretende aclarar que la definición del segundo SI se basa en un átomo de cesio aislado, no perturbado por ningún campo externo, como p. ej., la radiación ambiental de un cuerpo negro.

El segundo, así definido, es la unidad de tiempo acorde con la teoría general de la relatividad. Para poder contar con una escala de tiempo coordinado, se combinan las señales de diferentes relojes primarios en diferentes ubicaciones, que deben corregirse por los desplazamientos relativistas de la frecuencia del cesio.

El metro

El metro, símbolo m, es la unidad SI de longitud. Se define al fijar el valor numérico de la velocidad de la luz en el vacío, c, en 299 792 458, cuando se expresa en la unidad m s^{-1} , donde el segundo se define en función de la frecuencia del Cesio $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.

Esta definición implica la relación exacta $c = 299\,792\,458 \text{ m s}^{-1}$. De ella se obtiene la expresión exacta para el metro, en función de las constantes c y $\Delta\nu_{\text{Cs}}$:

$$1 \text{ m} = \left(\frac{c}{299\,792\,458} \right) \text{s} = \frac{9\,192\,631\,770}{299\,792\,458} \frac{c}{\Delta v_{\text{Cs}}} \approx 30,663\,319 \frac{c}{\Delta v_{\text{Cs}}}$$

Resultado de esta definición es que un metro es la longitud del trayecto recorrido por la luz en el vacío durante un intervalo de tiempo de $1/299\,792\,458$ de segundo.

El kilogramo

El kilogramo, símbolo kg, es la unidad SI de masa. Se define al fijar el valor numérico de la constante de Planck, h , en $6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$, cuando se expresa en la unidad $\text{J}\cdot\text{s}$, igual a $\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$, donde el metro y el segundo se definen en función de c y Δv_{Cs} ,

Esta definición implica la relación exacta $h = 6,626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-1}$. De ella se obtiene la expresión exacta para el kilogramo en función de las tres constantes h , Δv_{Cs} y c :

$$1 \text{ kg} = \left(\frac{h}{6,626\,070\,15 \times 10^{-34}} \right) \text{m}^{-2} \text{s}$$

o lo que es lo mismo

$$1 \text{ kg} = \frac{(299\,792\,458)^2}{(6,626\,070\,15 \times 10^{-34})(9\,192\,631\,770)} \frac{h \Delta v_{\text{Cs}}}{c^2} \approx 1,475\,5214 \times 10^{40} \frac{h \Delta v_{\text{Cs}}}{c^2}$$

A resultas de esta definición queda definida la unidad $\text{kg m}^2 \text{ s}^{-1}$ (la unidad de las magnitudes físicas de acción y momento angular). Esto conduce, junto con las definiciones del segundo y del metro, a la definición de la unidad de masa en función del valor de la constante de Planck h .

NOTAS:

La definición anterior del kilogramo fijaba el valor de la masa del prototipo internacional del kilogramo, $m(\mathcal{K})$ como exactamente igual a un kilogramo, y el valor de la constante de Planck h debía determinarse experimentalmente. La definición actual fija el valor numérico exacto de h y es la masa del prototipo la que debe determinarse ahora experimentalmente.

El número elegido para el valor numérico de la constante de Planck en esta definición es tal que, en el momento de su adopción, el kilogramo era igual a la masa del prototipo internacional, $m(\mathcal{K}) = 1 \text{ kg}$, con una incertidumbre típica relativa de 1×10^{-8} , resultante de la combinación de las mejores estimaciones del valor de la constante de Planck en ese momento.

El amperio

El amperio, símbolo A, es la unidad SI de corriente eléctrica. Se define al fijar el valor numérico de la carga elemental, e , en $1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$, cuando se expresa en la unidad C, igual a $A \cdot s$, donde el segundo se define en función de $\Delta\nu_{Cs}$

Esta definición implica la relación exacta $e = 1,602\,176\,634 \times 10^{-19} \text{ A} \cdot \text{s}$. Invertiendo esta relación se obtiene una expresión exacta para la unidad amperio en función de las constantes e y $\Delta\nu_{Cs}$:

$$1\text{A} = \left(\frac{e}{1,602\,176\,634 \times 10^{-19}} \right) \text{s}^{-1}$$

lo que es igual a

$$1\text{A} = \frac{1}{(9\,192\,631\,770)(1,602\,176\,634 \times 10^{-19})} \Delta\nu_{Cs} e \approx 6,789\,687 \times 10^8 \Delta\nu_{Cs} e$$

El efecto de esta definición es que un amperio es la corriente eléctrica correspondiente al flujo de $1/(1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19})$ cargas elementales por segundo.

NOTAS:

La definición anterior del amperio estaba basada en la fuerza entre dos conductores portadores de corriente y tenía el efecto de fijar el valor de la permeabilidad magnética de vacío μ_0 (también conocida como constante magnética) para que fuera exactamente $4\pi \times 10^{-7} \text{ Hm}^{-1} = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N A}^{-2}$, donde H y N son las unidades derivadas coherentes henrio y newton, respectivamente. La nueva definición del amperio fija el valor de e en lugar de μ_0 . Como resultado, μ_0 debe determinarse experimentalmente.

También se deduce que, dado que la permitividad eléctrica del vacío ϵ_0 (también conocida como constante eléctrica), la impedancia característica del vacío Z_0 y la admitancia del vacío Y_0 son iguales a $1/\mu_0 c^2$, $\mu_0 c$ y $1/\mu_0 c$, respectivamente, los valores de ϵ_0 , Z_0 e Y_0 ahora también deben determinarse experimentalmente, y se ven afectados por la misma incertidumbre típica relativa que μ_0 ya que c es un valor exacto. El producto $\epsilon_0 \mu_0 = 1/c^2$ y el cociente $Z_0/\mu_0 = c$ permanecen exactos. En el momento de adoptar la definición actual del amperio, μ_0 era igual a $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$, con una incertidumbre típica relativa de $2,3 \times 10^{-10}$.

El kelvin

El kelvin, símbolo K, es la unidad SI de temperatura termodinámica. Se define al fijar el valor numérico de la constante de Boltzmann, k , en $1,380\ 649 \times 10^{-23}$, cuando se expresa en la unidad $\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$, igual a $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, donde el kilogramo, el metro y el segundo se definen en función de h , c y $\Delta\nu_{\text{Cs}}$

Esta definición implica la relación exacta $k = 1,380\ 649 \times 10^{-23} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2} \text{ K}^{-1}$. Invirtiendo esta relación se obtiene la

expresión exacta para el kelvin en función de las constantes k , h y $\Delta\nu_{\text{Cs}}$:

$$1 \text{ K} = \left(\frac{1,380\,649}{k} \right) \times 10^{-23} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2}$$

lo que es igual a

$$1 \text{ K} = \frac{1,380\,649 \times 10^{-23}}{(6,626\,070\,15 \times 10^{-34})(9\,192\,631\,770)} \frac{\Delta\nu_{\text{Cs}} h}{k} \approx 2,266\,6653 \frac{\Delta\nu_{\text{Cs}} h}{k}$$

El efecto de esta definición es que un kelvin es igual a la variación de temperatura termodinámica que da lugar a una variación de energía térmica kT de $1,380\,649 \times 10^{-23} \text{ J}$.

NOTAS:

La definición anterior del kelvin estableció la temperatura del punto triple del agua, T_{TPW} , como exactamente igual a $273,16 \text{ K}$. Dado que la definición actual de kelvin fija el valor numérico de k en lugar de T_{TPW} , esta última debe determinarse ahora experimentalmente. En el momento de adoptar la presente definición, T_{TPW} era igual a $273,16 \text{ K}$ con una incertidumbre típica relativa de $3,7 \times 10^{-7}$ basada en las mediciones de k realizadas antes de la redefinición.

Como resultado de la forma en que se solían definir las escalas de temperatura, sigue siendo una práctica común expresar una temperatura termodinámica, símbolo T , en función de su diferencia con la temperatura de referencia $T_0 = 273,15 \text{ K}$, cerca del punto del hielo. Esta diferencia se denomina temperatura Celsius, símbolo t , definida mediante la ecuación

$$t = T - T_0.$$

La unidad de temperatura Celsius es el grado Celsius, símbolo $^{\circ}\text{C}$, que es por definición igual en magnitud a la unidad kelvin. Una

diferencia o intervalo de temperatura puede por tanto expresarse en kelvin o en grados Celsius, siendo el valor numérico de la diferencia de temperatura el mismo en ambos casos. Sin embargo, el valor numérico de una temperatura Celsius expresada en grados Celsius está relacionado con el valor numérico de la temperatura termodinámica expresada en kelvin por la relación

$$t/^{\circ}\text{C} = T/\text{K} - 273,15$$

El mol

El mol, símbolo mol, es la unidad SI de cantidad de sustancia. Un mol contiene exactamente $6,022\ 140\ 76 \times 10^{23}$ entidades elementales. Esta cifra es el valor numérico fijo de la constante de Avogadro, N_A , cuando se expresa en la unidad mol^{-1} , y se denomina número de Avogadro.

La cantidad de sustancia, símbolo n , de un sistema, es una medida del número de entidades elementales especificadas. Una entidad elemental puede ser un átomo, una molécula, un ion, un electrón, o cualquier otra partícula o grupo especificado de partículas.

Esta definición implica la relación exacta $N_A = 6,022\ 140\ 76 \times 10^{23}\ \text{mol}^{-1}$. Invertiendo esta relación se obtiene la expresión exacta para el mol en función de la constante N_A :

$$1\ \text{mol} = \left(\frac{6,022\ 140\ 76 \times 10^{23}}{N_A} \right)$$

El efecto de esta definición es que el mol es la cantidad de sustancia de un sistema que contiene $6,022\ 140\ 76 \times 10^{23}$ entidades elementales especificadas.

NOTAS:

La definición anterior del mol fijaba el valor de la masa molar del carbono 12, $M(^{12}\text{C})$, como exactamente 0,012 kg/mol. De acuerdo con la presente definición, $M(^{12}\text{C})$ ya no es un valor exacto y debe determinarse experimentalmente. El valor elegido para N_A es tal que en el momento de adoptar la definición actual del mol, $M(^{12}\text{C})$ era igual a 0,012 kg/mol con una incertidumbre típica relativa de $4,5 \times 10^{-10}$.

La masa molar de cualquier átomo o molécula X aún puede obtenerse a partir de su masa atómica utilizando la ecuación

$$M(X) = A_r(X) [M(^{12}\text{C})/12] = A_r(X) M_u$$

y la masa molar de cualquier átomo o molécula X también está relacionada con la masa de la entidad elemental $m(X)$ por la relación

$$M(X) = N_A m(X) = N_A A_r(X) m_u.$$

En estas ecuaciones, M_u es la constante de masa molar, igual a $M(^{12}\text{C})/12$ y m_u es la constante de masa atómica unificada, igual a $m(^{12}\text{C})/12$, ambas relacionadas con la constante de Avogadro a través de:

$$M_u = N_A m_u.$$

En el nombre «cantidad de sustancia», la palabra «sustancia» normalmente se reemplaza por el nombre de la sustancia en cuestión, en cualquier aplicación particular, por ejemplo, «cantidad de cloruro de hidrógeno, HCl» o «cantidad de benceno, C_6H_6 ». Es importante definir con exactitud la entidad involucrada (como se enfatiza en la definición del mol), lo que se aconseja hacer especificando la fórmula química molecular del material involucrado.

La candela

La candela, símbolo cd, es la unidad SI de intensidad luminosa en una dirección dada. Se define al fijar el valor numérico de la eficacia luminosa de la radiación monocromática de frecuencia 540×10^{12} Hz, K_{cd} , en 683, cuando se expresa en la unidad

$\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$, igual a $\text{cd}\cdot\text{sr}\cdot\text{W}^{-1}$, o a $\text{cd}\cdot\text{sr}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^3$, donde el kilogramo, el metro y el segundo se definen en función de h , c y $\Delta\nu_{\text{Cs}}$

Esta definición implica la relación exacta $K_{\text{cd}} = 683 \text{ cd sr kg}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ s}^3$ para la radiación monocromática de frecuencia $\nu = 540 \times 10^{12} \text{ Hz}$. Invertiendo esta relación se obtiene la expresión exacta para la candela en función de las constantes K_{cd} , h y $\Delta\nu_{\text{Cs}}$:

$$1 \text{ cd} = \left(\frac{K_{\text{cd}}}{683} \right) \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-3} \text{ sr}^{-1}$$

lo que es igual a

$$\begin{aligned} 1 \text{ cd} &= \frac{1}{(6,626\,070\,15 \times 10^{-34}) (9\,192\,631\,770)^2 683} (\Delta\nu_{\text{Cs}})^2 h K_{\text{cd}} \\ &\approx 2,614\,830 \times 10^{10} (\Delta\nu_{\text{Cs}})^2 h K_{\text{cd}} \end{aligned}$$

El efecto de esta definición es que una candela es la intensidad luminosa, en una dirección dada, de una fuente que emite radiación monocromática de frecuencia $540 \times 10^{12} \text{ Hz}$ y tiene una intensidad radiante en esa dirección de $(1/683) \text{ W/sr}$.

5 Aceptación de los resultados de medida

La aceptación de productos en un mercado global está basada en la confianza fundamentada en la realización de ensayos y medidas realizados por laboratorios, organismos y entidades a los que a su vez se les reconoce y acepta su competencia técnica. Para llevar a cabo esto, es fundamental la existencia de acuerdos de reconocimiento mutuo o multilaterales. A continuación se recogen

tres de los principales acuerdos que sustentan el reconocimiento internacional de productos.

5.1 Acuerdos

5.1.1 CIPM-ARM

El 14 de octubre de 1999 los directores de Institutos Nacionales de Metrología de 38 Estados miembros de la Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM) y 2 Organizaciones internacionales firmaron el Acuerdo de Reconocimiento Mutuo del Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM-ARM) sobre patrones nacionales de medida y certificados de calibración y medida emitidos por los Institutos Nacionales de Metrología. El Acuerdo de Reconocimiento Mutuo del CIPM ha supuesto la mayor revolución, a nivel mundial, para el funcionamiento de la Metrología y de los Institutos Nacionales de Metrología (INM), desde la Convención del Metro en 1875.

En la actualidad, el CIPM-ARM ha sido firmado por más de un centenar de Institutos Nacionales de Metrología de Estados pertenecientes a la Convención del Metro, y Asociados a la CGPM, además de algunas Organizaciones Internacionales, a lo que hay que añadir los Institutos Designados por las instituciones firmantes.

Uno de los objetivos del CIPM-ARM es proporcionar a los Gobiernos y a otras partes una base sólida para acuerdos más amplios, relativos al comercio internacional y a cuestiones reglamentarias. Ello se logra mediante dos mecanismos:

- Parte 1: estableciendo el grado de equivalencia entre los patrones nacionales de medida mantenidos por los INM participantes.

- Parte 2: estableciendo el reconocimiento mutuo de los certificados de calibración y medición expedidos por los INM participantes.

En la actualidad, en torno a un 90% del comercio mundial de exportación de mercancías se realiza entre naciones participantes en el CIPM-ARM.

El reconocimiento mutuo de las capacidades de medida y calibración (CMC) de los participantes se realiza basándose en los siguientes criterios:

- a) Participación con éxito en comparaciones identificadas por la comunidad metrológica internacional como de significación clave para magnitudes particulares y rangos específicos.
- b) Participación con éxito en otras comparaciones suplementarias, relacionadas con servicios de calibración específicos o que suponen alguna prioridad comercial o económica para países individuales o regiones geográficas concretas.
- c) Declaración de las capacidades de medida y calibración de cada participante (CMC), revisión dentro de la Organización Metrológica Regional (OMR) correspondiente, revisión por el resto de las OMR, aprobación por el Comité Conjunto de OMR y el BIPM (JCRB) y publicación en la base de datos de comparaciones clave del BIPM (KCDB).
- d) Existencia de un Sistema de la Calidad, situado al nivel de la mejor práctica internacional, basado en criterios acordados, habitualmente normas internacionalmente reconocidas (ISO/IEC 17025), aplicado a los servicios de calibración y medición.

Los dos primeros criterios proporcionan la base técnica para el reconocimiento de la Parte 1 del CIPM-ARM. El cumplimiento de los criterios c) y d) permite el reconocimiento de la Parte 2 del Acuerdo.

Como consecuencia, la participación de un INM en el CIPM-ARM permite a los organismos nacionales de acreditación y a otros entes, contar con la garantía de la credibilidad internacional y la aceptación de las medidas que el INM disemina. También proporciona el reconocimiento internacional de las mediciones realizadas por los laboratorios de calibración y ensayo acreditados, siempre que dichos laboratorios puedan demostrar fehacientemente la trazabilidad de sus mediciones al SI a través de un INM participante en el CIPM-ARM.

5.1.2 ILAC-ARM

El Acuerdo de Reconocimiento Mutuo ILAC-ARM proporciona la base técnica y de confianza para el reconocimiento de las calibraciones, ensayos, análisis clínicos de laboratorios de calibración y ensayo acreditados, así como de los resultados de inspección de los organismos de evaluación de la conformidad acreditados.

El ILAC-ARM facilita la aceptación de productos a través de las fronteras nacionales. Al eliminar la necesidad de calibraciones, ensayos, pruebas médicas o inspecciones adicionales de importaciones y exportaciones, se reducen las barreras técnicas al comercio.

El ILAC-ARM se firma entre las organizaciones regionales de acreditación que aglutinan a los organismos nacionales de acreditación. Así por ejemplo, tenemos en Europa a EA (*European Cooperation for Accreditation*), en Asia a APLAC (*Asia Pacific*

Laboratory Accreditation Cooperation) y en América a IAAC (*Inter-American Accreditation Cooperation*). De esta forma, el ILAC-ARM vincula los acuerdos de reconocimiento mutuo regionales, extendiéndolos al plano internacional. Los firmantes del ARM-ILAC acuerdan aceptar los resultados de los organismos acreditados de cada uno de ellos. Por lo tanto, los resultados de los organismos de evaluación de la conformidad acreditados por los firmantes del ILAC-ARM adquieren reconocimiento internacional.

Los organismos de acreditación que son firmantes del ILAC-ARM se evalúan por pares de acuerdo con los requisitos de la norma ISO/IEC 17011 para demostrar su competencia. Los firmantes del ILAC-ARM evalúan y acreditan posteriormente a los organismos regionales con las normas internacionales pertinentes: los laboratorios de calibración (que utilizan ISO/IEC 17025), los laboratorios de ensayos (que utilizan ISO/IEC 17025), los laboratorios de pruebas médicas (que utilizan ISO 15189) y los organismos de inspección (que utilizan ISO/IEC 17020).

5.1.3 IAF-MLA

El principal objetivo del IAF (*International Accreditation Forum*) es establecer acuerdos de reconocimiento multilateral (*Multilateral Agreements*, MLA) entre sus organismos de acreditación para contribuir a la libertad del comercio mundial mediante la eliminación de las barreras técnicas al comercio.

El propósito del MLA es permitir que las acreditaciones y los certificados emitidos por los organismos de certificación/registro acreditados por los miembros del MLA sean reconocidos por todos los miembros. El objetivo es que el MLA abarque a todos los organismos de acreditación en todos los países del mundo, eliminando así la necesidad de que los proveedores de productos o servicios estén

certificados en cada país donde venden sus productos o servicios (al ser titulares de certificados que se aceptan en todas partes).

La membresía del MLA se basa en la evaluación por pares de cada solicitante y la vigilancia continua de cada miembro para asegurar y confirmar que todos los miembros del MLA operan sus programas de acreditación y están implementando las pautas de manera consistente y equivalente. Los programas de acreditación de los miembros del MLA se basan en las guías relevantes de ISO/IEC.

5.2 Estructura MAN

Si a la infraestructura metrológica nacional anteriormente descrita le añadimos la acreditación y la normalización, tendremos lo que se suele llamar «infraestructura de la calidad» de un país o, a veces también, «triángulo de calidad: Metrología - Acreditación – Normalización» (MAN) (en inglés MAS).

El concepto ha de verse desde el punto de vista de la «calidad», como resultado de la integración y coordinación de una serie de actividades relacionadas con la *metrología*, la *normalización* y la *acreditación*. Para que se entienda mejor, la comercialización de un producto y su aceptación en los mercados internacionales debe venir avalada por una serie de ensayos y medidas fiables y trazables al SI (respaldados por la Metrología), que cumplan con normas o especificaciones aceptadas internacionalmente (Normalización) y realizados por organismos o laboratorios acreditados (Acreditación), que emitan un certificado reconocido o pongan un sello de calidad.

En la figura 10 se sintetiza el proceso de comercialización de un producto entre dos países A y B en los que, para su aceptación, se

han realizado una serie de medidas trazables al SI a través de la cadena de calibración, desde el laboratorio nacional a los de calibración e industria, y cuyos patrones y calibraciones se reconocen por los acuerdos de reconocimiento mutuo CIPM-ARM e ILAC-ARM, anteriormente mencionados. Se han utilizado normas internacionales para comprobar requisitos y evaluar su conformidad por organismos acreditados que han emitido su correspondiente certificado de conformidad o sello de calidad.

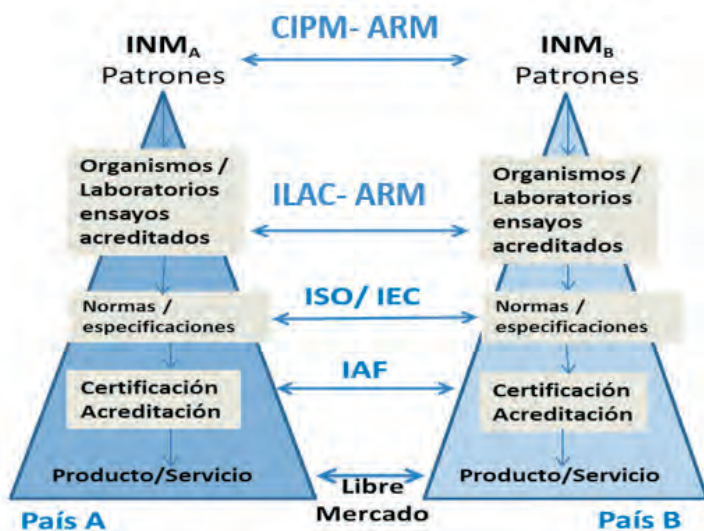


Fig. 10: Esquema de aceptación internacional de productos

Desde otro punto de vista mucho más genérico, en una economía globalizada, cada vez es más importante que las industrias sean competitivas y para ello es necesario tener en cuenta determinados factores en el plano empresarial, tanto nacional como internacional. En la figura 11 podemos ver que uno de esos factores es la

disponibilidad y funcionamiento efectivo, en el plano nacional, de una infraestructura de la calidad (MAN).

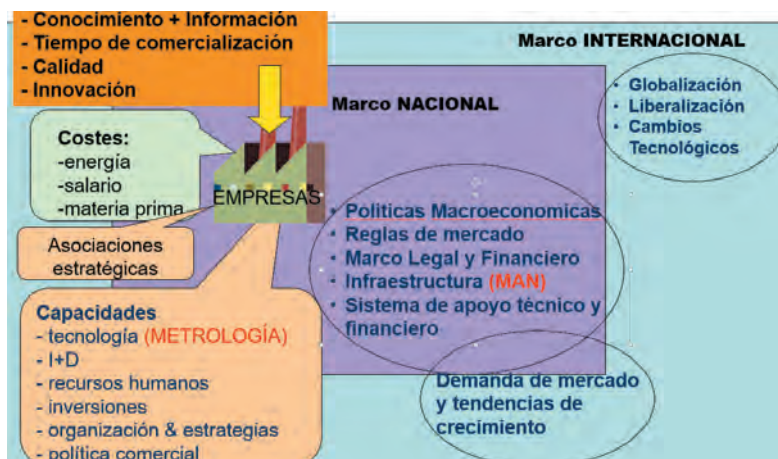


Fig. 11: Factores en la competitividad industrial

La exportación y comercialización de productos exige el cumplimiento de las demandas del mercado en cuanto a *calidad, seguridad y confiabilidad*, y los productores deben poder mostrar pruebas irrefutables e independientes de ello. Por lo tanto, un prerequisite es la existencia de una infraestructura de la calidad que cumpla con las normas internacionales y que supervise o controle las cadenas productivas proporcionando la confianza requerida. La figura 12 recoge los diferentes aspectos para llevar el producto al mercado, indicando claramente que el acceso al mercado se facilita a través de la infraestructura de la Calidad (MAN).



Fig. 12: Puesta en el mercado de productos

Así pues, resumiendo lo dicho hasta aquí, la infraestructura de la calidad está soportada por al menos los siguientes tres pilares mostrados en la figura 13:

- **METROLOGÍA:** Un instituto nacional de metrología que desarrolle y mantenga los patrones nacionales de medida con trazabilidad al SI, e internacionalmente aceptados y reconocidos (Ej.: Acuerdo CIPM-ARM) y que dote de trazabilidad al SI a los laboratorios de calibración e industrias punteras.
- **NORMALIZACIÓN:** Una entidad de normalización que facilite el acceso a las normas existentes y promueva aquellas necesarias para la economía regional o nacional.
- **ACREDITACIÓN:** Una entidad de acreditación que respalde la competencia técnica de los laboratorios de ensayo y calibración, y de las entidades de inspección y certificación.



Fig. 13: Triángulo MAN de la Calidad

La estructura nacional puede variar de un país a otro en función de sus recursos y necesidades; así, en algunos países los tres pilares pueden estar dentro de una sola institución, o en dos. En otros casos, como el de España, en tres instituciones independientes, pero coordinadas. Este último caso es el óptimo para demostrar la independencia e imparcialidad que suele exigirse en los convenios internacionales de reconocimiento mutuo. Además, para que la infraestructura funcione se requiere que cada pilar disponga de sus respectivos reconocimientos internacionales (CIPM-ARM; ILAC-ARM; IAF-MLA,...).

La infraestructura de la calidad representa básicamente un sistema voluntario donde los diferentes agentes operan en libre competencia y el productor o importador puede elegir. Además, es importante señalar que, como tal, no es un sistema punitivo y que su objetivo es aumentar la competitividad a través de garantizar la competencia

técnica y el cumplimiento de los requisitos establecidos. Esta infraestructura coexiste y se complementa con los sistemas de metrología legal (Control Metrológico Legal del Estado) que son obligatorios se articulan mediante textos legales de obligado cumplimiento (leyes, reales decretos, órdenes ministeriales, reglamentos,...) y buscan fundamentalmente la protección del consumidor.

La infraestructura de la calidad de un país ha llegado a ser una infraestructura técnica muy importante, que aporta garantías para:

- Mejorar la capacidad técnica de innovación
- Promover el crecimiento económico y el progreso social
- Aumentar la competitividad en el comercio internacional
- Mejorar los intercambios y la cooperación internacional
- Facilitar la aplicación de la alta tecnología en la industria

6 La Metrología del siglo XXI

La Metrología, como hemos visto hasta aquí, es tan antigua como la propia humanidad y se ha desarrollado en función de las necesidades de la sociedad en cada época.

En la actualidad, las áreas tradicionales de la industria han evolucionado hacia una mayor complejidad, requiriendo tolerancias de fabricación más exigentes y rangos de medida más amplios con menores incertidumbres; por otro lado, han surgido nuevas áreas tecnológicas, tales como la nanotecnología y la biotecnología, al tiempo que áreas que no son nuevas en sí mismas, como la química, la medicina y la seguridad alimentaria requieren importantes aportaciones de la metrología. Sin embargo, para que se produzca un efectivo progreso en dichas áreas se requiere un mayor esfuerzo

en investigación y desarrollo de patrones y métodos de medida trazables al Sistema Internacional de Unidades, SI y al desarrollo y actualización del propio SI.

Existen ciertos factores claves que están induciendo una evolución de la metrología tradicional hacia nuevos horizontes para cubrir demandas que están apareciendo en la sociedad, y entre estos factores podemos señalar los siguientes:

- La sociedad actual requiere mediciones que aporten confianza y den los mismos resultados independientemente del lugar de realización. Clave para la intercambiabilidad de piezas y componentes.
- La globalización del comercio y de la industria, con la creciente circulación de productos y servicios entre países, genera un aumento del interés por la exactitud y reproducibilidad de los resultados de medida que apoye al desarrollo económico y social. Clave para la economía de libre mercado.
- Es necesario contar con un sistema global de medida para la armonización internacional de unidades físicas, normas de productos, procedimientos de calibración, evaluación de incertidumbres, etc. Clave para el desarrollo científico y la transparencia en el comercio.

Hasta hace poco, la metrología se relacionaba prácticamente solo con la física y la ingeniería. El rápido desarrollo de la tecnología y la necesidad general de mediciones mejores y más fiables ha exigido nuevas demandas a la metrología clásica. En muchos dominios como la metrología dimensional, las medidas eléctricas, ópticas y de presión o el dominio del tiempo y la frecuencia, las exigencias de exactitud se han venido multiplicando, en los últimos cincuenta años, por diez, cada diez o veinte años según el campo. Esta progresión no se está deteniendo, sino que se incrementa,

como en el caso de los patrones de tiempo y frecuencia, base de los sistemas de navegación y posicionamiento actuales.

La metrología está comenzando a explorar nuevas fronteras; es el caso de la denominada «soft-metrology», que tal vez podríamos traducir como metrología de las «sensaciones», centrada en la medida de parámetros asociados a la percepción humana. En esta nueva metrología, el ser humano es considerado como un «transductor», centrándose los trabajos en la creación de escalas, la selección de «expertos» en sensaciones, la definición de sensibilidad, repetibilidad y reproducibilidad y la comparabilidad de métodos. La medida de la utilidad del software o del confort o de la satisfacción del cliente son ejemplos dentro de este campo, sin olvidar el color, gusto u olor, o parámetros econométricos y sociométricos como la imagen o la audiencia. En resumen, el leitmotiv de Galileo sigue presente hoy en día para los metrologos: *hacer medible lo que no se puede medir*.

7 Conclusiones

A lo largo de estas líneas hemos intentado mostrar el papel de la metrología y su relevancia en diferentes ámbitos sociales, tecnológicos y económicos y, a modo de resumen, podemos afirmar que:

- La sociedad actual requiere medidas que aporten confianza y resultados coincidentes, independientemente del lugar de su realización.
- El éxito económico de las naciones depende de su capacidad para fabricar y comercializar productos hechos con exactitud y calidad.

- La metrología apoya la calidad en la fabricación y potencia la innovación tecnológica.
- La metrología facilita la gestión del medioambiente y los recursos naturales.
- Los sistemas de navegación por satélite y la correlación internacional del tiempo hacen posible la localización precisa, las redes de computación globales y la seguridad en los transportes.
- La salud humana depende críticamente de la capacidad de hacer diagnósticos veraces, para los cuales las medidas bien hechas son cada vez más importantes.
- Los ciudadanos, con el respaldo de la metrología, pueden confiar en la cantidad de los bienes suministrados en sus transacciones..

Deseamos que esta publicación sirva para amortiguar en el lector esa tercera «i» de «*ignorada*» que caracteriza a la metrología.

8 Referencias

- [1] «*Metrology, its role in today's world*». QUINN, T.J. Raport BIPM-94/5.
- [2] «*Trends in legal metrology towards a global measurement system*» KOCHSIEK, Manfred. Boletín OIML enero 2003.
- [3] «*Economic and Social Benefits of Legal Metrology*». *Summary report and conclusions*. BIRCH, John. Boletín OIML, Abril 2004.
- [4] «*Las medidas y los hombres*». KULA, Witold. Editorial Siglo XXI.
- [5] *Metrum. La historia de las medidas*. Andrew Robinson. Editorial Paidós.
- [6] «*Introducción a la historia de la metrología*». Carlos Enrique Granados. *Monografías del departamento de Física Aplicada*. N° 7. UPM- ETSII.
- [7] «*Origen de la Metrología y su evolución histórica*». José A. Robles. *Master de Metrología UPM-CEM*. Diciembre 2015.
- [8] «*La unificación de los pesos y medidas en España durante el siglo XIX*». José Vicente Aznar García. *Editado por Centro Español de Metrología*. ISBN: 978-84-697-1989-3.
- [9] «*La metrología legal y su impacto en la sociedad*». ROBLES, José A. Módulo G2 del Curso Integral de Metrología Legal del CEM. Marzo 2006.

- [10] «*La Metrología y su necesidad*». SÁNCHEZ PÉREZ, Ángel María. Revista Española de Metrología e-medida. Centro Español de Metrología (CEM). nº 1, Febrero 2012, <http://www.e-medida.es/>
- [11] «*Enfrentando el desafío global de la calidad: Una Infraestructura nacional de la calidad*». SANETRA, Clemente; MARBAN, Rocio M.
- [12] *Metrología Abreviada. 3ª Edición*. EURAMET. Traducción al español del Centro Español de Metrología.
- [13] *Uso del concepto de trazabilidad metrológica por los laboratorios de calibración. NOTA ENAC y CEM. Marzo 2015*.
- [14] «*La Metrología, motor de innovación tecnológica y desarrollo industrial*». Dolores del Campo, José A. Robles; Revista Española de Metrología e-medida nº 1. Febrero 2012. (www.e-medida.es).
- [15] «*El Sistema Internacional de Unidades (SI) y su próxima revisión*». Emilio Prieto. Revista Española de Metrología e-Medida. Centro Español de Metrología (CEM). nº1 , Febrero 2012.
- [16] *Vocabulario Internacional de términos básicos y generales de Metrología*.
- [17] *GUM, Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement - Guía para la expresión de la Incertidumbre de Medida*.
- [18] *Conceptos generales de metrología. E. Prieto. Cursos de formación. Centro Español de Metrología*.

- [19] *La Metrología y Calidad. Infraestructura de la Calidad». José A. Robles Master de Metrología UPM-CEM. Diciembre 2014.*
- [20] *Implicaciones sociales de la metrología. José A. Robles Carbonell. Cursos de formación. Centro Español de Metrología.*

9 Enlaces de interés

Institución / Organización	Contacto
BIPM Oficina Internacional de Pesas y Medidas	www.bipm.org
BIPM KCDB	www.bipm.org/kcdb
CEN Comité Europeo de Normalización	www.cenorm.be
CEM Centro Español de Metrología	www.cem.es
CODATA Constantes físicas y químicas	www.codata.org
EA Acreditación en Europa	www.european-accreditation.org
ENAC Entidad nacional de acreditación en España	www.enac.es
EURAMET Organización regional europea en metrología	www.euramet.org
EUROLAB Laboratorios europeos de calibración, ensayo y análisis	www.eurolab.org
e-medida. Revista de metrología en español	www.e-medida.es www.e-medida.org www.e-medida.com

Institución / Organización	Contacto
IIE Instituto de la Ingeniería de España	www.iies.es
ISO Organización internacional de normalización	www.iso.org
IUPAC Unión internacional de química pura y aplicada	www.iupac.org
IUPAP Unión internacional de física pura y aplicada	www.iupap.org
OIML Organización Internacional de Metrología Legal	www.oiml.org
UNE Organismo de normalización de España	www.une.org
WELMEC Organización regional europea de metrología legal	www.welmec.org

*«La mejor parte del pensamiento es, sin duda, aquella que se asienta sobre la **medición y el cálculo**»*

Platón (La República)



**INSTITUTO DE LA INGENIERIA
DE ESPAÑA**