



Organización de los
Estados Americanos
OEA



Metrología para no-metrólogos

SEGUNDA EDICIÓN

Rocío M. Marbán

Julio A. Pellecer C.

METROLOGÍA PARA NO-METRÓLOGOS

Segunda Edición

Rocío M. Marbán

Julio A. Pellecer C.

2002

Para contactar a los autores dirigirse a:

2001 Producción y Servicios Incorporados S.A.

Calzada Mateo Flores 5-55, Zona 3 de Mixco

Guatemala, Centro América

Tel.: (502)591-0662

Fax: (502)594-0692

email: psi2001@osint.net

psi2001@itelgua.com

ISBN 99922-770-0-9

© OEA, 2002

Esta segunda edición revisada es publicada con el patrocinio del SIM.

El **Sistema Interamericano de Metrología, Normalización, Acreditación y Calidad, SIM**, es la organización regional de metrología para las Américas. Está conformado por los institutos nacionales de metrología de los 34 países miembros de la Organización de los Estados Americanos, OEA, la cual funge como su Secretaría Ejecutiva.

Las opiniones expresadas en este documento no son necesariamente opiniones de la OEA, de sus órganos o de sus funcionarios.

CONTENIDO

Agradecimientos	vii
Presentación	ix
Introducción	1
Qué se mide y cómo	11
Caracterización de la metrología	20
Léxico	21
Aplicaciones - Qué se mide y para qué	29
Longitud	29
Masa	30
Temperatura	31
Tiempo & frecuencia	32
Electricidad & magnetismo	33
Fotometría & radiometría	35
Acústica y vibración	36
Radiación ionizante	36
Química	37
Patrones y materiales de referencia	39
Introducción	39
Longitud	41
Masa	47
Temperatura	55
Tiempo & frecuencia	65

Metrología para no-metrólogos

Electricidad & magnetismo	75
Fotometría & radiometría	81
Acústica y vibración	87
Radiación ionizante	95
Química	101
Referencias	111
Anexo I	
Constantes físicas fundamentales y su relación con las unidades básicas	118
Anexo 2	
Algunas unidades SI derivadas	120
Anexo 3	
Múltiplos y submúltiplos más comunes para uso con el SI	123
Anexo 4	
Científicos relacionados con la electricidad	124
Anexo 5	
Radionuclídeos – conceptos básicos	127

AGRADECIMIENTOS

Muchas personas y entidades han colaborado para hacer posible esta publicación. En primer lugar, la Organización de los Estados Americanos, OEA, y la Cooperación Alemana para el Desarrollo, GTZ, que consideraron que un libro de este tipo podía resultar útil.

Los autores desean agradecer la ayuda recibida del Bureau International des Poids et Mesures (BIPM); del Dr. Gérard Geneves del Laboratoire Central des Industries Électriques du Bureau National de Métrologie de Francia (BNM-LCIE); del Dr. Duncan Jarvis, Acoustical and Noise Standards, del National Physical Laboratory de Inglaterra (NPL, UK); del Dr. Hans-Jürgen von Martens, de la sección “Aceleración” del Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) de Alemania, del Ing. Lester Hernández de COGUANOR en Guatemala. Asimismo, el National Institute of Standards and Technology de los EUA, NIST, por intermedio del Dr. Steve Carpenter, Director de Asuntos Internacionales y Académicos, tuvo la gentileza de proporcionar ejemplares de sus publicaciones especializadas.

Muy particularmente, desean destacar la excelencia científica del Centro Nacional de Metrología de

Metrología para no-metrólogos

México (CENAM) y la contribución de su Director, Dr. Héctor Nava Jaimes y de todo el personal profesional de esa entidad, que tuvo la gentileza de transmitir, ampliamente y sin reserva, sus conocimientos y sus formas de trabajo. Las modificaciones hechas a esta segunda edición responden a sugerencias de personal del CENAM. Agradecemos en particular al Dr. Ismael Castelazo Sinencio, Director de Servicios Tecnológicos y al M .en C. Rubén Lazos, Coordinador Científico, ambos del CENAM, y al Dr. Luis Mussio, Jefe de Metrología del Laboratorio Tecnológico del Uruguay (LATU), sus valiosas observaciones.

El contenido de esta publicación es responsabilidad únicamente de los autores.

Marzo 2002

PRESENTACIÓN

La presente publicación responde a la necesidad de poner en manos de quienes no son metrólogos un material, científica y técnicamente confiable, que sea un primer acercamiento a lo esencial de la Metrología y que, por lo tanto, les ayude a comprender su importancia.

A través de la historia se comprueba que el progreso de los pueblos siempre estuvo relacionado con su progreso en las mediciones. La Metrología es la ciencia de las mediciones y éstas son una parte permanente e integrada de nuestro diario vivir que a menudo perdemos de vista. En la metrología se entrelazan la tradición y el cambio; los sistemas de medición reflejan las tradiciones de los pueblos pero al mismo tiempo estamos permanentemente buscando nuevos patrones y formas de medir como parte de nuestro progreso y evolución.

Es por medio de diferentes aparatos e instrumentos de medición que se realizan pruebas y ensayos que permiten determinar la conformidad con las normas existentes de un producto o servicio; en cierta medida, esto permite asegurar la calidad de los productos y servicios que se ofrecen a los consumidores.

Metrología para no-metrólogos

Las mediciones correctas tienen una importancia fundamental para los gobiernos, para las empresas y para la población en general, ayudando a ordenar y facilitar las transacciones comerciales. A menudo las cantidades y las características de un producto son resultado de un contrato entre el cliente (consumidor) y el proveedor (fabricante); las mediciones facilitan este proceso y por ende inciden en la calidad de vida de la población, protegiendo al consumidor, ayudando a preservar el medio ambiente y contribuyendo a usar racionalmente los recursos naturales.

Las actividades relacionadas con la Metrología dentro de un país son responsabilidad de una o varias instituciones autónomas o gubernamentales y, según sus funciones, se caracteriza como Metrología Científica, Legal ó Industrial, dependiendo de su aplicación.

La primera está encargada de la investigación que conduce a la elaboración de patrones sobre bases científicas y promueve su reconocimiento y la equivalencia de éstos a nivel internacional. Las otras dos están relacionadas con la diseminación a nivel nacional de los patrones en el comercio y en la industria. La que se relaciona con las transacciones

comerciales se denomina Metrología Legal y busca garantizar, a todo nivel, que el cliente que compra algo reciba la cantidad efectivamente pactada. La otra rama se denomina Metrología Industrial y se relaciona con la industria manufacturera; persigue promover en la industria manufacturera y de servicios la competitividad a través de la permanente mejora de las mediciones que inciden en la calidad.

Actualmente, con la dinamización del comercio a nivel mundial, la Metrología adquiere mayor importancia y se hace más énfasis en la relación que existe entre ella y la calidad, entre las mediciones y el control de la calidad, la calibración, la acreditación de laboratorios, la trazabilidad y la certificación. La Metrología es el núcleo central básico que permite el ordenamiento de estas funciones y su operación coherente las ordena con el objetivo final de mejorar y garantizar la calidad de productos y servicios.

La Metrología a nivel de país juega un papel único y se relaciona con el Gobierno, con las Empresas y con la Población, relación conocida como el modelo G.E.P.

A nivel de Gobierno, este modelo es esencial para entender el papel de una infraestructura que se

requiere instalar y que sirve de apoyo en la elaboración de políticas y regulaciones para la elaboración y fabricación de productos y la prestación de servicios, tanto de origen nacional como de proveniencia extranjera.

Asímismo, el Gobierno debe tomar conciencia de que la capacidad de mediciones indica el nivel de desarrollo tecnológico del país en determinados campos, ya sea para la fabricación de productos o la prestación de servicios en diferentes áreas (manufactura, salud, educación, etc), lo cual incide directamente en la capacidad de competitividad de las empresas. A nivel internacional compiten las empresas, no los gobiernos, y uno de los pilares de la competitividad internacional es la calidad, por lo que conviene insistir y destacar que la metrología es una condición necesaria (aunque no suficiente) para lograr la calidad.

A nivel de Empresa, la competitividad se mide entre otras cosas por la capacidad de innovar. La innovación se puede dar en procesos productivos o administrativos, en productos, en servicios, etc. Es básica para la búsqueda permanente de la calidad a través de la mejora continua de las actividades. El proceso de mejora continua es un procedimiento en

el cual se usan parámetros de medición que nos permiten comparar lo que veníamos realizando con lo nuevo que se implementó, o sea que la medición forma parte integrante del proceso de innovación. En un medio de mejora continua lo único permanente es el cambio. Con la mejora continua de las actividades generalmente se busca que las empresas ganen mercados y puedan ampliar sus facilidades de producción lo cual, a su vez, abre la oportunidad de crecer y ampliar la oferta de nuevos empleos.

Desde el punto de vista de la Población, la Metrología es fundamental para apoyar el control de los productos que se fabrican y su impacto sobre el bienestar de la población. La población permanentemente consume productos nacionales y extranjeros y es la Metrología la llamada a ayudar a determinar que esos productos de consumo respondan a normas o especificaciones sobre salud y seguridad. Su relación con la población tiene un doble efecto: no solamente ayuda a la creación de nuevos empleos a través de impulsar el desarrollo de las empresas, sino también ayuda a la protección de ésta al velar por el contenido, la calidad y la seguridad de los productos que se consumen y su impacto en el medio ambiente.

A nivel internacional, con la apertura comercial a nivel mundial, la Metrología adquiere mayor importancia frente a la creciente interdependencia entre las naciones. Cada día los países se ven más involucrados en la firma de convenios, de tratados, bilaterales o regionales, etc. Estos involucran diferentes sectores (industria, comercio, salud, defensa, medio ambiente, etc.) y las empresas se ven confrontadas con esquemas de tipo internacional para su funcionamiento en cuanto a la manufactura, suministro de materiales, comercialización, etc. Si a esto le sumamos que los consumidores se guían cada vez más por patrones globales de consumo, es esencial contar con una infraestructura técnica que funcione como espina dorsal para la coordinación y ordenamiento a nivel global.

El primer requisito para este ordenamiento es la adopción y reconocimiento de un sistema internacional de unidades de medida. El primer paso formal serio para el ordenamiento internacional en las mediciones fue la Convención Internacional sobre el Tratado del Metro (20 de mayo de 1875) que dió origen al BIPM (Bureau International des Poids et Mesures – Oficina Internacional de Pesas y Medidas). En octubre de 1995, la 20ª Conferencia

General de Pesas y Medidas (CGPM) le pidió al Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM) que realizara un estudio de las necesidades internacionales relacionadas con la Metrología, con el objeto de guiar y ordenar los respectivos papeles del BIPM, de los Institutos Nacionales y de los Organismos Regionales de Metrología.

En el Hemisferio Occidental los Organismos Nacionales de Metrología de 34 países se han asociado para formar el Sistema Interamericano de Metrología denominado SIM. El SIM trabaja y se coordina en base a 5 subregiones que responden a los 5 bloques económico-comerciales más importantes del Hemisferio Occidental. Los bloques de actividades metrológicas son: NORAMET (Norte América), CAMET (Centro América), CARIMET (Caribe), ANDIMET (Grupo Andino) y SURAMET (América del Sur).

Destacada la importancia de la Metrología y buscando su mejor entendimiento por parte de los diferentes grupos profesionales, la presente publicación se enfocó, como lo indica su título, a quienes no son metrólogos. En un primer capítulo se hace una introducción al tema, el segundo busca explicar qué se mide y por qué, el tercero es una

Metrología para no-metrólogos

descripción somera de algunas aplicaciones para destacar la importancia de este campo y el cuarto capítulo detalla los patrones y los materiales de referencia actualmente en uso para las unidades principales del Sistema Internacional de Unidades. Esperamos que su lectura haga más accesible la comprensión de la actual Metrología.

Oscar Harasic

Coordinador Regional del Proyecto **Sistema Interamericano de Metrología, Normalización, Acreditación y Calidad**, Organización de los Estados Americanos, OEA.

Coordinador del Proyecto OEA/GTZ de **Gestión de la Calidad y Productividad en las Pequeñas y Medianas Empresas**.

INTRODUCCIÓN

La percepción inicial de **metrología** deriva de su etimología: del griego *metros* medida y *logos* tratado. Concepto que debe ser casi tan antiguo como el ser humano: “tengo nada”, “tengo algo”, “tengo mucho”; expresiones que reflejan una comparación muy primitiva pero que perdura en la raza humana bajo muchos aspectos, al punto que actualmente podemos decir que **metrología es la ciencia de las mediciones** y que medir es comparar con algo (**unidad**) que se toma como base de comparación.

Las ocasiones de medir las tuvo el humano primitivo con las nociones de: **cerca-lejos, rápido-lento, liviano-pesado, claro-oscuro, duro-suave, frío-caliente, silencio-ruído**. Originalmente estas percepciones fueron individuales pero con el correr de las experiencias y la vida en común surgieron las comparaciones entre las personas y en el transcurso de los milenios se han desarrollado bases de comparación generalmente aceptadas.

Con esos antecedentes y después de una buena cantidad de milenios, es fácil pensar en las bases para comparar las apreciaciones personales - dicho en buena lengua romance: en las **medidas** y sus **unidades**.

Metrología para no-metrólogos

Para mencionar algunas de las medidas y unidades básicas podemos citar:

MEDIDA	UNIDAD
longitud	metro
masa	kilogramo
tiempo	segundo
temperatura	kelvin
intensidad luminosa	candela
corriente eléctrica	ampere
cantidad de sustancia	mol

A menudo es necesario referirse a otras unidades de medida que, por hacer uso o basarse en las anteriores, se denominan derivadas. Es decir que, con el empleo de algoritmos matemáticos, se expresa una unidad de medida para un fin que no está cubierto por las de base.

Penetrar en el mundo de las unidades que utilizan la combinación de una o más unidades fundamentales es navegar en un mundo de algoritmos científicos útiles para propósitos definidos. Las unidades derivadas son las más numerosas.

Una **unidad** es un valor en términos del cual puede definirse la magnitud medida. Quizás convenga

destacar que, en tanto que unidad, no debe descomponerse en sus elementos. Se han desarrollado múltiplos y submúltiplos para poder expresar magnitudes mayores o menores que las expresadas por las unidades en sí. Veremos más adelante que el Sistema Internacional de Unidades, SI, con sus múltiplos y submúltiplos, es de tipo decimal (potencias de diez).

Anteriormente citamos **algo** con que comparar; ese algo se conoce como **patrón**.

Originalmente, se entendía por patrón a una representación o materialización física de la unidad. Era necesario destacar que un patrón es una representación confiable de la unidad solamente bajo un conjunto de condiciones claramente definidas para asegurar que no cambien estas condiciones por motivo de variaciones, por ejemplo, de temperatura, humedad, presión atmosférica, etc. Por sus características, el patrón físico no se empleaba directamente para hacer mediciones. Era, eso sí, el punto de referencia para construir y utilizar instrumentos de medición.

En la actualidad, y dado que los avances de la ciencia han permitido definiciones más exactas y

confiables de las unidades, basadas en constantes físicas universales, se define como patrón a: *una medida materializada, instrumento de medir, material de referencia o sistema de medición, destinado a definir, realizar, conservar o reproducir una unidad o uno o varios valores conocidos de una magnitud, a fin de transmitirlos por comparación a otros instrumentos de medir* ⁽²⁾.

El procedimiento de cómo medir para obtener resultados reproducibles también es importante y de hecho existen instrucciones precisas sobre cómo hacer la acción, qué unidades emplear y qué patrón utilizar.

En el mundo real la forma de medir obedece al diagrama siguiente:

- decidimos qué mediremos,
- seleccionamos la unidad acorde a la medida,
- seleccionamos el instrumento de medición (*calibrado*),
- aplicamos el procedimiento acordado.

Antes de entrar a ver en detalle algunas de las principales medidas, hagamos un poco, muy poco, de historia.

Estudios arqueológicos han encontrado que civilizaciones muy antiguas tenían ya los conceptos de pesar y medir. Muy pronto debe haberse hecho necesario disponer, además, de medidas uniformes que permitieran el intercambio comercial, la división de territorios, la aplicación de impuestos.

La aparición de sistemas de pesas y medidas se pierde en el tiempo. No conocemos lo que pudo haberse dado en el Lejano Oriente; sin embargo, aparecen sin lugar a duda en las civilizaciones de Mesopotamia y - desde luego - es claro que la construcción de las pirámides de Egipto (3000 a 1800 A.C.) demandó elaborados sistemas de medición.

En particular conocemos, y en cierta forma aún se emplean, las mediciones lineales que se usaron antiguamente en Egipto (el jeme, la cuarta, el palmo, el codo, el pie).

También en Egipto se emplearon balanzas para pesar metales preciosos y gemas. Después, al aparecer las monedas como elemento de intercambio comercial, éstas fueron simplemente piezas de oro o plata con su peso estampado. Dieron origen a un sistema monetario que se extendió por todo el Mediterráneo.

Metrología para no-metrólogos

Nuestra forma de medir el tiempo tiene su origen en el sistema sexagesimal desarrollado en Mesopotamia y nuestro calendario de 365 días se deriva originalmente del calendario egipcio.

Posteriormente, la conquista romana de gran parte del continente europeo originó la divulgación de los sistemas de pesas y medidas.

Para principios del segundo milenio, las diferentes medidas en uso habían proliferado de forma incontrolable. Se tenía, por ejemplo, diferentes medidas de capacidad según el producto de que se tratase ya fuese vino o cerveza, trigo o cebada. A veces las medidas variaban de provincia a provincia o de ciudad a ciudad.

Inglaterra utilizaba medidas de origen anglosajón y buscó la forma de mejorar y simplificar su sistema. Durante varios siglos el **sistema libra-pie-segundo** fué el sistema de preferencia en los países de habla inglesa y a nivel mundial para ciertas ramas comerciales y técnicas; a la fecha no ha sido del todo descartado y sigue siendo empleado en diversas actividades en muchos países.

Por su parte, Francia creó y desarrolló un sistema, simple y lógico, basado en los principios científicos

más avanzados que se conocían en esa época (finales del Siglo XVIII) - el **sistema métrico decimal** que entró en vigor durante la Revolución Francesa. Su nombre viene de lo que fue su unidad de base: el metro, en francés *mètre*, derivado a su vez del griego *metron* que significa medida, y del uso del sistema decimal para establecer múltiplos y submúltiplos. En su versión primera, el metro se definió como la diezmillonésima parte de la longitud de un cuadrante del meridiano terrestre y se determinó midiendo un arco de meridiano entre Dunkerque en Francia y Barcelona en España. La historia, las vicisitudes, el desarrollo y la aplicación de este sistema han sido ampliamente documentados ^(1,18).

Los metrólogos siguen muy activos y son importantes los cambios y mejoras que se dan en todos los aspectos relacionados con mediciones. La creciente colaboración entre metrólogos de diversos países está, por su parte, ayudando a crear enfoques y formas de trabajo aceptados a nivel internacional. Los métodos uniformes de medición se han establecido para que todos podamos trabajar sobre la base de una misma magnitud o unidad conocida y asegurar que los resultados de toda calibración, verificación y ensayo, en cualquier

laboratorio o empresa, garantice la compatibilidad y la calidad.

En la actualidad, en consonancia con el enfoque global, cada vez son más los países que están adoptando por ley el **Sistema Internacional de Unidades SI**, basado en el sistema métrico decimal, con la consiguiente adopción de los patrones y técnicas de medición correspondientes.

Cuarenta y ocho naciones han suscrito el Tratado de la Convención del Metro, en el que se adoptó el Sistema Internacional de Unidades (SI). La Convención otorga autoridad a la Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM - Conferencia General de Pesas y Medidas), al Comité International des Poids et Mesures (CIPM - Comité Internacional de Pesas y Medidas) y al Bureau International des Poids et Mesures (BIPM - Oficina Internacional de Pesas y Medidas), para actuar a nivel internacional en materia de metrología.

La CGPM está constituida por representantes de los países miembros y se reúne cada cuatro años en París, Francia; en ella se discuten y examinan los acuerdos que aseguran el mejoramiento y diseminación del Sistema Internacional de Unidades

(SI); se validan los avances y los resultados de las nuevas determinaciones metrológicas fundamentales y las diversas resoluciones científicas de carácter internacional, y se adoptan las decisiones relativas a la organización y desarrollo del BIPM.

Para asegurar la unificación mundial de las mediciones físicas, el BIPM:

- establece los patrones fundamentales y las escalas de las principales magnitudes físicas,
- efectúa y coordina las determinaciones relativas a las constantes físicas,
- conserva los prototipos internacionales,
- coordina las comparaciones de patrones mantenidos en los laboratorios nacionales de metrología,
- asegura la coordinación de las técnicas relacionadas con las mediciones.

QUÉ SE MIDE Y CÓMO

Las unidades del Sistema Internacional de Unidades, **SI**, son establecidas por la Conferencia General de Pesas y Medidas (**CGPM**) bajo cuya autoridad funciona la Oficina Internacional de Pesas y Medidas (**BIPM** - Bureau International des Poids et Mesures) con sede en Francia. En los párrafos siguientes, las definiciones internacionales de las unidades son las publicadas por el BIPM, actualizadas al mes de enero del 2000.

La CGPM decidió establecer el SI, basado en siete unidades bien definidas. Estas son las llamadas unidades de base que se listan en la tabla 1.

Originalmente, las medidas de base o fundamentales se llamaban así por ser consideradas independientes entre sí y permitir, a su vez, la definición de otras unidades. Los patrones correspondientes eran medidas materializadas que se conservaban en lugares acordados y bajo condiciones determinadas. Los avances científicos y técnicos así como la disponibilidad de instrumentos de mayor exactitud han dado por resultado que, con excepción del kilogramo, las unidades de base se definan actualmente de diferente forma, con base en

TABLA 1
Unidades de base del SI

Magnitud	Símbolo	Unidad
longitud	m	metro
masa	kg	kilogramo
tiempo	s	segundo
corriente eléctrica	A	ampere
temperatura termodinámica	K	kelvin
cantidad de substancia	mol	mol
intensidad luminosa	cd	candela

experimentos físicos. En rigor, se podría argumentar que en algunos casos las unidades básicas no son estrictamente independientes entre sí. Por ejemplo, el *metro* ya no se define contra el antiguo metro prototipo - una barra de iridio-platino - y la definición actual involucra el concepto de *segundo*, otra unidad de base. En igual forma, la *candela*, unidad de base de la intensidad luminosa, se define en términos del *hertz* (s^{-1}) y del *watt* ($m^2.kg.s^3$), ambas unidades derivadas, y del *estereorradián*¹, una unidad derivada adimensional.

Sin embargo, se considera que el SI, entendido como el conjunto de unidades básicas y de unidades derivadas, es un sistema coherente por las razones siguientes:

- las unidades básicas están definidas en términos de constantes físicas (Anexo 1), con la única excepción del kilogramo, definido en términos de un prototipo,
- cada magnitud se expresa en términos de una única unidad, obtenida por multiplicación o división de las unidades de base y de las unidades derivadas adimensionales,
- los múltiplos y submúltiplos se obtienen por medio de multiplicación con una potencia exacta de diez,

¹ En algunos países se emplea el término **esterradián**.

- las unidades derivadas se pueden expresar estrictamente en términos de las unidades básicas en sí, es decir, no conllevan factores numéricos.

Los trabajos de definición y refinamiento de las unidades del SI persiguen en todo momento que las unidades sean coherentes con las ya existentes.

Como vimos anteriormente, de estas unidades de base se deriva un gran número de unidades; algunas de las que están consideradas como unidades derivadas en el SI se listan en el Anexo 2.

De las unidades derivadas quizás resulte conveniente destacar dos, que anteriormente se conocían como unidades “complementarias”, y que son las empleadas para medir los ángulos planos, en el caso del radián (rad) y los ángulos sólidos, en el caso del estereorradián (sr). También se les conoce como unidades no-dimensionales o adimensionales. El neper y el bel, cuyo uso es aceptado pero que no forman parte integral del SI, son también adimensionales.

En el SI se establece además una serie de reglas y convenciones que tienen que ver con el uso de

unidades mixtas, la forma de seleccionar e identificar los prefijos, el uso de múltiplos y submúltiplos, la ortografía, el uso de mayúsculas y minúsculas, de singular y plural, el agrupamiento de dígitos, el redondeo de valores, etc.^(16,30,37)

Estas reglas no son aún totalmente de aplicación universal; en algunos países de América, por ejemplo, se sigue usando el punto y no la coma para señalar la separación de los decimales. En todo caso, es importante conocer estas reglas y se recomienda la consulta de algunas de las referencias dadas^(16,37,40,46).

Adicionalmente, existen unidades que, sin ser del SI, están aceptadas para su uso concomitante y son conocidas como unidades adicionales (tabla 2)

Algunas de ellas se utilizan en forma temporal en tanto su uso es substituido por las aceptadas, otras únicamente en campos especializados, por ejemplo el quilate (ct) en joyería. Otras unidades, cuyo uso no está aceptado con el SI^(40,46), se siguen utilizando en algunos contextos y en algunos países, por ejemplo la *dina* y el *stokes*.

Si ahora vemos la estructura jerárquica de los patrones, notamos que podemos describirla como una pirámide en cuyo vértice tenemos el conjunto de patrones que corresponden a las **unidades de base del SI** de las que ya hemos hablado.

La segunda posición corresponde al conjunto de patrones nacionales.

En el siguiente nivel se localizan los patrones de referencia, conjunto que sirve para preparar los patrones de trabajo a nivel operativo.

El conjunto de patrones del nivel operativo (patrones de trabajo) constituye la base de la pirámide.

La cadena de instituciones encargadas de operar el SI está encabezada por el BIPM, le siguen los Laboratorios Nacionales de Metrología, a continuación están los Laboratorios de Calibración y por último los Laboratorios de Trabajo.

Los laboratorios nacionales de metrología, custodian los **patrones nacionales** y tienen la responsabilidad de diseminar las unidades SI a los laboratorios acreditados de calibración de sus respectivos países.

TABLA 2

Unidades adicionales aceptadas para uso con el SI

Nombre	Símbolo	Expresión en unidades SI
<u>Tiempo:</u>		
minuto	min	1 min = 60 s
hora	h	1 h = 60 min = 3600 s
día	d	1 d = 24 h = 86 400 s
<u>Ángulo plano:</u>		
grado	°	1° = $(\pi/180)$ rad
minuto	'	1' = $(1/60)^\circ = (\pi/10\,800)$ rad
segundo	"	1" = $(1/60)' = (\pi/648\,000)$ rad
<u>Volumen:</u>		
litro	l, L ^(a)	1 L = 1 dm ³ = 10 ⁻³ m ³
<u>Masa:</u>		
tonelada, tonelada métrica	t	1 t = 10 ³ kg

- a) Aunque esta unidad debería escribirse con minúscula, el símbolo alternativo "L" para litro fue aceptado por la CGPM para evitar posibles confusiones entre la letra "l" y el número "1"; no se acepta la letra cursiva como símbolo.
- b) También se consideran unidades adicionales: el electrovolt (eV), la unidad de masa atómica unificada (u) y la unidad astronómica (ua).

Los laboratorios de calibración aseguran que los equipos de medición así como los patrones de referencia y de trabajo estén acordes con los patrones nacionales.

Los laboratorios de ensayos, en el nivel de trabajo, son los encargados de evaluar la conformidad de productos que van a ser certificados. Para sus trabajos, utilizan **patrones de referencia**, que son calibrados contra los patrones nacionales del estrato anterior.

Finalmente, encontramos las organizaciones o instituciones que utilizan los **patrones de trabajo**, empleados por la industria y otros sectores, los cuales suelen ser calibrados contra patrones de referencia y éstos a su vez contra patrones nacionales.

Un concepto importante en la metrología es el de la llamada **trazabilidad**². Por ello se entiende la propiedad de una medición o del valor de un patrón, de estar relacionado a referencias establecidas, generalmente patrones nacionales o internacionales, por medio de una cadena continua de comparaciones, todas ellas con incertidumbres

² Nota de los autores: aunque opinamos que el término correcto es rastreabilidad y no trazabilidad, hemos conservado éste último a lo largo del texto por ser el comúnmente empleado por los metrólogos.

establecidas. La posibilidad de determinar la trazabilidad de cualquier medición descansa en el concepto y las acciones de calibración y en la estructura jerárquica de los patrones de la que ya hablamos.

Para los metrologos, se entiende por **calibración**: un conjunto de operaciones que establece, bajo condiciones específicas, la relación entre los valores indicados por un instrumento de medición, sistema de medición, valores representados por una medida materializada o un material de referencia y los valores correspondientes a las magnitudes establecidas por los patrones. Algunos, indebidamente, le llaman calibración a un proceso de **comprobación** o **verificación** que permite asegurar que entre los valores indicados por un aparato o un sistema de medición y los valores conocidos correspondientes a una magnitud medida, los desvíos sean inferiores a los errores máximos tolerados⁽²⁾.

Por otra parte, los metrologos suelen tomar en consideración las principales causas de error en las mediciones, causas que pueden ser o no conocidas y controlables y que pueden deberse a factores del

medio ambiente en el que se llevan a cabo las mediciones, a defectos de construcción o de calibración de los aparatos empleados, a fallas del operador o a la propia interpretación de los datos, o a factores aleatorios.

CARACTERIZACIÓN DE LA METROLOGÍA

Por conveniencia, se hace a menudo una distinción entre los diversos campos de aplicación de la metrología; suelen distinguirse como Metrología Científica, Metrología Legal y Metrología Industrial.

Metrología científica

Es el conjunto de acciones que persiguen el desarrollo de patrones primarios de medición para las unidades de base y derivadas del Sistema Internacional de Unidades, SI.

Metrología industrial

La función de la metrología industrial reside en la calibración, control y mantenimiento adecuados de todos los equipos de medición empleados en producción, inspección y pruebas. Esto con la

finalidad de que pueda garantizarse que los productos están de conformidad con normas. El equipo se controla con frecuencias establecidas y de forma que se conozca la incertidumbre de las mediciones. La calibración debe hacerse contra equipos certificados, con relación válida conocida a patrones, por ejemplo los patrones nacionales de referencia.

Metrología legal

Según la *Organización Internacional de Metrología Legal (OIML)* es la totalidad de los procedimientos legislativos, administrativos y técnicos establecidos por, o por referencia a, autoridades públicas y puestas en vigor por su cuenta con la finalidad de especificar y asegurar, de forma regulatoria o contractual, la calidad y credibilidad apropiadas de las mediciones relacionadas con los controles oficiales, el comercio, la salud, la seguridad y el ambiente.

LÉXICO

Para poderse entender, los metrologos utilizan un léxico acordado internacionalmente por medio del Vocabulario Internacional de Metrología, VIM⁽⁵⁴⁾; algunas de las definiciones más usuales se dan a continuación.

Magnitud (medible)

Atributo de un fenómeno, de un cuerpo o de una sustancia, que es susceptible de distinguirse cualitativamente y de determinarse cuantitativamente.

Magnitud de base

Una de las magnitudes que, en un sistema de magnitudes, se admiten por convención como funcionalmente independientes unas de otras.

Magnitud derivada

Una magnitud definida, dentro de un sistema de magnitudes, en función de las magnitudes de base de dicho sistema.

Dimensión de una magnitud

Expresión que representa una magnitud de un sistema de magnitudes como el producto de potencias de factores que representan las magnitudes de base de dicho sistema.

Magnitud de dimensión uno (adimensional)

Magnitud cuya expresión dimensional, en función de las dimensiones de las magnitudes de base, presenta exponentes que se reducen todos a cero.

Unidad (de medida)

Una magnitud particular, definida y adoptada por convención, con la cual se comparan las otras magnitudes de igual naturaleza para expresarlas cuantitativamente en relación a dicha magnitud.

Unidad (de medida) **de base**

Unidad de medida de una magnitud de base en un sistema dado de magnitudes.

Valor (de una magnitud)

Expresión cuantitativa de una magnitud en particular, generalmente bajo la forma de una unidad de medida multiplicada por un número.

Medición

Conjunto de operaciones que tienen por finalidad determinar el valor de una magnitud.

Mensurando

Magnitud dada, sometida a medición.

Exactitud de medición

Grado de concordancia entre el resultado de una medición y el valor verdadero (o real) de lo medido (el mensurando).

Repetibilidad (de los resultados de mediciones)

Grado de concordancia entre los resultados de mediciones sucesivas de un mismo mensurando, llevadas a cabo totalmente bajo las mismas condiciones de medición.

Reproducibilidad

Grado de concordancia entre los resultados de las mediciones de un mismo mensurando, llevadas a cabo haciendo variar las condiciones de medición.

Incertidumbre

Parámetro, asociado al resultado de una medición, que caracteriza la dispersión de los valores que, con fundamento, pueden ser atribuidos al mensurando.

Medida materializada

Dispositivo destinado a reproducir o a proveer de forma permanente durante su empleo, uno o varios valores conocidos de una magnitud dada.

Patrón

Medida materializada, aparato de medición, material de referencia o sistema de medición, destinado a definir, realizar, conservar o reproducir una unidad o uno o varios valores de una magnitud para servir de

referencia. *Los patrones pueden ser internacionales (reconocidos por acuerdo internacional) y nacionales (reconocidos por acuerdo nacional).*

Patrón primario

Patrón que se designa o se recomienda por presentar las más altas calidades metrológicas y cuyo valor se establece sin referirse a otros patrones de la misma magnitud.

Patrón secundario

Patrón cuyo valor se establece por comparación con un patrón primario de la misma magnitud.

Patrón de referencia

Patrón, generalmente de la más alta calidad metrológica disponible en un lugar u organización dados, del cual se derivan las mediciones que se hacen en dicho lugar u organización.

Patrón de trabajo

Patrón utilizado corrientemente para controlar medidas materializadas, aparatos de medición o materiales de referencia.

Patrón de transferencia

Patrón empleado como intermediario para comparar patrones entre sí.

Trazabilidad³

Propiedad del resultado de una medición o del valor de un patrón de estar relacionado a referencias establecidas, generalmente patrones nacionales o internacionales, por medio de una cadena continua de comparaciones, todas ellas con incertidumbres establecidas.

Material de referencia (MR)

Material o sustancia que tiene uno (o varios) valor(es) de su(s) propiedad(es) suficientemente homogéneo(s) y bien definido(s) para permitir su utilización como patrón en la calibración de un aparato, la evaluación de un método de medición o la atribución de valores a los materiales.

Material de referencia certificado (MRC)

Material de referencia provisto de un certificado, para el cual uno o más valores de sus propiedades está certificado por un procedimiento que establece su enlace con una realización exacta de la unidad bajo la cual se expresan los valores de la propiedad

³ Ver Nota 2, página 18

y para el cual cada valor certificado cuenta con una incertidumbre a un nivel de confiabilidad señalado.

Nota: dado que no en todos los países se emplea la misma forma de escribir los números, vale aclarar que en este documento se utiliza la coma para indicar decimales y una “x” para el signo de multiplicación. Así, por ejemplo, escribiremos $6,023 \times 10^{23}$ y no 6.023×10^{23} .

APLICACIONES

Una pregunta que puede plantearse es ¿para qué se mide? Sin entrar en detalle y sin pretender ser exhaustivos, veamos algunas respuestas restringidas a los aspectos básicos.

Como es de esperar, en las distintas aplicaciones se realizan distintas acciones que demandan niveles de confiabilidad que en metrología se identifican como “incertidumbre”, que no es sino el intervalo de confianza de los resultados de las mediciones.

Longitud

A la medición de la longitud, determinación de distancia, se le utiliza en mediciones dimensionales tales como: áreas, volúmenes, capacidades, rapidez y velocidad, redondez. La longitud está incluso presente en la definición de las unidades llamadas no dimensionales (radián y estereoradián) para medir ángulos. En general podríamos decir que es de uso en toda determinación de la forma de un objeto.

Muchos campos de la actividad humana requieren mediciones dimensionales: la geodesia, los catastros que determinan la propiedad y uso de la

tierra, la construcción y mantenimiento de caminos, carreteras, calles y avenidas, la construcción de vivienda, la industria manufacturera de todo tipo, las máquinas herramienta, los odómetros para determinar cobros de renta de vehículos, muchos aspectos comerciales. Quizás donde se ve con mayor impacto la importancia de buenas mediciones de longitud es en la industria manufacturera. Las industrias del vestuario, de muebles, automotriz, de accesorios, de aparatos electrodomésticos, de instrumentos científicos y médicos, de equipos electrónicos y muchos más, demandan piezas que se ensamblen adecuadamente unas con otras, así como mediciones exactas en los productos finales que se ponen a disposición de los consumidores.

Masa

La actividad de conocer cuantitativamente la masa está presente en todas las actividades humanas. Es por ello que el uso de patrones e instrumentos para determinar la masa es amplio y sin mostrar una ejemplificación extensa citamos los campos: industrial - administración (compras, bodegas, etc.), procesos (ejecución y control), ventas (pedidos y despachos); laboratorios (investigación y control); comercial (en todas las transacciones); científico

(aun en el quehacer teórico). Las cantidades de masa a determinar van desde la del electrón hasta la del universo, pasando por la de los mosquitos, hamburguesas, seres humanos, vehículos, etc. Normalmente todo lo que se produce, vende o intercambia se relaciona directa o indirectamente con la masa, por lo tanto puede considerarse que la aplicación de la metrología en su aspecto masa, en sus distintos niveles, es omnipresente en el quehacer cotidiano.

Temperatura

La sensación de calor o frío es una de las más comunes en los seres vivos y el concepto de temperatura y su medición está presente en innumerables actividades del ser humano.

Puesto que nuestro primer contacto con la medición de temperatura de tipo científico suele ser el termómetro casero, vienen de inmediato a la mente las aplicaciones de tipo médico y en particular la determinación de la temperatura corporal de los enfermos con la importancia que puede tener para la evolución de ciertas dolencias. Pero también se requiere medir temperatura en forma adecuada para la fabricación de medicamentos, el uso de técnicas

de diagnóstico, los análisis clínicos, la esterilización de material clínico y hospitalario. Los alimentos, tanto en su preparación como en las técnicas de su conservación, requieren mediciones de temperatura y, si éstas pueden ser empíricas a nivel casero, a nivel industrial se requiere exactitud en las mediciones. La tintorería, la fabricación de cerámica de todo tipo, la aplicación de esmaltes y pinturas en aparatos electrodomésticos y en vehículos, la generación de energía, el transporte refrigerado, el aire acondicionado y tantas más actividades humanas, requieren mediciones adecuadas de temperatura.

Tiempo

¡La medición del tiempo es útil no solamente para asegurar la puntualidad o para determinar el ganador de una prueba de atletismo! Además de las aplicaciones obvias del diario vivir (levantarse a determinada hora; autobuses, trenes y aviones cumpliendo en tiempo sus itinerarios, control de las horas de trabajo para cálculo de remuneración, control del tiempo en las telecomunicaciones, etc.), muchos procesos industriales, muchas técnicas médicas dependen de una medición exacta del tiempo. Otras aplicaciones usuales son por ejemplo

los taxímetros (basados sólo en tiempo o combinación de tiempo y recorrido), los relojes registradores (timekeepers), los velocímetros. La sincronización de actividades tales como las operaciones bursátiles y las militares, los lanzamientos y acoplamientos de naves espaciales, etc. demanda la medida exacta del tiempo.

En general podemos hablar de relojes y de cronómetros (tipo I con circuitos electrónicos digitales y tipo II de mecanismos análogos mecánicos o de motor sincrónico) y de otros medidores de intervalos de tiempo, como los empleados en el estacionamientos de vehículos, el lavado automático de vehículos, los parquímetros, o en el control de tiempo de aparatos electrodomésticos tales como máquinas lavadoras, máquinas secadoras, hornos de microondas.

Electricidad y magnetismo

En el siglo pasado se realizaron innumerables trabajos que abrieron la puerta del desarrollo moderno; se construyeron motores movidos por electricidad, con los cuales la industria, el transporte y toda actividad que requiere algún tipo de movimiento se vió favorecida. Con la manufactura de las bombillas

incandescentes, la iluminación artificial cambió la forma de todas las actividades nocturnas. Enumerar las aplicaciones actuales de la electricidad adecuadamente suministrada y utilizada significaría listar todas las actividades del hombre, para las cuales es controlada (medida) y para ello es necesario disponer de aparatos o sistemas confiables y de exactitud conocida.

En las comunicaciones el uso de la electricidad es fundamental tanto en telefonía, radio, televisión, como en operación de satélites. Pero, más que la existencia misma del recurso electricidad y magnetismo, es la confiabilidad del manejo o empleo de este recurso lo que la metrología garantiza con sus patrones y procedimientos. En el diseño es donde se afrontan los innumerables problemas de confiabilidad y por supuesto que el disponer de sistemas que aseguren el comportamiento adecuado de los equipos, dentro de ciertos límites, hace posible diseñar, planificar y realizar proyectos complejos

Por otra parte, en toda la electrónica subyace el uso de medidas confiables (exactas para los profanos), confiabilidad y reproducibilidad debidas, en gran parte, a los avances en metrología.

Fotometría y radiometría

El hombre ha desarrollado muchos aparatos y artefactos que le permiten contar con luz independientemente de las condiciones naturales y que, aún más, permiten intensidades que difícilmente se encuentran en la naturaleza. Todos estos aparatos demandan técnicas confiables de medición para garantizar que efectivamente se está logrando la intensidad o iluminación deseadas.

Pero, además, las técnicas de análisis físico y químico a menudo exigen mediciones muy exactas de la magnitud de luz o de radiación. Los fotómetros de absorción, de ennegrecimiento, fotoeléctricos, espectrofotómetros y medidores de radiación, etc. dependen para su exactitud de calibraciones cuidadosas, basadas en los patrones aceptados.

En la actualidad se emplean técnicas de terapia fotodinámica para el tratamiento de ciertas enfermedades, aplicaciones industriales de la luz ultravioleta, el empleo de las propiedades germicidas de ciertas radiaciones, el uso de determinadas longitudes de onda en el crecimiento de plantas, etc. que, también, demandan mediciones confiables.

Acústica y vibración

Las mediciones exactas en acústica son de importancia para aspectos tales como el diseño de auditorios y teatros, las telecomunicaciones, la radio, la fabricación de instrumentos musicales, la producción de aparatos de reproducción y transmisión de sonido (incluyendo fonógrafos, micrófonos y amplificadores), la eliminación de sonidos molestos o peligrosos (en oficinas, áreas de producción, transporte terrestre y aéreo), el diseño de artefactos de advertencia como las sirenas de ambulancias y bomberos y ciertos indicadores a nivel industrial, el sonar, las exploraciones petroleras, la fabricación y calibración de aparatos para sordera, las microondas, la sismografía, los ecocardiogramas, el ultrasonido en química, en medicina con fines de diagnóstico y de tratamiento, en aplicaciones industriales tales como soldadura.

Radiación ionizante

Las aplicaciones médicas de la radiación ionizante son probablemente las más conocidas bajo la forma de los rayos X para diagnóstico y del uso de los isótopos radioactivos en radioterapia y como trazadores en investigación médica y bioquímica.

Entre las aplicaciones industriales se pueden mencionar la activación de vitaminas, la síntesis (por ejemplo la de bromuro de etilo), la polimerización (poliestireno o polietileno), la vulcanización del hule, la polimerización de monómero de metil-metacrilato, los acabados textiles para lograr tejidos y prendas de planchado permanente, el procesamiento de alimentos (cocción, secado, pasteurización, etc.), la preservación y esterilización de alimentos, el control de la germinación y de las infestaciones por insectos en granos almacenados, el “curado” o endurecimiento de acabados tales como pinturas y tintas, la metalurgia, la geoquímica, la arqueología (C^{14}), las mediciones de grosor, la generación de energía eléctrica.

Química

En las actividades científicas y en las técnicas es importante conocer las bases para calcular qué y cuánto de una o varias sustancias debe utilizarse.

El caso obvio es el del laboratorio, clínico o industrial, pero también son importantes los procesos industriales de todo tipo, unos porque manejan volúmenes muy grandes y pequeñas variaciones pueden significar toneladas perdidas y otros porque

utilizan cantidades muy pequeñas y variaciones ínfimas pueden ser cruciales.

Es decir que el uso de patrones y materiales de referencia constituye la base del trabajo (el éxito de producción), y la garantía de la calidad. Por ejemplo, en la producción y comercialización de los medicamentos existe un campo muy importante para empleo de la metrología.

PATRONES Y MATERIALES DE REFERENCIA

INTRODUCCIÓN

Los patrones y materiales de referencia serán los elementos tratados en más detalle en las secciones siguientes, de acuerdo con el siguiente modelo: consideraciones sobre qué se mide, definición de la unidad, patrones primarios, exactitud e incertidumbre, equipos de medición.

En relación con la incertidumbre, es de notar que entre los metrologos existen dos escuelas⁽⁷⁾. Una enfoca la incertidumbre como un elemento para denotar la *uniformidad* del resultado en mediciones repetidas. La otra usa el término para indicar que se miden *diferencias* entre los resultados. En ambos casos recordemos que la incertidumbre no es sino el intervalo de confianza. Los dos enfoques son válidos según el campo de aplicación, ya sea en laboratorios de trabajo o en laboratorios nacionales. Para los laboratorios nacionales y secundarios, se recomienda trabajar de acuerdo a la guía ISO de

1993, “Guide to the expression of uncertainty in measurement”⁽⁴⁴⁾.

En el continente americano, con la creación y los trabajos del **Sistema Interamericano de Metrología, SIM**, se está buscando lograr la mayor integración y coherencia posible en aspectos de metrología. Las autoridades del SIM llevaron a cabo, en 1999, un ejercicio de planeación estratégica. Uno de los aspectos analizados consistió en determinar las áreas para las acciones a nivel regional y a nivel de laboratorios nacionales de metrología. Estas áreas resultaron ser: longitud, masa, temperatura, tiempo y frecuencia, electricidad y magnetismo, fotometría y radiometría, acústica y vibración, radiación ionizante, química.

LONGITUD

Qué se mide

Intuitivamente todos conocemos lo que es longitud o largo. En la práctica, lo que realmente medimos es la distancia o separación entre dos puntos y considerando que la definición de patrones actualmente se orienta al empleo de constantes universales, es importante estar conscientes de que la longitud implica distancia.

Se estima que un 80% de las mediciones hechas en la industria tienen que ver con desplazamiento y por lo tanto con longitud. En el año de 1800, se consideraba adecuada una exactitud de 0,25 mm para las mediciones de longitud, hoy se habla⁽¹³⁾ de intervalos para los requerimientos que van del campo de la nanotecnología hasta el campo de la geofísica.

Definición internacional de la unidad de medida de longitud

Historia

Originalmente, el metro se definió como la diez-millonésima parte de la longitud de un cuadrante del

meridiano terrestre e inicialmente se determinó midiendo un arco de meridiano entre Dunkerque en Francia y Barcelona en España, ciudades ambas a nivel del mar; sobre esta base se construyó en 1799 el llamado *mètre des Archives*, primera materialización del metro. Posteriormente al establecimiento del internacional “Tratado del Metro” en 1875, una copia de este prototipo se constituyó en 1889 como el metro prototipo internacional. Este metro prototipo, una barra de iridio-platino que aún se conserva en París, se consideraba estable y preciso, al igual que sus copias, y se utilizó hasta 1960, fecha en la cual fue reemplazado por una definición basada en la longitud de onda de cierta línea espectral naranja de la luz emitida por el isótopo 86 del krypton. En la 17ª Conferencia General de Pesas y Medidas de 1983 se modificó a la definición actual, la cual está relacionada con la velocidad de la luz en el vacío (299 792 458 metros por segundo).

Definición

La unidad de longitud es el **metro** (símbolo **m**) que se define como la longitud de la trayectoria recorrida por la luz en el vacío durante un intervalo de tiempo de $1/299\,792\,458$ de *segundo*.

Patrones

Para hacer prácticas las mediciones de longitud, se requiere una transferencia de un patrón expresado en términos de la velocidad de la luz hacia un patrón o artefacto físico.

Para medir longitudes del orden del metro se emplean métodos interferométricos. El método consiste en comparar la longitud a ser medida con la longitud de onda λ de una radiación luminosa cuya frecuencia f ha sido previamente determinada con gran exactitud. La referencia utilizada es la longitud de onda de la radiación producida por un láser, estabilizado ya sea en frecuencia o en longitud de onda⁽⁴³⁾.

Por ejemplo⁽⁴³⁾, con un láser de helio-neón estabilizado con cámara de metano, se miden longitudes de onda de 3 392,231 397 327 nm con incertidumbre relativa de 3×10^{-12} mientras que con un láser de argón estabilizado con cámara de yodo se miden longitudes de onda de 514,673 466 4 nm con una incertidumbre relativa del orden de $2,5 \times 10^{-10}$.

En la actualidad, existen modelos portátiles de láser estabilizados, los cuales le han permitido al

BIPM hacer comparaciones y calibraciones in situ en una región sin requerir que varios laboratorios nacionales de metrología se vean obligados a llevar sus aparatos a París para su calibración⁽¹⁹⁾. Con estas calibraciones a base de láser, los países pueden contar con sus patrones nacionales.

De estos patrones nacionales se derivarán de acuerdo a la cadena que ya vimos, los patrones de calibración y los patrones de ensayo y de trabajo tales como cintas métricas, reglas y otros. Asimismo, de éstos se originan todos los artefactos empleados en la vida diaria para medir la longitud

En adición a los métodos basados en fuentes luminosas, también se utilizan bloques patrón de medida. Se trata de bloques metálicos o cerámicos, altamente pulidos, cuyas extremidades tienen un paralelismo de alta calidad, y que se pueden combinar en la cantidad necesaria para obtener la longitud deseada con una exactitud adecuada a los fines, ya sea que se trate de bloques de calibración o de trabajo.

Los bloques patrón calibrados por interferometría pueden constituir la materialización del patrón y de

ellos, por comparación mecánica, se derivan patrones secundarios.

Incertidumbres

Como mencionamos anteriormente, en los patrones, utilizando los láser estabilizados se pueden obtener incertidumbres relativas de medición de longitud del orden de 10^{-9} y 10^{-12} .

Equipos de medición

Longitud, anchura, altura, espesor, diámetro, son todas medidas lineales y se han desarrollado numerosos instrumentos para poder medirlas en forma simple y con la exactitud requerida en cada caso.

Así tenemos, entre otros: reglas (de madera, metal o plástico, rígidas o plegables), cintas métricas (de metal, plástico o tela), calibradores (de alta precisión, para tuercas y tornillos, para engranajes), micrómetros, nonios o verniers, bloques patrón, medidores de ángulos, divisores (también conocidos como compases de puntas o bigoteras), medidores de diámetro interior o exterior, medidores de redondez o de planos, rugosímetros, etc.

Metrología para no-metrólogos

Estos instrumentos pueden basarse en métodos mecánicos, neumáticos, ópticos o electrónicos. Según el tipo de instrumento y el uso al que esté destinado, se establecen en cada caso tolerancias de exactitud.

MASA

Qué se mide

La masa de un cuerpo se manifiesta de dos maneras; una es en el cambio de estado de movimiento (inercia) y la otra es en la atracción entre los cuerpos.

Supongamos un túnel al vacío, con un plano que sirva de pista, con la cara superior perfectamente lubricada de forma que, al colocar un objeto sobre esa superficie y al desplazarlo, no exista fricción entre la superficie y el objeto. Entonces, si el objeto está en reposo y lo ponemos en movimiento, el esfuerzo necesario para moverlo sería una manifestación de la masa del objeto.

En el mismo túnel y en las mismas condiciones, si retiramos la pista, el objeto cae atraído por el planeta Tierra y ésta sería la otra manifestación de la masa del objeto.

En ambos casos, tanto la medida del esfuerzo para mover el objeto como la medida de la caída serían la medida de la masa del objeto.

Dicho de otra forma, la masa es la cantidad de materia contenida en un volumen determinado mientras que el peso es el resultado de la atracción de la Tierra sobre esa masa.

Definición internacional de la unidad de masa

Historia

La unidad de masa, el kilogramo, se definió originalmente como la masa de un litro de agua a 4°C. Se modificó esta definición en vista de las dificultades prácticas de obtener agua pura y por el hecho de que la definición involucraba otra magnitud, a saber la temperatura.

Podría argumentarse que el kilogramo es un múltiplo del gramo y que por lo tanto es éste el que debe constituir la unidad. En efecto esto ha sido analizado por los metrologos pero por razones prácticas se acordó seguir considerando el kilogramo como la unidad de masa.

Como, con los actuales conocimiento científicos, no se ha podido definir aún la unidad de masa en función de las constantes universales, actualmente se define ésta con base en un artefacto o prototipo,

por acuerdo de las 1ª y 3ª Conferencia General de Pesas y Medidas, de 1889 y 1901 respectivamente. Sin embargo, la 21ª Conferencia General de Pesas y Medidas, en octubre de 1999⁽¹³⁾, acordó “recomendar que los laboratorios nacionales continúen sus esfuerzos para refinar experimentos que vinculen la unidad de masa a constantes fundamentales o atómicas con miras a una futura redefinición del kilogramo.”

Definición

El **kilogramo** (símbolo **kg**) es la unidad de masa; es igual a la masa del prototipo internacional del kilogramo.

Patrones

El prototipo internacional es un cilindro de treintinueve milímetros de altura y treintinueve milímetros de diámetro, hecho de una aleación con noventa por ciento de platino y diez por ciento de iridio. Tiene una densidad aproximada de veintiún gramos y medio por centímetro cúbico. Se considera como el único patrón primario de masa. El prototipo original – *kilogramme des Archives*, fabricado en la misma

época que el *mètre des Archives*, se considera patrón histórico.

En 1889, de una misma colada, se prepararon: el kilogramo internacional, cuatro testigos y patrones nacionales (originalmente 40 de ellos para llenar las necesidades de los países signatarios de la Convención del Metro). Estos, y los fabricados subsecuentemente por el BIPM, son a veces conocidos como “kilogramo N°x”, donde “x” es el número de identificación de uno de esos patrones.

Debido a que la definición y construcción de la unidad se basan en un artefacto, la unidad nunca podrá ser transferida con mayor exactitud que la que permita la comparación de masas con el prototipo internacional de masa.

Considerando las limitaciones de las comparaciones, se ha estructurado una jerarquía de patrones, con las siguientes características obligadas, que se expone a continuación:

PROTOTIPO INTERNACIONAL DEL KILOGRAMO

Material: Platino-Iridio; Densidad: $21,5 \text{ g cm}^{-3}$

PATRONES DE REFERENCIA DEL BIPM

Material: Platino-Iridio.

PROTOTIPOS NACIONALES

Material: Platino-Iridio.

PATRONES PRIMARIOS NACIONALES

Material: Acero (Latón)

Densidad: $8,0 \text{ g cm}^{-3}$ ($8,4 \text{ g cm}^{-3}$)

PATRONES SECUNDARIOS NACIONALES

Material: Acero (Latón)

PATRONES DE REFERENCIA

PATRONES DE TRABAJO

Exactitud

El patrón actual del kilogramo permite medir la masa con una exactitud de 1 en 10^8 .

La finalidad de disponer de patrones es medir con exactitud la masa de los cuerpos; por ello es necesario disponer de múltiplos y submúltiplos del kilogramo con los cuales se puedan determinar exactamente las masas deseadas.

Los conjuntos de múltiplos y submúltiplos del kilogramo también deben ser representados como

patrones conectados con uno o más kilogramo-patrón. Para considerar los múltiplos y submúltiplos en función de su variabilidad, se agrupan en décadas que contengan por lo menos 4 patrones; la representación más usual es 1 2 2 5, así la masa de un kilogramo $m_{1\text{kg}}$ puede ser representada por:

$$m_{100} + m_{200} + m_{200} + m_{500}$$

donde:

m_{100} = masa del patrón de 100 gramos.

m_{200} = masa del patrón de 200 gramos (Nº 1).

m_{200} = masa del patrón de 200 gramos (Nº 2).

m_{500} = masa del patrón de 500 gramos.

Es claro que una balanza analítica de laboratorio no requiere del mismo grado de exactitud que una balanza controladora de vehículos de carga. La exactitud de los patrones de masa puede definirse conforme a las categorías E_i , F_i , M_i con valores que van usualmente de un miligramo a 50 kilogramos. A las masas con alta exactitud les corresponde la categoría E_i , a las masas de exactitud fina les corresponde la categoría F_i y a las de exactitud media les corresponde la categoría M_i .

Al estudiar la exactitud de $m_{1\text{kg}}$ la primera composición para estimar la variabilidad es la siguiente:

$$m_{1\text{kg}} - (m_{100} + m_{200} + m_{200} + m_{500}) = x$$

donde $m_{1\text{kg}}$ es el patrón de la masa de un kilogramo y el valor de x podría pertenecer a cualquiera de las categorías E, F o M.

En la recomendación OIML R111⁽⁴¹⁾ pueden encontrarse los diferentes límites de tolerancia para la exactitud de distintas masas patrón en las categorías E_i , F_i y M_i . La calidad de la medición está caracterizada por la incertidumbre de la misma.

Equipos de medición

La balanza es el instrumento más antiguamente conocido que se utiliza para medir la masa. Mientras no se cambie la definición del kilogramo sólo podemos comparar masa y no podremos medirla en forma directa. La técnica contemporánea permite la construcción de innumerables tipos y capacidades del artefacto, adecuados para los usos específicos que se desee, ya sea en laboratorios, industrias, comercios, agencias estatales, etc. Los requerimientos básicos de las

balanzas son que sean estables, exactas, sensibles y que puedan ser calibradas.

En metrología de masa de alta exactitud, se determina la masa en balanzas llamadas comparadoras. La balanza comparadora para un patrón nacional debe ser de intervalo limitado y con buena sensibilidad (por ejemplo, de un microgramo). Antes se hablaba de balanzas simples, de brazos iguales o desiguales, con o sin peso deslizante, las de combinación incluyendo las básculas, las romanas y las automáticas con múltiples posiciones de equilibrio; actualmente se emplean también celdas de carga que envían señales eléctricas para determinar el peso. En vista de todas las posibles combinaciones que se dan, la tendencia actual es a hablar de *instrumentos para pesar* sin entrar en distinciones entre, por ejemplo, balanzas y básculas.

TEMPERATURA

Qué se mide

En el caso de las mediciones de la característica llamada temperatura, lo que buscamos es un indicador del *calor* de un cuerpo dado. Pero calor no es lo mismo que temperatura. Podríamos definir *calor* como una forma de energía asociada con y proporcional al movimiento molecular. Lo que conocemos por *temperatura* es realmente el valor de la lectura de un aparato medidor como por ejemplo un termómetro; por ello decimos que la manifestación del calor es la temperatura.

Definición internacional de la unidad de medida de temperatura

Historia

La definición de la unidad de medida de temperatura tiene una larga y compleja historia. Ya en 1742 Anders Celsius propuso una escala centígrada de temperatura basada en el agua con el cero en el punto de congelación y un valor de 100 en el punto de ebullición. El BIPM⁽¹⁹⁾ recoge el historial a partir de la escala normal de hidrógeno de 1878 hasta la actual escala

internacional de temperatura (EIT-90 o ITS-90) de 1990. Sin embargo, es interesante notar que transcurrió un siglo hasta que, en 1954, la 10ª CGPM (Conferencia General de Pesas y Medidas) adoptó la propuesta hecha en 1854 por William Thomson Kelvin de definir la unidad de temperatura termodinámica (actualmente nombrada en su honor) en términos del intervalo entre el cero absoluto y un único punto fijo. La definición actual fue aprobada por la 13ª Conferencia General de Pesas y Medidas, en 1967.

Definición

La unidad base de temperatura termodinámica es el **kelvin** (símbolo **K**) que se define como la fracción $1/273,16$ de la temperatura termodinámica del punto triple del agua.

El llamado *punto triple del agua* es el punto donde es posible el equilibrio o coexistencia de la sustancia - agua en este caso - en sus estados sólido, líquido y gaseoso.

Al hablar de escalas de temperatura, es común encontrar referencias a la *temperatura termo-*

dinámica, objeto de la definición internacional y, además, a la *escala práctica de temperatura*.

La escala práctica o de Celsius, antes conocida como de grados centígrados, es la más utilizada. Su punto cero es la temperatura de congelación del agua y al punto de ebullición del agua se le define como 100°C , ambos medidos bajo determinadas condiciones. Por debajo del cero de esta escala, las temperaturas tienen valor negativo; por ello decimos comúnmente que en un invierno crudo, las temperaturas pueden bajar a menos cuarenta grados (grados Celsius).

Por su parte, la escala de temperatura termodinámica, que por definición se expresa en kelvin, tiene su punto cero en el llamado *cero absoluto* y equivale a $-273,16^{\circ}\text{C}$. Esta escala no tiene por lo tanto valores negativos y los intervalos son los mismos que los de la escala Celsius.

Los termometristas expresan generalmente las temperaturas menores de 0°C en kelvin y las mayores de 0°C en grados Celsius. A menudo, hacen también la salvedad de que el punto de congelación del agua a presión atmosférica normal, 0°C , ocurre realmente a $273,15\text{ K}$ mientras que el punto triple del agua ocurre a $273,16\text{ K}$, equivalente a $0,01^{\circ}\text{C}$.

Patrones

La materialización de la escala internacional de temperatura EIT-90, constituye el patrón para la unidad de temperatura. Su propósito es especificar procedimientos y termómetros prácticos internacionalmente acordados, que permitan a los laboratorios nacionales materializar la escala y determinar valores altamente reproducibles.

Esta materialización se logra por medio de una serie de celdas selladas, que contienen una sustancia pura, en condiciones tales que pongan a la sustancia en cierto estado al que corresponde una temperatura dada, que representa un punto fijo de definición. Estos puntos fijos de definición se seleccionaron originalmente para que la escala se conformara lo más posible a la escala termodinámica.

Los datos correspondientes están recogidos en el documento legal conocido como EIT-90. La 21^a Conferencia General de Pesas y Medidas, en octubre de 1999⁽¹⁴⁾, encargó al comité internacional correspondiente los trabajos que sirvan de base para extender la EIT-90 por debajo de su actual límite inferior de 0,65 K.

Los puntos fijos de definición de la escala EIT-90 son varios y a título indicativo se dan algunos de ellos en la tabla 3.

TABLA 3

Puntos fijos de definición de la escala EIT-90

Temperatura		Substancia	Estado
T₉₀/K	t₉₀/°C		
de 3 a 5	de - 270,15 a - 268,15	He - Helio	Presión de vapor saturado
83,805 8	- 189,344 2	Ar - Argón	Punto triple
234,315 6	- 38,834 4	Hg - Mercurio	Punto triple
273,16	0,01	H ₂ O - Agua	Punto triple
302,914 6	29,764 6	Ga - Galio	Punto de fusión
429,748 5	156,598 5	In - Indio	Punto de solidificación
505,078	231,928	Sn - Estaño	Punto de solidificación
692,677	419,527	Zn - Cinc	Punto de solidificación
933,473	660,323	Al - Aluminio	Punto de solidificación
1 234,93	961,78	Ag - Plata	Punto de solidificación
1 337,33	1 064,18	Au - Oro	Punto de solidificación
1 357,77	1 084,62	Cu - Cobre	Punto de solidificación

Incertidumbres

Las celdas selladas permiten calibrar instrumentos de medición de temperatura con una incertidumbre relativa del orden de 10^{-6} .

Equipos de medición

El primer termómetro de que se tiene referencia fue el construido por el científico italiano Galileo Galilei alrededor del año 1593. Hoy en día, se cuenta con diversos tipos de sensores para medir temperaturas, todos los cuales infieren la temperatura por medio de algún cambio en una característica física⁽⁴²⁾.

Los de empleo más común son: artefactos de cambio de estado, artefactos de expansión de fluido, termocuplas o termopares, artefactos de resistencia y termistores, sensores ópticos e infrarrojos, artefactos bimetálicos.

Los llamados *artefactos de cambio de estado* se refieren a etiquetas, crayones, lacas o pinturas, cristales líquidos, gránulos o conos, que cambian de apariencia al alcanzar determinada temperatura. Usualmente se emplean para temperaturas entre

38 °C y 1 780 °C. El cambio de apariencia es permanente por lo que no pueden usarse repetidamente, el tiempo de respuesta es relativamente lento y la exactitud no es alta pero son útiles en aplicaciones industriales como por ejemplo en soldadura o en hornos de cocción de cerámica.

El termómetro casero es el representante mejor conocido de los *artefactos de expansión de fluido*. Los termómetros pueden ser de mercurio, de un líquido orgánico como el alcohol y también existen versiones que emplean algún gas. Los hay que trabajan bajo inmersión parcial, total o completa. Se pueden utilizar repetidamente, no requieren fuentes de corriente pero los datos que proporcionan no pueden ser directamente registrados y/o transmitidos.

Las *termocuplas o termopares*, contruidos de dos piezas de diferentes metales unidas en un extremo y con un voltímetro acoplado, son exactos, robustos, confiables y de costo relativamente bajo. Su intervalo de medición depende de los metales empleados y usualmente está entre - 270 °C y 2 300 °C.

Los *artefactos de resistencia* (conocidos como RTDs en inglés) se basan en el principio de que al cambiar la temperatura cambia la resistencia

eléctrica. En el caso de metales ésta aumenta; en los *termistores* en cambio, la resistencia eléctrica del semiconductor cerámico disminuye al aumentar la temperatura. Son estables pero tienen el inconveniente de que, puesto que trabajan a base del paso de una corriente por un sensor, se crea una cierta cantidad de calor lo cual puede afectar su exactitud. Los RTDs trabajan a temperaturas en torno de los -250°C a 850°C y los termistores entre -40°C y 150°C .

Los *sensores o pirómetros ópticos* se basan en que la luz emitida por un objeto caliente está relacionada con su temperatura; trabajan entre 700°C y $4\,200^{\circ}\text{C}$. Por su parte, los *sensores o pirómetros infrarrojos* miden la cantidad de radiación emitida por una superficie; son apropiados para temperaturas del orden de los $3\,000^{\circ}\text{C}$. Aunque su precio es mayor, ambos tienen la ventaja de que no requieren contacto directo con la superficie cuya temperatura va a ser medida.

En los *artefactos bimetalicos* se hace uso de la diferente expansión térmica de diferentes metales. Se unen dos piezas de diferentes metales; al calentarse, una pieza se expande más que la otra cuando se exponen al mismo cambio de

temperatura y el movimiento provocado se transmite a un indicador en una escala de temperatura. Tienen la ventaja de ser portátiles y de no requerir fuente de potencia

Otros medidores de temperatura empleados en metrología son el termómetro estándar de resistencia de platino (standard platinum resistance thermometer SPRT), los termómetros de gas a volumen constante (CVGT), los termómetros de radiación.⁽⁵⁵⁾

De acuerdo al tipo de medidor de temperatura, al uso que se le dará y al intervalo de temperaturas que abarca, se establecen las especificaciones y tolerancias. Por ejemplo a nivel industrial, entre 0 °C y 100 °C, se considera que se requiere una exactitud de 1 °C, mientras que, arriba de 100 °C, la exactitud requerida cambia a 5 °C⁽⁶⁾.

TIEMPO Y FRECUENCIA

Qué se mide

El tiempo es un concepto que ha interesado a los físicos y a los filósofos desde la antigüedad. Aristóteles y Newton, entre muchos otros, buscaron definir el tiempo⁽⁴⁴⁾ y más recientemente Hawking⁽¹⁷⁾ habla, en sentido matemático, tanto de tiempo real como de tiempo imaginario.

Para fines prácticos, el tiempo es un concepto relacionado con el orden y la duración de los eventos; si dos eventos ocurren en forma no simultánea en un punto dado, ocurren en un orden definido y con un lapso entre ellos⁽⁹⁾. Para el hombre primitivo, el primer indicador del transcurrir del tiempo debe haber sido el ciclo diario de día y noche con los movimientos visibles de los astros. Podemos razonablemente suponer que, por observaciones, se concibieron posteriormente las duraciones mayores indicadas por las fases lunares y por las estaciones.

Historia

Inicialmente, los intervalos de tiempo se midieron en base a la posición de los astros. Un primer artefacto

debe haber sido el *reloj de sol*, basado en la observación de que la sombra cambia de longitud en el transcurso del día, consistente en una varilla (llamada estilo o gnomon) paralela al eje de la tierra, que proyecta su sombra sobre un cuadrante. Se cree que data de 579 aC y se atribuye a Anaximandro o a Tales de Mileto. Para medir el tiempo durante la noche, en interiores o en días sin sol, se usaron *relojes de fuego* que se basaban en la tardanza de combustión de cuerdas con nudos, de candelas marcadas o de cierta cantidad de aceite. Luego, aparecieron los *relojes de agua*, del cual se conoce un modelo antiquísimo, elaborado en China, provisto de un flotador, pero cuyo mejor representante es la *clepsidra*, perfeccionada en Grecia. Este instrumento fue empleado por asirios, egipcios, griegos y romanos y se siguió utilizando hasta el Renacimiento. Se basa en la supuesta regularidad de la salida de agua por un orificio y los mejores modelos empleaban diámetros variables a diferentes niveles. La clepsidra dió a su vez origen al conocido *reloj de arena*.

Se cree que los *relojes mecánicos* se originaron en China; aparecieron en Europa alrededor del Siglo XIII. El primer reloj movido exclusivamente por pesa y del cual existe una descripción, fue

construido en 1364 por Henri de Vick, relojero alemán, por encargo de Carlos V de Francia. El *reloj de péndulo* se debe a Huygens, en 1657; él desarrolló también los mecanismos que iban a hacer posibles los *relojes de bolsillo*. Por su lado, Pedro Henlein, cerrajero de Nuremberg, desarrolló el mecanismo de espiral o muelle real y a partir del siglo XVII los mecanismos eran esencialmente de muelle y volante. Los relojes tenían a menudo sistemas adicionales de campana, de carrillón o de “cuco”. Todos estos dieron origen a una importante industria y a verdaderas obras de arte.

En 1855, E.D. Johnson construyó el *cronómetro*. Aunque ya desde 1780 Luis Recordon había desarrollado la cuerda automática para relojes de bolsillo, no fue sino hasta en 1924 que John Harwood la aplicó a relojes de pulsera. Ya en el siglo XX, se volvieron comunes los *relojes eléctricos* y los relojes despertadores, aunque la verdadera generalización en el uso de los relojes se dió con la puesta en el mercado de los relojes de funcionamiento a pilas, inicialmente conocidos como *relojes digitales* aunque también los hay analógicos. Actualmente se fabrican *relojes de cuarzo*, que son muy exactos.

Los *relojes atómicos*, empleados en ciencia - y en metrología - son los que permiten el alto grado de exactitud de medición del tiempo que se puede obtener hoy en día. Son estables ya que las frecuencias originadas son muy poco afectadas por factores tales como temperatura, presión o humedad.

Definición internacional de las unidades de medida de tiempo [13ª Conferencia General de Pesas y Medidas, 1967], y de frecuencia

Anteriormente, la definición se refería al segundo que podríamos llamar *astronómico*, en cambio en la actualidad se trata del segundo *atómico*.

El **segundo** (símbolo **s**) es la duración de 9 192 631 770 períodos de la radiación correspondiente a la transición entre los dos niveles hiperfinos del estado base del átomo de cesio 133.

donde 9 192 631 770 es la frecuencia de la energía involucrada en dicha transición del cesio; el estado base se considera ser aquél en el cual los electrones se encuentran en su menor nivel de energía; los

niveles hiperfinos representan el incremento energético más pequeño que pueden experimentar en este estado⁽⁶⁾.

De esta unidad, se deriva la unidad de frecuencia, el hertz.

El **hertz** (símbolo **Hz**) es la frecuencia de un fenómeno periódico, con período de un *segundo*.

La **hora** (símbolo **h**) y el **minuto** (símbolo **min**), no son múltiplos decimales del segundo y por lo tanto no son unidades del SI. Sin embargo, su uso es tan generalizado que se consideran como unidades aceptadas para uso con el SI (ver tabla 3). En ciertos casos, también es necesario expresar intervalos de tiempo mayores tales como semana, mes, y año.

Patrones

La realización de la definición de *segundo* se hace por medio de un reloj atómico de cesio. Se basa en que los átomos, bajo diversas excitaciones, emiten

radiaciones monocromáticas y por lo tanto pueden generar un período (duración de una oscilación) definido con mucha exactitud.

Se consideran patrones secundarios aquellos que emplean otras fuentes de frecuencia, tales como maser de hidrógeno, patrones de rubidio, patrones comerciales de cesio, etc., que son suficientemente exactos para la mayor parte de aplicaciones.

No es suficiente tener capacidad de medir con exactitud intervalos de tiempo, se requiere una escala a nivel mundial, que permita hacer comparaciones y relaciones precisas; los horarios de transporte aéreo son un claro ejemplo de la importancia de esta sincronización.

Para ello, es necesario el mantenimiento permanente de una misma escala continua de tiempo como un elemento para la aplicación de la realización del patrón.

Reloj atómico de cesio⁽⁴³⁾

La energía interna de un átomo (electrones+núcleo) asume valores que corresponden a los diversos estados cuánticos del átomo.

Este último tiene la posibilidad de efectuar una transición entre un nivel de energía E_A y otro nivel de energía E_B , emitiendo o absorbiendo una radiación. La frecuencia ν de la radiación es determinada por la relación:

$$h.\nu = | E_B - E_A |$$

donde h designa a la constante de Planck.

La transición adoptada para definir el segundo fue escogida no solamente en virtud de sus cualidades propias (monocromatismo de la radiación lo cual implica una frecuencia bien definida, con pequeña sensibilidad a las perturbaciones externas), sino también por motivos de orden técnico (entre otros, frecuencia de transición situada en un dominio de frecuencias accesibles a los instrumentos electrónicos existentes, comodidad en el empleo del cesio para la obtención de un haz atómico y para la detección por ionización).

El reloj de cesio emplea un oscilador de cuarzo muy preciso, cuya frecuencia se verifica generando una radiación electromagnética con la cual se ilumina una nube de átomos de cesio. Si la frecuencia de la radiación es precisamente 9 192 631 770 ciclos por segundo, los átomos de cesio se polarizan y pueden ser detectados por un campo magnético. Si la frecuencia se desvía ligeramente, disminuye el número de átomos polarizados lo que genera una señal de corrección para mantener la frecuencia del oscilador en su valor nominal.

Escalas de Tiempo

La escala TAI, Tiempo Atómico Internacional, es calculada en el BIPM. En 1999 se basó en alrededor de doscientos relojes atómicos en cerca de cincuenta laboratorios nacionales de metrología. Para mantener la escala lo más cercano posible al segundo como lo define el SI, se usan datos de aquellos laboratorios nacionales que mantienen los mejores patrones primarios de cesio.

TAI es una escala uniforme y estable, por lo tanto no toma en consideración la ligera irregularidad de la rotación de la Tierra; sin embargo, se requiere este tipo de escala para fines prácticos. Para ello, existe la escala UTC, Tiempo Universal Coordinado, que es idéntica a la TAI excepto que, según es necesario, se le agrega un segundo para asegurar que, promediado a lo largo de un año, el Sol cruza el meridiano de Greenwich a mediodía de la hora UTC con 0,9 segundo de aproximación. Cuando no son importantes fracciones de segundo, el conocido “tiempo promedio o tiempo del meridiano de Greenwich” (Greenwich Mean Time, GMT) es prácticamente equivalente al UTC. Sin embargo, se recomienda no usar el término GMT sino emplear siempre el término UTC.

La difusión de la escala se hace por diversos medios y puede requerir receptores especiales.

Puede hacerse:

- por acceso telefónico al servicio horario; con una exactitud de hasta 50 ms,

- por difusión de señales horarias codificadas (por ejemplo en onda corta, 3 MHz a 30 MHz, con exactitud de $10\text{ ms}^{(36)}$, en 1350 KHz frecuencia modulada, etc.), con exactitudes de milisegundos,
- con exactitud de 10 ns por recepción de señales de televisión usando GPS (Global Positioning System/ Sistema de Posicionamiento Global basado en satélites artificiales) como intermediario.

Incertidumbres

En la actualidad, los patrones de tiempo se trabajan con incertidumbres relativas del orden de 10^{-14} y hasta, en algunos casos, de 10^{-15} .

Por su parte, se calcula que, en un millón de años de funcionamiento, la escala de tiempo atómico, TAI, difiere de la escala ideal en menos de un segundo.

Más que la exactitud, que puede no ser constante, la característica más importante de una escala UTC (generada en laboratorios nacionales de metrología) es su estabilidad.

Equipos de medición

Las mediciones usuales de tiempo se llevan a cabo por medio de diversos tipos de relojes y cronómetros, de mayor o menor exactitud según las necesidades, calibrados en base a la escala UTC o TAI según el caso. También se emplean contadores de intervalos de tiempo y osciladores de cuarzo.

Por su parte, las mediciones de frecuencia requieren de las más altas exactitudes posibles para aplicaciones tales como las transmisiones de comunicaciones digitales y los sistemas de posicionamiento global (GPS).

ELECTRICIDAD Y MAGNETISMO

Qué se mide

En algunos materiales conocidos como conductores, existen cargas eléctricas libres que se pueden mover, tal el caso de los electrones en los metales y los iones en las soluciones salinas. En estos materiales, en presencia de un campo eléctrico, se produce un flujo estable de carga en la dirección del campo; tal flujo constituye la corriente eléctrica.

En electricidad, se dan tres elementos básicos, relacionados entre sí por la ley de Ohm:

$$E = IR$$

donde E es la tensión eléctrica, comúnmente llamada el voltaje, I es la corriente eléctrica y R es la resistencia. En base a esta ley se pudo haber definido la unidad de electricidad en términos de cualquiera de estos tres elementos. Se decidió definirla en términos de corriente eléctrica, quedando las unidades de tensión eléctrica y de resistencia como unidades derivadas.

La carga eléctrica es una propiedad de la materia que produce efectos eléctricos y magnéticos. En un sistema aislado es constante y aparece en paquetes. La carga aislada más pequeña es la que posee el electrón. La forma simple de poner de manifiesto la carga eléctrica es frotando con una tela de seda dos esferas, por ejemplo de ámbar, suspendidas con un material no conductor: las esferas se repelen manifestando la misma carga. Si las esferas que se frotan son de materiales diferentes, por ejemplo una de ámbar y la otra de vidrio, se atraen manifestando que poseen cargas diferentes⁽¹⁾.

Un símil que permite visualizar el comportamiento de la electricidad y la interrelación de sus características, es el siguiente:

En una tubería que conduce agua caracterizamos el fenómeno por la cantidad de agua que fluye, la presión con que lo hace y las características de la tubería. En electricidad la presión equivale a la tensión eléctrica expresada en volts (V); la cantidad de agua a la corriente eléctrica en amperes (A) y la fricción característica de la tubería a la resistencia eléctrica en ohms (Ω).

Historia

Hace cerca de 2600 años que Tales de Mileto hiciera notar que al frotar ámbar con lana o piel, el ámbar atraía pequeños trozos de paja o plumas, Aristóteles, más o menos 250 años después, comentó las descargas de un pez (especie de anguila) que producía golpes (eléctricos). Hace 2100 años, el poeta Lucrecio describió la piedra imán descubierta en la región de Magnesia. En 1600, William Gilbert distinguió claramente los fenómenos eléctricos y los fenómenos magnéticos, 63 años después se contruyó la primera máquina que produjo electricidad por fricción. En el presente, el fenómeno es bien conocido, considerablemente complejo y ampliamente relacionado con la mecánica cuántica. En el Anexo 4 se listan algunos de los científicos que han contribuido a su estudio.

Definición internacional de las unidades de medida de electricidad y magnetismo [9ª Conferencia General de Pesas y Medidas, 1948]

El **ampere** o **amperio** (símbolo **A**) es la intensidad de una corriente eléctrica constante que, mantenida en dos conductores - rectilíneos, paralelos, de longitud infinita, de sección circular despreciable, colocados a un *metro* de distancia entre sí en el vacío -, produciría entre estos conductores una fuerza igual a 2×10^{-7} *newtons* por *metro* de longitud.

Las unidades derivadas principales son el volt y el ohm.

El **volt** o **voltio** (símbolo **V**) es la tensión eléctrica existente entre las terminales de un elemento pasivo de un circuito, que disipa una potencia de un *watt* cuando es recorrido por una corriente invariable de un *ampere*.

El **ohm** u **ohmio** (símbolo Ω) es la resistencia eléctrica de un elemento pasivo de un circuito recorrido por una corriente invariable de un *ampere*, sometido a una tensión eléctrica constante de un *volt* entre sus terminales.

Patrón

Los principios y los artefactos utilizados en un patrón dependen del desarrollo científico y las facilidades técnicas disponibles; para el ampere antes se utilizaban las balanzas de corriente, pero su incertidumbre es considerable. Actualmente se obtienen mejores resultados con el volt y el ohm cuantizados y utilizando la Ley de Ohm.

La realización de la unidad se hace con un sistema que a su vez es patrón. Se usa el efecto Josephson para la unidad de referencia del volt y se trabaja con el efecto de Hall para la resistencia. El trabajo desarrollado en el procedimiento de la realización es complejo y requiere de aparatos y equipo especializados así como de personal altamente calificado.

Incertidumbre

La incertidumbre de medición de la tensión eléctrica (volt) en un arreglo de uniones de Josephson es de unas pocas partes en 10^{10} y para el patrón de la resistencia con el efecto de Hall cuantizado es de unas pocas partes en 10^9 . La gran confiabilidad en el transporte de los sistemas de Josephson y Hall cuantizado permite que los laboratorios nacionales tengan sistemas (patrón) comparables internacionalmente.

Equipos de medición

La técnica actual permite la producción de aparatos analógicos y digitales destinados a medir la corriente eléctrica. Como en todo trabajo científico el uso de ordenadores facilita, acelera y da mayor certidumbre a sus resultados. El trabajo de medición emplea extensamente el procesamiento digital y muchos conocimientos relacionados con la mecánica cuántica, es decir que es trabajo de alta tecnología aunque sus resultados son de uso popular, en aparatos tales como amperímetros, voltímetros y medidores de resistencia. Tenemos que distinguir entre los sistemas de medición de alta resolución/baja incertidumbre - patrones y sistemas de referencia - y los de aplicación práctica.

LUZ (FOTOMETRÍA Y RADIOMETRÍA)

Qué se mide.

Las diversas formas de energía radiante incluyen los rayos cósmicos, los rayos gamma, los rayos X, los rayos ultravioleta, los rayos de la luz visible al hombre, los rayos infrarrojos, las microondas y los rayos eléctricos y de radio (hertzianos).

En el caso de la fotometría estamos primordialmente interesados en el fenómeno conocido como *la luz*, una de las manifestaciones de energía radiante, y que es energía en forma de ondas electromagnéticas, emitida en forma de fotones, y con determinada frecuencia y longitud de onda. Desde el punto de vista de la porción del espectro visible para el hombre, la luz ha sido primariamente para él la luz solar y sus substitutos a lo largo de los siglos: el fuego, la vela, la lámpara de aceite, la de queroseno, la de gas, la de arco, de filamento de carbono, de filamento de tungsteno, de neón, fluorescente, de vapor de mercurio, etc.

Historia

El estudio de la luz se remonta en la historia. Cuatro siglos antes de Cristo, Euclides trabajó en su tratado Óptica aunque no fue sino hasta principios del siglo VII que se identificó el mecanismo de la visión. Otros investigadores han estudiado intensamente el fenómeno: Ibn al-Haitham en el siglo XI, Galileo en 1610, Kepler en 1611 con su tratado *Dioptrics*, Descartes en 1637 al descubrir la ley de refracción. Newton en 1704 con su tratado *Opticks*⁽⁵³⁾. Posteriormente Huygens, Fresnel, Maxwell, Michelson y muchos más han hecho aportaciones a este campo.

Lo que se persigue para fines prácticos en fotometría es poder expresar la impresión visual de un llamado “observador promedio”. Diferentes personas tienen diferente percepción visual y, por ello, la Comisión Internacional de la Iluminación llevó a cabo toda una serie de mediciones en gran cantidad de personas con la finalidad de poder definir de alguna forma ese “observador promedio”. Pero, además, hay que tomar en cuenta que la respuesta visual humana varía al variar la longitud de onda y que el ojo humano es insensible a las radiaciones infrarrojas y a las ultravioleta. Por ello, se trabaja

sobre la base de medir magnitudes físicas, en este caso las características energéticas de la radiación, lo cual es el campo de la radiometría. Por lo tanto, aunque se trata de dos cosas diferentes, están estrechamente relacionadas.

Definición internacional de la unidad de medida de la luz.

Historia

La historia de la unidad y su patrón ha sido accidentada⁽³¹⁾. La candela se definió originalmente en el siglo XVIII, en base a elementos combustibles y presentaba muy baja reproducibilidad. Se le hicieron modificaciones (Carcel 1800, Hefner 1884) pero las condiciones ambientales seguían siendo un factor crítico. En 1880 Violle propuso emplear una pieza de platino a la temperatura correspondiente al punto de transición del estado líquido al estado sólido. Por problemas derivados de los requisitos de pureza del platino, Blondel propuso en 1896 el empleo de un cuerpo negro que mantuviera una temperatura elevada constante y en 1930 Burgess colocó el platino en un crisol de torio dentro de un horno de inducción. Debido a las dificultades de realización de la unidad fotométrica, diversos congresos

modificaron la candela Violle en 1884, 1889, 1909, 1921, 1933, 1937, 1938 y 1954 - fecha ésta en que la candela fue reconocida como la sexta unidad fundamental después del metro, el kilogramo, el segundo, el ampere y el kelvin - hasta llegar a la actual definición aprobada por la 16ª Conferencia General de Pesas y Medidas en 1979.

Definición internacional de las unidades de medida de fotometría y radiometría [16ª Conferencia General de Pesas y Medidas, 1979].

La **candela** (símbolo **cd**) es la intensidad luminosa, en una dirección dada, de una fuente que emite una radiación monocromática de frecuencia 540×10^{12} *hertz* y cuya intensidad radiante en esa dirección es de $1/683$ *watt* por *estereorradián*.

De esta unidad se derivan las siguientes unidades de trabajo:

El **lumen** (símbolo **lm**) es el flujo luminoso emitido por una fuente puntual e invariable de una *candela*, de igual valor en todas las direcciones, al interior de un ángulo sólido de un *estereorradián*.

El **lux** (símbolo **lx**) es la iluminación de una superficie plana de un *metro cuadrado* de área, sobre la cual incide perpendicularmente un flujo luminoso de un *lumen*, distribuido uniformemente.

La **candela por metro cuadrado** (símbolo **cd.m⁻²**) es la luminancia de una fuente de un *metro cuadrado* de área y una intensidad luminosa de una *candela*.

En fotometría se habla de: flujo luminoso (lm), de eficiencia luminosa (lm.W⁻¹), de intensidad luminosa (cd), de luminancia (cd.m⁻²), de iluminación (lx).

En radiometría, las unidades son el flujo energético o flujo radiante o potencia (W), la intensidad energética o intensidad radiante (W.sr⁻¹), la luminancia energética o radiancia (W.m⁻².sr⁻¹), la iluminación energética también conocida como irradiancia o densidad de flujo térmico (W.m⁻²).

Patrones

Actualmente el énfasis en el mantenimiento de los patrones fotométricos y radiométricos se pone no ya

en métodos fotométricos sino en radiometría a base de detectores. El patrón primario en el BIPM se basa en un radiómetro comercial eléctrico de sustitución criogénica, que se considera ser uno de los más exactos disponibles. En adición al radiómetro criogénico, se tienen conjuntos de fotodiodos de silicio que se emplean como patrones de trabajo y de transferencia cuando no se requiere el más alto grado de exactitud. La transferencia a patrones, nacionales y otros, se hace también por medio de lámparas, calibradas por comparación.

Incertidumbres

El patrón de la candela se realiza con una incertidumbre relativa de 3×10^{-3} .

Equipos de medición

En el campo de fotometría y radiación se utilizan radiómetros, fotómetros de absorción, de ennegrecimiento, de polarización, eléctricos, fotoeléctricos; integradores, espectrofotómetros, espectralradiómetros, colorímetros, y medidores de radiación. También radiómetros criogénicos (detector-based radiometers) para patrones.

ACÚSTICA Y VIBRACIÓN

Qué se mide

Con excepción de los sordos de nacimiento, los humanos captan intuitivamente el concepto de sonido. Para todos los animales el sonido es parte importante del entorno. En particular para el hombre, entra en juego tanto para fines de comunicación con otras personas, como para percibir situaciones ya sea naturales (sonidos de la naturaleza circundante) o debidas a la propia acción del hombre (por ejemplo: escuchar música, el ruido de máquinas en funcionamiento, timbres y sirenas de advertencia, etc.).

El sonido puede definirse como una alteración mecánica, tal como un cambio de densidad, de desplazamiento o de velocidad de partículas, propagado en un medio elástico (p.e. aire o agua). Por medio elástico entendemos aquel que tiene la capacidad de recuperar su tamaño y forma originales cuando cesa la alteración que provocó una tensión, torsión, corte o compresión.

En base a esta definición, podemos a la vez definir un *campo de sonido* como un medio elástico donde

se produce y propaga una alteración mecánica, tal como un cambio de densidad, de desplazamiento o de velocidad de partículas.

En acústica se estudian y se miden las propiedades básicas del sonido:

- intensidad, determinada por la amplitud de onda
- tono, determinado por la frecuencia o número de las vibraciones
- timbre, determinado por las vibraciones adicionales (sonidos armónicos) que acompañan a la vibración fundamental

El humano normal no puede escuchar sonidos de frecuencia menor a 16 Hz (sonidos infrasónicos), ni mayor de 20 kHz (sonidos ultrasónicos o supersónicos).

Las mediciones cuantitativas del sonido se iniciaron realmente en el siglo XIX y no es sino hasta en el siglo XX, particularmente en los últimos 20 a 30 años, que se han estudiado los riesgos de daños al sistema auditivo humano y la incomodidad debida al ruido⁽²⁹⁾. Recientemente, en 1999, la CIPM creó el Comité Consultivo sobre Acústica, Ultrasonido y Vibración.

La Organización Internacional de Normalización, ISO, tiene establecidas varias normas en el campo estrictamente de acústica que incluyen aspectos tales como: frecuencia estándar para afinado, métodos para calcular nivel de intensidad, magnitudes de referencia para niveles acústicos, etc.; y una cantidad aún mayor de normas en campos relacionados. Por su parte, la Comisión Internacional Electrotécnica, IEC, se ha venido ocupando de normalizar aspectos relacionados con micrófonos y su calibración, medidores de nivel de sonido, determinación de niveles de potencia de sonido, simuladores del oído humano, etc.

Para fines de metrología, las mediciones más comunes en acústica son: la magnitud de un campo de sonido y la potencia de una fuente de sonido.

En la práctica⁽²⁹⁾, para medir la magnitud de un campo de sonido, la *presión de sonido* es la magnitud más fácil de transformar de una forma de energía (alteración de partículas en el medio elástico) a otra equivalente (p.e. pascal [Pa], equivalente a newtons por metro cuadrado, N/m²) y es la que usualmente se mide.

A su vez, una fuente de sonido se caracteriza por su potencia.

Tanto la presión de sonido como la potencia de una fuente de sonido se miden en decibeles relativos respectivamente a $20 \mu\text{Pa}$ y 1 pW .

Definición de unidades de medida de acústica y vibración

Estamos familiarizados con los watts en relación con la iluminación – sabemos que una bombilla de 100 W nos permite leer con comodidad mientras que una de 25 W nos da una iluminación muy tenue. En el caso de la luz, esta relación se percibe en forma aritmética.

En comparación, la sensibilidad a los sonidos es diferente. Los sonidos ordinarios de una conversación están alrededor de 1 mW , que podemos expresar como $1000 \text{ microwatts } (\mu\text{W})$ y los sonidos leves caen a fracciones de 1 mW .

El oído detecta las diferencias de intensidad en forma logarítmica. Así, por ejemplo, si $2000 \mu\text{W}$ “suenan” cierta cantidad mayor que $1000 \mu\text{W}$, se requieren $4000 \mu\text{W}$ y no 3000 para percibir la misma

magnitud de incremento y, a su vez, $8000 \mu\text{W}$ para percibir ese mismo incremento a partir de $4000 \mu\text{W}$. Las razones $2000/1000$, $4000/2000$, $8000/4000$, son las mismas aunque no lo sean las diferencias de los valores; el logaritmo de las diferencias es el mismo.

Cuando un sonido tiene 10 veces la potencia de un segundo sonido, la razón es de 10, cuyo logaritmo es 1. En este caso se dice que la diferencia en intensidad de sonido es un *bel* (llamado así en honor a Alexander Graham Bell). Similarmente, si un sonido es 100 veces más fuerte que otro, es 2 bels más fuerte; si es 1000 veces más fuerte, es 3 bels más fuerte. Este tipo de unidad refleja la forma logarítmica en que trabaja el oído.

El bel resulta un valor muy grande para las necesidades usuales de medición y por ello se emplea el *decibel*. Así, un sonido será un decibel más fuerte que otro cuando sea 1,26 veces más fuerte ya que 0,1 es prácticamente el logaritmo en base 10 de 1,26.

Esta unidad derivada adimensional “uno” se ha venido empleando para expresar valores de magnitudes logarítmicas tales como decremento logarítmico, nivel de campo o nivel de potencia en áreas tales como acústica y electrotecnia. Se usa

el nombre **bel** (símbolo **B**) y su comúnmente empleado submúltiplo el **decibel** (símbolo **dB**) cuando se emplean *logaritmos de base diez*; asimismo se habla del **neper** (símbolo **Np**) cuando se emplean *logaritmos naturales o neperianos*. La aceptación de estas unidades sigue bajo estudio por la CGPM.

Patrones

La magnitud básica para todas las mediciones en acústica es la presión de sonido. No existe una forma práctica para tener una fuente de referencia que genere una presión de sonido de un Pascal y se sigue trabajando con el fin de encontrar un método para generar o medir un campo de sonido de forma que pueda emplearse como un patrón de referencia. Por ello, hasta ahora, la exactitud de las mediciones depende del uso de micrófonos calibrados con exactitud.

Para fines de medición, la señal acústica se convierte a una señal eléctrica empleando un micrófono condensador o electrostático. En este tipo de micrófono, el diafragma actúa como una de las placas del capacitor y la vibración produce cambios en la capacitancia que a su vez producen cambios de voltaje.

La Comisión Electrotécnica Internacional, IEC, tiene establecidas especificaciones para micrófonos de referencia, a nivel de laboratorio y a nivel de trabajo de campo.

La calibración se hace empleando calibradores de sonido con una fuente generadora de referencia. La IEC tiene establecidas especificaciones para la calibración empleando la técnica de reciprocidad⁽²⁹⁾ basada en micrófonos condensadores. Esta técnica fue seleccionada por su nivel de incertidumbre y ha sido aprobada a nivel mundial para la realización del patrón primario de referencia en acústica; se viene refinando por medio de estudios e intercomparaciones a nivel mundial.

Incertidumbres

La diferencia mínima de presión de sonido que puede percibir el humano es de 1 dB (un decibel). Sin embargo, para muchas aplicaciones sobre todo relacionadas con la determinación de ruidos y en particular en el caso de naves aéreas, los requerimientos de certificación demandan mediciones del orden de 0,1 dB y por ello las referencias primarias de medición deben trabajar con una incertidumbre de alrededor de 0,05 dB.

Equipos de medición

En adición a los micrófonos, se emplean otros medidores.

Para determinar la presión en sonidos continuos se usa el medidor de promedio exponencial y los valores se expresan en decibels como un *nivel de presión de sonido*. Para sonidos puntuales se usa el medidor de promedio integrado y el valor obtenido se expresa en decibels como un *nivel continuo equivalente de presión de sonido*.

La intensidad del sonido es una medida de la magnitud y dirección del flujo de la energía sonora. Usualmente se mide por medio de dos micrófonos y el nivel de intensidad sonora se expresa en decibels relativos a 10^{-12} Wm^{-2} . La medición de la intensidad sonora permite determinar la potencia de una fuente sin necesidad de ambientes especializados pero el método aún no es de empleo común.

RADIACIÓN IONIZANTE

Qué se mide

Se entiende por radiaciones ionizantes aquellas radiaciones electromagnéticas de longitud de onda extremadamente corta, altamente penetrantes, y que tienen energía cuando menos del valor de la de los rayos X, de forma que la radiación es suficientemente fuerte para producir iones, quitando o agregando electrones de la materia.

Entre ellas se pueden mencionar: las radiaciones que producen partículas cargadas tales como las radiaciones α , las radiaciones β , y las radiaciones protónicas; las radiaciones que producen partículas no cargadas como las radiaciones γ y los rayos X (ambos liberan fotones) y las radiaciones neutrónicas.

Estas radiaciones pueden tener origen natural o ser producidas artificialmente en aceleradores de partículas tales como ciclotrones, betatrones, sincrotrones o aceleradores lineales.

Historia

Los rayos X fueron descubiertos por Wilhelm Konrad Röntgen en 1895. En 1896, Antoine Henri Becquerel (en cuyo honor se ha nombrado la unidad de desintegración de un material radioactivo) descubrió la radioactividad en una sal de *uranio*. Pierre y Marie Curie mostraron que todas las sales de uranio eran radioactivas así como las de *torio* y descubrieron además los elementos radioactivos *polonio* y *radio*, presentes en el mineral pitchblenda. Las emisiones radioactivas no son homogéneas y fue Ernest Rutherford quien, en 1899, las clasificó de acuerdo a sus cargas y su poder de penetración y les asignó los nombres de radiaciones *alpha*, *beta* y *gama*.

Definición de las unidades de medida de radiación ionizante

El núcleo de un radionuclídeo tiene la probabilidad de transformarse en forma espontánea (ver Anexo 5). La *actividad* se caracteriza por el número promedio de transformaciones por segundo y se mide con base en la unidad llamada *becquerel*.

Otra medición de importancia es la *dosis absorbida*, es decir la cantidad de energía transferida a la materia por unidad de masa, y que puede considerarse la magnitud fundamental en dosimetría.

El SI no tiene unidades básicas para la radiación ionizante pero reconoce al becquerel y al gray como unidades derivadas.

El **becquerel** (símbolo **Bq**) es la actividad de un material radioactivo en el cual se produce una desintegración nuclear por *segundo*.

El **gray** (símbolo **Gy**) es la dosis de radiación ionizante absorbida uniformemente por una porción de materia, a razón de 1 *joule* por *kilogramo* de su masa.

Patrones

En virtud de la variedad de partículas emitidas y de las alteraciones que sufren las fuentes radioactivas, no se ha considerado el establecimiento de un patrón primario único para el *becquerel*.

Metrología para no-metrólogos

Las referencias primarias están conformadas por una combinación de instrumentos y métodos de medición, específicos para cada tipo de nuclídeo radioactivo.

A título indicativo, para las emisiones α , (plutonio 239 y plutonio 240 por ejemplo) se usa un detector de silicio para el conteo en un ángulo sólido definido. Para las emisiones γ (yodo 123 o iridio 192, por ejemplo) se emplea el conteo en un pozo con cristal de yoduro de sodio.

Tampoco se considera un patrón único del *gray* para dosimetría. En este caso, se emplean métodos basados en colorimetría, ionometría (con instrumentos de gran sensibilidad y utilizables para todas las radiaciones), dosimetría de Fricke, termoluminiscencia (adecuada para radioprotección y radioterapia), resonancia paramagnética electrónica (para irradiación industrial).

Incertidumbres

Las incertidumbres de las mediciones, tanto del becquerel como del gray, son del orden de 10^{-2} a 10^{-3} .

Equipos de medición

Al igual que para el establecimiento de patrones, los equipos de medición son detectores, contadores, dosímetros, calibradores de rayos α y γ , cámaras de ionización, calorímetros, cámaras de extrapolación (ionización variable), etc.

QUÍMICA

Qué se mide

Se conoce por estequiometría a la rama de la química y de la ingeniería química que trata de las cantidades de sustancias que entran en las reacciones químicas o que son producidas por éstas. Toda reacción química tiene sus propias proporciones características y éstas se determinan por medio de fórmulas químicas, de ecuaciones, de los pesos atómicos y moleculares y de la determinación de qué y cuánto se utiliza y se produce, es decir de la cantidad de materia que entra en juego. Toda la estequiometría se basa esencialmente en la evaluación del número de moles de sustancia como un indicador preciso de la magnitud de dicha sustancia.

En química, y particularmente en química analítica, la cantidad de materia en una muestra dada es un elemento crucial de información. A su vez, es un factor en otros aspectos tales como concentraciones de soluciones, determinaciones de pH, etc. En la industria química, es indispensable conocer la cantidad de materia empleada en las diversas reacciones y en los productos obtenidos.

Historia

Puede decirse que la química se ha “estudiado” desde la más remota antigüedad. El trabajo de metales (cobre, oro y plata, bronce, hierro), la cerámica, los esmaltes, los pigmentos, etc. involucran en mayor o menor grado procesos químicos que demandan un cierto grado de conocimiento, aunque éste haya sido originalmente de naturaleza meramente práctica.

Alrededor del año 1460, llegó a Florencia un manuscrito con catorce tratados, supuestamente escritos por un personaje posiblemente legendario de nombre Hermes Trismegisto, conocidos como el *Corpus hermeticum*; se cree que se remonta a los años 100-300 aunque por algunas referencias a Egipto hay quienes sitúan parte de su contenido en 2500 aC, con lo cual sería el conocimiento registrado relacionado con química de mayor antigüedad.

Empédocles (500 aC), a quien conocemos por medio de Aristóteles, consideraba que la naturaleza constaba de cuatro elementos constitutivos: fuego, tierra, aire y agua. La primera teoría “atómica” (la materia está formada de átomos infinitamente pequeños e indivisibles) de que se tiene noticias se

debe a Leucipo (aproximadamente 475 aC) y su discípulo Demócrito. La retomaron Epicúreo (341 aC), el romano Lucrecio (*De rerum natura*) y en su momento Aristóteles, que enseñaba que toda materia está constituida por mezclas de estos cuatro elementos y que éstos no son permanentes. En base a ello, se creía en la posibilidad de transmutar cuerpos (metales) en otros, por ejemplo en oro.

Quizás el primer “químico” haya sido Jabir Ibn Hayian (conocido como Jabir o Geber) de la corte de Harun al-Rashid (alrededor del año 786), que estudió textos griegos y a quien se atribuye gran cantidad de escritos. Se cree que dominó las técnicas de la química práctica conocidas en su época. Basó sus trabajos en el azufre, el mercurio y la sal y dió una serie de instrucciones para llevar a cabo los trabajos.

En el siglo VIII, se empezó a escribir sobre química en el Norte de Africa y, al aparecer traducciones del árabe en Europa en los siglos XII y XIII, se tiene ya registro de trabajos de los llamados alquimistas.

Se dice que uno de ellos, Nicolas Flamel, logró, en el siglo XIV, producir oro y ello despertó en los siglos XV y XVI una fiebre por la alquimia, ese mundo hermético

y esotérico, fiebre de la que no se sustrajeron Robert Boyle, John Locke e Isaac Newton.

Pero la alquimia, más que una simple búsqueda de cómo producir oro, empezaba a ser una ciencia que estudiaba seriamente las reacciones químicas, que aportó muchos descubrimientos y conocimientos nuevos (por ejemplo la destilación del *aqua vitae* o etanol, la preparación de *aqua regia*, el ácido nítrico, el ácido sulfúrico, muchas de las sales), y que generó innumerables controversias.

Por ejemplo, Robert Boyle en su obra *The Sceptical Chymist* (1661) refutó las teorías químicas basadas en los cuatro elementos y en el trío de la alquimia (mercurio, azufre y sal), argumentando que no tenían la capacidad de explicar los resultados de experimentos.

Para nuestros fines, quizás el químico de más importancia resulte ser Antoine Laurent Lavoisier quien publicó en 1789 su *Tratado elemental de química*. Lavoisier insistió siempre en el hecho de que las mediciones eran importantes en química; no era suficiente la observación cualitativa, era necesario trabajar en forma cuantitativa.

Posteriormente, Amedeo Avogadro postuló la hipótesis, conocida con su nombre: iguales volúmenes de gases a igual temperatura y presión contienen el mismo número de moléculas, independientemente de su naturaleza química y sus propiedades físicas. Este número es conocido como *número de Avogadro* y es igual a $6,023 \times 10^{23}$; es el número de moléculas de cualquier gas presente en un volumen de 22,41 litros y es el mismo para el gas más liviano (hidrógeno) como para un gas pesado tal como dióxido de carbono o bromo. El número de Avogadro es una de las constantes fundamentales de la química.

Definición internacional de la unidad de medida en química. [14^a Conferencia General de Pesas y Medidas, 1971].

Historia

Anteriormente, el mol (en algunos países llamado “la mol”) se definía como el peso molecular de sustancia expresado en gramos. En la actualidad, y aunque ello no es obvio de la forma de expresar la unidad, se aplica el término a una magnitud que contenga $6,023 \times 10^{23}$ (el número de Avogadro) de las unidades consideradas y por ello se puede

hablar de un mol de átomos, de iones, de radicales, de electrones. Por ello, cuando se emplea el mol, deben especificarse las entidades elementales empleadas las cuales pueden ser átomos, moléculas, iones, electrones, otras partículas, o grupos especificados de tales partículas.

El **mol** (símbolo **mol**) es la cantidad de materia que contiene tantas entidades elementales como átomos existen en 0,012 *kilogramos* de carbono 12.

Una unidad derivada, recientemente aceptada por la 21^a Conferencia General de Pesas y Medidas en 1999⁽¹³⁾, tiene su origen en la recomendación para el uso de unidades SI en medicina y química clínica, debido a la importancia de evitar que resultados de mediciones clínicas se expresen en varias diversas unidades.

El **katal** (símbolo **kat**) es la unidad *mol por segundo* para uso en medicina y bioquímica, como expresión de la actividad catalítica.

Patrones y materiales de referencia

En la actualidad, no se ha considerado la realización de un patrón primario único para el *mol* aunque se viene trabajando con el fin de contar con patrones confiables.

Como patrones de trabajo, se emplean los métodos llamados *primarios* y cuerpos químicamente puros en una matriz conocida, con un título definido, conocidos como *materiales de referencia*.

El Comité Consultivo de la Cantidad de Materia (CCQM) del CIPM ha recomendado los siguientes como métodos de alto potencial a ser establecidos como primarios:

Métodos primarios de medición directa:

Electroquímica:

- titulación coulombimétrica
- mediciones de potencial de hidrógeno (pH)
- conductividad electrolítica

Métodos clásicos de química analítica:

- gravimetría
- titulación

Métodos primarios de medición por correlación:

- dilución isotópica con espectrometría de masas
- resonancia nuclear magnética
- calorimetría diferencial

En cuanto a los materiales a emplear, recordemos aquí las definiciones de *material de referencia* y de *material de referencia certificado*:

Material de referencia: Material o sustancia que tiene uno (o varios) valor(es) de su(s) propiedad(es) suficientemente homogéneo(s) y bien definido(s) para permitir su utilización como patrón en la calibración de un aparato, la evaluación de un método de medición o la atribución de valores a los materiales.

Material de referencia certificado: Material de referencia provisto de un certificado, para el cual uno o más valores de sus propiedades está certificado por un procedimiento que establece su enlace a una realización exacta de la unidad bajo la

cual se expresan los valores de la propiedad y para el cual cada valor certificado cuenta con una incertidumbre a un nivel de confiabilidad señalado.

Un ejemplo de éstos lo constituyen los materiales de referencia certificados usuales en los laboratorios para calibrar aparatos, verificar métodos y reactivos.

Incertidumbres

Las incertidumbres en los resultados varían según el elemento a ser dosificado y su concentración. Sin embargo, se puede hablar de niveles del orden de 10^{-3} hasta 10^{-4} .

Equipos de medición

Las determinaciones involucran técnicas de análisis y los equipos correspondientes para los métodos considerados primarios a los que ya se hizo referencia.

REFERENCIAS

1. Alonso, Marcelo
Física, Curso elemental
Tomo I, Mecánica; Tomo II, Hidromecánica-Calor;
Tomo IV, Electromagnetismo, física atómica
La Habana Cuba, Cultural S.A., 1953
2. Alvaro Medeiros de Farias Theisen
Fundamentos da Metrologia Industrial
Porto Alegre, 1997
3. Audoin, C.
Caesium Beam Frequency Standards: Classical and Optically Pumped
Metrologia, 1992, 29, 113-134
4. Benson, Harris
University Physics
New York, John Wiley & Sons, 1991
5. Campos, J. et al
Realization of the candela from a partial filtering $V(\lambda)$ detector traceable to a cryogenic radiometer
Metrologia, 1995/96, 32, 675-679
6. CENAM
comunicaciones personales
7. Cerruti, L.
The Mole, Amedeo Avogadro and others
Metrologia, 1994, 31, 159-166
8. Clare, J.F.
Realization of a photometric scale based on cryogenic radiometry
Metrologia, 1998, 35, 251-254

9. **Concise Encyclopedia of the Sciences.**
New York, Facts on File, 1978
10. Cooter, I.L.
Electrical standards and measurements
Electro-Technology, 79, 53, Jan 1967.
11. De Bièvre P. and H.S. Peiser
The reliability of values of molar mass, the factor that relates measurements expressed in two SI base units (mass and amount of substance)
Metrologia, 1997, 34, 49-59
12. **Dictionary of Physics,**
volume 1
McGraw-Hill, 1993
13. Draft resolutions 21st. CGPM
(información obtenida del sitio BIPM en Internet)
14. Edwards, C.S., et al
A 633 nm iodine-stabilized diode-laser frequency standard
Metrologia, 1999, 36, 41-45
15. Gardner, J.L. et al
New basis for the Australian realization of the candela
Metrologia, 1988, 35, 235-239
16. **Guide for the Use of the International System of Units (SI)**
Barry N. Taylor
NIST Special Publication 811
US Department of Commerce, NIST, 1995
17. Hawking, Stephen
¿Se vislumbra el final de la física teórica? en **Agujeros negros y pequeños universos.**
México, Editorial Planeta, 1994

18. Hopkins, Robert A.
The International (SI) Metric System and How it Works
3rd, revised ed.
Tarzana, CA, AMJ Publishing Co., 1975
19. <http://www.bipm.fr>
20. <http://www.cenam.mx>
21. <http://www.euromet.org>
22. <http://www.ibpinet.com.br/sim>
23. <http://www.lcie.fr>
24. <http://www.nist.gov>
25. <http://www.oiml.org>
26. <http://www.ptb.de>
27. International Comparison Final Report
Field: Acoustics; EUROMET
Metrologia, 1997, 34, 197-198
28. **ISO Guide to the expression of uncertainty in measurement**
Geneva, ISO, 1993
29. Jarvis, Duncan
Sound measurements
Metrologia, 1999, 36, 249-255
30. José Dajes Castro
Sistema Internacional de Unidades de Medida
Lima, Perú; INDECOPI, 1999
31. Matamoros García, Carlos H.
La candela, principios y usos
Mexico, CENAM, 1999
32. McGlashan M.L.
Amount of substance and the mole
Metrologia, 1994/95, 31, 447-455

33. McGlashan, M.L.
Entitic quantities, molar quantities and relations between them
Metrologia, 1997, 34, 7-11
34. National Bureau of Standards
Standard cells, their construction, maintenance and characteristics
US Department of Commerce, 1965
35. NBSIR 75-926
The National Measurement System for Length and Related Dimensional Measurements.
Part I.
US Dept. of Commerce, National Bureau of Standards, 1976.
36. NIST Time and Frequency FAQ
(información obtenida del sitio NIST en Internet)
37. Norma Centroamericana ICAITI 4010
Guía para el uso del sistema internacional de unidades;
contiene factores de conversión para pasar de unidades de otros sistemas a unidades SI
Guatemala, ICAITI, s.f.
38. Ohno, Y.
Detector-based luminous-flux calibration using the Absolute Integrating-Sphere Method
Metrologia, 1998, 35, 473-478
39. Ohno, Y. and J.K. Jackson
Characterization of modified FEL quartz-halogen lamps for photometric standards
Metrologia, 1995/96, 32, 693-696
40. OIML D 2 (1999)
Legal units of measurement
France, OIML, 1999

41. OIML R111
Weights of classes E_1 , E_2 , F_1 , F_2 , M_1 , M_2 , M_3 .
France, OIML, 1994
42. Omega Engineering Inc
<http://www.omega.com/techref/measureguide.html>
43. **Padrões de Unidades de Medidas**, Referências
Metrológicas da França e do Brasil
Rio de Janeiro, INMETRO, 1999
44. Park, David
The How and the Why – An essay on the origin and
development of physical theory
N.J., Princeton University Press, 1988
45. Samaan N.D. and F. Abdullah
Computer-aided Modelling of Pressure Balances
Metrologia, 1993/94, 30, 641-644
46. **SI Guide, International System of Units**
Geneva, ISO, 1998
47. Simpson, D.I.
**Computerized Techniques for Calibrating Pressure
Balances**
Metrologia, 1993/94, 30, 655-658
48. Tarbeye Yu. V., and E.T. Frantsuz
**Measuring Procedure to realize the Ampere by the
Superconducting Mass Levitation Method**
Metrologia, 1992, 29, 313-314
49. The Boeing Co., Primary Standards Unit
A Precision Electrical Measurement Course
August 1962
50. UNEP (United Nations Environmental Programme)
Radiation; doses, effects, risks
Nairobi, Kenya, 1985

51. US Department of Commerce, National Bureau of Standards
Definition of Ampere and Magnetic Constant
Precision Measurement and Calibration
NBS Special Publication 300, vol.3, 1972
52. US Department of Commerce, National Bureau of Standards
Frequency and time
Precision Measurement and Calibration
NBS Special Publication 300, vol.5, 1972
53. Vasco Ronchi
Optics, the science of vision
N.Y., University Press, 1957
54. **VIM, Vocabulaire International des Termes Fondamentaux et Généraux de Métrologie**
Genève, ISO, 1993
55. Working Group 1, Comité Consultatif de Thermométrie
On the International Temperature Scale of 1990 (ITS-90), Part I: Some definitions. Short Communication.
Metrologia 1997, 34, 427-429

ANEXOS

Anexo 1

Constantes físicas fundamentales y su relación con las unidades básicas

Reproducido con autorización del BIPM

c	velocidad de la luz en el vacío
h	constante de Planck
α	constante de estructura fina
R	constante de los gases ideales
k	constante de Boltzmann
K_j	constante de Josephson
K_{j-90}	valor convencional de la constante de Josephson
R_k	constante de von Klitzing
R_{k-90}	valor convencional de la constante de von Klitzing
e	carga del electrón
N_A	número de Avogadro
G	gravedad
m_{12}	
^{12}C	masa del carbono 12
m_e	masa del electrón en reposo
R_∞	constante de Rydberg

Anexo 2

Algunas unidades SI derivadas

Magnitud Derivada	Unidad SI derivada	Nombre	Expresión en términos de otras unidades SI	Expresión en términos de unidades básicas SI
ángulo plano	radián ^(a)	rad		$\text{m} \cdot \text{m}^{-1} = 1$ ^(b)
ángulo sólido	estereorradián ^(a)	sr ^(c)		$\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2} = 1$ ^(b)
frecuencia	hertz (hercio)	Hz		s^{-1}
fuerza	newton	N		$\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
presión, esfuerzo	pascal	Pa	N/m^2	$\text{m}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
energía, trabajo, cantidad de calor	joule (julio)	J	$\text{N} \cdot \text{m}$	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
potencia, flujo radiante	watt (vatío)	W	J/s	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$
carga eléctrica, cantidad de electricidad	coulomb (culombio) C			$\text{s} \cdot \text{A}$

dosís absorbida, energía específica impartida, kerma, índice de dosís absorbida	gray	Gy	J/kg	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
dosís equivalente, índice de dosís equivalente	sievert	Sv	J/kg	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$

- (a) El radián y el estereorradián pueden emplearse en expresiones para unidades derivadas para distinguir entre cantidades de naturaleza diferente pero igual dimensión.
- (b) En la práctica, los símbolos rad y sr se emplean cuando es apropiado pero generalmente se omite la unidad derivada "1".
- (c) En fotometría, el nombre estereorradián y el símbolo sr usualmente se conservan en las expresiones de unidades.
- (d) Esta unidad puede usarse en combinación con prefijos SI, por ejemplo, miligrados Celsius, m°C .

Anexo 3

Múltiplos y submúltiplos más comunes para uso con el SI

Factor	Prefijo	Símbolo	Factor en palabras
1 000 000 000 = 10^9	giga	G	mil millones de veces
1 000 000 = 10^6	mega	M	un millón de veces
1 000 = 10^3	kilo	k	mil veces
0,001 = 10^{-3}	mili	m	una milésima
0,000 001 = 10^{-6}	micro	μ	una millonésima
0,000 000 001 = 10^{-9}	nano	n	una mil millonésima
0,000 000 000 001 = 10^{-12}	pico	p	una billonésima

Anexo 4

Científicos relacionados con la electricidad

Epicuro (342-270 AC). Primera hipótesis sobre el magnetismo.

Roger Bacon (1214-1294). Repulsión magnética.

Pedro Peregrino (1269). Primer escrito sobre magnetismo.

Cornelio Gema (siglo XVI). Atracción entre líneas de fuerza.

G. Cardan (1501-1576). Diferencia entre fenómenos eléctricos y fenómenos magnéticos.

Nicolo Cabeo (1585-1650). Repulsión.

William Gilbert (1540-1603). Primer electroscopio.

S. Gray (1696-1736). Clasificación de los cuerpos que pueden electrificarse por frotamiento.

F. Hauskbee (siglo XVII). Distribución superficial de la electricidad.

C. Du Fay (1698-1739). Fluidos eléctricos, cuerpos buenos y malos conductores.

Benjamin Franklin (1706-1790). El rayo como fenómeno eléctrico.

H. Cavendish (1731-1810). Constante dieléctrica, capacidad eléctrica y potencial.

Charles A. Coulomb (1736-1806). Ley cuantitativa de la atracción entre dos polos.

Georg Simon Ohm (1789-1854). Ley fundamental de la electricidad

Alessandro Volta (1745-1827). Pila eléctrica.

G. Green (1793-1841). Depuración del concepto de potencial en electrostática.

J. Karl F. Gauss (1777-1855). Magnetismo terrestre.

M. Faraday (1791-1867). Constante dieléctrica y líneas de fuerza.

Wilhelm Weber (1804-1890). Dipolos permanentes.

Hans C. Oersted. (1770-1851). El magnetismo es una manifestación de la electricidad en movimiento.

M. Ampere (1775-1836). Dos corriente paralelas del mismo sentido se atraen pero si son de sentidos contrarios se repelen.

Pierre S. Laplace (1749-1836).

Jean B. Biot (1774-1862).

J. Henry. (1797-1878). Fuerza electromotriz inducida f.e.m.i.

James Clerk Maxwell (1831-1879). La luz es un fenómeno electromagnético.

Metrología para no-metrólogos

H. R. Hertz (1857-1894). Comprobación de que la velocidad de las ondas electromagnéticas es igual a la velocidad de la luz.

Ernest Rutherford (1871-1937). Teoría del átomo nuclear.

Edwin H. Hall (1855-1938). Cuando un campo magnético es aplicado perpendicularmente a una cinta que transporta corriente, una diferencia de potencia aparece a lo ancho de la cinta.

Leon N. Cooper (en 1956). En el estado base, a 0 K, sin campo externo ni flujo de corriente, todos los electrones forman parejas (llamadas parejas de Cooper) en las cuales dos electrones tienen momentos y spin opuestos.

Brian David Josephson (1940-). Dos superconductores separados por una capa aislante con un grosor de 1 nm pueden ser perforados por las parejas de Cooper; como la carga de cada pareja es $2e$, se establece una supercorriente sin la aplicación de diferencia de potencial.

Anexo 5

Radionuclídeos – conceptos básicos⁽⁵⁰⁾

Los átomos de un mismo elemento siempre tienen el mismo número de protones en el núcleo pero pueden tener diferente número de neutrones. Aquellos con diferente número de neutrones pertenecen a diferentes variedades del mismo elemento y se les llama *isótopos*. Se suelen distinguir por el número total de partículas en su núcleo. Por ejemplo, el uranio-238 tiene 92 protones y 146 neutrones, el uranio-235 tiene los mismo 92 protones pero 143 neutrones. A los átomos caracterizados de esta forma se les llama *nuclídeos*.

Algunos nuclídeos, los menos, son estables o producen radiaciones tan débiles que pueden considerarse estables. En los nuclídeos que no son estables, con cada cambio sufrido se libera energía y existe gran variedad de combinaciones para estas secuencias de transformación o *desintegración* como se le conoce. A todo el proceso de transformación se le llama *radiactividad* y a los nuclídeos inestables se les conoce como *radionuclídeos*. Al número promedio de transformaciones que ocurre cada segundo en una cantidad de material radioactivo se le llama *actividad* y ésta es medida en *becquerels*, en honor al físico que descubrió el fenómeno. Las transformaciones pueden ser naturales o artificiales por bombardeo de nuclídeos estables por medio de neutrones.

Las diferentes formas de radiación se emiten con diferentes energías y poderes de penetración. Las radiaciones α (alpha) son detenidas por el papel y apenas penetran las capas externas de la piel; sin embargo, son extremadamente dañinas cuando penetran en el organismo por una herida, por ingesta o por la respiración. Las radiaciones β (beta) pueden atravesar de uno a dos centímetros de tejido vivo y las radiaciones γ (gama) son detenidas únicamente por capas gruesas de plomo o concreto.

La energía de la radiación es la que puede causar daños. La cantidad de energía de radiación depositada en tejido vivo se llama *dosis absorbida* y se mide en unidades *gray*.

Por otra parte, una dosis de radiación α es más dañina (20 veces más) que la misma dosis de radiaciones β o γ ; por ello se toma en cuenta el potencial de daños en la llamada *dosis equivalente* que se mide en *sieverts*.

CORRECCION PG 81

En el caso de la fotometría estamos primordialmente interesados en el fenómeno conocido como *la luz*, una de las manifestaciones de energía radiante, y que es energía en forma de ondas electromagnéticas, emitida en forma de fotones, y con determinada frecuencia y longitud de onda. Desde el punto de vista de la porción del espectro visible para el hombre, la luz ha sido primariamente para él la luz solar y sus substitutos a lo largo de los siglos: el fuego, la vela, la lámpara de aceite, la de queroseno, la de gas, la de arco, de filamento de carbono, de filamento de tungsteno, de neón, fluorescente, de vapor de mercurio, etc.

CORRECCION PG 126

Brian David Josephson (1940-). Dos superconductores separados por una capa aislante con un grosor de 1nm pueden ser perforados por las parejas de Cooper; como la carga de cada pareja es $2e$, se establece una supercorriente sin la aplicación de diferencia de potencial.