



I ASAMBLEA NACIONAL DE METROLOGÍA
Una mirada a la metrología
española de los años 70 del
siglo XX



CENTRO ESPAÑOL DE METROLOGÍA



Una mirada a la metrología española de los años 70 del siglo XX

Selección de ponencias comentadas
de la **I Asamblea Nacional de Metrología** celebrada con
ocasión del centenario de la firma de la Convención del
Metro en 1975

Una Publicación del Centro Español de Metrología.

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

1ª edición. Diciembre 2023.

Edita: Centro Español de Metrología.

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

© Centro Español de Metrología

NIPO: 11323007X (papel)

NIPO: 113230085 (digital)

Depósito Legal: M-34041-2023

Publicación incluida en el Programa editorial del Ministerio de industria, Comercio y Turismo de 2023 y editada por el Ministerio de Industria y Turismo de acuerdo con la reestructuración ministerial establecida por Real Decreto 829/2023, de 20 de noviembre.

Presentación

En un momento de la historia donde la ciencia de la medida, *la metrología*, está muy presente en los desarrollos científicos y técnicos que están revolucionando el estado de bienestar de la sociedad del siglo XXI, nos ha parecido oportuno reflexionar sobre la situación de la metrología española y nada mejor para ello que recordar el pasado reciente con una mirada a los años 70, en donde se empezaron a sentar las bases de la infraestructura metrológica con la que hoy cuenta España.

Esta obra selecciona una pequeña colección de las ponencias presentadas en la I Asamblea Nacional de Metrología con ocasión del centenario de la firma de la Convención del Metro. Dado que en mayo del 2025 se va a celebrar el 150 aniversario, hemos considerado de interés seleccionar algunas ponencias relacionados con el SI y con su materialización y compararlas con la realidad actual. Asimismo, incluimos íntegramente las conclusiones a las que llegaron nuestros antecesores, documento de gran interés para valorar el desarrollo efectuado en estos casi cincuenta años y comprobar el grado de cumplimiento de su visión. Sirva esta publicación también para rendir homenaje a aquellos visionarios de la metrología que en momentos difíciles de la transición española supieron generar una hoja de ruta y buscar los mecanismos y apoyos para que se implementara.

Hoy, después de transcurrido casi medio siglo, la metrología nacional ha logrado situarse a un buen nivel científico dentro del entorno europeo, contando con expertos en todos los foros internacionales relevantes. Aun así, algunas de las dificultades que adolecía la metrología en los años 70 siguen estando presentes en pleno siglo XXI, tales como la escasez de recursos humanos y económicos, su visibilidad ante la sociedad así como la disponibilidad de su enseñanza específica en las universidades.

En la tercera década del siglo XXI, la metrología española tiene ya una estructura descentralizada, coordinada y una visión de futuro que permitirá a buen seguro un desarrollo acorde con la ciencia y necesidades nacionales y europeas en los próximos años.

Tres Cantos, 23 de Noviembre de 2023
José Ángel Robles Carbonell
Director

Contexto de la metrología en España, en la década de los setenta

La década de los setenta para España, con el paso de un sistema político de dictadura a otro de democracia, removió todos los cimientos de aquella sociedad, produciendo un clima de emprendimiento, ilusión, pero también de gran incertidumbre. No hay que olvidar que en la segunda parte de la década de los setenta, la economía española sufrió un estancamiento con lo cual los retos políticos de una transición hacia la democracia se vieron incrementados por los efectos de la crisis económica, lo que llevó al claro convencimiento de la necesidad de liberar la economía y crear nuevas instituciones o reformar otras de forma que permitiesen un adecuado crecimiento económico y materializar la aspiración de España a formar parte de la Comunidad Económica Europea.

En este entorno, la metrología española seguía sin despegar, sin reconocimiento político y social y nos atreveríamos a decir que su existencia era casi anecdótica. España, que siempre había estado en primera línea en los grandes eventos que llevaron al progreso de la metrología y de la ciencia en el siglo XIX, como fueron la adopción del Sistema Métrico Decimal (Ley de 19 de julio de 1849) y la firma del Tratado de la Convención del Metro (20 de mayo de 1875), no fue capaz en las primeras siete décadas del siglo XX de dar un impulso significativo a la metrología, ni conseguir la creación de un instituto nacional que liderara su desarrollo. Existieron varios intentos que, por motivos económicos, políticos, competenciales y quizás de índole personal de alguno de los científicos de la época, frustraron su éxito. Así, a comienzos de la década de los años setenta, la situación de la metrología en España era penosa, resultado de un proceso lento, pero continuado, de abandono y desidia por parte de los que, teóricamente, tenían que haber impulsado y respaldado esta actividad en nuestro país.

Fuera de nuestras fronteras, la realidad era muy distinta, la metrología afrontaba un desarrollo sin precedentes, iniciado antes de la Segunda Guerra Mundial e incrementado en las décadas posteriores debido al desarrollo científico, tecnológico e industrial.

Esta realidad de metrología desarbolada, sin horizonte y de divisiones competenciales entre las Administraciones, contrastaba en cuanto al plantel de figuras científicas que desde el siglo XVIII habían resaltado a nivel internacional en materia de pesas y medidas (metrología). Así tenemos en el siglo XVIII a Jorge Juan, Antonio de Ulloa, Ciscar y a finales del XIX a Ibañez de Ibero, y ya en el siglo XX a Blas Cabrera, Torres Quevedo, Otero Navascués, Leonardo Villena, Alberto Orte, Carlos Granados, M. Colomina... habiendo sido tanto Ibañez de Ibero, como Otero Navascués, presidentes del Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM).

A pesar de la relevancia de la metrología para la ciencia, tal como Bachelard señaló (*Essai sur la connaissance*): “*El problema de la medición, oculta, de alguna manera, toda la historia del desarrollo de la ciencia. La precisión de las medidas es suficiente para caracterizar los métodos científicos de cada época*”, la infraestructura existente en la década no lo reflejaba y lo que era mucho más preocupante, tampoco se esperaban grandes cambios. España seguía sin comprender que el desarrollo económico y social dependía en buena parte de que la industria y el comercio dispusieran de una adecuada metrología de apoyo. Algunos países, hoy grandes potencias industriales lo habían entendido desde el principio del siglo XX y habían fundado grandes institutos con actividades en metrología (PTR hoy PTB (Alemania), NPL (Reino Unido) o NBS (USA), actual NIST). En España seguía la eterna cuestión del “parcelismo” y la supremacía del ego; las competencias en metrología estaban divididas entre la Comisión Nacional de Metrología y Metrotécnica (CNMM) y el Ministerio de Industria y Energía. La situación nos la relata muy claramente, D. Mariano Martín Peña en el artículo publicado en el nº 1 de la revista e-medida:

“ ... En el año 1975 existían, en nuestro país, dos foros en los que se trataban temas metrológicos. Por un lado, estaba la CNMM, que era el órgano de la Administración General del Estado responsable de la metrología en España, que tenía asignadas todas las competencias tanto legislativas como ejecutivas, por la Ley 88/1967, de 8 de noviembre, de Pesas y Medidas. Estaba adscrita al Instituto Geográfico y Catastral y ello suponía

un obstáculo casi insalvable para su evolución y desarrollo, ya que sus actividades eran consideradas marginales dentro de una institución centrada en la Geodesia, la Geofísica, el Catastro y la Cartografía. La propia composición de la CNMM era otro grave problema, pues estaba formada por un representante de cada departamento ministerial, cuyos conocimientos científicos o jurídicos podrían ser sólidos, pero no así los metroológicos, en ocasiones insuficientes, y que no mostraban especial interés en adquirirlos ya que no formaban parte de su dedicación habitual. Además, la promulgación del Real Decreto de 9 de junio de 1924, por el que se reorganizaba el ministerio de Trabajo, Comercio e Industria atribuyó a la Jefatura Superior de Industria, los servicios de «comprobación y vigilancia de pesas y medidas», que pasarían a depender de este Departamento, con el personal afecto a los mismos, salvo en lo referente a metrología de precisión, inspección técnica y patrones internacionales que continuarán dependiendo del Instituto Geográfico. Esta dualidad competencial dio lugar, dentro de la propia CNMM, a un cierto enfrentamiento con el representante del Ministerio de Industria.

...Por otro lado, estaba el Comité de Metrología de la Asociación Española de Control de la Calidad (AECC) que, desde un principio, fue un foro abierto para reunir a los laboratorios metroológicos privados y oficiales, centrando su actividad principalmente en la metrología industrial, muy incipiente en aquella época.

Estos laboratorios, algunos de ellos con representación en la CNMM, daban trazabilidad a la industria y a los centros de investigación, recibiendo a cambio generosas subvenciones del Ministerio de Industria y Energía, teniendo una posición aparentemente de privilegio en la metrología nacional. Se reunían periódicamente para discutir temas técnicos pero sus decisiones no tenían efectos legales. Además, existieron conversaciones de la AECC con el Ministerio de Industria y Energía en las que esta Asociación mostró su disposición a colaborar para hacer homologaciones y autodefinir los patrones primarios y secundarios, si fuese necesario.

Como es fácil deducir, tanto algunos miembros de la AECC como de la CNMM, eran totalmente reacios a la creación de una infraestructura metroológica nacional con un Instituto de Metrología a la cabeza que concentrase todas las competencias y responsabilidades, tanto científicas como legales y de representación nacional ante los organismos internacionales. Las razones de su actitud eran, entre otras, que sus departamentos perdían poder de decisión en materia metroológica e incluso algunas de sus normativas podían quedar fuera de legalidad viéndose obligados a derogarlas. También los grandes laboratorios nacionales compartían esta postura porque peligraban las subvenciones públicas, como así sucedió, y perdían su privilegiada e injustificada posición de máximas autoridades en la materia en la que se comportaban como auténticos “gurús”.

Resumiendo, la realidad de la década era una metrología atomizada, sin coordinación, ni liderazgo y con una falta de visión estratégica que marcara una clara hoja de ruta.

Mirando la situación con la perspectiva que nos permite el tiempo transcurrido, podemos afirmar que la década de los setenta preparó el terreno para lo que vendría en la siguiente década y conviene destacar dos hitos que contribuyeron a ello:

- El primer hito fue la Conferencia Europea de Metrología celebrada en 1973 en Teddington (Reino Unido) que dio lugar a la creación de las bases para la Cooperación Europea en Metrología y Calibración (WECC), que ha derivado con los años en EURAMET. Como resultado de esta conferencia, en el ámbito privado, se creó el Comité de Metrología dentro de la Asociación Española de Control de la Calidad (AECC), el cual fue desde un principio, como se ha dicho anteriormente, un foro abierto para reunir a los jefes de los laboratorios metroológicos privados y oficiales, detectando las necesidades de la industria y mentalizando a la Administración para que elaborara las pertinentes recomendaciones y acciones. Todo lo hecho desde este Comité, pionero y visionario ha contribuido grandemente a la difusión de la Metrología.

- El segundo hito, objeto de esta publicación, fue la I Conferencia Nacional de Metrología con ocasión del centenario de la firma del Tratado de la Convención del Metro. Este evento propició la oportunidad de que los científicos de la época se reunieran, expusieran sus desarrollos y planteasen en las conclusiones una especie de hoja de ruta sobre lo que era urgente abordar. Además, lo más reseñable, fue el eco e impacto que tuvo el evento en los diferentes medios de comunicación de la época, haciendo visible a la sociedad y a las Administraciones Públicas la “Metrología”, materia que seguramente a más de uno le pareció novedosa, a pesar de sus más de 5000 años de historia.

La década de los setenta propició pues que, ya desde el inicio de la década de los ochenta, con un claro objetivo de integración de España en la Comunidad Europea, se abordará una transformación que fue toda una revolución en los diferentes ámbitos sociales, económicos y políticos. La metrología también estaba allí, tocando a la puerta del cambio. En la primera parte de los ochenta, se generó el marco legal de desarrollo de la metrología, se creó al Centro Español de Metrología (CEM), organismo llamado a representar el papel de instituto nacional de metrología y se le dotó de unas instalaciones modélicas en su tiempo. En paralelo a la creación del CEM se inició la primera red de laboratorios acreditados (SCI) que daría soporte directo a las industrias del país y que posteriormente serviría de base para lo que es hoy la Entidad Nacional de Acreditación, ENAC.

EL ADELANTADO DE SEGOVIA

40 de la Gran Avenida de 1910
del Palacio de la Real

17 San Agustín, 7. Teléfono 414488-20-22
Primer tel. aparatos 11 242424

AÑO LVIII — Número 11.074
Martes, 28 de diciembre 1912

Director: Sr. D. Antonio Martín Caba
Capataz Legar. 36 1-1928

LA IMPORTANCIA DE LA METROLOGIA EN LA ECONOMIA DEL PAIS

Comunicación de la importancia que la Metrología tiene en el desarrollo económico de un país, la I. Asociación de Metrología, realizó y organizó en el primer tomo de sus obras, para que expresen en conclusiones y datos estadísticos sus leyes y principios.

A la salida de una de ellas tenemos un ejemplo de un producto que ha sido sometido a un control de calidad en el momento de su salida de la fábrica, para que se asegure su calidad y su pureza.

—¿Por qué se hacen de esta manera los productos que se venden en el mercado?

—El Estado, en su deber de garantizar la calidad de los productos que se venden en el mercado, debe establecer un control de calidad en el momento de su salida de la fábrica, para que se asegure su calidad y su pureza.

—¿Qué ventajas tiene un control de calidad en el momento de su salida de la fábrica?

—Este control garantiza, una pureza superior, que permite una mayor calidad de los productos que se venden en el mercado.

En el proceso de un producto se hacen muchos errores, de mala calidad y errores, y así sucede cuando por la fuerza humana de los operarios, la calidad de un bien producido, no es controlada en el momento de su salida de la fábrica, para que se asegure su calidad y su pureza.

—¿Qué ventajas tiene un control de calidad en el momento de su salida de la fábrica?

—Este control garantiza, una pureza superior, que permite una mayor calidad de los productos que se venden en el mercado.

estadísticas, que debe aplicarse en todo el proceso de fabricación y en el producto acabado.

Una buena estadística es indispensable para el desarrollo económico de un país, ya que permite conocer el estado de la producción, tanto que permitan el control de la misma. Para conseguir esta estadística, es necesario tener un control de calidad en el momento de su salida de la fábrica, para que se asegure su calidad y su pureza.

—¿Y en qué se basa?

—Nuestro control de calidad se basa en el control de la calidad de los productos que se venden en el mercado, para que se asegure su calidad y su pureza. Este control se realiza en el momento de su salida de la fábrica, para que se asegure su calidad y su pureza.

—¿Y la Administración también tiene un control de calidad?

—Indudablemente, pero también debe de ser controlada de ella por que profesionalmente se asegura en el campo de la metrología, que debe tener un control de calidad en el momento de su salida de la fábrica, para que se asegure su calidad y su pureza.

—¿Qué ventajas tiene un control de calidad en el momento de su salida de la fábrica?

—Este control garantiza, una pureza superior, que permite una mayor calidad de los productos que se venden en el mercado.

—¿Qué ventajas tiene un control de calidad en el momento de su salida de la fábrica?

—Este control garantiza, una pureza superior, que permite una mayor calidad de los productos que se venden en el mercado.

—¿Qué ventajas tiene un control de calidad en el momento de su salida de la fábrica?

—Este control garantiza, una pureza superior, que permite una mayor calidad de los productos que se venden en el mercado.

Cien años de lucha contra el caos

Hoy pueden medirse liliputianos un millón de veces más pequeños que los de Swift y gigantes diez billones de veces más grandes ● La revolución del sistema métrico ● Siete unidades básicas de medida: metro, segundo, kilo, kelvin, amperio, candela y mol ● Respuestas curiosas a la pregunta "¿qué es un miligramo?" ● Importancia de la metrología

YA. Madrid 27 de diciembre 1975

... que los liliputianos y los gigantes de Swift medían, respectivamente, el centímetro y 10 metros, los progresos realizados desde entonces por la ciencia permitieron en sucesivos días medir liliputianos un millón de veces más pequeños, así como también gigantes diez billones de veces más grandes. Las cifras desfilan a toda imaginación.

Un gran físico del siglo XIX, Lord Kelvin, escribió estas palabras "Medir es saber". En efecto, al introducir la medición en las observaciones y en las experimentos, la ciencia ha realizado un progreso en la comprensión, y, por otra parte, la medida de las longitudes constituye la clave de todas las otras medidas.

Una idea de la complejidad e importancia de estas tareas nos la dan proporcionalmente los trabajos, sesiones y discusiones de la Asamblea Nacional de Metrología, organizada por la Comisión Nacional de Metrología y Metrofísica, de la Presidencia del Gobierno, y celebrada recientemente en Madrid, en conmemoración del primer centenario de la Convención del Metro.

UN MITO EN LA HISTORIA

La implementación del sistema métrico por la revolución francesa, y especialmente por la Convención, fue una auténtica penetración del conocimiento científico en la vida y en la economía de la sociedad, y en este sentido puede afirmarse que constituye uno de los grandes hitos en la historia de la humanidad.

El sistema métrico ha sido el primer sistema de medidas elaborado con sus unidades "naturales", definidas de modo preciso, y sus divisiones decimales, sencillas y prácticas. Cada siglo sucesivamente y especialmente hoy, ha penetrado en nuestra vida cotidiana y en nuestro desarrollo científico, pero no sólo debemos atribuir la grandeza y la profunda significación histórica de esta reforma, considerada como uno de los grandes contribuciones que este hecho le aportó a la humanidad.

UN CAOS INDESCRIPCIÓN

La posterior reforma de Longueville ha creado el caos indescriptible que existía en el mundo, en virtudes de la reforma francesa, con reformas las

pesos y medidas. Estas variaban no sólo de una nación a otra, sino según las provincias e incluso según las ciudades. Cuando los países europeos formaban parte del Imperio romano poseían el mismo sistema de pesos y medidas, pero al dismembrarse el Imperio de Carlomagno, cada señor hacía sus leyes, implementaba su justicia, acuñaba su moneda y utilizaba sus propias medidas. Cada pequeño estado o cada principado se convertían así, progresivamente, en unidades económicas independientes.

Naturalmente, esta situación producía enorme inquietud y generaba a los comerciantes, los campesinos y en general a todos los habitantes, ya que, a poco que se alejaban de su villa de residencia, se encontraban casi siempre con pesos y medidas diferentes que complicaban las transacciones de compra y venta y favorecían el fraude.

LUCES Y ONDAS PARA MEDIR

En la XI Conferencia General de Pesos y Medidas (1900) se sancionó el Sistema Internacional de Unidades, denominado SI, y fundamentado en las tres mediciones del sistema Giorgi, en la cuarta unidad eléctrica: el amperio, y el kelvin y la candela. En dicha Conferencia se crearon también dos unidades suplementarias: el radian, para el ángulo plano, y el

estereorradian, para el ángulo sólido, además de un conjunto de unidades derivadas que pueden, todas ellas, ser expresadas en las seis unidades básicas del Sistema, que comprende también una serie de símbolos para los prefijos que deben ser empleados para obtener los múltiplos y submúltiplos decimales de las unidades SI.

En las medidas de longitud, de acuerdo con los usos más recientes, los patrones primarios no se establecen ya en función de las longitudes específicas de un metal, generalmente el platino o el acero inoxidable. Tales métodos han sido abandonados porque existen de precisión a mejor dicho, porque su precisión no es superior a la diecimilésima. Para sustituirlos se utilizan hoy la luz y las longitudes de onda. La luz emitida por tubos de descarga se encuentra en rayos que pueden ser muy finos y cuya frecuencia y longitud de onda son características del gas considerado. Estos rayos pueden servir de patrones de longitud.

Las siete unidades básicas de medida son hoy el metro para la longitud, el segundo para el tiempo, el kilogramo masa para la masa, el kelvin para la temperatura, el amperio para la intensidad de corriente eléctrica, la candela para la intensidad luminosa y el mol para la cantidad de sustancia.

ATENCIÓN A LA METROLOGIA

La importancia de estos temas fue subrayada por el Director del Instituto Geográfico y Catastral, y el secretario de la Comisión Nacional de Metrología y Metrofísica, en la conferencia de prensa celebrada con ocasión de la I Asamblea Nacional de Metrología.

Vivimos—se dijo entonces—en una situación de auténtico subdesarrollo en cuestión de pesas y medidas. Homologamos las especificaciones técnicas que nos mandan desde los laboratorios internacionales porque carecemos de medios materiales con que hacerlo en España. La sociedad española debe convencerse de que sin metrología no hay desarrollo industrial ni podrá ser posible nuestra vinculación a las economías europeas.

El desconocimiento que sobre esta materia existe en España es tal—se dijo también en la conferencia de prensa—que en los libros de texto aún se les enseña a nuestros escolares medidas como la libra y la onza, que no existen ya, y en cambio no se habla de otras que están ya establecidas en nuestro país por la ley de pesas y medidas de 8 de noviembre de 1967.

En la reciente Asamblea se ha expresado la necesidad de dotar a la metrología de laboratorios y de medios con que ejercer su vigilancia en el control de los aparatos que están en el comercio, y en la coordinación de todas las medidas del país, desde las referidas a sector sanitario hasta las de producción e industria. Se informó que en el laboratorio de pesas y medidas actualmente sólo trabajan 17 ingenieros, cuando en Estados avanzados en esta especialidad, como Estados Unidos y Rusia, el número de especialistas es de 5.000 y 10.000, respectivamente.

UNA ANECDOTA

Y por último, una anécdota. Con el fin de comprobar sobre el terreno hasta qué punto los Estados Unidos están preparados para la adopción del sistema métrico decimal, un redactor de la revista "Chemical and Engineering News" entrevistó a unas 100 personas en las calles de Nueva York, haciéndoles simplemente esta pregunta: "¿Puede decirme lo que es un miligramo?" He aquí algunas de las respuestas recibidas:

● Una señora: "Indica la eficacia de un medicamento, ¿no es así?" Se que más tranquilizantes vienen en comprimidos de cien miligramos."

● Una muchacha: "Lo aprendí en clases de golf. Es el cien por cien de un centímetro cúbico."

● Un taxista: "Ah, sí, es algo como una cabeza de alfiler, ¿verdad?"

● Una secretaria: "Figura en el índice del diccionario."

● Una muchacha: "No soy matemática."

● Una camarera: "Es una especie de carta de restaurante."

● Una joven: "Es un sistema muy pepelido."

● Un policía: "Tiene que ver algo con el espacio exterior."

● Una secretaria: "Un miligramo es un millón de gramos."

● Una mujer: "Es una milonelina de... pero que no sé de qué."

● Una niña: "¿Cómo? ¿Un miligramo?"

● Un tipo de Borevay (clase popular de Nueva York): "Eso es un mensaje como los que reparte la Western Union (sociedad de telegrafía americana)."

**Manuel CALVO
HERNANDO**

Industrialización al paso de la Metrología para ser competitiva y social

Por M. RÁNCHEZ GIL

«La Metrología es una disciplina esencialmente interdisciplinada, sólo en el ámbito técnico el señor Grandjean en su ponencia ante las participaciones a la I Asamblea Nacional de Metrología.

Aunque como país desarrollados nos consideráramos relativamente adelantados, en cualquier momento contamos con hombres de primerísima fila en el comercio internacional de la Metrología. Por un lado, hace un año, nuestro general Rafael De Diego presidió por indicaciones nuestras el Comité Internacional de Pesar y Medidas (C. I. P. M.). A los otros lados, otro antiguo científico español, el señor Oscar Navascués, preside con autoridad internacional al mismo organismo.

Imposible detallar, al enumerar ejemplos, el espectro multidisciplinario abarcado en las aprobadas sesiones de la I Asamblea Nacional, con sus cincuenta (cincuenta) sesiones. Resulta abrumadora la vasta banda de exploraciones, investigaciones e hallazgos de laboratorio. Junto y sobre vasta ciudad se ha incorporado una preocupación por todos compartible: la urgencia de avanzar en una adecuada infraestructura metrologica que permita, a la vez que obvia, a nuestra industria a competir internacionalmente.

Metrología, calidad y experticia

El doctor Núñez de las Cuevas fue uno de los que más insistieron en la necesidad de incorporar las capacidades de la nueva ciencia, la Metrología, en nuestra industria. No pueden entenderse los hechos en su relación con empresas e industrias sino a partir de referentes fijos y amplios por todos los países.

En una sociedad consciente y avanzada hay una conciencia que se impone: aptitud. No sólo en el campo de prácticas pedagógicas y correctivas, en cosas esenciales (a mayor costo se hacen cosas malas y costosas), sino en la precisión de las condiciones y medidas que se le atribuyen. La necesidad de la medida se potencia al tratarse de aparatos o dispositivos de medida que hay que regular y calibrar por el Estado: es la Metrología Legal, que está involucrando con más todo el quehacer industrial.

La importancia específica al esfuerzo de la Comisión Nacional de Metrología y Mecánica, para que se prepare una Ley de Metrología capaz de eliminar los problemas y de establecer una sólida estructura nacional. En primer lugar para mejorar la calidad, incorporar el nivel de precisión y calidad y salir con ventaja a los mercados internacionales. La metrología mejorará así nuestra calidad a nivel internacional. La importancia, importante en una comunidad internacionalizada, será bastante más vital.

Actividad exponencial del Ministerio de Industria

Don José María Estigarraga trató el Ministerio de la evolución metrologica hasta llegar al S. I. o Sistema Internacional. Destacó las obligaciones legales más decisivas en España: ley del 8/11/52, modificando las disposiciones de varias medidas con los estándares métricos; la del 9/7/52, declarando obligatorio para todo documento y transacción el sistema métrico decimal y su estructura; la del 8/11/57, adoptando el S. I., que completó el decreto del 25/4/54 incorporando las modificaciones subsiguientes.

El reglamento último correspondiente a la estructura organizativa de la Metrología como ciencia legal, ante posibles modificaciones de toda índole. Con toda la actividad industrial y sus implicaciones han sido minuciosamente determinadas: analímetros, manómetros, pirómetros, calí-

El Economista. Madrid 27 de diciembre 1975.

bradores, sondas, densímetros, matraces, probetas, termómetros...

El señor Estigarraga hizo patente la labor vigilante del Ministerio de Industria a través de sus Delegaciones en el caso de los controladores eléctricos, antes de instalarse después con motivo de reparaciones, por posible desgaste. La verificación anual de todo instrumento de medida en la industria es la más importante tarea que puede investigarse. El personal afecto a cada Delegación Provincial ha de pasar por todos los Ajustamientos relativos al estado de cada instrumento de medida.

Se hizo mucho. Pero queda muchísimo más por hacer. Ante todo, las Delegaciones tienen la misma plantilla que en 1950, cuando la industria estaba en pañales, los instrumentos de medición eran pocos y las exigencias de calidad en bastantes sectores casi rudimentarias. Desde entonces, además, se han formado decenas de empresas que multiplican el deber de vigilar. Es un asunto incómodo. Una sociedad instruida y desarrollada reclama medidas apropiadas de calidad. El Estado debe protegerla. Todo este cambio se convierte en apopleja de la Metrología y en rigor de las actividades industriales que empiezan, directores y profesionales deben satisfacer con celo y con variedad respecto a los progresos de las materias que esta I Asamblea ha tratado de pregonar en nuestro país.

Horizonte de recomendaciones y propuestas

Como resumen de las conclusiones que, sin formularse todavía, han flotado en el ambiente, es interesante reproducir las recomendaciones-objetivos que el Director general de Promoción Industrial y Tecnología sometió a la Asamblea:

- a) Complementar la legislación actual refinando las normas existentes y actualizándola en relación con las recomendaciones de la Organización Internacional de Pesar y Medidas y la legislación correspondiente de otros países.
- b) Mejora de los actuales laboratorios dependientes del Ministerio para poseerlos al contenido de las exigencias de la Metrología Legal.
- c) Despejar el estudio de una disseminación económica de unidades y la correspondiente explotación de los laboratorios metrologicos para asistencia y formación de las empresas industriales.
- d) Aumento de las plantillas del personal dedicado a las tareas metrologicas y formación del mismo en las técnicas que exigirá las tareas previstas para un futuro próximo.
- e) Posible apoyo en entidades colaboradoras de la Administración, sujetas a su control, para exceder la acción de las Delegaciones Provinciales del Ministerio de Industria.

ANTE EL I CENTENARIO DEL METRO COMO UNIDAD UNIVERSAL DE MEDIDA

"La balanza comercial de una nación que careciese de calidad
metroológica para sus productos sería de difícil equilibrio"

ABC. Madrid 13 de diciembre 1975.

Los próximos días 15, 16 y 17 la Comisión Nacional de Metrología y Metrogenia, de la Presidencia del Gobierno, celebrará diversos actos para conmemorar el centenario de la Convención de París de 1875, de la cual nació el metro como unidad universal de medida.

Sobre los hitos más importantes de las andaduras del metro desde aquella reunión de París hace ahora un siglo hemos hablado con el doctor Roberto Rivas, vocal-secretario de la citada Comisión Nacional.

La «Convención del metro» —dice— acordó crear y mantener una oficina internacional, conocida por Bureau de Métrique, siendo el primer secretario del Comité Internacional de Pesas y Medidas el general Ildefonso de Ibero, marqués de Muthusén.

A partir de la Convención, el metro no se relacionó con el meridiano terrestre; simplemente era la longitud entre dos tramos de una «reja de platino-iridio» de la cual conserva dos prototipos la Comisión Nacional de Metrología y Metrogenia. Los científicos metrologistas trataron de obtener una mayor precisión y que ésta se conservara a través del tiempo.

El avance tecnológico permitió en el año 1900 (XI Conferencia General de Pesas y Medidas) definir el prototipo internacional de longitud con una precisión del orden cien veces mayor y a base de un patrón natural e indestroctible, fundamentado en un determinado número de longitudes de onda de la radiación correspondiente a una transición del Ispiro de erbio 85. Esta es la definición actualmente vigente.

—¿Cuál es la problemática actual de la metrología?

—La metrología es una ciencia y una técnica que incide en todas las tecnologías. El concepto metroológico de la medida requiere coordinación universal. Se necesita, para ello, un sistema básico de unidades aceptadas por todos los países del mundo. El concepto científico profundo de la metrología se conliga así con el filosófico para lograr el entendimiento humano. Los nuevos descubrimientos de la física nuclear han permitido remplazar gran parte de los patrones de naturaleza mecánica por otros de naturaleza atómica que se rigen por las leyes físicas universales y rigurosas. La creación

actual de los patrones de las unidades básicas del sistema internacional, ya vigente en España desde 1967, no era concebible hace poco más de una década. Como simple ejemplo, diré que con el maser de hidrógeno —patrón de frecuencia— se llega a precisiones del orden de 10^{-11} y a una estabilidad de 10^{-12} para un cierto intervalo de tiempo.

APLICACIONES PRACTICAS

—¿Qué puede decir de la actual aplicación en la industria, en los servicios y en la metrología legal?

—Aquellos países que van a la cabeza

del desarrollo industrial han comprendido perfectamente la importancia de la metrología. Los acontecimientos trascendentes del orden científico de estos últimos años han sido posibles por un desarrollo paralelo de la ciencia y la técnica metroológica. La inexistencia de una estructura y unos laboratorios metroológicos adecuados incide en la calidad y garantía de los bienes producidos. En consecuencia, en los mercados que tienden a ser perfectos por lo tanto competitivos, como ocurre con los supranacionales, la comercialización de toda clase de bienes no sería fácilmente viable. La balanza comercial de una nación que careciese de calidad metroológica para sus productos sería de difícil equilibrio. De otra manera, el desarrollo industrial debe ponderar profundamente cada día con mayor rigor, el criterio cualitativo de la producción. Para lograrla es necesario disponer de una eficiente metrología.—DR. PABLO COE-
LLO

Conclusiones de la I Asamblea Nacional de Metrología

1. Estudio y promulgación de una Ley de Metrología y su correspondiente Reglamento, donde deberán introducirse y adaptarse las distintas Recomendaciones que se han ido produciendo en esta materia por la Comisión Nacional de Metrología y Metrotecnia, de la Presidencia del Gobierno.
2. Creación de un Instituto Nacional de Metrología en España, donde se aborden los problemas de investigación, diseminación y aplicación de la Metrología
3. Potenciar los laboratorios metrológicos estatales, con el fin de convertirlos, si es posible y procede, en laboratorios primarios.
4. Diseminación de las Unidades del Sistema SI, declaradas legales en España.
5. Potenciar la verificación y diseminación de patrones secundarios por parte de los Servicios que correspondan.
6. Abordar por la Universidad y Centros de Enseñanza Superior, los estudios necesarios en materia metrológica.
7. Unificar a nivel nacional el Servicio de Metrología Legal de acuerdo con los criterios internacionales.

Madrid, 18 de diciembre de 1975

Leonardo Villena

Patronato "Juan de la Cierva"

1. El Sistema Internacional de Unidades.

Seguendo los acuerdos de las diferentes Conferencias Generales de Pesas y Medidas y utilizando la terminología oficial se trata de un sistema práctico de unidades de medida que comprende unidades SI básicas, unidades SI derivadas, unidades SI suplementarias, múltiplos y submúltiplos SI y otra serie de unidades que han sido admitidas definitiva o temporalmente para ser usadas juntamente con las auténticas unidades SI, además de las reglas para usar todas ellas. ¿ Que significan, desde el punto de vista de la Física, todos estos nombres?

Se llaman unidades básicas a aquellas que pueden realizarse físicamente con independencia de las demás unidades. La definición de estas unidades básicas debe considerarse como la descripción de una situación experimental, que permanece invariable frente a cualquier reajuste en las otras unidades básicas, aun cuando las utilice para fijar el valor de las magnitudes de influencia (p.e. la temperatura en la definición del metro) o para especificar la propia situación experimental (p.e. la separación entre conductores en la definición del amperio). Pero esas otras unidades, como las palabras, se utilizan sólo como símbolos y si esas unidades cambian, como si cambiara el sentido de una palabra, deberá modificarse adecuadamente la redacción de la definición para que siga describiendo la misma situación experimental.

Cada unidad básica está ligada, en su realización, con un prototipo material o con una cierta constante física. En estos momentos solamente el kilogramo está ligado con un prototipo material, mientras que el metro está ligado con una longitud de onda del Cripton 87, el segundo con un período del Cesio 133, el amperio con la permeabilidad en el vacío, el kelvin con la temperatura termodinámica del punto triple del agua, el mol con el número de átomos del carbono 12 y la candela con la intensidad luminosa del cuerpo negro.

Por el contrario las unidades derivadas son aquellas que se obtienen combinando las unidades básicas mediante operaciones algebraicas, las mismas que ligan entre sí las diferentes magnitudes. Su definición implica, pues, una experiencia física en que no intervienen prototipos ni constantes físicas.

Hay todavía en el Sistema Internacional dos unidades que no han sido clasificadas ni como unidades básicas ni como unidades derivadas y a las que se llaman unidades suplementarias, aunque en realidad se utilizan conjuntamente con las básicas para obtener ciertas unidades derivadas.

Su diferencia fundamental, frente a las unidades básicas, es que no representan experiencias físicas y, desde luego, no están ligadas ni con prototipos ni con constantes físicas. Se les puede considerar como una magnitud con dimensiones o sencillamente como un número puro. Por todo ello pueden ser consideradas indistintamente como unidades básicas o como unidades derivadas.

Es importante subrayar la diferencia que hay entre unidades básicas en Metrología y unidades fundamentales en el Cálculo dimensional.

Recordemos que en Física lo que tratamos es de establecer un modelo matemático con el cual interpretar y predecir los hechos experimentales. Las leyes físicas pueden considerarse como postulados o como definiciones de nuevas magnitudes y expresan una proporcionalidad que permite elegir la unidad de la nueva magnitud independientemente de las unidades de otras magnitudes, ya que en ellas figuran constantes universales o pueden introducirse los parámetros adecuados.

En efecto para comprobar experimentalmente una ley y para usarla en nuestras predicciones es preciso que los símbolos sean sustituidos por números, es decir que cada magnitud venga expresada por una cantidad, lo cual exige haber elegido las unidades correspondientes de tal manera que la ley se transforme en una identidad.

Examinando el sistema de ecuaciones que ligan las magnitudes mecánicas, vemos que aparecen una serie de constantes universales como la gravitación o la de paso entre masa inercial y masa gravitatoria, a cada una de las cuales podemos, a voluntad, hacerla igual a 1 (como en el segundo caso) o mantenerla con un valor numérico, al cual corresponden unas dimensiones. Cada vez que hacemos que una constante universal sea igual a 1 (y por lo tanto que sus dimensiones sean cero) reducimos en una el número de magnitudes fundamentales a partir de las cuales quedan definidas las demás magnitudes. La elección de que constantes universales deben permanecer (y por tanto cuántas serán las unidades fundamentales dimensionalmente hablando), es una cuestión teórica y depende mucho de los criterios conceptuales y estéticos que queramos aplicar al modelo matemático en cuestión.

Al introducir las magnitudes de otras ramas de la Física usamos ecuaciones de paso en las cuales aparecen constantes universales, una para cada rama. De nuevo podemos hacerla igual a 1 con lo cual las nuevas magnitudes son derivadas, o asignarle un valor, en cuyo caso habrá una unidad fundamental eléctrica, una unidad fundamental térmica, etc. De nuevo la decisión depende de consideraciones puramente conceptuales.

Por el contrario la elección de una unidad básica en Metrología implica solamente que, desde un punto de vista pragmático, la definición de la unidad y su realización resulta más práctica y con una incertidumbre menor que las de otras posibles. Y por supuesto ello no implica que sea una unidad dimensionalmente fundamental. Todo ello indica que cualquier crítica o modificación al Sistema SI no debe basarse en consideraciones teóricas, sino simplemente en razones de utilidad práctica. La dependencia

metrológica no significa dependencia dimensional ni viceversa.

Existe aun otro criterio posible en la elección de unidades de base y es tratar de encontrar unidades naturales e introducir en las fórmulas los parámetros necesarias para que éstos se conviertan en identidades. De hecho en físico-química cuántica el metro, el kilo, el segundo y el amperio pueden sustituirse por la masa y la carga del electrón, por la constante de Plank y por la permeabilidad eléctrica en el vacío. Sin embargo, y siempre por las mismas razones pragmáticas a que venimos aludiendo, se ha postpuesto esta elección, conceptualmente muy elegante, por la de las unidades tradicionalmente utilizadas, para cuya realización experimental están preparados los distintos laboratorios de Metrología.

Hay una serie de coincidencias entre unidades de base en Metrología y unidades fundamentales en Cálculo dimensional, como las de longitud, masa y tiempo. Pero como decíamos antes la Metrología exige, además de ser lógica y sistemática, que las unidades básicas tengan cada vez mayor precisión. Esto y no consideraciones dimensionales es lo que determina y determinará la elección de unidades de base.

2. Nombre del Sistema.

Lo primero que se ha discutido en torno al Sistema Internacional de Unidades, ha sido precisamente este nombre. Desde un punto de vista estricto no se puede llamar Sistema de Unidades a aquel que comprende, juntamente con éstas, a sus múltiplos y submúltiplos e incluso otra serie de unidades que están relacionadas de una manera arbitraria con las unidades de partida, como por ejemplo la hora, la milla marina, la atmósfera etc.

Por todo ello se propuso usar la denominación Sistema Internacional de Medidas o Sistema Internacional Expandido de Unidades para este conjunto sistemáticamente organizado que comprende todas las unidades que, de una manera permanente o temporal, han sido admitidas por las sucesivas Conferencias Generales de Pesas y Medidas.

Al principio la propuesta tuvo aceptación, sin embargo el hecho de que la palabra medida tenga varias interpretaciones y que el nombre Sistema Internacional de Unidades tenga ya una gran aceptación, hizo que se desechara cualquier cambio y se mantuviera la designación original, si bien distinguiendo entre unidades SI y prefijos SI con los cuales se obtienen los múltiplos y submúltiplos.

Es cierto que la coherencia del sistema se mantiene solamente entre las unidades SI y sus múltiplos y submúltiplos, no siendo coherentes las otras unidades, admitidas temporal o definitivamente como consecuencia de que su uso está muy extendido. Aquí de nuevo ha triunfado la posición pragmática de la Metrología en el sentido de tratar de unificar criterios no solo entre científicos, sino también entre todos los estamentos de las distintas naciones y procurar que los acuerdos sean finalmente adoptados por todo el mundo, lo cual evidentemente sugiere hacer los menos cambios posibles sobre los acuerdos ya tomados.

3. Metro

Dió nombre al sistema métrico decimal, antecesor del Sistema Internacional de Unidades y fue siempre considerado como la unidad básica por excelencia, derivándose de ella el litro y el kilogramo.

De hecho se quiso referir a alguna unidad natural, haciéndole depender del meridiano terrestre. La realización del metro costó catorce años de trabajo y pasó por el metro de los Archivos hasta desembocar en el prototipo internacional, que reinó desde 1889 hasta 1960. En el interín la industria mecánica había pasado de un montaje y ajuste individual a una producción masiva (que exige que todos los elementos ajusten) y a una miniaturización. Por ello aceptaba en 1800 una precisión de 0,25 mm, pero en 1.900 exigía de 0,01 mm; en 1950 ya era preciso 0,25µm que pasarían en 1970 a 0,01 µm.

Como consecuencia de todo ello fue necesario cambiar la definición ligando el metro a una constante física o unidad natural: la longitud de onda del Cripton 87. Aun cuando la frecuencia de esta radiación se puede calcular exactamente a partir de la constante de Planck, la carga del electrón y las masas del electrón y del protón, la realización experimental tropieza con una serie de dificultades que producen una incertidumbre de 10^{-9} con lo cual, en la práctica, la realización del metro tiene una incertidumbre de 10^{-8} , mayor que la que se obtendría hoy con láser. La tendencia actual es referir el metro al segundo ya que éste se realiza con una incertidumbre de 10^{-12} o 10^{-13} . Por ello ha sido necesario fijar definitivamente el valor de la velocidad de la luz que realmente es invariante, pero cuyo valor estaba sujeto a constantes revisiones y cuyas medidas tenían una incertidumbre de 10^{-6} , que luego pasó a 10^{-9} .

Entonces podemos definir al metro como la longitud recorrida por la luz en un cierto tiempo, aunque parece más elegante definirlo en función de la longitud de onda asociada al Cesio 133. Resulta así pues que el metro, la primera unidad de base, va a pasar, en cierta manera, a depender del segundo, perdiendo su hegemonía. Ello no significa que deje de ser unidad de base.

4. Kilogramo.

El kilogramo es el único patrón material que todavía subsiste y ello es debido a que su comparación con otras masas comporta una incertidumbre de 10^{-8} , mejor que las de cualquier otro procedimiento, hasta ahora propuesto, que ligue la masa con una unidad natural. Las mejoras introducidas por el N.B.S. en la balanza (que ya no es necesario bloquear), en la igualación de la temperatura, en la limpieza del ambiente y en el aislamiento frente a vibraciones, hacen prever que este prototipo se mantendrá todavía por varios años.

Otra singularidad de esta unidad básica es que su nombre utiliza un prefijo y que por tanto la milésima parte de la unidad no es el milikilogramo sino simplemente el gramo. Recientemente se discutió una proposición para rebautizar el kilogramo con un nombre, p.e. klog, de tal manera que esta unidad se manejara como todas las demás. Conceptualmente la proposición era acertada y sin embargo fue rechazada porque desde el punto de vista de la práctica iba a producir numerosas confusiones y solo produciría una satisfacción estética.

Adviértase que habiendo elegido la identidad numérica entre masa inercial y masa gravitatoria ambas pueden derivarse de la magnitud fuerza (es decir peso). Algún día podría dejar de ser unidad básica el kilogramo y sustituirle el newton, ya que éste se define por la constante de la gravedad y la incertidumbre obtenida en la medida de g es cada día menor. (El newton es el peso de una masa de $1/g$ kg)

5. Segundo

La magnitud tiempo es probablemente la primera para la cual han existido unidades. El hombre primitivo tenía a su disposición el día solar, el mes lunar y el año estelar. Desde hace muchos años la Unión Internacional de Astronomía estableció el segundo, ayudada después por la Unión Internacional de Radiociencia la Unión Internacional de Telecomunicación y la Unión Internacional de Física. Este segundo astronómico tenía el inconveniente de referirse al año trópico y de no ser ni una receta realizable en un laboratorio metrológico, ni un prototipo cuidadosamente guardado. Por ello se cambió la definición refiriendo el segundo a la frecuencia del Cesio 133. Así se puede realizar con incertidumbre de 10^{-13} .

Por razones históricas los múltiplos del segundo (minuto, hora, día, mes, año, siglo) no son coherentes, aunque también pueden utilizarse los prefijos SI, como ks. Uno de los problemas creados por estos múltiplos naturales no coherentes es que tampoco son coherentes ciertas unidades derivadas de ellos y de uso extendido como km/h, rad/min, o kw.h (en el caso de este último se ha propuesto una recomendación para sustituirlo por el joule que es la verdadera unidad SI de energía).

6. Amperio

Como ya hemos dicho anteriormente en una ley física se puede mantener la constante de proporcionalidad (con dimensiones) con lo cual, la nueva magnitud tiene dimensiones propias o reducir esta constante a la unidad, con lo cual la nueva magnitud queda enteramente referida a las otras que figuran en la fórmula. Así las magnitudes eléctricas se pueden definir en términos de magnitudes mecánicas. Para evitar confusiones se mantiene una constante con dimensiones, elegida de tal manera que la fuerza y la energía sean medidas con la misma unidad tanto si son mecánicas como eléctricas.

Se podría buscar como unidad natural, la carga de las partículas elementales que normalmente es 0,1 o -1 y usar como medida los números cuánticos. De hecho las nuevas magnitudes utilizadas en Física de partículas elementales como el spin isotópico, la extrañeza, el número barión, etc, sí que se miden en números cuánticos. Pero las medidas normales en Ingeniería eléctrica expresan siempre interacciones electromagnéticas o gravitacionales para los cuales el amperio es una unidad más adecuada.

No es, sin embargo, el amperio la unidad que se diseña sino las unidades eléctricas derivadas para voltaje, resistencia y capacidad que se mantienen mediante patrones materiales. Las comparaciones que se hicieron en 1957 y 1970 comprue-

ban que las desviaciones son extraordinariamente pequeñas y por ello en la práctica son estos valores acordados internacionalmente los que se utilizan.

Existe la tendencia de utilizar el efecto Josephson (unión entre superconductores en helio líquido) que permite ligar el voltaje a una frecuencia excitadora, constante natural medible con gran precisión, cuya realización puede llegar a ser más conveniente y práctica. Entonces el voltio podría sustituir al amperio como unidad básica.

7. Kelvin: En la descripción de los fenómenos térmicos aparecieron dos conceptos muy importantes, el grado de calor o temperatura y la entropía, siendo la primera fácilmente observable y comparable y apareciendo en muchas predicciones termodinámicas. De nuevo podríamos hacer que la temperatura fuera una energía o un número puro, pero como ello llevaría a confusión se llegó a considerarla como unidad básica, con dimensión independiente, de tal manera que la entropía se expresa en julios por kelvin. Así, y gracias a la termodinámica y a la mecánica estadística, se expresan claramente los cambios de energía y las propiedades dinámicas de sistemas con gran número de partículas.

Existe aquí un problema especial para determinar experimentalmente múltiplos del kelvin sin recurrir constantemente a medidas termodinámicas que exigen extrapolar el producto pV para presión cero. Ello exige utilizar el termómetro de gas y medir con gran precisión la densidad del mercurio y el valor de g .

La realización experimental de la temperatura, a partir de la temperatura termodinámica del punto triple del agua, ha sido la Escala Práctica Internacional con una serie de puntos fijos que se comparan con termómetros de resistencia, pirómetros etc.

8. Mol

En Físicoquímica se ha venido especificando la cantidad de los cuerpos que reaccionan mediante el átomo-gramo o la molécula-gramo, ligadas no a la masa, sino a la masa relativa, que es la que cuenta en las reacciones químicas con enormes poblaciones de átomos, iones, moléculas, etc.

Al no poder contar individualmente y con precisión estas grandes poblaciones es preciso recurrir a medios químicos que permiten hacerlo con menor incertidumbre.

Puede decirse que el mol es la definición operacional de la constante de Avogadro, como el número de átomos del carbono 12 que existen en 12 gramos de tal elemento. En las discusiones previas hubo proposiciones para establecer el mol como unidad derivada basada en el kilogramo. Pero se impusieron, de nuevo las razones prácticas, en este caso por parte de la técnica e ingeniería químicas, dejando a un lado las razones puramente teóricas.

La nueva unidad sustituye a los "equivalentes" y "miliequivalentes" usados en química clínica, química inorgánica, electroquímica etc.

3. Candela

Hay una serie de unidades físico-fisiológicas cuyo concepto escapa, en cierta manera, a las leyes físicas. Son aquellas que se necesitan para expresar el efecto que en el cuerpo humano ejerce el sonido (fonio), la luz (lumen) y las radiaciones ionizantes (roentgen). Gracias a ellas se reduce a un solo número el efecto sobre el hombre de una compleja distribución espectral, sea de radiaciones mecánicas o electromagnéticas.

Para poder integrar el lumen dentro de un sistema físico de medidas es preciso fijar con gran precisión el llamado observador patrón fotópico y multiplicar la energía en cada longitud de onda por el factor correspondiente e integrar después en todo el margen visible. Se trata pues de combinar una magnitud física, la distribución de la energía espectral que nos da el flujo de energía para cada longitud de onda, con una curva experimental fisiológica que nos da eficiencia luminosa fotópica de cada longitud de onda sobre el observador patrón. Sin embargo la realidad no es tan simplista como suponer que en la percepción luminosa la retina actúa como un filtro espectral cuya respuesta es integrada por el cerebro. Pero por el momento no hay nada mejor.

De nuevo nos encontramos aquí con una unidad que no es fundamental desde el punto de vista conceptual pero que en un campo restringido, la técnica de iluminación, tiene gran importancia práctica. Lo malo de esta unidad es que su realización experimental tiene una gran incertidumbre, del orden de 10^{-2} , ya que el cuerpo negro se realiza con el platino a temperatura de congelación y esta realización tiene grandes problemas experimentales.

Es pues el único caso en que los patrones secundarios (juegos de lámparas calibradas) tiene una mayor fiabilidad que una nueva realización del patrón primario.

Para evitar esto se trata de fijar uno o varios coeficientes, correspondientes a otros tantos observables patrones, que permiten definir el lumen en términos de energía, con lo que esta unidad perdería realmente su independencia y pasaría a ser unidad derivada.

10. Radian

Si consideramos un espacio isótropo y euclideo, para medir las dos formas elementales que en tal espacio podemos considerar, traslación y rotación, podemos elegir una unidad de longitud y una unidad de ángulo. No existe unidad natural para la longitud pero sí para el ángulo: una rotación completa. Sin embargo se ha preferido utilizar como unidad el radian ya que desde el punto de vista matemático resulta más conveniente.

Observese que la magnitud ángulo puede considerarse como teniendo su propia dimensión, a partir del ángulo suscitado entre dos semirrectas. También puede definirse como un número puro, razón de dos longitudes, arco y radio, siendo entonces un nombre especial del número uno. Es ésto, fundamentalmente, lo que le distingue de las demás unidades básicas y sugiere denominarla de otra manera, unidad suplementaria.

11. Otras posibles unidades básicas o suplementarias.

Existen una serie de magnitudes con dimensión cero (es decir que son números puros), como la permeabilidad relativa o la eficiencia, que vienen presentando el problema de cual es la unidad SI que sirve para medirlas. Para obviar este problema se ha propuesto admitir como unidad básica el número "UNO" que tendría el nombre correspondiente en cada idioma (por ejemplo "UN" en francés, "ONE" en inglés, etc) y como símbolo el uno romano, I, con el cual se podrían utilizar los prefijos obteniendo expresiones como mI, o kI. También podría haber unidades derivadas como por ejemplo uno por segundo (I/s), uno por metro (I/m), etc.

La modificación más importante es que este mismo símbolo se antepondría a todos los símbolos de unidades básicas, suplementarias o derivadas con lo que desaparecerían algunas ambigüedades al escribir kIm^{-1} ó mIm^3 y no km^{-1} o mm^3 que no coinciden con las expresiones primeras.

Existen, por otro lado, una serie de magnitudes cuyos efectos son de tipo logarítmico y para las cuales se han desarrollado unidades apropiadas, p.e., el neper y el bel. El neper usa logaritmos naturales y por lo tanto un neper equivale a la razón e y ha estado siempre asociado a cocientes de amplitud. El bel usa logaritmos decimales y por lo tanto un bel equivale a la razón 10, estando asociado a cocientes de potencias. Se ha propuesto elegir una unidad SI para medir magnitudes logarítmicas, siendo lógico tomar el neper, pero hasta el momento no se ha tomado ninguna decisión dejando libertad para usar ambas unidades. Adviértase, que como en caso del radian, al neper se le puede asignar su propia dimensión o considerarlo un número puro, en cuyo caso es también un nombre especial del número uno. Ello sugiere que, de ser aprobado, figuraría entre las unidades suplementarias.

12. Propuestas para otras unidades.

Los espectroscopistas de Infrarrojo han propuesto establecer una unidad para medir el número de onda o frecuencia espacial, que es el recíproco de la longitud de onda. La unidad SI debería ser m^{-1} pero tradicionalmente se viene usando cm^{-1} (en cualquier caso no resulta claro el uso de prefijos). Por ello se propuso dar a esta unidad derivada el nombre de Hezberg de manera paralela a como se denominó herz al s^{-1} . Sin embargo la proposición no prosperó, aunque se autorizó a los espectroscopistas de infrarrojo a seguir utilizando el cm^{-1} . Cuando se apruebe la unidad UNO quedarán más claro el uso de prefijos p.e. kIm^{-1} .

Adviertase que una misma unidad puede ser utilizada en relación con varias magnitudes pero no al revés. En efecto un evento por segundo (I/s) puede medir distintas magnitudes, para algunas de las cuales se han elegido nombres especiales. Así el herzio que solo debe emplearse para medir frecuencias y el becquerel que debe utilizarse sólo para medir actividades.

Otro problema que se ha suscitado es la incomodidad de que las unidades de superficie y de volumen varíen de cien en cien o de mil en mil. Esto se habría solventado asignando nombres especiales a las unidades derivadas metro cuadrado y metro cúbico, de tal manera que se pudieran utilizar los prefijos SI de una manera normal. De nuevo ha prevalecido el criterio de hacer las mínimas modificaciones, y cuando se apruebe el UNO se podrá escribir KIm^2 ó mIm^3 .

A este respecto se ha recordado que en estos momentos el litro es una unidad que se reproduce y disemina con mucha mayor precisión que el decímetro cúbico, lo que sugiere independizarlo del m^3 y convertirlo en otra unidad básica mediante la introducción de una constante física: la densidad del agua isotópica destilada en condiciones normales de p y T . Pero esto no pasa de ser una proposición.

13. Nuevos prefijos.

Recientemente se han añadido los prefijos peta y exa para indicar los múltiplos $5 \times 3 = 15$ ceros y $6 \times 3 = 18$ ceros, derivados de penta y hexa, mediante la supresión de una letra. Esta derivación proviene de que alguien entendió que el sufijo tera, anteriormente aprobado para $4 \times 3 = 12$ ceros, provenía, por supresión de una letra, de tetra, cuando en realidad deriva del griego teras que significa monstruoso. La equivocación sufrida por algún científico ha permitido establecer una regla para los nuevos múltiplos ya aprobados y probablemente para los que se definan en un futuro. Se pretende elegir prefijos que recuerden a los números griegos 7 y 8 y se está pensando en seta (en lugar de septa, para $7 \times 3 = 21$ ceros) y ata (en lugar de akta, para $8 \times 3 = 24$ ceros).

14. Final

Quiero indicar que toda la información anteriormente vertida es solamente el producto de mi participación durante 9 años en las reuniones de la Comisión de Símbolos, Unidades y Nomenclatura de la Unión Internacional de Física, y durante 5 años en las reuniones del Comité consultivo de unidades del Comité Internacional de Pesas y Medidas.

Espero haber demostrado que la Metrología no es el dilectantismo de añadir cifras decimales a la definición de las unidades ni tampoco la rutina de seguir midiendo con una unidad legal, aun cuando esté deprovista de la precisión experimental requerida por el momento en que vivimos. La Metrología es un servicio inherente al desarrollo industrial y económico de la Humanidad. Prescindiendo de si fue primero el huevo o la gallina, lo

cierto es que los países de economía más desarrollada son los que tienen mejor Metrología Industrial y en los que hay más investigación metrológica.

Se trata pues de expresar de una manera convenientemente lógica e internacionalmente aceptada, los resultados de las medidas físicas para el intercambio de datos, de artículos y de servicios, tarea en la que están empeñadas además de la Conferencia General de Pesas y Medidas, la Unión de Física, juntamente con otras Uniones científicas y con la Organización Internacional de Normalización.

El Sistema Internacional de Unidades del siglo XXI

M^a Dolores del Campo Maldonado

Directora de la División de Magnitudes Mecánicas e Ingeniería

Centro Español de Metrología

Leonardo Villena adelanta en el primer apartado de su artículo el sueño de poder disponer de un sistema internacional de unidades elegante que en el año 1975 era simplemente un sueño. Un sueño que ya habían expresado James Clerk Maxwell en 1870 y Max Planck en 1900 cuando abogaban por unas definiciones de las unidades de medida basadas en constantes de la naturaleza que mantendrían su significado a lo largo del tiempo y para todas las civilizaciones.

El Sistema Internacional de Unidades (SI) fue establecido en 1960 por una resolución de la 11^a Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM) y en la actualidad es utilizado en el mundo entero como el sistema de unidades predilecto y lenguaje fundamental de la ciencia, la tecnología, la industria y el comercio. El SI, a partir de un pequeño grupo de siete unidades básicas, define otra serie de unidades derivadas como producto de estas básicas. El número de estas unidades derivadas puede crecer sin límite atendiendo a las necesidades de la ciencia y tecnología según se vayan desarrollando nuevos campos.

El SI ha sido desde sus inicios un sistema dinámico que ha evolucionado con los avances de la ciencia y la técnica. En el momento de la celebración de esta 1^a Asamblea Nacional de Metrología, no se tenía conciencia de que la primera revolución cuántica y el uso de las tecnologías láser iban a iniciar un cambio irreversible en cómo se concebía la metrología en ese momento.

La 17^a CGPM en 1983 adoptó la definición del metro como la distancia recorrida por la luz en el vacío en un tiempo de $1/299\,792\,458$ segundos. El valor que figura en el denominador de esta expresión era precisamente la velocidad de la luz en el vacío, c , de esta forma el metro fue la prime-

ra unidad en basar su definición en una constante de la naturaleza. Los sueños de Maxwell y Plank comenzaban a cumplirse. Esta definición vino impulsada por la invención del láser a finales de los años 50 del siglo pasado, la posibilidad de utilizar una luz monocromática, colimada y coherente permitió mejorar, unos dos órdenes de magnitud, la incertidumbre de realización del metro mediante lámparas de kriptón como fuente de radiación, que a su vez ya había mejorado unos tres órdenes de magnitud las incertidumbres de realización del prototipo internacional (barra de platino iridiado).

En los años 80 del siglo pasado, el uso de los efectos Josephson y Hall cuántico supusieron un cambio de paradigma en la metrología eléctrica y permitieron realizar de forma indirecta el amperio (usando la Ley de Ohm) con incertidumbres hasta diez veces mejores que las que se conseguían en ese momento mediante la realización directa usando la balanza de potencia. Para poder implementar esta realización indirecta del amperio, el Comité Internacional de Pesas y Medidas en 1990 asignó unos valores convencionales a las constantes de Josephson y von Klitzing lo que llevó, en la práctica, a crear un sistema de unidades eléctricas al margen del SI, las unidades eléctricas convencionales, con unas diferencias conocidas con respecto al SI.

Este panorama de avances científicos junto con las derivas significativas que se estaban observando entre las masas de los prototipos nacionales del kilogramo y la del prototipo internacional pavimentaron el camino para que la CGPM en 2011 animase a los institutos nacionales de metrología a investigar para poder llevar a cabo una revisión del SI que cambiase definitivamente su concepción.

Tras varios años de investigación internacional colaborativa de muchos institutos nacionales de metrología, en 2018 se dieron las condiciones para que la 26ª CGPM en su reunión de 2018 aprobase el nuevo SI que define las unidades básicas fijando los valores de varias constantes fundamentales. De esta forma la realización de las unidades y su exactitud sólo dependerá de los avances tecnológicos y de la estructura cuántica de la naturaleza, no de la propia definición.

El actual SI representa una nueva manera de formular las definiciones de unidades en general, y las de las siete unidades básicas en particular. Entre las constantes elegidas se encuentran dos constantes fundamentales de la naturaleza: la constante de Planck y la velocidad de la luz, de esta forma las propias unidades del SI representan nuestra comprensión actual de las leyes de la física. Por primera vez, las unidades básicas no se definen en función de ningún artefacto ni de ninguna propiedad de la materia sino que entroncan con nuestro conocimiento de la naturaleza, este es un avance sin precedentes desde la firma de la Convención del Metro en 1875.

Pero este no es el fin del SI, nuevos retos a corto plazo nos esperan. El primero, la nueva definición del segundo. La segunda revolución cuántica ha impulsado el desarrollo de los relojes ópticos cuyo principio de funcionamiento se basa en el uso de frecuencias en el rango óptico, consiguiendo mejoras en las incertidumbres de medida varios órdenes de magnitud mejores que las obtenidas con los relojes de cesio. En esta carrera a la nueva definición del segundo, el año 2030 es la meta. Se espera que para esa fecha se haya podido elaborar una propuesta que la 29ª CGPM esté en disposición de aprobar. Para ello muchos institutos nacionales de metrología están trabajando en el desarrollo de sus relojes ópticos. España, en esta carrera no se quiere quedar atrás y tanto el Real Instituto y Observatorio de la Armada como el Centro Español de Metrología están trabajando en sendos desarrollos complementarios.

Pero el segundo no es el único reto que tiene el SI por delante, la candela cuántica, a pesar de ser aún un proyecto futuro, puede convertirse en realidad gracias al desarrollo de las fuentes de fotones únicos.

En conclusión, en estos últimos cincuenta años los cambios científicos y tecnológicos han permitido cumplir los sueños de los grandes científicos del siglo XIX, pero el SI es un sistema vivo que como el propio lenguaje evoluciona y se adapta a las necesidades de todos aquellos que lo utilizamos y seguirá evolucionando y perfeccionándose en el futuro.

FUTURO DE LA DISTRIBUCIÓN DE TIEMPO Y FRECUENCIAS EN ESPAÑA

A. Orte

La actual Comunicación tiene como antecedentes:

- i) Una charla anterior (Junio 1974) dedicada a presentar la escala de Tiempo Universal Coordinado que se mantiene en el Instituto y Observatorio de Marina, UTC(DMF).
- ii) La experiencia metroológica adquirida en la conservación, difusión y aplicaciones de la escala citada, y ...
- iii) Un proyecto expuesto mas recientemente (Julio 1975) ante los miembros de la Comisión Nacional de Metrología y Metrotecnia sobre "Metrología Nacional del Tiempo (Hora y Frecuencias)".

En las ocasiones mencionadas en i) y iii) se llegaba a las conclusiones siguientes:

I) La generación en forma continua de la unidad de tiempo SI (múltiplos y submúltiplos) mas conveniente para los usos metroológicos nacionales de primer orden, consiste en la realización de una escala de Tiempo Universal Coordinado apoyada en un grupo de relojes que funcionen de acuerdo con la definición del segundo (relojes atómicos).

II) La difusión de la hora y de las frecuencias asociadas a la unidad SI al máximo de la precisión alcanzable, mas adecuada a las necesidades nacionales, es la que se realiza utilizando una serie de laboratorios, oficiales y privados, dotados de una instrumentación cronográfica relativamente simple y de uno o varios relojes atómicos convenientemente estudiados con relación a la citada escala de Tiempo Universal Coordinado.

III) Para la distribución de la hora y de las frecuencias de precisión nos vemos obligados en la actualidad a prescindir de los sistemas tradicionales de "emisiones horarias" y "emisiones de frecuencias patrón", sustituyéndolos por el actual concepto de "comparación a distancia de los relojes". En esta comparación se usarán las técnicas hoy recomendadas.

En la presente Comunicación me limitaré a describir los esquemas y sus instrumentos básicos necesarios para la realización de las ideas anteriores y a dar a conocer algunos de los resultados que se han obtenido últimamente con la colaboración de determinados laboratorios.

El Laboratorio Patrón y su escala de Tiempo Universal Coordinado

El laboratorio patrón está concebido para obtener, mediante un número suficiente de relojes atómicos propios, a los que se podrá añadir información sobre una selección de relojes alejados, una escala nacional de Tiempo Universal Coordinado (UTC_L), controlada permanentemente por el Tiempo Atómico Internacional (TAI).

Recordemos que el Tiempo Universal Coordinado no es sino el propio Tiempo Atómico Internacional atrasado un número conocido de segundos. Para el metrologo hablar de Tiempo Atómico Internacional y de Tiempo Universal Coordinado es equivalente ya que está constantemente informado del número de segundos en que estos tiempos difieren. Sin embargo el término Tiempo Universal Coordinado tiene la ventaja de que al indicar "coordinación" invita a los laboratorios particulares a conseguir que algunas de sus escalas naturales o sintéticas se ajusten en el mayor grado posible a ese Tiempo Universal Coordinado definido internacionalmente. Este es el origen de la denominación de las distintas escalas UTC locales que presentaré en esta Comunicación. Recordemos también que el Tiempo Universal Coordinado ha sido recomendado por la XV Conferencia General de Pesas y Medidas para que con ayuda del sistema de husos horarios sea la base de la hora legal de los distintos países. Esto exige que cada país conserve una "réplique" adecuada del UTC, destinada a hacer el papel de referencia nacional.

En general todo reloj considerado individualmente se aparta en algún grado de la definición correcta del segundo. En los relojes atómicos comerciales la definición del segundo suele estar garantizada dentro del orden 10^{-11} . Las faltas de regularidad a corto y medio plazo suelen también caer dentro de este mismo orden.

Se precisa por tanto para la definición del UTC_L propio o local, con

binar la información obtenida mediante las comparaciones de todos los relojes para obtener un reloj promedio que aproveche las mejores propiedades que presentan los relojes individuales. El criterio a seguir resulta del estudio sistemático del comportamiento de los relojes con relación al TAI y se materializa en un modelo matemático que los sintetiza.

El laboratorio patrón contará según esto con los medios suficientes para la continua intercomparación de todos sus osciladores. Si el intercomparador tiene capacidad de cálculo o va unido a un computador que realice la síntesis prevista, su salida servirá para la materialización del reloj UTC_L.

Visto lo anterior pasemos a describir (Fig. 1) un laboratorio patrón.

A, B, C y D son los distintos relojes del laboratorio funcionando con la estabilidad a medio y largo plazo ya mencionada. Uno de ellos D será susceptible de ser utilizado como reloj portátil.

Los relojes se comparan constantemente con el COMPARADOR. Las comparaciones se combinan linealmente de acuerdo con un sistema de coeficientes obtenidos prácticamente. El resultado de la combinación define como he indicado el UTC_L.

También se compara a los relojes locales la información recibida por vía radioeléctrica de uno o varios relojes alejados. Esta información experimenta una puesta en forma en un instrumento adecuado (SINCRONIZACION EXTERIOR) antes de entrar en el COMPARADOR. Normalmente la información exterior procede de otro laboratorio vía TV o bien de los propios relojes que gobiernan las emisiones Omega ó Loren-C vía dichas emisiones.

La figura supone que el propio comparador realiza los cálculos necesarios proporcionando finalmente las siguientes diferencias:

$$UTC_L - \text{Loren C}, \quad UTC_L - A, \quad UTC_L - B \dots UTC_L - D$$

Estos valores se combinarán nuevamente en un organismo central, el Bureau International de l'Heure (BIH) con los datos procedentes de todos los laboratorios asociados. El BIH informa finalmente sobre las diferencias

$$UTC - UTC_L \quad TAI - A \quad TAI - B \dots$$

que permite referir al TAI cualquier medida hecha con uno de los relojes individuales o con el reloj sintético UTC_L.

No se describe al detalle la instrumentación que corresponde a un laboratorio patrón ya que ello entra dentro de la Comunicación de J. Benavente.

En la figura 2 siguiente se exhiben las curvas obtenidas en los últimos meses del funcionamiento de una muestra de distintas escalas UTC_L. Corresponden a los laboratorios:

USNO	-	Observatorio Naval de Washington	27	relojes
NBS	-	National Bureau of Standards de Washington	8	"	
DHI	-	Instituto Hidrográfico de Hamburgo	1	"
ROO	-	Observatorio de Greenwich	6	"
IEN	-	Instituto Electrónico Nacional de Turin	..	4	"
ON	-	Observatorio de Neuchâtel	4	"
OMSF	-	Observatorio de Marina de San Fernando	...	3	"

La estabilidad de las frecuencias de las escalas representadas con relación al TAI es del orden de 10^{-12} . Los errores de definición de los UTC_L son inferiores generalmente a algunos microsegundos. Estos errores que se cometen con uno o dos meses de retraso podrán aplicarse finalmente como una corrección a las medidas de tiempo y servirán para calcular las correcciones de segundo orden a aplicar a las frecuencias medidas en cada laboratorio.

Los laboratorios que usan o redistribuyen tiempos y frecuencias de precisión.

Las propiedades metroológicas del UTC_{OMSF} inherentes a la curva OMSF de la figura, que se obtuvo a partir de los relojes localizados en San Fernando se pueden refinar aún más y asegurar al mayor plazo posible, añadiendo a los relojes locales los datos procedentes de comparaciones de relojes situados en otro u otros laboratorios.

También se pueden transferir dichas propiedades a aquellos laboratorios que realizan en su propio beneficio o en beneficio público metrología de precisión tiempo-frecuencias.

A continuación (Fig. 3) se proponen algunos esquemas de la instrumentación que se considera necesaria según las precisiones a conseguir. Existen, naturalmente, otras combinaciones de instrumentos que pueden conducir al mismo resultado.

Veamos a continuación un ejemplo práctico de transferencia recíproca de datos entre un laboratorio del primer tipo INTA S23(MD) y el Observatorio de Marina.

Las curvas representadas en la figura 4 (correspondientes a los mismos meses considerados anteriormente), muestran el estudio del reloj atómico de INTA S23(MD) y los patrones UTC de Washington y San Fernando respectivamente.

Los puntos θ corresponden a transportes de hora desde Washington. La separación entre las curvas representadas irá reduciéndose ligeramente a medida que se prograse en los métodos de sincronización a distancia y que se consiga aumentar el número de relojes que intervienen en el UTC_{OMSF}. Un término constante de 2,0 microsegundos existente entre los datos de los observatorios europeos y los americanos se aplicará dentro de poco a una de las curvas.

En la figura 5 se representa un caso de transferencia de datos vía transmisiones continuas de V.F a un buen reloj de cuarzo; el que utiliza para la conservación de la hora la estación de seguimiento de Satélites instalada en las proximidades del Observatorio de Marina.

Se trata de una transferencia de hora del Observatorio Naval de Washington vía la estación NSS situada en el canal de Panamá.

Como referencia se incluye la curva "UTC(OMSF) - Reloj" obtenida de comparaciones por línea directa al Observatorio, comprobadas mediante transportes de hora.

Se observa en las curvas que para compensar el efecto de la deriva de frecuencias del cristal de cuarzo éste se corrige periódicamente. El objeto de este reloj es conocer la hora para la observación fotográfica de satélites artificiales, dentro de algunas decenas de microsegundo cosa que se consigue con creces.

Dispositivo de comparación entre laboratorios

Como ya se ha indicado bajo el punto de vista de la metrología moderna y de las exigencias del usuario científico, se excluye la distribución realizada clásicamente por medio de las emisiones horarias y de frecuencias patrón.

Desde el momento en que se dispuso de relojes atómicos garantizados dentro del error relativo 10^{-11} , el físico puede, dentro de estos límites, confiar sus medidas a su propio reloj con mayor seguridad que la que le pueda producir el antiguo método de "calibrado" de tiempos y frecuencias con ayuda de emisiones horarias controladas por "laboratorios especializados".

Como acabo de señalar sobre resultados experimentales existe en la actualidad la posibilidad de ir conociendo de una forma continua cual es el comportamiento en tiempos y en frecuencias de los patrones de un laboratorio con relación a patrones alejados e incluso a un conjunto de patrones nacionales o internacionales.

En consecuencia se propone un esquema, adecuado a la metrología del tiempo y frecuencias en España basado en el concepto de la comparación continua de distintos laboratorios pertenecientes a una supuesta red metrológica nacional. Para ello tanto al laboratorio que produce el UTC_L para uso nacional como a los que usan o redistribuyen tiempos-frecuencias con precisión, se les ha supuesto equipados con los sistemas actuales de comparación continua a distancia. Estos sistemas pueden ser (por el momento):

- 1) Sistemas continuos de recepciones Loren-C.
- 2) " " " " " sincronización TV.
- 3) " " " " " recepciones A.
- 4) " " " " " " GL.

Anteriormente se han puesto ejemplos de algunos resultados de los sistemas 1) y 4). Se ha incluido el caso de las emisiones de frecuencias patrón en Onda Larga, pertenecientes a las emisiones clásicas de frecuencias, ya que si se estudian estas de una forma continua mediante un sistema de seguimiento de fase resulta una aplicación de la técnica de "comparación

continuo". Del resto de las posibilidades existentes para interconexión de osciladores alejados, incluidas las que aún no han sido del todo experimentadas, hará mención en su Comunicación J. Benavente.

Para el conocimiento de los retardos que producen los distintos sistemas de sincronización enumerados, se propone el método del reloj atómico portátil.

En Junio de 1975 tuvo lugar una primera experiencia de transporte de la hora de San Fernando mediante reloj de rubidio portátil. Aparte del interés científico de la experiencia, ella nos permitió reanudar o iniciar, según los casos, contactos personales con nuestros colegas de Madrid y comprobar las excelentes posibilidades humanas y de material con que ya se dispone para iniciar en España un sistema de distribución de tiempos y frecuencias de acuerdo con las necesidades de la metrología moderna así como de comprobar una vez más que en la Metrología tiempo-frecuencias, con más motivo que en el resto de las empresas colectivas, lo más importante es la coordinación. Es el camino sincronizado.

FIGURA 1

LABORATORIO PATRON : ESCALA UTC_{local}

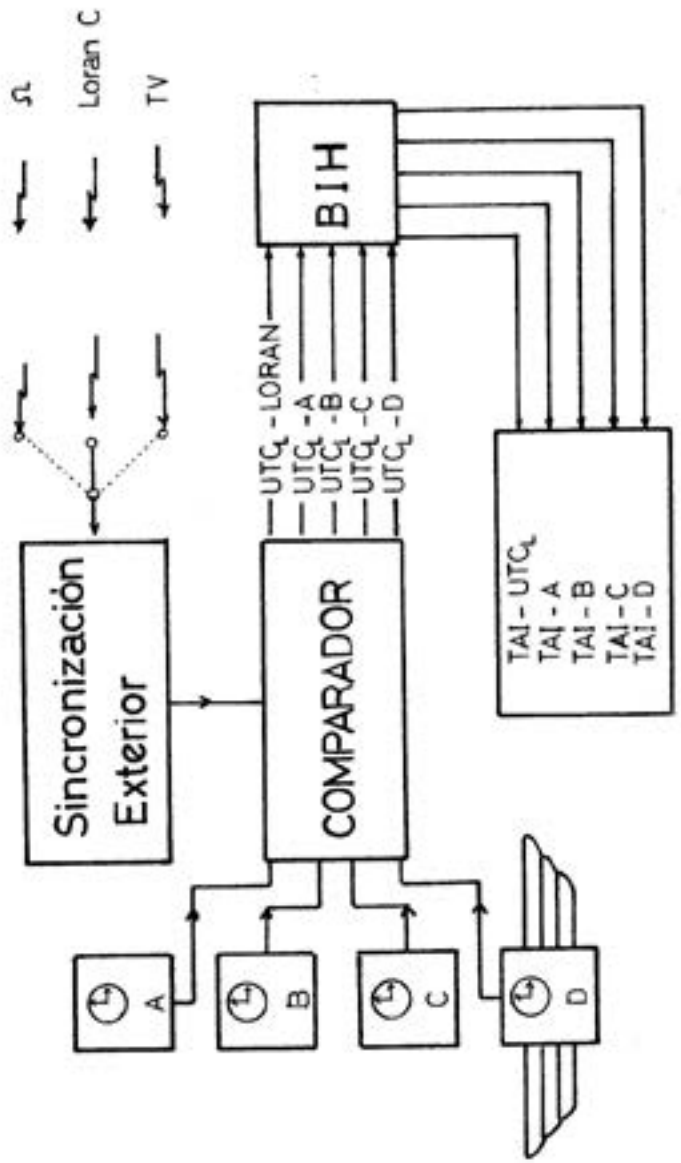


FIGURA 2

UTC - UTC local

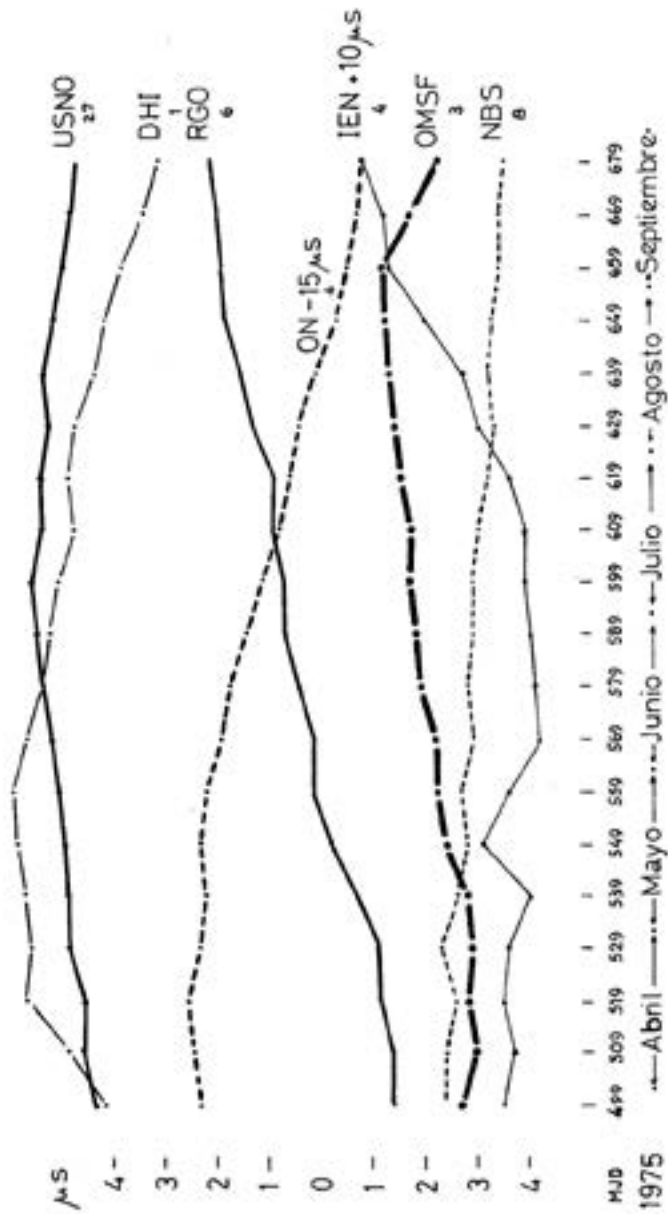


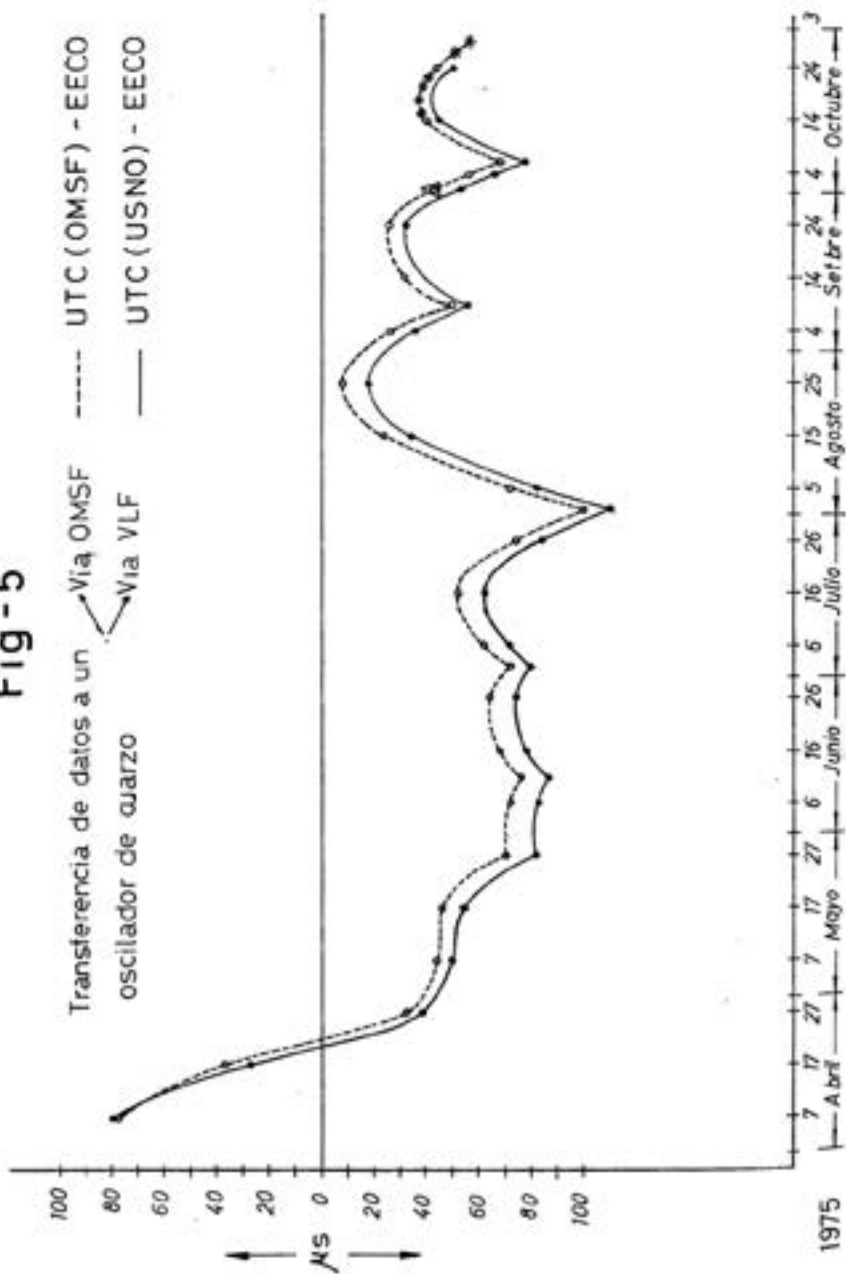
FIGURA 3

DISTRIBUCION NACIONAL DE TIEMPO Y FRECUENCIAS
LABORATORIOS COLABORADORES

Precisión mínima		Equipo básico mínimo
10^{-11}	$1 \mu s$	Cs + Cs + Qz Cs + Rb + Qz
10^{-10}	$10 \mu s$	Cs* Rb* Qz + Qz
		LORAN C (r) TV (r)
		LORAN C TV Ω OL (r)

* Instrumento compacto
(r) Registro continuo

Fig - 5



La metrología de tiempo en el Real Instituto y Observatorio de la Armada

Héctor Esteban Pinillos

Jefe de la Sección de Hora

Real Instituto y Observatorio de la Armada

Responsabilidad nacional del mantenimiento y custodia de la hora

Mediante Decreto 3852/1970 de 31 de diciembre, de reorganización del Instituto y Observatorio de Marina, se asigna al Observatorio la responsabilidad de la determinación, mantenimiento y difusión de las escalas de tiempo físico y astronómico, de acuerdo con los requisitos internacionales. Para cumplir con la citada misión, el Observatorio organizó sus medios materiales y de personal para dar respuesta a su responsabilidad como referencia nacional de la hora, creándose la nueva Sección de Hora el 9 de marzo de 1971.

Desde entonces, las necesidades de tiempo y frecuencia no han parado de ser cada vez más y más exigentes. No hay aspecto tecnológico que no dependa del tiempo o la frecuencia precisos. Cuando se crea la Sección de Hora, la escala de tiempo que mantenía el Observatorio permanecía sincronizada dentro de $\pm 100 \mu\text{s}$ a UTC con una precisión en la definición de la frecuencia mejor de 10^{-9} en términos relativos. Durante los últimos diez años la realización práctica de UTC en el Observatorio, UTC(ROA), ha permanecido sincronizada dentro de $\pm 10 \text{ ns}$, con una precisión en la definición de la frecuencia mejor de 10^{-14} en términos relativos, es decir, en estos 50 años la sincronización y la frecuencia (en términos relativos) han mejorado en cuatro y cinco órdenes de magnitud, respectivamente. A pesar de la sensible progresión experimentada en este medio siglo, los parámetros metroológicos actuales van a quedar igualmente superados en un futuro muy próximo, con la implementación en el Centro del nuevo reloj óptico de laboratorio.

Mediante R.D. 2781/1976, de 30 de octubre, la escala de «tiempo universal coordinado», mantenida por el Instituto y Observatorio de Marina, pasó a considerarse como base nacional de la Hora Legal en España. Este real decreto quedó derogado por el R.D. 1308/1992, de 23 de octubre, por el que se declara al Laboratorio del Real Instituto y Observatorio de la Armada como laboratorio depositario del Patrón Nacional de Tiempo y laboratorio asociado al Centro Español de Metrología (CEM).

En la actualidad, la responsabilidad del Observatorio ha quedado elevada al rango de Ley (Ley 32/2014, de Metrología, de 23 de diciembre), lo cual se ha considerado un espaldarazo a la labor tradicionalmente desempeñada por el Centro, pues esto no ha ocurrido con ninguna otra magnitud física, cuyo patrón se declara mediante un real decreto.

Escala de tiempo UTC(ROA)

UTC(ROA) es la realización práctica y en tiempo real de la escala de Tiempo Universal Coordinado (UTC) en el Real Observatorio de la Armada.

Esta escala está basada en la media ponderada de los relojes que contribuyen en su realización. Para ello, el Observatorio cuenta con dos máseres de hidrógeno activos y cinco patrones de haz de cesio, a los que se suma un sexto ubicado en las instalaciones del CEM en Tres Cantos, y que se utiliza como base de frecuencia en la realización de la unidad de longitud del SI de unidades, el metro.

La ponderación de los relojes que contribuyen a la realización de UTC(ROA) se efectúa en base a criterios de estabilidad de cada reloj para tiempos de integración de 20 días y sobre la base de datos correspondientes a los últimos 3 meses. Previamente, se aplica una técnica de desacoplo de “ruido” para estimar la inestabilidad asociada a cada reloj a partir de la información relacionada con parejas de relojes. La estabilidad se estima en términos de la desviación de Allan.

Evaluada la inestabilidad individual asociada a cada reloj, se calcula la ponderación óptima, solamente alterada por la inclusión de un criterio

de “peso límite” que impida la excesiva dependencia de un determinado reloj.

La escala UTC(ROA) cuenta asimismo con mecanismos de detección de anomalías y rechazo de relojes en caso de un mal comportamiento metroológico, así como con mecanismos de compensación y eliminación de los saltos de fase derivados de la inclusión de un nuevo reloj en la escala, o la extracción de un reloj de ésta (ya sea intencionadamente o no).

El disciplinado de la escala se lleva a cabo a partir de los datos de la Circular T que publica periódicamente la Oficina Internacional de Pesas y Medidas (BIPM), y que contiene los datos de diferencia de fase entre UTC y UTC(ROA) del mes anterior. También se utilizan los datos de la UTC rápida (UTC_r), con una periodicidad semanal. En la actualidad, la diferencia entre UTC y UTC(ROA) permanece dentro de ± 5 ns (lo recomendado internacionalmente es mantenerse dentro de ± 100 ns), con una estabilidad en frecuencia, en términos de desviación de Allan, mejor de 2×10^{-15} para un tiempo de integración de cinco días.

Diseminación y transferencia de tiempo y frecuencia

Junto a la realización y mantenimiento de la escala de tiempo, su diseminación y comparación internacional constituyen unas de las tareas más relevantes a realizar por un laboratorio primario de tiempo y frecuencia.

Cabe reseñar, que la intercomparación a escala mundial llegó a principios de los 80, con la aparición del sistema GPS. Este sistema, además de proporcionar una notable mejoría en la precisión respecto de los sistemas anteriores (sistema OMEGA, el sistema LORAN-C, etc.) proporcionó una cobertura a nivel global. Este hito fue rápidamente aprovechado por el BIPM para mejorar y ampliar sus enlaces internacionales, mediante la observación sistemática de satélites GPS.

La estabilidad de UTC se mantiene mediante el procesado de los datos procedentes de los diferentes laboratorios nacionales de tiempo, y su exactitud está sujeta al desarrollo de la tecnología de los relojes atómicos. Actualmente, la estabilidad de esta escala está limitada no por la estabilidad

de los nuevos patrones atómicos, sino más bien, por las limitaciones inherentes a los sistemas de transferencia actuales.

El ROA participa activamente en la intercomparación de su escala de tiempo con los laboratorios de tiempo del resto del mundo, contribuyendo con sus relojes en la generación de UTC. Para esta tarea cuenta con varios receptores de los sistemas globales de navegación por satélite (GNSS), específicos de tiempo, y con una estación VSAT y Módem de ensanchamiento de espectro para transferencia de señal a través de satélites geostacionarios.

Sistemas GNSS

Entre las técnicas de comparación a nivel global siguen destacando por su precisión, universalidad y bajo coste las técnicas de transferencia basadas en el sistema GNSS (GPS, GLONASS, BeiDou y Galileo), como son la de vista común CV (Common-View), mono y multicanal, la técnica todos a la vista AV (All-in-View) y la de doble frecuencia en código y fase de portadora PPP (Posicionamiento Preciso de Punto), mediante la utilización de receptores geodésicos.

La precisión de esta última técnica para cada época de observación está por debajo de los 100 ps, proporcionando transferencia de frecuencia con incertidumbres de 1×10^{-15} , para tiempos promedio de un día. La exactitud, no obstante, viene determinada por los resultados de las calibraciones de estos sistemas y por el ruido en código de las señales GNSS, estimándose en uno o unos pocos nanosegundos.

Sistema TWSTFT

Otra técnica que representa el estado del arte en lo que respecta a exactitud en transferencia de tiempo (por debajo de 1 ns) y que es casi equiparable en estabilidad en frecuencia a la técnica PPP, en partes por 10^{-15} para tiempos promedio de 1 día, es el sistema de doble encaminamiento o dos vías (TWSTFT), basado en la observación de satélites de comunicacio-

nes geostacionarios. Este sistema tiene sin embargo una serie de inconvenientes que restringen su uso, como son el elevado coste que conlleva la utilización de estos satélites y la imposibilidad de efectuar transferencias simultáneas entre varias estaciones.

Transferencia de tiempo y frecuencia mediante fibra óptica

El desarrollo de los nuevos relojes de tipo óptico ha llevado consigo una evolución paralela de métodos alternativos de comparación, basados en fibra óptica, con mayor precisión, sin estar sujetos a los efectos atmosféricos y pérdidas de rendimiento en la sincronización, y resultando ser menos vulnerables ante interferencias y suplantaciones de la señal.

Por tanto, es necesario conseguir una transferencia de tiempo y frecuencia adecuada que permita comparar y explotar todas las capacidades que puede llegar a ofrecer un entramado de relojes ópticos operando a largas distancias. Atendiendo al criterio del nivel de ruido de fase del enlace/señal propagada (SNR), la fibra óptica como medio de transmisión es un buen candidato, ya que está bien aislado respecto a cualquier interferencia electromagnética externa, posee un gran ancho de banda y presenta bajas pérdidas. Todo ello se traduce en una mayor capacidad de transmisión de datos y un mayor alcance. Asimismo, la fibra óptica puede ser un canal de transmisión bidireccional lo que permite la transmisión simultánea de diferentes longitudes de onda por una misma fibra óptica, mediante la técnica de multiplexación por división de longitud de onda (DWDM), en ambos sentidos, eliminando así asimetrías en las comparaciones.

A este respecto, el ROA se encuentra desarrollando el proyecto SASFO (Solución Avanzada de Sincronismo mediante Fibra Óptica) que tiene como objetivos principales el estudio, desarrollo y optimización de la transferencia de tiempo y frecuencia en un enlace de fibra óptica de larga distancia. En concreto, se pretende llevar a cabo la distribución de tiempo mediante nodos de White Rabbit mediante tecnología DWDM y realizar la transferencia de una frecuencia ultraestable con optimización del enlace mediante cancelación activa del ruido de fase. Para ello se propone la implementación en local de este método de transferencia y que, a su vez,

sea susceptible de desplegarse en un futuro sobre redes de comunicaciones convencionales ya existentes.

Mediante este sistema se esperan obtener estabilidades de unos pocos picosegundos en la transferencia de tiempo mediante protocolo White Rabbit, y una estabilidad relativa en la transferencia de frecuencias ópticas del orden de 1×10^{-16} para tiempos cortos de integración.

Desarrollo de un reloj óptico

La búsqueda de incertidumbres cada vez más bajas ha conllevado la exploración de transiciones cada vez más energéticas, en el rango óptico del espectro electromagnético (entre diez mil y cien mil veces superiores a las de microondas) en donde el láser se ha convertido en el nuevo oscilador interno de interrogación.

Los últimos avances en las técnicas de enfriamiento láser, así como la aparición de los peines de frecuencias en las décadas anteriores, han permitido la investigación y desarrollo de estos patrones de frecuencias ópticas. A día de la fecha, estos han llegado a demostrar estabilidades y exactitudes relativas sin precedentes, del orden de 10^{-16} y 10^{-18} a 1 s, respectivamente, es decir, cien veces mejores que los actuales patrones primarios de microondas.

Desde finales de 2019 el ROA está afrontando el gran reto de diseñar y desarrollar a medio plazo sus propios patrones ópticos, mediante el proyecto para la Construcción e Implementación de un Reloj de red Óptica de Estroncio (CIROEs). Este trascendental hito, posibilitará el establecimiento de un núcleo español de desarrollo de patrones ópticos, con el que mantenerse en el estado del arte en tecnologías vinculadas a la metrología cuántica de tiempo y frecuencia.

"LA METROLOGIA DE LONGITUDES EN EL INSTITUTO DE OPTICA"

por Joaquín Montilla Gómez

Instituto de Óptica.

Describiremos sucintamente las instalaciones y los métodos que utilizamos, como rutina, en la Sección de Óptica Física de este Instituto, con las que tratamos de cubrir las necesidades metroológicas de longitudes en nuestro país, utilizando las técnicas de la Óptica Física; es decir, comparando la longitud problema con una longitud de onda de una radiación patrón.

Referimos las instalaciones que están en funcionamiento y que podemos llamar ya clásicas. Otras instalaciones y métodos originales que hemos desarrollado puede el lector hallarlos descritos en las referencias que damos al final.

Medida de láminas delgadas por elipsometría

La elipsometría es una técnica conveniente y precisa para la determinación del espesor e índice de refracción de láminas muy delgadas depositadas sobre superficies, y para la medida de las constantes ópticas de superficies reflectantes. El límite inferior del espesor de la lámina que puede ser medido por estos métodos es al menos de un décimo de los que pueden ser medidos por los métodos de interferometría de dos ondas.

Estas técnicas elipsométricas utilizan las medidas de los cambios en el estado de polarización de la luz por su reflexión en la superficie en estudio, aplicando la solución exacta de las ecuaciones algebraicas de Drude.

En las determinaciones, y aparte de la longitud de onda de la fuente que ilumina la muestra, juegan tres parámetros: el ángulo de incidencia, el ángulo de acimut y la relación de intensidades de los ejes de la elipse de la luz que, después de su reflexión, se comporta en general como elíptica mente polarizada.

Las observaciones se realizan en un goniómetro de polarización y sus lecturas se tratan por medio de un ordenador, ya que el hallar la solución exacta del sistema de ecuaciones implicado resulta extraordinariamente laborioso; máxime cuando se hacen series de determinaciones de rutina.

El rango de medidas que estos métodos puede cubrir vá desde 0.01 nm hasta unos 300 nm, dependiendo del índice de refracción de la sustancia. Pudiéndose tomar como precisión de las determinaciones de 0.01 nm.

Medida de películas delgadas por interferometría

Los métodos interferenciales de múltiples reflexiones que pueden ser aplicados simple y directamente a la determinación del espesor de depósitos metálicos, o al estudio de la topografía de la superficie, y cuya precisión es la más alta que hasta ahora se ha podido obtener por métodos ópticos

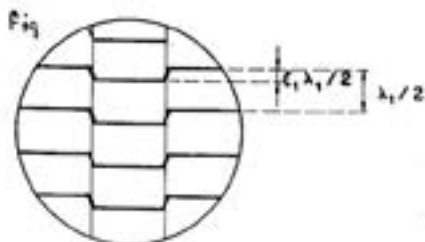
son las franjas de espesor constante (Franjas de Fizeau).

Estos métodos desarrollados en una gran parte por Tolansky usan las interferencias producidas entre dos láminas reflectantes cuando se encuentran en estrecha proximidad.

Franjas de espesor constante

Cuando entre dos láminas transparentes y revestidas de películas altamente reflejantes se forma una cuña de aire de muy poco espesor y se observa iluminada con luz monocromática aparecen franjas de interferencia, que, si las superficies son ópticamente planas, serán finas líneas oscuras, paralelas y equidistantes. Cualquier irregularidad en el estado de planeidad de la superficie se traducirá en una deformación de las franjas. La interpretación de la topografía es inmediata si consideramos que el sistema de franjas equivale a curvas de nivel de los espesores del aire comprendido entre las láminas, siendo la diferencia de altura entre dos franjas consecutivas $\lambda/2$ de la luz monocromática usada.

Un escalón en una de las superficies se traducirá en un desplazamiento de una parte de sistema respecto de la otra parte (fig. 1).



Según esto si queremos determinar el espesor de un depósito, lo que hemos de medir es el escalón en el borde de él. Para que el factor de reflexión sea igual en la zona con depósito y en la libre, y para igualar la diferencia del cambio de fase que produciría al ser de distintas sustancias ambas zonas, se impone recubrir la zona del escalón con depósito uniforme metálico (plata, aluminio, etc.) de manera que, conservandose el relieve, la superficie sea homogénea.

Normalmente las observaciones se realizan a través de un microscopio de pocos aumentos.

La fuente de luz monocromática puede ser una lámpara espectral de sodio, o mercurio a baja presión y un filtro interferencial. Un condensador focaliza ésta sobre un pequeño diafragma que conviene que sea lo más estrecho posible dentro de las condiciones suficientes de observación. Un colimador hace la marcha de rayos del haz paralela y una lámina semiplataada a 45° dirige este haz sobre la lámina en la que se encuentra el escalón a medir. Superpuesta a ella está la lámina ópticamente plana de referencia plateada, con un factor de reflexión de un 85%. (De este factor depende la finura de las franjas y, por lo tanto, la precisión en las determinaciones). Si esta lámina va rígidamente unida al sistema de observación es entonces la lámina problema la que debe poder orientarse, mediante tornillos micrométricos, para conseguir el sistema de franjas paralelas y debidamente orientadas.

La observación se realiza a través de un microscopio normal de pocos aumentos, unos 50, y, si no se va a tomar fotografía, conviene para la precisión de las medidas utilizar un micrómetro ocular.

Las franjas deben cortar normalmente al escalón a medir. Esta determinación se mejora sensiblemente si existe un escalón a ambos lados con bordes paralelos.

Conviene que en el campo de vista aparezcan de cuatro a seis franjas.

La manera de determinar la altura del escalón es medir el desplazamiento del sistema de franjas de un lado del escalón respecto al otro. Si esto lo referimos a la distancia entre dos franjas consecutivas, tendremos en semilongitudes de onda el valor del escalón (fig. 1). Resulta esencial el poder seguir la continuidad de las franjas en el talud del escalón.

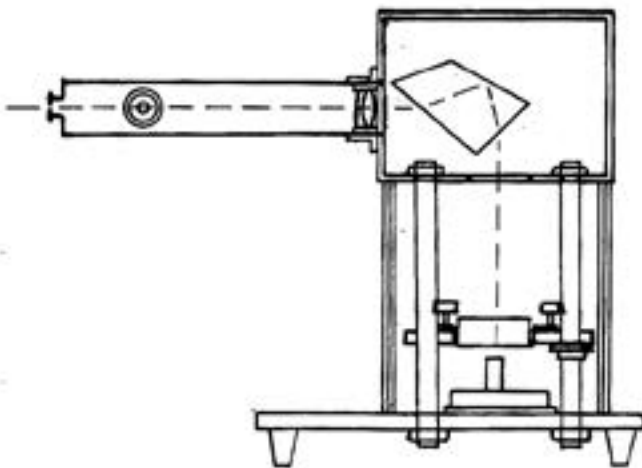
La finura y contraste de las franjas, de que depende principalmente la precisión del método se puede mejorar usando en la lámina de referencia películas múltiples dieléctricas como depósito reflejante, capas alternadas de dieléctricos de alto y bajo índice de refracción y de espesor de $\lambda/4$ cada una.

La precisión normal del método es de $\lambda/200$, si la lectura se ha realizado con un micrómetro ocular; esta precisión puede ser mejorada en un factor de 10, es decir $\lambda/2000$, si se toma una fotografía del campo de vista y aquella se analiza en un microdensitómetro registrador.

Medida de galgas por interferometría

Las galgas a extremos se miden siempre por comparación directa con las longitudes de onda luminosas. Solamente en casos excepcionales se hace la comparación con otros patrones de acero.

Las galgas cuya longitud es inferior a 100 mm se miden en un interferómetro de tipo Fizeau.



La figura adjunta puede dar una idea de la disposición general de sus componentes. La luz que proviene de una

adecuada lámpara espectral es focalizada en la rendija de entrada, y, siguiendo su marcha según el eje tubo es colimada por el objetivo que se encuentra en su extremo; pasa a través del prisma de desviación constante, es desviada hacia abajo incidiendo sobre la lámina de referencia, transparente y ópticamente plana, que es atravesada, e incidiendo a continuación sobre otra lámina inferior y la galga problema que está adherida a ella. La luz es reflejada por ambas y regresa a través del mismo camino hasta el ocular de observación que se encuentra dispuesto en el tubo del colimador.

Las franjas de interferencia se producen en el espacio comprendido entre las dos láminas.

Normalmente se mide utilizando como fuente de radiación una lámpara de Hg 198 de tipo Meggers refrigerada por agua, y excitada por una radiofrecuencia.

La medida de la temperatura se realiza por un puente potenciométrico de manera que uno de los termopares se fija sobre la galga y el otro se sumerge en hielo fundente. La precisión de la temperatura es de $\pm 0.03^{\circ}\text{C}$. Las lecturas de presión y humedad se realizan en un barómetro y psicrómetro de precisión. Las observaciones se hacen de la parte fraccionada del orden de interferencia para cuatro longitudes de onda del espectro de la fuente utilizada. Unas tablas ya preparadas permiten conocer, por un método de coincidencias, las discrepancias de la longitud real de la galga con su longitud nominal.

Las correcciones debidas al indice de refracci6n de aire se realizan pasando al aire normal y para lo cual se han preparado unos 6bacos.

El cambio de fase debido a la comparaci6n de sistema de franjas producidas por reflexi6n en diel6ctricos (l6minas de vidrio) y entre diel6ctrico y metal se mide por un m6todo elipsom6trico y su resultado, que es constante para cada metal, se introduce en la correcci6n de la longitud real.

La precisi6n de las medidas es de ± 25 nm para galgas de hasta unos 25 mm de longitud; y de unas 2 partes por mill6n para longitudes superiores. Hemos encontrado que este l6mite viene impuesto principalmente por la calidad de la galga.

Medida de patrones a extremos de longitud de hasta un metro

Para terminar esta exposici6n daremos una sucinta reseña de las caracter6sticas m6s sobresalientes de las instalaciones interferenciales que se realizaron en los laboratorios de este Instituto, para la verificaci6n de longitudes a extremos de hasta un metro de longitud.

Con fondos del presupuesto propio y de una ayuda de la Fundaci6n "Juan March" a trav6s de la Comisi6n Espaola de Pesas y Medidas, este Instituto di6 fin, en el aho 1965, a una primera fase de un proyecto m6s amplio, cuya primera fase se consista en la realizaci6n del metro a extremos.

Esto implicaba la construcción de unos laboratorios mecánica y térmicamente estables con unas rigurosas exigencias, la instalación de las fuentes de radiación patrón -Kr 86 - bajo especificaciones de trabajo recomendadas y la construcción del interferómetro adecuado.

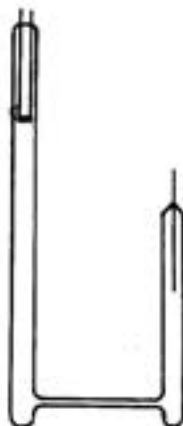
Los laboratorios están ubicados en la planta sótano del edificio y se componen de dos cámaras: una que aloja al interferómetro y otra contigua a ésta que aloja la fuente de radiación, consola de mandos y puesto de medida.

El suelo de la cámara del interferómetro está compuesto por una losa de hormigón de 40 cm. de espesor, descansando sobre arena; aislada mecánicamente de la estructura del edificio.

La cámara del interferómetro de unos 100 m³ de capacidad está aislada en sus paredes, suelo y techo por espuma de poliestireno y dentro de ella se construyó otra también de espuma de poliestireno. En el espacio intermedio van alojados los calefactores, termostatos y homogeneizadores que consiguen una estabilidad de temperatura, en este espacio intermedio, del orden de $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$; esta fluctuación a través de la pared de la cámara interior se amortigua quedando mejor que 0.01°C .

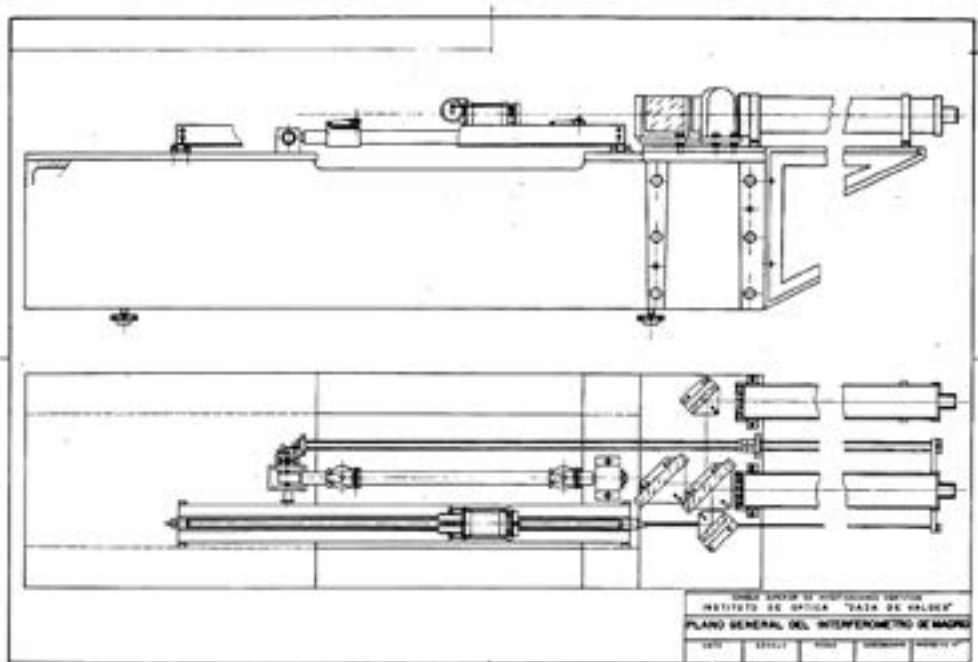
Los otros factores que afectan al índice de refracción del aire: presión y humedad, no se estabilizan, sino que se miden durante las verificaciones y se hacen las correcciones adecuadas para pasar al aire normal.

La fuente de radiación - lámpara de Kr 86 patrón primario de longitud - está situada fuera de la cámara y alojada en un criostato que asegura las especificaciones de su funcionamiento en el punto triple del nitrógeno, 63°E.



Las lámparas patrón que este Instituto posee en la actualidad provienen del Physikalisch-Technische-Bundesanstalt y son de dos tipos: de cátodo caliente y de tipo Meggers sin electrodos.

Un juego de filtros interferenciales permite aislar la radiación patrón o bien las otras que el Kr 86 produce.



El interferómetro fué de diseño propio y su construcción se realizó, parte en los talleres de este Instituto, parte en factorías nacionales.

Las partes pesadas que lo componen son de fundición hierro revenido y suman unos 2.800 kgs. de peso, lo que le proporciona una gran estabilidad mecánica y gran capacidad calorífica; adoptan forma de U con objeto de poder alojar el carro de desplazamiento en una posterior y prevista transformación para la lectura de trazas grabadas sobre reglas. La pieza en U mencionada, se apoya a través de cuatro patas en otras tantas zapatas cuya área ha sido calculada para que el aglomerado de

corcho de 50 mm. de espesor que se interpone entre ellas y la losa, trabaje a 1500 gr/cm^2 , lo que hace que la posible vibración residual de la losa sea absorbida en un 70 por 100. Estas placas de corcho actúan también de excelentes interceptores de flujo calorífico entre la losa y el interferómetro.

Sobre la pieza en U se encuentran dispuestas las partes que componen el interferómetro en sí: lámina separadora, lámina compensadora, espejos auxiliares y los subconjuntos del soporte de la regla y del espejo de referencia.

El subconjunto soporte de la regla permite la fijación de ella por sus puntos de Airy y su orientación respecto al haz luminoso, pudiéndose verificar ésta desde el exterior de la cámara por transmisión mecánica.

El subconjunto del espejo de referencia posee un sistema de orientación, a lo largo de dos raíles, mandado por dos motores síncronos reversibles que se dirigen desde el exterior, así como el desplazamiento del espejo sobre los raíles.

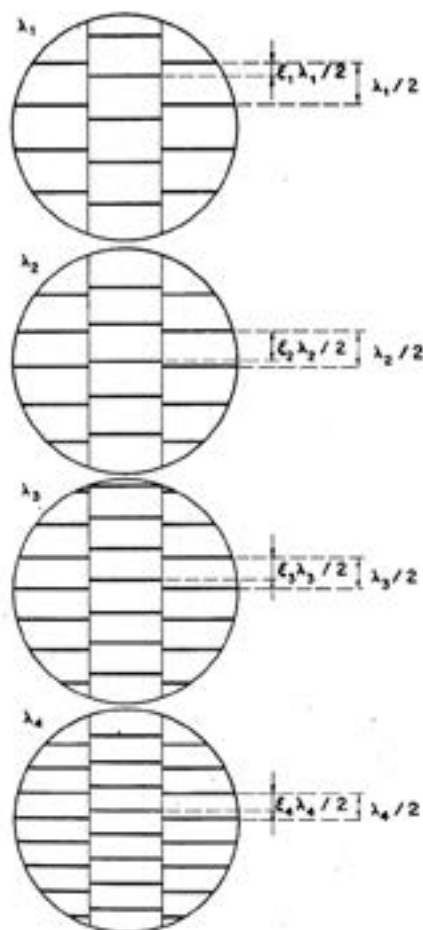
Dos ménsulas solidarias con la pieza en U soportan el colimador y el telescopio de observación, siendo las características más sobresalientes de estas de 1 m. y 2 m. de focal respectivamente y 80 mm. de diámetro útil./

La observación se realiza desde el exterior.

Las partes ópticas que componen el interferómetro son de cuarzo fundido y de extraordinaria precisión.

Al interferómetro llegan los terminales de unos termopares que fijos a la regla a verificar, permiten desde el exterior y por medio de un puente de Wheastone determinar la temperatura de aquella.

Con esta disposición una vez ajustado el interferómetro y colocada la regla a verificar, todas las determinaciones se realizan desde el exterior de la cámara.



El método de medida que se usa para la determinación del intervalo a verificar es el de coincidencias de los excedentes fraccionarios de los sistemas de franjas de interferencia, cuyos valores teóricos esperados para discrepancias con los valores nominales de tal intervalo, han sido calculados y tabulados para diez radiaciones de las más usuales en interferometría y con saltos de 0.01μ , hasta las 6 micras.

Las instalaciones disponen también de los ébacos para efectuar las correcciones debidas a la presión y humedad.

La precisión de las instalaciones, tras las reiteradas verificaciones efectuadas con un laser de He - Ne de frecuencia estabilizada, creemos que podemos asegurarla como mejor que 1 parte en 10^8 .

- - - - -

Referencias

- 1).- "Método interferencial de medida de células de absorción para infrarrojo". An. Fis. Quim. 56A, 105, 1960.
- 2).- "Calibrador óptico para espesores de pared de vidrio". LUZ, vol. 4, 39, 1961.
- 3).- "Dispositivo interferencial para el calibrado del enfoque fino del microscopio". An. Fis. Quim. 58A, 19, 1963.
- 4).- "Dos métodos interferenciales para la determinación del espesor de láminas birrefringentes" (Col. J.V. Atín). OPA vol. 1, n° 2, 113, 1968.

- 5) "Determinación interferencial de espesores con medios goniométricos". (Col. J. Pillado). OPA, vol. 3, 1, 65, 1970.
- 6) "Determinación de espesores de láminas por interferencias múltiples". (Col. A. aguilar). OPA, vol. 3, 1, 65, 1970.
- 7).- "Medida de espesores de láminas delgadas transparentes con un refractómetro de ángulo límite". OPA, 7, 2, 115, 1974 (Col. A. Aguilar).

Metrología de longitud, de los 70 a nuestros días

María del Mar Pérez Hernández

Jefa de Área de Longitud e Ingeniería de Precisión

Centro Español de Metrología

Según el artículo que lleva por título “La metrología de longitudes en el Instituto de óptica” de Joaquín Montilla Gómez, en la década de los 70 las necesidades metrológicas de longitud en nuestro país a primer nivel estaban cubiertas por el Instituto de Óptica “Daza de Valdés” del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, principalmente mediante el uso de métodos interferométricos.

Las capacidades de medida de aquel entonces eran la determinación del espesor de películas delgadas por interferometría y por elipsometría, así como la medición de bloques patrón longitudinales de longitud menor a 100 mm por interferometría, para lo que se empleaba un interferómetro de tipo Fizeau empleando como fuente de radiación una lámpara de Hg 198. La medición de bloques patrón de longitud hasta un metro se realizaba con un interferómetro construido ad hoc en el instituto, empleando como fuente de radiación una lámpara de Kr 86.

En esta época la definición del metro estaba basada en la radiación del kriptón 86, ya que en 1960 la 11ª Conferencia General de Pesas y Medidas adoptó como definición del metro: «1 650 763,73 veces la longitud de onda en el vacío de la radiación naranja del átomo del kriptón 86». Posteriormente en 1983 la 17ª CGPM pasó a definir el metro como “la longitud del trayecto recorrido por la luz en el vacío durante un intervalo de tiempo $1/299\,792\,458$ segundos”. De esta forma ya en 1983 se relacionaba el valor de la definición del metro con una constante: la velocidad de la luz en el vacío.

La redefinición actual del metro mantiene la dependencia de la definición con la constante de la velocidad de la luz en el vacío: “el metro, símbolo m, es la unidad SI de longitud. Se define al fijar el valor numérico de la

velocidad de la luz en el vacío, c , en 299 792 458, cuando se expresa en la unidad m s^{-1} , donde el segundo se define en función de la frecuencia del cesio $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ ”.

Desde la definición de 1983, el Comité Consultivo de Longitud del CIPM publicó la *Mise en Pratique* (MeP) del metro, mediante la cual se establecieron una serie de radiaciones recomendadas para la materialización del metro. Dicha MeP ha ido evolucionando e incluyendo nuevas radiaciones.

Hoy en día, el Área de Longitud e Ingeniería de Precisión del Centro Español de Metrología es la encargada de realizar y mantener los patrones nacionales de las unidades de longitud, metro, y de ángulo plano, radián, del Sistema Internacional de Unidades (Sistema SI). Se ocupa de la diseminación de ambas unidades hacia los niveles metroológicos inferiores, dotando a éstos de la trazabilidad necesaria al SI, mediante calibración de patrones, instrumentos, equipos y sistemas de medida.

Para ello el CEM cuenta con fuentes emisoras de dos tipos:

- Un sintetizador óptico (peine de frecuencias) basado en un láser de pulsos de femtosegundos, con una frecuencia de repetición de 250 MHz y frecuencia offset de 20 MHz, referenciado a la unidad SI de tiempo, el segundo, a través de un patrón atómico de Cesio, trazado en tiempo real al Real Observatorio de la Armada (ROA), Laboratorio Asociado al CEM y depositario del Patrón Nacional de Tiempo/Frecuencia, que permite seleccionar la longitud de onda de interés, de entre un continuum de longitudes de onda entre 530 nm y 2100 nm.
- Láseres de helio-neón estabilizados sobre la componente $f(a16)$ de la estructura hiperfina de la transición 11-5 R(127) de la molécula del yodo 127, emitiendo en una longitud de onda de valor nominal aprox. 633 nm, sintonizable en otros picos de absorción de dicha molécula.

Estos láseres patrón, junto a otros láseres patrón de otros países, participan en la comparación clave internacional continua CCL-K11, basada en

el uso de sintetizadores ópticos y auspiciada por la Oficina Internacional de Pesas y Medidas (BIPM), dentro del Acuerdo de Reconocimiento Mutuo CIPM-MRA, a fin de garantizar su equivalencia internacional.

Mediante las fuentes emisoras patrón citadas, se produce la diseminación hacia los siguientes niveles metroológicos empleando el método de batido de frecuencias, permitiendo la determinación de la longitud de onda emitida por otras fuentes de radiación dotándolas de trazabilidad al Sistema Internacional con valores de Capacidades de Medida y Calibración CMC reconocidas en la KCDB del BIPM del orden de $2,5 \times 10^{-11}$ en valor relativo.

Actualmente el área atiende a las necesidades del país en metrología de longitud, abarcando desde la determinación de longitud de onda de radiaciones ópticas, medidas materializadas de longitud, determinación de defectos de forma, rugosidad, mediciones de patrones para micro y nanometrología, topografía y mediciones de patrones e instrumentos de medida de ángulo plano.

Mediante interferómetros y comparadores interferométricos el área dota de trazabilidad a los patrones materializados del siguiente nivel metroológico, como son los bloques patrón longitudinales, patrones a trazos, patrones de diámetro así como patrones de amplificación y patrones de escalón mediante técnicas interferométricas, alcanzando incertidumbres expandidas ($k = 2$) en medidas de patrones a trazos del orden de $Q[60 \text{ nm}, 0,3 \times 10^{-6} L]$ y en bpl del orden de $Q[24 \text{ nm}, 0,4 \times 10^{-6} L]$.

A partir de patrones de amplificación se calibra una máquina de medición de defectos de forma que mediante la técnica de separación de errores permite medir patrones de defectos de redondez con incertidumbre inferior a 10 nm. Actualmente se está trabajando para calibrar dicha máquina mediante actuadores piezoeléctricos calibrados interferométricamente.

El área cuenta con un microscopio de fuerza atómica (AFM) metroológico, un microscopio confocal, un microscopio holográfico y un perfilometro de contacto que permiten la diseminación de la unidad a patrones en el ámbito de la micro y nanometrología.

ESCALAS INTERNACIONALES DE TEMPERATURA

M. Colomina

Instituto de Química Física "Rocasolano"

En el siglo XVIII se definieron las primeras escalas de temperatura, entre las cuales las más extendidas fueron las conocidas escalas Fahrenheit y Centígrada. En 1848, poco más de un siglo después del establecimiento de la escala centígrada por Anders Celsius, William Thomson, al que posteriormente se le distinguió con el título de Lord Kelvin, definió una nueva escala de temperaturas absolutas o Escala Kelvin que, con modificaciones de forma, se transformó en la Escala Termodinámica de Temperaturas.

Las dificultades experimentales para la medida de temperaturas de la escala termodinámica con un termómetro de gas condujeron al Bureau Internacional de Pesas y Medidas a adoptar, en 1887, como escala termométrica patrón para el servicio internacional de pesas y medidas, la Escala Centígrada del Termómetro de Hidrógeno. Esta escala, que tenía como puntos fijos de referencia los de fusión del hielo y de ebullición del agua, se reproducía por los científicos de la época con unos termómetros de mercurio en vidrio duro muy precisos, construidos por Tonnelot en París. La situación no era satisfactoria porque el intervalo de temperaturas era muy limitado y la precisión, notable para la época, pronto resultó insuficiente.

Antes de 1914 se intentó establecer una escala internacional de temperatura, EIT, pero la primera guerra mundial hizo fracasar este proyecto. A partir de 1920 se iniciaron discusiones entre los científicos del NBS de Washington D. C., PTB de Berlín, NPL de Teddington y KOL de Leyden, que condujeron al texto de la Escala Internacional de Temperatura de 1927, EIT-27, aprobada por la VII Conferencia General de Pesas y Medidas.

La EIT-27 está basada en seis puntos definidos: los puntos normales de ebullición del oxígeno, del agua y del azufre y los puntos de congelación del agua, plata y oro. Los valores adoptados para los puntos fijos se basaban en los mejores resultados obtenidos hasta entonces para dichos puntos mediante termometría de gases. La definición de la EIT-27 determina también los aparatos con los que deben realizarse la escala, así como las fórmulas de interpolación entre los puntos fijos y de extrapolación por encima del punto de fusión del oro. Los aparatos de medida prescritos, con características y fórmulas de interpolación y extrapolación cuidadosamente especificadas, eran: El termómetro de resistencia de platino, desde el punto de ebullición del oxígeno hasta 630°C . El termopar patrón de platino/platino-rodio, desde 630°C hasta el punto de fusión del oro. Para temperaturas superiores al punto de fusión del oro se emplea el pirómetro óptico.

La EIT-27, adoptada 40 años después que la anterior Escala del Termómetro de Hidrógeno, suponía un avance gigantesco con relación a ésta y permitía soslayar las dificultades prácticas de la determinación directa de temperaturas termodinámicas por termometría de gases (posible sólo en un número limitadísimo de laboratorios) y unificar las diferentes escalas de temperatura nacionales existentes entonces.

En 1937, el Comité Internacional de Pesas y Medidas creó su Comité Consultivo de Termometría, que se reunió por primera vez en 1939 y recomendó una revisión de la EIT-27. La segunda guerra mundial retrasó la nueva edición de la EIT hasta 1948, en que fue aprobada por la IX Conferencia General de Pesas y Medidas. Las modificaciones introducidas no podían ser tan espectaculares como en la primera edición de la EIT. La EIT-48 se basaba en los 6 mismos puntos definidos que la edición de 1927 y los aparatos y métodos utilizados para reproducir la Escala eran sustancialmente los mismos. No obstante, se introdujeron modificaciones que afectaban a ^{los} valores numéricos de las temperaturas medidas: la primera modificación fue un aumento de $+0,3^{\circ}\text{C}$ en el punto de congelación de la plata, con lo que subían todas las temperaturas medidas con el termopar de platino/platino-rodio.

hasta un máximo de $+0,4 \text{ K}$ a $800 \text{ }^\circ\text{C}$. La segunda modificación importante fue la utilización de la Ley de radiación de Plank en lugar de la de Wien para la extrapolación por encima de la temperatura de congelación del oro. También se asignó un nuevo valor a la constante de radiación c_2 . Con ello las temperaturas disminuyeron $2,2 \text{ K}$ a $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ y unos 8 K a $2000 \text{ }^\circ\text{C}$. En 1948 se adoptó también una resolución interesante: el empleo de la denominación CELSIUS en lugar de las palabras centígrado y centesimal usadas hasta entonces.

La EIT-48 fue corregida en 1960, con una nueva denominación: Escala Internacional Práctica de Temperatura de 1948 (edición corregida de 1960), abreviadamente EIPT-48. Esta edición mantenía los mismos puntos fijos de referencia que la EIT-48, con idénticos valores numéricos. Aunque no se había suprimido todavía la temperatura de ebullición del azufre como punto fijo, se acordó aconsejar su sustitución por el punto de congelación del cinc, más reproducible. La EIPT-48 incorpora el punto triple del agua (aprobado por la X Conferencia General de Pesas y Medidas de 1954), por definición igual a $273,16 \text{ K}$ (equivalente a $0,01 \text{ }^\circ\text{C}$) y la definición actual del kelvín, que no sería adoptada por la Conferencia General hasta 1968. Con la adopción de un valor exacto para el punto triple del agua, la Escala Termodinámica de Temperatura está definida por un solo punto fijo, como había previsto un siglo antes Lord Kelvin.

En 1968 la XIII Conferencia General de Pesas y Medidas aprobó una nueva escala de temperatura, la EIPT-68, y adoptó unas importantes resoluciones sobre definición, unidad y símbolos de temperatura, recogidas en la introducción del texto de la EIPT-68 (*), reproducida parcialmente a continuación:

"La unidad de la magnitud física fundamental conocida como temperatura termodinámica, símbolo T, es el kelvín, símbolo K, definido como la fracción $1/273,16$ de la temperatura termodinámica del punto triple del agua".

(*) edición corregida en 1975

"Por razones históricas, relacionadas con la manera en que las escalas de temperatura fueron definidas originalmente, es práctica común expresar una temperatura en términos de su diferencia con la de un estado térmico 0,01 kelvin mas bajo que el punto triple del agua". Una temperatura así expresada se conoce como temperatura Celsius, símbolo t, definida por $t = T - 273,15 \text{ K}$.

"La unidad de la temperatura Celsius es el grado Celsius, símbolo °C, que es, por definición, igual en magnitud al kelvin. Una diferencia de temperatura se puede expresar en kelvin o en grados Celsius".

La EIPT-68 era necesaria por dos razones: la primera, porque con los progresos de la termometría de gases las discrepancias de la EIPT-48 con las temperaturas termodinámicas eran excesivamente grandes, sobre todo a temperaturas elevadas. La segunda, para extender la escala a temperaturas mas bajas.

La EIPT-68 está basada en los valores asignados a las temperaturas termodinámicas de un número de estados de equilibrio reproducibles (puntos fijos) y a instrumentos patrón calibrados a dichas temperaturas. Los puntos fijos que definen la EIPT-68 son 11 en lugar de los 6 de la EIPT-48. El límite inferior de la nueva escala es 13,81 K (punto triple del hidrógeno) en vez de 90,18 K (punto de ebullición del oxígeno). Los únicos valores numéricos coincidentes con la EIPT-48 son el punto triple del agua y el punto de ebullición del agua. Desaparecen los puntos de congelación del agua y de ebullición del azufre. Por encima de los 100 °C hay tres puntos de referencia: los de congelación del cinc, de la plata y del oro. Por debajo del punto triple del agua se definen seis estados de equilibrio: dos del oxígeno, uno del neon y tres del hidrógeno.

Además de los puntos fijos que definen la escala ésta contiene 27 puntos de referencia secundarios, 19 de ellos comprendidos entre el límite inferior de la EIPT-68 y el punto de congelación del oro (1054,43 °C) y 8 puntos por encima de esta temperatura hasta alcanzar la de fusión del Wolframio (3387 °C).

Para reproducir la EIPT-68 se utilizan los mismos instrumentos de medida usados para las escalas anteriores, con especificaciones mas estrictas y nuevas fórmulas de interpolación y extrapolación. En el intervalo de 13,81 K a 90,188 K (punto de congelación del oxígeno), la EIPT-68 se basa en el valor medio de cuatro escalas nacionales y en los mejores valores seleccionados para los puntos fijos de dicho intervalo. Las escalas nacionales están definidas por unos termómetros de resistencia de platino calibrados contra un termómetro de gas y son muy reproducibles.

Una edición corregida de la EIPT-68 ha sido aprobada por la XV Conferencia General de Pesas y Medidas en 1975. Entre las correcciones introducidas las mas importantes son las siguientes: Se incrementa en dos el número de puntos de equilibrio que definen la escala, manteniéndose idénticos los valores numéricos de los once puntos restantes. Los nuevos puntos de equilibrio elegidos son el punto triple del argon (como una alternativa al de condensación del oxígeno) y el de congelación del estaño. Los aparatos de medida, los intervalos en los que se emplean y los métodos siguen siendo los mismos. No obstante, se ha cambiado ligeramente la función de referencia W_{CCT-68} del termómetro de resistencia de platino para temperaturas por debajo de 0°C y se han modificado los criterios para la selección de termopares. La tabla de puntos de referencia secundarios se ha enriquecido con cuatro nuevos estados de equilibrio y se han modificado algunos puntos de la tabla anterior, siendo los que mas han variado los de congelación del platino (1769°C) y del Wolframio (3422°C).

* * *

Como complemento de las consideraciones generales sobre la evolución de las Escalas Internacionales de Temperatura acabadas de exponer, se resumen a continuación parte de las recomendaciones recientes del Comité Consultivo de Termometría, algunas de las tendencias actuales de la Termometría y las previsiones sobre la futura sustitución de la actual EIPT por otra mas adecuada.

Entre las recomendaciones del Comité Consultivo de Termometría, CCT, al Comité Internacional de Pesas y Medidas, CIPM, citaremos las siguientes:

1 - Reconocido de una manera general que el termopar de platino/platino-rodio es muy inferior al termómetro de resistencia de platino y al pirómetro óptico, se recomienda intensificar y coordinar las investigaciones para extender el campo de los termómetros de resistencia de platino a temperaturas mas elevadas y el pirómetro óptico hasta temperaturas mas bajas.

2 - Considerando el interés general por las bajas temperaturas, se recomienda intensificar las investigaciones para extender la EIPT-68 hasta 2 mK.

3 - Teniendo en cuenta el creciente interés, científico e industrial, por las temperaturas muy elevadas, se recomienda intensificar las investigaciones para la determinación precisa de temperaturas superiores a 4000 K.

De acuerdo con las recomendaciones acabadas de citar se está realizando un gran esfuerzo de investigación para que termómetros de resistencia de platino, especialmente contruidos para elevadas temperaturas, sustituyan en un plazo no lejano al par de platino/platino-rodio, como instrumento patrón para la reproducción de la EIPT desde los 630 °C hasta el punto de fusión del oro (1064,43 °C) o, al menos, en la mayor parte del intervalo citado. El termopar de platino/platino-rodio se seguirá utilizando, no como instrumento patrón, pero si como un instrumento para medir temperaturas muy útil, sencillo, barato, de fácil acceso a reducidos espacios y que requiere instrumentos de medida de bajo precio.

Una tendencia actual en los países mas desarrollados es el empleo creciente de termómetros electrónicos que usan termistores como elemento sensible. Estos termómetros se emplean en laboratorios clínicos como sensores de temperatura en analizadores de enzimas automáticos. Los termómetros electrónicos médicos también comienzan a ser de un uso bastante extendido. El calibrado fácil y frecuente de es-

tos termómetros ha exigido la puesta a punto de nuevos puntos fijos de referencia para temperaturas próximas a las del cuerpo humano.

Finalmente, reproducimos unos breves comentarios del Presidente del CCT sobre la futura sustitución de la EIPT-68. Este cambio se considera necesario: 1) Para sustituir el termopar de platino/platino-rodio por el termómetro de resistencia de platino y el pirómetro óptico. 2) Para extender la EIPT por debajo de 13,81 K y si es posible modificar la definición de la escala entre 13,81 K y 20 K. 3) Para modificar la definición de las ecuaciones del termómetro de resistencia de platino por debajo de 273,15 K y 4) Para hacer que la nueva EIPT esté mas próxima en toda su extensión con las correspondientes temperaturas termodinámicas. En cuanto a la fecha de modificación de la escala se piensa que la mas probable sería 1983.

* * *

El texto oficial completo de la EIPT-68, edición corregida de 1975, ha sido publicado recientemente por el Bureau Internacional de Pesas y Medidas, en la versión oficial francesa, y en su versión inglesa en la revista Metrología (*). En ambas publicaciones encontrará el lector interesado en este tema una descripción minuciosa, cuidadísima y precisa de la EIPT actualmente en vigor, con todos los detalles necesarios para su realización práctica por un especialista en termometría. En la primera de las dos publicaciones citadas, se encuentran también el informe presentado por el Comité Consultivo de Termometría, CCT, al Comité Internacional de Pesas y Medidas en 1974 y los resúmenes de los trabajos presentados a la 10ª sesión del CCT.

(*) Comité International des Poids et Mesures-Comité Consultatif de Thermometrie. 10^e SESSION-1974. Bureau International des Poids et Mesures. Pavillon de Breteuil, F-92310 Sevres, Francia.
Depositaire: OFFILIB, 48 rue Gay-Lussac, F-75005, París.
Metrología 12, 7-17 (1976)

Escalas Internacionales de Temperatura

M^a José Martín Hernández

Jefa del Área de Termodinámica y Medioambiente

Centro Español de Metrología

Las escalas internacionales de temperatura han estado siempre ligadas a la materialización de la unidad de temperatura (kelvin) debido a la naturaleza intensiva de la magnitud: independencia del tamaño del sistema y del material del que está compuesto. Esto implica que no se puede definir o construir un intervalo de la unidad de temperatura y sumarlo sucesivamente para obtener otras temperaturas. Así pues, para poder medir la temperatura ésta ha de relacionarse con otra magnitud física cuya relación con ella puede establecerse y con una métrica conocida (p. e. resistencia, fuerza electromotriz, dilatación, ...).

La primera escala internacional de temperaturas fue establecida por la Conferencia General de Pesas y medidas en 1927, *para superar las dificultades prácticas de la realización directa de las temperaturas termodinámicas mediante termometría de gases, y como sustituta universalmente aceptable de las diferentes escalas de temperatura nacionales existentes*. Desde entonces ha habido hasta 5 escalas más (extendiendo el rango, cambiando instrumentos de interpolación, puntos fijos de definición, etc) hasta llegar a la escala actual de 1990 o EIT-90.

El texto y la información suplementaria de la Escala Internacional de Temperatura en vigor constituían hasta hace poco la guía de referencia para la realización de la unidad básica kelvin.

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

Como se puede observar, esta definición no implica ningún experimento particular para su realización práctica ya que está ligada a una constante física. Por esta razón, y debido a los recientes desarrollos en termometría, se ha establecido un documento más amplio y flexible que incorpora las escalas de temperatura en uso y los mejores métodos disponibles de termometría primaria: *la Mise en Pratique* (o puesta en práctica) del kelvin (MeP-K).

El propósito de la *Puesta en Práctica del kelvin* publicada por el Comité Consultivo de Temperatura (CCT) del Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM) en 2019 es indicar como puede realizarse en la práctica la definición de la unidad básica del SI, es decir, el establecimiento del valor y la incertidumbre asociada de una magnitud del mismo tipo que la unidad, consistente con la definición de la unidad.

En esta MeP del kelvin se explica que las Escalas Internacionales de Temperatura proporcionan procedimientos aceptados internacionalmente tanto para realizar como para diseminar la temperatura de una manera sencilla y reproducible como alternativa práctica a los métodos primarios.

Como instituto nacional de metrología español, el Centro Español de Metrología mantiene, conserva, custodia y disemina el patrón nacional de temperatura termodinámica. En concreto, este patrón nacional consiste en la realización de la Escala Internacional de Temperatura de 1990 (EIT-90) y termometría radiométrica primaria absoluta y relativa, de acuerdo con las recomendaciones del CIPM. La EIT-90 se materializa y mantiene mediante puntos fijos de temperatura. Se utilizan termómetros de resistencia de platino hasta 1235 K y cuerpos negros y termómetros de radiación para temperaturas superiores a 1235 K. La EIT-90 se disemina desde 83 K a 2500 K utilizando termómetros de interpolación; además es periódicamente comparada con las Escalas de otros Institutos Nacionales de Metrología.

La realización, mantenimiento y diseminación del kelvin mediante termometría radiométrica primaria absoluta se lleva a cabo mediante la determinación de la potencia óptica emitida por una cavidad isoterma de emisividad,

banda espectral y ángulo sólidos conocidos en el rango de 962 °C a 2800 °C. La realización, mantenimiento y diseminación del kelvin mediante termometría radiométrica relativa se lleva a cabo mediante la medida de la potencia óptica en una serie de puntos fijos de temperatura termodinámica conocida.

En cuanto a las incertidumbres de estas realizaciones, en el caso de la EIT-90, las capacidades de calibración y medida del Área de Temperatura del CEM están publicadas en la base de datos del BIPM y van desde los 0,12 mK para las medidas de puntos triples de agua (0,01 °C), en termometría de contacto, a 1,7 °C a 2747 °C, en termometría de radiación (esta última capacidad de medida está actualmente en revisión tras la finalización de la comparación clave que la soporta).

La realización primaria del kelvin por termometría radiométrica tiene unas incertidumbres similares a la EIT-90 en termometría de radiación, de 0,2 °C a 1,0 °C, de 962 °C a 2747 °C, respectivamente, soportadas por comparaciones internacionales con otros institutos nacionales de metrología dentro de proyectos de investigación.

ESTABILIZACION DE RESISTENCIAS PATRON PARA CUALQUIER

CORRIENTE

Juan Antonio Gómez García
Metrología
C.I.F. "L. Torres Quevedo"

El uso de resistencias patrón impone unas condiciones especiales, tales como un valor pequeño de corriente ó temperatura constante para que estas resistencias no pierdan su carácter de patrones.

En la medida de corrientes fuertes con precisión, uno de los métodos consiste en hacer pasar la corriente por una resistencia de valor conocido y medir la d.d.p. entre sus bornas por métodos potenciométricos. Estos métodos adolecen del defecto que la resistencia deja de ser patrón cuando la corriente es lo bastante alta como para que su temperatura pueda alterarse sensiblemente.

Para ilustrar este punto recordaremos que una resistencia que mida R_0 a la temperatura de referencia t_0 (del exterior), a la temperatura t medirá

$$R = R_0 \left[1 + \alpha(t-t_0) + \beta(t-t_0)^2 + \dots \right] \quad (1)$$

expresión válida mientras $t-t_0$ sea suficientemente pequeña para que el desarrollo en serie (1) sea convergente

α , β , etc serán constantes con t_0 .

El error relativo de R_0 resulta de (1) y vale

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \alpha(t-t_0) + \beta(t-t_0)^2 + \dots \quad (2)$$

Si tenemos en cuenta que al utilizar la resistencia de valor nominal R_0 y actual R se disipa una potencia $I^2 R$ en forma de calor, se podrá escribir en primera aproximación que

$$W = I^2 R_0 K(t-t_0)$$

de donde

$$(t-t_0) = \frac{I^2 R}{K} \approx \frac{I^2 R_0}{K} \quad (3)$$

y llevando (3) a (2) resulta

$$\frac{\Delta R}{R_0} \approx \alpha \frac{I^2 R_0}{K} + \beta \frac{I^4 R_0^2}{K^2} + \dots = \frac{I^2 R_0}{K} \left[\alpha + \beta \frac{I^2 R_0}{K} + \dots \right] \quad (4)$$

Se ve pues que el error relativo de la resistencia es tanto peor cuanto mayor es la corriente que la atraviesa I . En resistencias metálicas, con coeficientes

$$\alpha \gg \beta \gg \dots$$

se puede afirmar que a la temperatura \bar{t} con temperatura de referencia t_0 igual a la del ambiente, el error relativo de la resistencia crece con el cuadrado de la corriente, de manera que si se pasa de $I = 1 \text{ mA}$ al error relativo de la resistencia se hace un millón de veces mayor:

Una resistencia que a 23°C se haya definido como patrón para corrientes de 1 A , por ejemplo 1 Ohm con error relativo de 10^{-6} , tiene un error de 10^{-4} para corrientes de 10 amperios y ha perdido dos cifras en la exactitud.

El camino para conseguir que una resistencia tenga valor constante es que su temperatura no varíe al cambiar la corriente circulante, cualquiera que sea la temperatura exterior, y eso puede conseguirse situando la resistencia en un ambiente adecuado (horno, baño) y generando la temperatura \bar{t} mediante dos fuentes de calor diferentes, la primera la propia resistencia patrón, y la segunda otra resistencia auxiliar R_1 cuya potencia disipada es controlada por la temperatura de la resistencia patrón mediante un circuito de control que consta de un sensor termoelectrónico, un amplificador y un circuito regulador de la corriente auxiliar de calefacción i . Puede verse el diagrama de bloques en la figura 1 adjunta. En el circuito auxiliar se detecta las variaciones de temperaturas y el amplificador hace que la sensibilidad del dispositivo sea muy alta. El horno y la disposición de los elementos se ha dibujado simbólicamente.

mente, y la temperatura θ se fija por comparación con una referencia no mostrada en la figura 1.

De acuerdo con lo indicado anteriormente

$$W = I^2 R + i R_1 = K(\theta - t_0) \quad (5)$$

y para una temperatura exterior constante la corriente I podrá variar entre

$$I=0 \text{ para } i = \sqrt{\frac{K(\theta - t_0)}{R_1}}$$

$$I_{\max} = \sqrt{\frac{K(\theta - t_0)}{R}} \text{ para } i=0 \quad (6)$$

La temperatura θ deberá elegirse lo bastante superior al ambiente para que I_{\max} alcance el valor deseado, y por supuesto deberá ser compatible con la estabilidad de la estructura, es decir no se deteriorará el aceite, ni se estropearán los componentes de la unidad.

En estas condiciones la (5) permite afirmar que la temperatura del horno o baño será θ con una temperatura de la resistencia de $\theta \pm \Delta\theta$, lo que llevado a la expresión de la resistencia verdadera transformada de la nominal R_0 como antes y se obtendrá un error relativo

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \alpha \Delta t + \beta \Delta\theta^2 + \dots \quad (7)$$

La expresión (7) demuestra que con esta disposición la resistencia patrón mantendrá su precisión máxima en todo el margen de corrientes dado por (6). Existen dispositivos muy elaborados que mantienen una temperatura elegida en cierto margen y para ello requieren un dispositivo de calefacción y otro de refrigeración, y un sistema mecánico para producir la circulación laminar del líquido del baño.

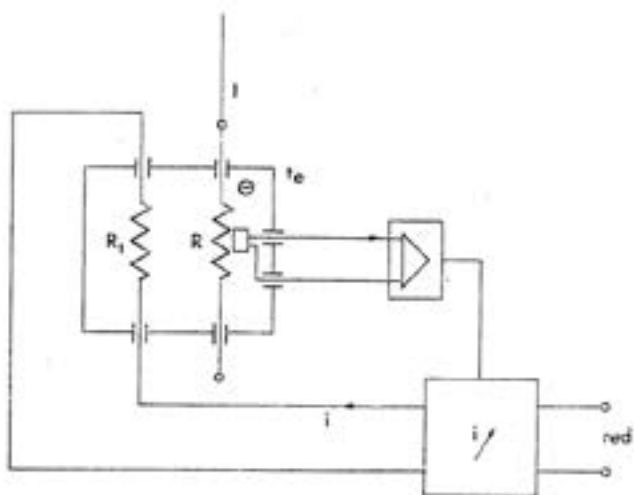


Fig.1
 Diagrama de bloques de la resistencia patrón estabilizada.

Nuestra propuesta intenta conseguir el mismo resultado con una complicación menor para lo que se ha de tomar una temperatura θ bastante alta (la máxima prevista) y se llegará a ella siempre, cualquiera que sea la corriente que atraviese la resistencia patrón, para lo que el sensor de temperatura controlará la corriente i de calefacción o complementaria, no habiendo ahora necesidad de refrigeración puesto que la temperatura de trabajo siempre es la máxima. Esperamos igualmente que no haya que utilizar circulación de aceite, lo cual deberá ser comprobado experimentalmente cuando se disponga de la primera realización.

La utilización de estas resistencias será la misma de cualquier otra patrón, pero no tiene sentido introducirla en baños u hornos puesto que ya ella está preparada para mantener constante su temperatura de funcionamiento. En el caso de que se pueda fijar $\Delta\theta = 10^{-3}K$, valor que ya se alcanza en los baños actuales tomando $\alpha = 10^{-5}$ y $\beta = 10^{-6}$ la inexactitud de la resistencia resulta

$$\frac{A R}{R_0} \ll 10^{-5} \cdot 10^{-3} = 10^{-8}$$

o sea que R_0 tiene 8 cifras exactas.

Entre las ventajas que proveemos para estas resistencias patrón están el amplio margen de corrientes, el coste relativamente bajo y el espacio ocupado que será notablemente menor que los baños de circulación laminar de aceite. Como inconveniente podemos citar la existencia del circuito auxiliar y de control de temperatura que por otra parte también necesitan todos los baños u hornos estabilizados.

La metrología eléctrica en la actualidad

Javier Díaz de Aguilar

Jefe del Área de Electricidad y Magnetismo

Centro Español de Metrología

En este artículo de Juan Antonio Gómez García, titulado “Estabilización de resistencias patrón para cualquier corriente”, publicado en 1975, describe una ingeniosa propuesta para compensar las variaciones del valor resistivo de las denominadas resistencias patrón con la temperatura y con la intensidad aplicada. El efecto de la intensidad es producir un calentamiento de la resistencia que es proporcional al cuadrado de la misma. La solución consiste en introducir la resistencia patrón en un horno cuya temperatura se regula circulando una corriente controlada por la propia temperatura de la resistencia patrón por una resistencia adicional situada en el horno. Se toma como temperatura de referencia la correspondiente a la máxima intensidad de uso de la resistencia patrón y esta es la que se configura para su calibración y posterior utilización.

El problema que se planteaba es común a la utilización de patrones basados en artefactos: deriva con el tiempo (necesidad de calibración periódica), influencia de condiciones ambientales (temperatura, presión, humedad etc.) a la que hay que añadir las variaciones en su valor que pueda experimentar durante su traslado desde el laboratorio de referencia al de utilización.

Se hace ahora una revisión de la evolución de los patrones eléctricos nacionales desde los basados en artefactos hasta nuestros días basados en patrones cuánticos, en los que desaparecen los problemas anteriores. Es de destacar que, hasta el 20 de mayo de 2019, con la redefinición del SI, no desaparecieron todos los patrones basados en artefactos.

Antes de la llegada de los patrones cuánticos la referencia de resistencia se mantenía en los Institutos nacionales de Metrología mediante resistencias patrón, la más utilizada fue la diseñada por el Dr. Thomas, basada en un

bobinado de manganina, envejecidas artificialmente a alta temperatura, aisladas herméticamente con una doble pared. No obstante estas resistencias están afectadas por las variaciones de temperatura y presión por lo que deben mantenerse en baños de aceite y determinar su coeficiente de presión para efectuar correcciones. Conjuntos de estas resistencias constituyeron los patrones nacionales de resistencia para la realización del amperio. El CEM dispone de un conjunto de cinco resistencias del que se dispone de un histórico de más de 30 años de valores de las resistencias obtenidos periódicamente.

Para la referencia de tensión la mejor solución se encontró en las denominadas pilas Weston, cuya tensión dependía de la composición química generando un valor aproximado de 1,018 V. Estos patrones estaban muy influenciados por la variación de temperatura por lo que debían mantenerse en hornos estabilizados. Otro problema adicional era que estaban muy afectadas por las vibraciones y no podían suministrar corriente sin cambiar de valor. La referencia de tensión se mantenía en la media de grupos de estas pilas. Posteriormente estos patrones fueron sustituidos por referencias electrónicas, los diodos Zener, pero su valor seguía teniendo una alta dependencia con la temperatura con lo que, de nuevo, debían mantenerse en hornos estabilizados.

En el año 1990 los institutos nacionales de metrología basaron sus patrones en los efectos cuánticos Josephson y Hall cuántico. El primero descubierto por Brian D. Josephson en 1962 y el segundo por Klaus von Klitzing in 1980. El CEM desarrollo los patrones nacionales basados en estos efectos que fueron validados mediante comparaciones con el BIPM. La realización del amperio en el CEM se basa en estos dos patrones y en la aplicación de la ley de ohm.

Con la llegada de los patrones cuánticos, los problemas asociados con los patrones basados en artefactos desaparecen. Un patrón cuántico puede ser reproducido en cualquier momento y lugar del mundo siendo consistente con el resto de patrones cuánticos realizados en distintos lugares y momentos. Además de la realización del amperio estos patrones cuánticos son la base del CEM para la realización del resto de magnitudes eléctricas.

cas. En tensión, con el efecto Josephson se pueden generar valores hasta 10 V, para alcanzar valores superiores hasta 1 000 V se emplean divisores resistivos con trazabilidad al efecto Hall cuántico. La tensión en alterna se traza al patrón cuántico mediante convertidores térmicos obteniéndose incertidumbres del orden de partes por millón. Las medidas de tensión, intensidad y fase permiten dar trazabilidad a los patrones de potencia y energía eléctrica. Finalmente, mediante complejos puentes coaxiales se obtiene la trazabilidad en Inductancia y Capacidad.

No obstante, la realización de los patrones cuánticos no es nada sencilla, se necesitan temperaturas criogénicas, altos campos magnéticos y sofisticados sistemas de medida y solo es posible realizarlos en centros con un alto nivel tecnológico. El objetivo de la ciencia es lograr la realización de estos efectos en condiciones más favorables. Mayores temperaturas y campos magnéticos menores. En este sentido el CEM lidera un proyecto de investigación fundamental consistente en desarrollo de nuevos materiales bidimensionales para la realización del efecto Hall cuántico.

Recientemente el CEM ha desarrollado un nuevo laboratorio de magnetismo cuya trazabilidad se inicia de nuevo en otro patrón cuántico el de resonancia magnética nuclear, NMR en sus siglas en inglés. Partiendo de este patrón y en un preciso proceso de escalado se llegara de valores del orden de militeslas hasta varios teslas. En este proceso de escalado se ha desarrollado en sistema automático de cancelación del campo magnético externo.

Los patrones cuánticos que hemos mencionado hasta el momento constituyen los denominados patrones cuánticos macroscópicos o también denominados electrónica cuántica. Los estados cuánticos están ocupados por un gran número de partículas. Hace unos años el CEM empezó el desarrollo de los denominados patrones de la segunda revolución cuántica, en que los estados cuánticos se centran en partículas elementales. En concreto el CEM está desarrollando un patrón cuántico de frecuencia óptica basado en trampa de iones, este patrón superará en exactitud a los actuales patrones basados en la transición del átomo de cesio, que constituye la actual definición del segundo. Cuando un número suficiente de

Institutos Nacionales de Metrología hayan desarrollado estos patrones se podrá establecer una nueva definición del segundo. La experiencia que se adquiriera en el desarrollo de este patrón será la base para nuevos patrones de segunda generación cuántica, como puede ser nuevos patrones magnéticos, gravimétricos etc. Además, el patrón de frecuencia óptica será utilizado en el desarrollo de una red de comunicaciones cuánticas en la Comunidad de Madrid.

Para finalizar este artículo y como curiosidad comentar que, de forma similar a lo propuesto en su día por Juan Antonio Gomez, algún fabricante comercializa unos hornos específicos para alojar resistencias individuales manteniendo éstas a alta temperatura del orden de 36 grados Celsius y de esta forma minimizar la influencia de la temperatura sobre la resistencia.

REDEFINICION DEL LUMEN Y DE LA CANDELA

Antonio Corróns.- Instituto de Óptica

La intensidad es la magnitud fundamental de fotometría y la candela es la unidad S.I. base de la cual deben derivarse las otras unidades fotométricas. Esta elección ha creado numerosos problemas, hasta ahora, a los fotometristas, por lo que ya está en marcha una redefinición con un cambio radical de criterios.

La elección de la intensidad luminosa como magnitud fundamental es desafortunada.

1? Porque la relación de la intensidad a otras magnitudes fotométricas es matemáticamente imprecisa.

2? Hay problemas que no pueden resolverse en la medida real de la intensidad.

3? Porque en un sistema de medidas basado en la intensidad se encuentran problemas pedagógicos y conceptuales.

Si las medidas fotométricas pudieran ser limitadas solo a fuentes y detectores puntuales, o si pudieramos trasladarnos a medir al infinito, entonces la definición de la C.I.E. de intensidad sería bastante aceptable.

La intensidad luminosa (de una fuente en una dirección dada) es el cociente del flujo $d\Phi$ luminoso que deja la fuente, propagado en un elemento de ángulo sólido que contiene la dirección dada, por el elemento de ángulo sólido, $d\Omega$

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad (1)$$

Una nota al pie de esta definición describe la intensidad de una fuente real como: "el cociente del flujo radiante (luminoso) recibido sobre una superficie elemental por el ángulo sólido que dicha superficie subtende desde cualquier punto

de la fuente, cuando este cociente se toma en el límite al aumentar la distancia entre fuente y detector", esto es,

$$I = \lim_{d \rightarrow \infty} \frac{\phi(d)}{\Omega(d)} \quad (2)$$

El problema es que nunca podemos llegar al límite, $d \rightarrow \infty$, en un experimento. Tenemos que trabajar con unos pocos cocientes de cantidades finitas que son miembros de una secuencía finita que converge hacia el límite. Para ser útiles, esos cocientes deberían ser valores medios de I, sobre un ángulo sólido finito especificado en una dirección dada. Sin embargo son valores medios de I en diferentes ángulos sólidos y en diferentes direcciones. Desgraciadamente la intensidad es una magnitud muy diferente de la luminancia o la iluminancia. Estas pueden definirse de forma que los miembros de una secuencia infinita que converge hacia el límite son promedio de la cantidad definida por el límite. Por ejemplo, la iluminancia se define como:

$$E = \frac{d\phi}{dA} = \lim_{A \rightarrow \infty} \frac{d\phi}{A} \quad (3)$$

donde A es el área de una superficie concreta de medida no nula, y $\phi(A)$, es el flujo luminoso interceptado por la superficie. Además,

$$\frac{\phi(A)}{A} = \bar{E} = \int A dA \quad (4)$$

donde \bar{E} es la irradiancia media sobre A.

Esta ecuación es importante porque relaciona la idealización matemática, E, con las cantidades medibles, $\phi(A)$, A y \bar{E} .

Las ecuaciones 2 y 3 representan el punto de vista puramente matemático y es importante tenerlas en cuenta, pero la eq - 4 representa la realidad de las medidas. La falta de una ecuación para la intensidad similar a la 4 es un defecto crucial de concepto. Esencialmente el problema es que la iluminancia y la luminancia son funciones de punto, pero la intensidad no. Está asociada con una fuente, en vez de con un punto.

Las dificultades pedagógicas que resultan de definir la intensidad como la magnitud fundamental de fotometría pueden verse en muchos de los tratados de Fotometría e incluso en los de Radiometría. Invariablemente el autor comienza con la definición de intensidad como el flujo por ángulo sólido, y después "deriva" la luminancia ó la iluminancia a la "ley del cuadrado de la distancia".

Todos estos problemas se resolverían automáticamente si el presente sistema de medidas fotométricas fuera reemplazado por otro, basado en la medida de la energía radiante en un lugar del espacio, en vez de en la emitida por una fuente concreta, y por lo tanto con el flujo luminoso como magnitud fundamental.

Con respecto a la unidad básica de fotometría, la candela se necesita:

- 1? Que sea redefinida de forma que relacione exactamente la unidad SI de potencia, el vatio, con una radiación monocromática especificada.
- 2? Que la unidad de intensidad luminosa sea reemplazada como unidad básica por la unidad de flujo luminoso, el lumen.

La elección de la Intensidad y la Candela como bases de la fotometría se hizo para adaptar fuentes artificiales de luz determinadas, las lámparas de incandescencia en vacío, como patrones. Las virtudes fundamentales de estas lámparas son su reproductibilidad y su conveniencia en fotometría visual, pues tienen una distribución espectral parecida a la de la candela primitiva. Pero sus características radiométricas han de ser calculadas a partir de la Ley de Planck, lo que supone que la distribución energética espectral de este patrón de radiación compleja no se conozca con precisión satisfactoria, debido a la imposibilidad de medir hoy con exactitud la temperatura de fusión del Pt.

Como resultado en la radiación monocromática de cada longitud de onda hay una incertidumbre aproximada del 2% entre las magnitudes radiométricas y fotométricas correspondientes.

El desarrollo de la moderna Radiometría hace estas incertidumbres insostenibles. El movimiento de técnicas visuales hacia técnicas físicas ha sido motivado en forma fundamental por los avances en la tecnología de detectores, así como por la adaptación internacional de la función de eficacia espectral L_v luminosa $V(\lambda)$.

Actualmente se relaciona la luminancia, L_v , con la Radiancia espectral, $L_{e,\lambda}$, en la forma

$$L_v = K_m \int L_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda \quad (5)$$

de donde

$$K_m = L_v(Pt) / \int L_{e,\lambda}(Pt) V(\lambda) d\lambda \quad (6)$$

K_m (lm W^{-1}) da la relación entre el lumen y el vatio a la longitud de onda ($\lambda = 555 \text{ nm}$) donde $V(\lambda)$ es máxima. Para cada longitud de onda será $K(\lambda) = K_m V(\lambda)$.

Para calcular K_m , se sustituye $L_{e,\lambda}(Pt)$ por su valor según la ley de Planck.

$$K_m = L_v(Pt) / \left\{ \frac{c_1}{\pi n^2} \int \frac{\lambda^{-5} V(\lambda) d\lambda}{e^{c_2/n\lambda T(Pt)} - 1} \right\} \quad (7)$$

n es el índice de refracción del aire.

$T(Pt)$ es la temperatura termodinámica del platino fundente.

De la incertidumbre en el conocimiento de esta temperatura nace el problema fundamental para relacionar con exactitud la Fotometría con la Radiometría.

Las más precisas medidas de la $T(Pt)$ en los últimos años conducen a valores de K_m de

$K_m = 670.8$	para $T(Pt) = 2045 \text{ K}$:	I.P.T.S.	1968
$K_m = 686.7$	para $T(Pt) = 2041.05 \text{ K}$	Quinn	1972
$K_m = 679.4$	para $T(Pt) = 2042.85 \text{ K}$	Jones y Tapping	1974

Parece evidente que la unidad básica de fotometría no debe estar supeditada al desarrollo de la escala termodinámica de temperatura. Y que la mejor solución es abandonar por completo la emisión del platino fundente y redefinir el patrón en

términos radiométricos y con luz monocromática, sin tenerle su jeto por más tiempo a una fuente de emisión cualesquiera que esta sea. El valor de Km se puede adaptar arbitrariamente por acuerdo, y se le puede dar el valor de $K = 680$, sin más objeto que el de mantener la tradición en cuanto al valor absoluto de lo que actualmente una candela o un lúmen son.

REDEFINICION

La necesidad de solucionar definitivamente los problemas expuestos ha llevado a Blevin y Steiner a proponer en Septiembre de 1975, al Comité Consultivo de Fotometría y Radiometría de la Oficina Internacional de Pesas y Medidas la adopción del lúmen como unidad base SI de fotometría, con la siguiente definición:

LUMEN

Flujo luminoso de radiación monocromática que se caracteriza por una frecuencia de 540×10^{12} hertz y por un flujo radiante de $1/680$ vatios.

Nota: 540×10^{12} hertz equivale a 555×10^9 m. en el aire de $n = 1.00028$

El comité decidió aceptar en principio el cambio y la nueva definición, pero fijando un plazo de estudio de dos años para su adopción definitiva.

La candela, unidad derivada del lumen, queda definida:

CANDELA

Intensidad luminosa de una fuente emitiendo, en un ángulo sólido total de 4π str, radiación monocromática que se caracteriza por una frecuencia de 540×10^{12} hertz, y por un flujo radiante de $4\pi/680$ vatios.

CONSECUENCIAS DE LA REDEFINICION

1º La redefinición junto con las funciones de eficacia luminosa ya adaptadas $V(\lambda)$ y $V'(\lambda)$ da lugar a valores de $K(\lambda)$ y $K'(\lambda)$ exactamente conocidos, posibilitando obtener valores fotométricos de espectroradiométricos por computación exacta

- 2? No se necesita en adelante un patrón de luz, ya que el vatio ha sido ya definido en términos de m, Kg y sg. Cada laboratorio podrá elegir el método que considere más adecuado para realizar la unidad fotométrica.
- 3? No habrá más énfasis desproporcionado en las lámparas de vacío, pudiendo utilizarse fuentes más prácticas, como las modernas lámparas de halógeno e incluso el laser. El recalibrado del patrón puede hacerse con frecuencia y no necesita estabilidad a largo plazo, uno de los graves inconvenientes del cuerpo negro.
- 4? Más precisión y acuerdo entre las escalas fotométricas internacionales.
- 5? La redefinición simplifica la enseñanza de la fotometría, al convertir la Física Fotométrica en un campo objetivo de la metrología pues no es más que radiometría pesada espectralmente.

Evolución de la candela en España en estos casi 50 años

Joaquín Campos Acosta

Instituto de Óptica “Daza de Valdés”

Consejo Superior de Investigaciones Científicas

La evolución de la unidad básica en el campo de Fotometría en estos últimos casi 50 años ha venido marcada por la redefinición de la misma en el año 1979. Hasta entonces, la candela, como otras unidades básicas, estaba ligada a un dispositivo complejo, un radiador completo o cuerpo negro a la temperatura de fusión del platino con unas dimensiones y presión especificadas. Un dispositivo que no era asequible más que a unos pocos laboratorios nacionales en el mundo por su complejidad. En el año 1979, en línea con el pensamiento que se abría paso en la comunidad metroológica internacional, la candela se redefinió, eliminando su conexión directa con un dispositivo y estableciéndola como la intensidad luminosa de una fuente que emite un flujo radiante (potencia radiante) de $1/683$ W por estereorradián en una dirección dada a la frecuencia de 540×10^{12} Hz, que se corresponde con la de máxima sensibilidad de la curva de eficiencia luminosa del ojo humano.

Esta nueva definición permitió la realización primaria de la unidad básica de intensidad luminosa en un mayor número de laboratorios de referencia metroológica, puesto que se trataba de medir la intensidad radiante de una fuente en una dirección dada, a la frecuencia de 540×10^{12} Hz; es decir, medir el flujo radiante por unidad de ángulo sólido en esa dirección. La medida del flujo radiante se puede realizar directamente con un radiómetro o por comparación con un emisor patrón como el propio cuerpo negro u otros que se han ido desarrollando como la radiación de sincrotrón.

La medida del flujo por comparación con otro patrón emisor sigue estando reservada a pocos laboratorios en el mundo, pues los emisores patrón requieren instalaciones complejas y costosas, pero la medida con un radiómetro es más asequible. De hecho, esta segunda línea es la que han seguido

la mayor parte de los laboratorios que han conseguido la realización primaria de la candela. Los radiómetros absolutos, que son capaces de medir el flujo radiante per se, sin necesidad de ser calibrados respecto a otro patrón, se han desarrollado mucho en los últimos 50 años. En esencia son de dos tipos: los de sustitución eléctrica, en los que se compara el calentamiento producido por la radiación absorbida con el producido sobre el mismo elemento por una corriente eléctrica, y los denominados cuánticos, en los que se mide la corriente generada por la radiación absorbida y se estima esta a partir de la primera. Si bien estos principios son relativamente sencillos, su realización práctica no lo es, puesto que hay que conocer muy bien los mecanismos que diferencian los calentamientos radiante y eléctrico en el primer caso y evaluarlos, o las pérdidas que hacen que no se produzca un electrón por cada fotón incidente y evaluarlas también. Se han necesitado desarrollos tecnológicos importantes en ambas líneas hasta que se ha alcanzado una incertidumbre relativa de medición cercana a 0,01 %, lo cual sólo se consigue hoy en día en determinadas condiciones de laboratorio.

El Instituto de Óptica del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC-IO en adelante) ha participado en esta evolución de la candela, realizando la unidad de intensidad luminosa antes de la aprobación de su definición de 1979. Al principio de la década de los setenta del siglo pasado, el Instituto de Óptica, de dilatada experiencia en medidas fotométricas, decidió realizar sus propios patrones primarios para evitar la dependencia de otros países. A partir de un radiómetro de sustitución eléctrica comercial (conocido como ECPR), basado en un detector piroeléctrico, que se acababa de desarrollar en el entonces NBS de EE. UU., se midió la distribución espectral de la irradiancia producida por una lámpara de filamento de tungsteno con halógeno en un plano a 50 cm de distancia, utilizando un conjunto de filtros interferenciales. A partir de ella se calculó la intensidad radiante y la intensidad luminosa de la lámpara como se propondría luego en la definición de la candela. Este trabajo se publicó en el año 1979, el mismo en que se redefinió la unidad básica.

Con el ECPR el límite de incertidumbre relativa se situaba en el 1 %, comparable a lo que se obtenía con otras realizaciones de la unidad básica,

pero lejos de la de otras unidades básicas. En la década de los ochenta, el NPL desarrolló un nuevo radiómetro de sustitución eléctrica basado en un bolómetro de germanio situado en una cavidad en vacío y a temperatura de helio líquido, con la intención de medir la radiación de un cuerpo negro y contribuir a la estimación de la constante de Planck.

El CSIC-IO adquirió uno de estos radiómetros para volver a realizar la candela con menor incertidumbre. Se realizó de forma original a partir de un radiómetro con respuesta espectral como la de la curva de eficiencia luminosa del ojo humano (luxómetro) que fue calibrado respecto al radiómetro criogénico de sustitución eléctrica, consiguiéndose rebajar la incertidumbre de la nueva realización a la mitad de su valor anterior a medidos de la década de los noventa del siglo anterior.

En la actualidad y tras haber participado en proyectos europeos de los programas de metrología EMRP y EMPIR en los que se ha trabajado en el desarrollo de un nuevo radiómetro basado en un fotodiodo de silicio de eficiencia cuántica unidad, es decir, cada fotón absorbido en una determinada región espectral produce un electrón que contribuye a la fotocorriente, el CSIC-IO está participando en un proyecto del programa EPM en el que uno de los objetivos es usar este radiómetro para definir la candela a partir de una fuente LED. Se espera que la incertidumbre de esta nueva realización sea del orden de 0,1 %, limitada por la incertidumbre de la distribución espectral de la propia fuente sobre la que se realice la unidad.

La definición de la candela del año 1979 tenía en su seno la filosofía que ha inspirado el nuevo SI del año 2019, por lo que no ha necesitado una nueva redefinición para incorporarse al mismo, sino una nueva reformulación adoptando el valor de 683 lm/W, la constante de eficacia luminosa, como una de las siete constates en las que se basa el actual sistema internacional.

Esa definición del año 1979 no sólo tenía la virtud anterior, sino que ponía de manifiesto que la magnitud clave que se ha de medir para realizar la candela es el flujo radiante o la potencia radiante. Por este motivo en varias ocasiones se ha planteado que la candela podría ser sustituida por el lumen, la unidad de flujo luminoso en el SI, como unidad básica de

las magnitudes fotométricas en el SI. El CSIC-IO ha participado en ese debate que, sin embargo, no ha dado lugar a ningún cambio de unidad básica hasta la fecha, dada la importancia de la candela en el mundo de la iluminación, la gran industria que soporta la fotometría.

Si estos casi 50 años han estado llenos de actividad, el futuro no se prevé menos activo. Las tecnologías cuánticas han alumbrado fuentes de radiación con emisión de fotones individuales o con número controlado de fotones. Estas fuentes de frecuencia de emisión bien conocidas se están ensayando para la realización futura de la candela. Bastaría con contar con precisión suficiente esos fotones para poder conocer el flujo luminoso de la fuente (nuevamente el pugilato entre lumen y candela) que podría ser su intensidad luminosa si las condiciones geométricas de la emisión lo permiten. ¿Habría una candela cuántica?

Por último, hacer notar que la relación entre las magnitudes radiométricas y fotométricas se establece a partir de la distribución espectral de la eficiencia luminosa, la conocida $V(\lambda)$. Por tanto esta función es parte integral de la realización de la candela. Esta curva se adoptó en el año 1924 y, aunque se conoce que tiene ciertas deficiencias, no se ha modificado hasta la fecha. Sin embargo, el conocimiento aprehendido sobre las células que determinan la visión del ojo puede posibilitar que se defina una nueva curva de eficiencia luminosa en el futuro que podría dar lugar a una nueva definición de la candela.

ESTADO ACTUAL DE LOS PATRONES PRIMARIOS EN DOSIMETRIA X Y GAMMA.

Antonio Brosed Sarreta

Junta de Energía Nuclear.

Cada vez es más extenso el campo que debe cubrir la dosimetría de radiaciones ionizantes, en particular la de radiaciones X y gamma, a medida que se extiende el uso de estas radiaciones. En todas las aplicaciones, desde el ensayo de materiales para reactores nucleares, hasta el tratamiento del cáncer, pasando por los problemas de protección del personal que maneja las instalaciones radiactivas, la radiación, como problema metrológico, interesa más desde el punto de vista de sus efectos sobre el material que se irradia que desde el del conocimiento de la fuente que la origina. Esto determina que las magnitudes de interés en nuestro caso concreto, la dosis absorbida y la exposición, tengan ese mismo carácter. En esta comunicación se trata de pasar revista al estado de la exactitud de la medida de estas magnitudes en la cúspide de la pirámide metrológica, es decir, en los laboratorios primarios, así como a las inquietudes y a los proyectos de estos laboratorios.

Campos de actuación y necesidades.

Sería prolijo el enumerar todas las aplicaciones de las radiaciones X y gamma. La costumbre es agruparlas en tres grandes campos, a saber:

- a) Dosimetría personal, que concierne a la medida de la radiación y sus efectos sobre las personas profesionalmente expuestas y sobre el público en general.
- b) Dosimetría clínica, que estudia la radiación que se usa como fuente de energía para diagnóstico y terapéutica.
- c) Dosimetría del tratamiento de los materiales, que se interesa en aquellas aplicaciones de la radiación, en dosis mucho mayores

.../...

que en las citadas antes, para esterilización de alimentos, materiales clínicos, etc. y, en general, para todo proceso en que interese el cambio de las propiedades del material irradiado.

Es obvio que en los tres casos, el interés del usuario reside primordialmente en la energía absorbida en el material que le concierne y por eso la magnitud radiológica que más le importa es la "dosis absorbida" (*).

El grado de exactitud con que se necesitan las medidas no es el mismo en estos tres campos. En principio la exigencia máxima reside en la dosimetría clínica. Transcribiendo literalmente; el jefe de la Sección de Radiaciones Ionizantes del National Physical Laboratory (NPL), pone en boca de uno de los máximos especialistas británicos en oncología las siguientes palabras. "...El conocimiento exacto de los niveles de las dosis es de importancia particular cuando se suministra radioterapia a tumores localizados, que son potencialmente curables. Varios estudios muestran que el efecto letal para tumores primarios aumenta rápidamente en una zona relativamente estrecha de niveles de dosis.... En una serie de pacientes con carcinoma temprano de laringe, tratados en el Christie Hospital y en el Holt Radium Institute, desde 1955 a 1961, se pudo descubrir que existían cambios marcados en la velocidad de cura y en la incidencia de efectos debidos a sobredosis, para una variación de $\pm 5\%$ en la dosis suministrada al tumor ..." (JENNINGS 1974). Teniendo en cuenta cómo se propagan los errores en el proceso de disseminación; para que un centro clínico la dosis se suministre con una exactitud de 5%, no es aventurado decir que el laboratorio primario debe destruirla con una exactitud del orden de 1% a 2%.

En el campo de la dosimetría personal, la máxima autoridad es naturalmente el Comité Internacional para la Protección contra las Radiaciones (ICRP), en cuya publicación n°12, párrafo 101 se lee: "La incertidumbre en determinar los límites superiores de la dosis equivalente anual a la totalidad del cuerpo o a sus órganos, no debería exceder del 50%. Cuando estas dosis son meno-

(*) La definición de dosis absorbida se debe al Comité Internacional de Unidades y Medidas de Radiación (ICRU). En su formulación más reciente (1971): "La dosis absorbida D , es el cociente de d por dm , donde d es el valor medio de la energía impartida por la radiación a la materia, en un volumen elemental, y dm es la masa de la materia en ese volumen elemental". La unidad SI, aprobada en la 15ª Conferencia General de Pesas y Medidas, es el gray (Gy). La unidad especial es el rad (1 rad = 10^2 Gy).

res de 2 ren, se puede aceptar una incertidumbre de 1 ren. En ella se incluyen los errores debidos a las variaciones en la sensibilidad del dosímetro con la energía y con la dirección de su incidencia, así como los errores intrínsecos del dosímetro y de su calibración" (ICRP 1969). Es decir, siempre que no excedan determinados niveles, en este campo las exigencias de exactitud no son muy estrictas. Evidentemente, la exigencia se haría mucho mayor si se trata de dosis mucho más altas, como las que se podrían recibir en casos de emergencia o de accidente.

En cuanto al tercero de los campos citados, el tratamiento de materiales, volvamos a transcribir al Dr. Jennings: "En procesos de esterilización, una incertidumbre de X% en la medida de la dosis se traducirá en un aumento de X% en el costo, es decir, al esterilizar productos médicos, si se desea suministrar una dosis mínima garantizada, al objeto de cumplir con la legislación, se necesitará un período adicional de irradiación para tener en cuenta la incertidumbre" (JENNINGS 1974).

Si de la exactitud pasamos a los niveles de dosis que se requieren en estos tres campos, nos encontramos con que cubren unos 12 órdenes de magnitud, desde los niveles de protección a los del tratamiento de materiales. También es enorme el rango de las energías requeridas, puesto que comprende desde rayos X generados mediante tensiones de aceleración de unos pocos kV, hasta los generados en los aceleradores de 50 MV, pasando por los rayos gamma del orden de los MeV, como los fotones emitidos por las fuentes de ^{60}Co y de ^{137}Cs , de tanto uso en los campos citados. El tipo de problemas, pues, que se les plantean a los laboratorios primarios, los grandes Laboratorios Nacionales, presenta grandes diversidades tecnológicas que se resuelven mediante una diversificación de los métodos de medida. De ellos hablaremos brevemente en lo que sigue.

Método iconométrico. Exposición.

Tan importante como definir la dosis absorbida es establecer cuáles son los materiales de interés metroológico, es decir, aquellos en los que conviene realizar las medidas físicas que de forma directa o indirecta conduzcan a la determinación de la dosis absorbida. Tales materiales, escogidos en virtud de sus propiedades, en los que es factible hacer tales medidas, pueden considerarse como materiales de referencia. Lo que interesa es que las medidas físicas puedan realizarse en condiciones apropiadas, pero también que los

resultados obtenidos en ellos se puedan transferir con una pérdida mínima de exactitud a lo que se obtendría si las medidas se realizarán precisamente en los materiales en los que por parte del usuario se querría determinar la dosis absorbida. El material de referencia más comúnmente usado, y desde antiguo, para radiaciones X y gamma, es el aire. La razón práctica para ello es la ionización que las radiaciones producen en él, como es notorio. Debido a la constancia de la energía necesaria para producir un par de iones, el número de los producidos en una masa determinada de aire, resulta proporcional a la energía que le comunica el haz de radiación. Esta constante se representa por \bar{W} y vale, $\bar{W} = 34 \cdot 10^{-19} \text{ J (33,7 eV)}$. Aprovechando esta propiedad se define la magnitud que se usa corrientemente para caracterizar el campo de radiación en cada punto, la exposición ^(*). Si se lee con cuidado su definición, requisito imprescindible para realizar físicamente su unidad, se aprecia que las condiciones exigidas son ideales, imposibles de realizar rigurosamente en la práctica. La principal dificultad reside en el hecho de que los iones que hay que recoger son producidos a causa de la interacción de los fotones con una masa determinada de aire (aunque no se hayan originado directamente en ella). En realidad la medida de la exposición sólo es posible en las condiciones experimentales denominadas de equilibrio electrónico, en las cuales existe una compensación de cargas en la zona de medida (ROSCHE 1958; BROSED y GRANADOS 1973). Otra dificultad muy importante nace del hecho de que los electrones producidos directamente, han de ser detenidos por completo en el aire. Pues bien, la emigración de tales electrones va, desde el orden de un milímetro para fotones de unos pocos keV, hasta unos cuantos metros, para los fotones gamma del ⁶⁰Co. Ello obliga a que la mayor parte de los Laboratorios Nacionales empleen dos tipos de instrumentos para determinar la exposición. Hasta energías de unos 600 keV se emplean cámaras de paredes de aire libre. A partir de esa energía es preferible utilizar cámaras de paredes de grafito. Se han hecho intentos para utilizar paredes de aire a presión, pero presentan dificultades muy serias y su uso parece descartado en el futuro.

(*) Según ICRU: "La exposición es el cociente de dQ por dm , donde dQ es el valor absoluto de la carga total de todos los iones de un mismo signo producidos en el aire, cuando todos los electrones (negativos y positivos) liberados por los fotones en un volumen elemental de aire, cuya masa sea dm , hayan sido detenidos completamente en el aire". Su unidad en el sistema SI es el $\frac{C}{kg}$. La unidad especial es el roentgenio, símbolo R ($1R = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ C.kg}^{-1}$).

El uso de las cámaras de cavidad descansa en el principio de Bragg-Gray, que relaciona la ionización en un gas (en este caso aire) que llena una cavidad muy pequeña, con la energía disipada en las paredes de la cavidad (ALLISY 1967). En principio, esto permite la determinación directa de dosis absorbidas por medios ionométricos; ahora bien, su medida en un material de referencia a diversas profundidades se ve seriamente impedida, entre otras causas, por la degradación del espectro de fotones en los umbrales de la cavidad. Estas dificultades son considerablemente inferiores cuando la cámara se ha diseñado específicamente para determinar la exposición en un punto del haz.

En ambos tipos de cámaras, es preciso aplicar términos correctivos para que se pueda pasar de las medidas experimentales al valor de la exposición en un punto del haz, conforme a la definición. Para energías superiores a un valor que puede situarse alrededor de 2 MeV, la incertidumbre en uno de estos términos limita la exactitud de las medidas, incluso empleando cámaras de cavidad. En cuanto al límite inferior diremos que, para unos pocos keV, la condición de equilibrio electrónico se cumple únicamente en distancias tan cortas que el volumen de medida utilizable impide la recogida de una cantidad de carga eléctrica que sea físicamente medible. Fuera de estos márgenes carece de interés la medida de la exposición, al menos para los laboratorios primarios. No se olvide que el fin último sigue siendo la determinación de la dosis absorbida. Por eso la medida de la exposición no estará justificada más que cuando los métodos de medida directa de la dosis absorbida comporten una incertidumbre mayor. Bien es cierto que siempre habrá interés en desarrollar métodos de medida directa de la dosis absorbida, ya que la operación de convertir los datos de medida de la exposición a valores de la dosis absorbida en los materiales de interés, es siempre un problema delicado que implica una serie de condiciones cuya alteración obliga a introducir factores de corrección no muy bien conocidos y, en todo caso, requiere el uso de constantes como \bar{W} y e , la carga eléctrica elemental (ICRU 1969; ICRU 1973). A pesar de todo, y en tanto que los procedimientos colorimétricos no digan su última palabra, hoy por hoy, la exposición conserva un interés metrológico indudable. Tanto es así que es frecuente la determinación de dosis absorbidas a altas energías, mediante medidas realizadas con instrumentos calibrados en roentgenios para la energía del ^{60}Co . Tales determinaciones, que se llevan a cabo en centros secundarios y en establecimientos clínicos, se hacen a distintas profundidades en el seno del material de interés. Conviene añadir la observación de que; para medir en un laboratorio primario, con precisión

.../...

suficiente, la exposición o la tasa de exposición; es preciso que las cargas eléctricas recogidas sean bastante grandes, lo que significa que los niveles de intensidad del campo de radiación son los que corresponden a los usos clínicos. Por tanto, para realizar medidas a niveles de radioprotección, es preciso apartarse bastante de las condiciones óptimas que exige la definición de la magnitud. Se han propuesto soluciones variadas. Una de las más acertadas es la que ha adoptado el NPL, donde se ha diseñado una cámara adecuada para hacer medidas a estos niveles bajos de protección pero que, al mismo tiempo, en su escala menos sensible, es susceptible de ser calibrada mediante las cámaras primarias nacionales. Esta cámara, que podría llamarse de transferencia; según sus diseñadores, si se calibra en términos de tasa de dosis absorbida en aire, con radiaciones de energía descrita por una calidad de capa de hemirreducción de 1,25 mm de aluminio a 20 mm de aluminio; puede medir niveles de protección con una exactitud de 5%. (KEMP y READ 1968). Como se verá en apartados posteriores, la exactitud alcanzable para medidas de la exposición, en el rango de energía de interés, por los laboratorios primarios, es del orden de 1% a 1,5%.

Método calorimétrico.

En los últimos quince años se ha desarrollado mucho el uso de calorímetros para la medida de la fluencia de energía y de la dosis absorbida. Esto se debe sin duda a la mejora en sensibilidad de los métodos de detección. A este desarrollo no han sido ajenos en modo alguno los laboratorios primarios y, desde hace unos años, una de sus tareas principales es el estudio, desarrollo y puesta a punto de calorímetros y técnicas calorimétricas apropiadas para establecer los patrones de dosis absorbidas en niveles de uso clínico y de tratamiento de materiales. Las técnicas calorimétricas son varias (LAUGHLIN y GENNA 1966) pero los niveles de energías involucradas y las características de los materiales absorbentes que se requieren en las medidas de dosis absorbidas, hacen que la técnica elegida sea la calorimetría casi-adiabática. En ella se mantiene en todo momento una diferencia mínima de temperatura entre el material absorbente y la camisa que lo rodea, de modo que las fugas térmicas sean despreciables frente a la energía calorífica implicada en el proceso. En síntesis se procede como sigue: En una primera fase, un sensor embebido en el material absorbente, mide la variación de una magnitud eléctrica (normalmente una resistencia), variación que es proporcional al cambio

.../...

de temperatura que experimenta el absorbente al ser irradiado. Para determinar la constante de proporcionalidad, en una segunda fase, se introduce en el absorbente una cantidad conocida de energía eléctrica. Este método, naturalmente, supone que la medida de la energía comunicada por medios eléctricos es equivalente a la medida de la energía introducida por el haz de radiación. Posibles errores sistemáticos nacen de esta suposición, pues los gradientes de temperatura pueden ser apreciablemente distintos en uno y otro caso. Para evitarlo, en muchos calorímetros, el propio material absorbente de la radiación es el que sirve como resistencia de calentamiento en la fase de calibración.

Para que el calorímetro cumpla con la definición de la dosis absorbida, el material debe cumplir varios requisitos. De un lado, debe convertir en calor toda la energía que le imparte la radiación y, por otro, el número atómico de los materiales de que esté compuesto no puede ser alto, a fin de que las dosis absorbidas medidas en él se puedan trasladar con la mayor exactitud posible a los materiales de interés clínico y se conozca la equivalencia con otras magnitudes radiológicas. El material más usado actualmente es el carbono, en forma de grafito de alta pureza. También exige la definición, implícitamente, que la perturbación introducida por el calorímetro en el campo de los fotones sea mínima y, al mismo tiempo, el campo de electrones debe ser mínimamente perturbado por el teórico elemento diferencial de masa dm . Por eso se hacen del mismo material absorbente y la cámara y se trata de hacer mínimas las inhomogeneidades inevitables introducidas por los sistemas de medida de temperatura, calefacción etc. Por otro lado, el tamaño del absorbente es crítico. En teoría infinitamente pequeño, debe ser compatible con la sensibilidad del método y capaz de absorber las perturbaciones de masa que representan las inevitables inhomogeneidades citadas. Teniendo en cuenta la potencia específica envuelta en una medida primaria, unas decenas de milivatios por kilogramo, se comprende que la construcción del calorímetro y la realización de las medidas constituyan una técnica delicada y difícil.

En una primera etapa, los calorímetros diseñados en algunos laboratorios primarios, han sido enfocados primordialmente hacia la medida de dosis absorbidas producidas por fotones de energía por encima de 600keV y en especial por los del ^{60}Co . Para varios de ellos se han comparado determinaciones de dosis absorbidas con las realizadas por métodos ionométricos, al objeto de sacar a la luz los posibles errores sistemáticos o de deducir experimental-

mente los valores de parámetros tan importantes en dosimetría como \bar{Q} y \bar{P} (*). En una segunda etapa, los calorímetros deberán emplearse para medir dosis absorbidas en haces de mayor energía. Quizá es prematuro todavía hablar de exactitudes pues queda mucho trabajo por realizar, pero no cabe duda de que la calorimetría parece llamada a resolver la falta de verdaderos patrones de dosis absorbidas, al menos desde la energía de ^{137}Cs . Por el momento, con las técnicas calorimétricas en uso, la sensibilidad de este método sólo permite hacer determinaciones de la dosis absorbida que corresponden a los niveles de utilización clínica y de tratamiento de materiales.

Método químico

A menudo, la transferencia de energía a un material, por medio de las radiaciones ionizantes, produce en él un cambio químico. Algunos de estos cambios son razonablemente proporcionales a la dosis absorbida, independientemente de otras cualidades de la radiación, por lo que pueden aprovecharse para la medida de la dosis absorbida. El método químico más aceptado en la actualidad es el de la conversión del ión ferroso en férrico, a partir de una solución de sulfato ferroso. (FRICKE y HART 1966). Este dosímetro se conoce como dosímetro de Fricke y la medida se realiza normalmente determinando la concentración del ión férrico en la solución irradiada, empleando espectrofotometría de absorción. Para que el método proporcione verdaderamente valores de dosis absorbidas, es preciso conocer el valor de \bar{Q} proceden de comparaciones hechas entre dosímetros de Fricke con dosímetros iónicos o calorímetros. Por consiguiente, en rigor, este instrumento no es absoluto. No obstante ha jugado y juega un papel muy importante en los planes de trabajo de los laboratorios primarios y ello se debe fundamentalmente a dos razones. La primera es que utiliza un medio acuoso, por lo que es de gran interés en dosimetría clínica. La segunda es que constituye un buen procedimiento para la diseminación de la unidad de dosis absorbida. Para ello los laboratorios primarios preparan con todo cuidado cápsulas con solución virgen que se envían por correo a los centros que hay que calibrar. Allí se irradian estas cápsulas simultáneamente con los dosímetros de referencia del centro y se reexpiden al laboratorio emisor, el cual hace las medidas de concentración. Servicios de este

(*) \bar{P} es el valor medio del cociente de los poderes de frenado del aire y del grafito.

tipo están funcionando actualmente en Francia y en el Reino Unido y este último país proporciona igualmente servicio a algunos laboratorios primarios y secundarios de otros países.

La incertidumbre de la medida se debe en su mayor parte a la medida de \bar{C} . De todos los valores de esta constante existentes en la literatura, los más consistentes corresponden a la energía de la radiación gamma del ^{60}Co (ICRU - 1969; ICRU 1970), lo que sin duda se debe a la abundancia de determinaciones realizadas. Para esta energía la incertidumbre se puede estimar en 1,5% aproximadamente, pero aumenta con mucha rapidez para las energías por encima y por debajo de ésta. Varios laboratorios primarios se ocupan con gran interés en la mejora del valor de \bar{C} para todos los rangos.

Instrumentos-patrón

En un sólo país, el carácter de patrón para las radiaciones ionizantes se ha atribuido a determinados haces de radiación. El resto de los grandes Laboratorios Nacionales ha concedido dicho carácter a los instrumentos de medida. Es costumbre distinguir tres zonas de energía, a saber:

- 1- Rayos X blandos, o de energía baja (5 - 50 kV)
- 2- " " duros, o de energía media (50 - 250 kV)
- 3- Fotones de energía igual o superior a los del ^{60}Co .

En la figura 1 se representan de modo esquemático los métodos y los instrumentos que se utilizan en los laboratorios primarios, así como las condiciones necesarias para poder determinar las dosis absorbidas a partir de la exposición. Como resumen de todo lo dicho anteriormente se puede decir que para cubrir las dos primeras zonas de energía se emplean cámaras de paredes de aire libre. La energía de los gammas del ^{60}Co se cubre con cámaras de cavidad de paredes de grafito. La incertidumbre asociada con estos instrumentos es del orden de 1% a 1,5%. En algunos laboratorios se utilizan calorímetros adiabáticos como instrumentos-patrón para la determinación directa de la dosis absorbida, siendo el grafito el material de referencia en este caso. Aunque la incertidumbre no esté aún bien establecida, y habrá que esperar a los resultados de las comparaciones internacionales que se avecinan para poder hablar con mejor conocimiento, los laboratorios que utilizan estos instrumentos actualmente, en los niveles de uso clínico y para energías de los gamma de ^{137}Cs y de ^{60}Co , dan cuenta de incertidumbres ligeramente mejores que 1%.

.../...

Comparaciones internacionales.

Es bien sabido que una de las misiones principales de un laboratorio primario nacional es adquirir en sus medidas un grado de consistencia apropiado con el resto de los laboratorios primarios. El medio mejor es la comparación mutua, que en el caso que nos ocupa puede hacerse sometiendo a un mismo haz de radiación los distintos instrumentos-patrón o utilizando un instrumento intermedio, un instrumento de transferencia. Las comparaciones internacionales, en todos los campos metroológicos, han sacado ya a la luz numerosos errores sistemáticos, debido a que con mucha frecuencia las medidas se hacen empleando métodos diferentes. Los resultados son óptimos cuando las comparaciones se llevan a cabo dentro del marco de una Organización con experiencia científica y de coordinación, bien probada. Este convencimiento fue lo que impulsó a varias organizaciones internacionales a cooperar calurosamente, cuando, en 1958, el Comité Internacional (CIPM) decidió entrar oficialmente en el campo de la metrología de las radiaciones ionizantes. Así se pudo crear un Comité Consultivo para los Patrones de las Radiaciones Ionizantes (CCEMRI) que orientó al BIPM para la instalación de los laboratorios, la elección del personal y el establecimiento de planes de trabajo. El CCEMRI está actualmente dividido en cuatro Secciones independientes. La Sección I se ocupa precisamente de los rayos X y gamma. En 1965, el CCEMRI, a continuación de una experiencia decisiva obtenida mediante una comparación internacional entre varios patrones, realizada en los laboratorios de cada uno de los participantes, decidió que "con objeto de conseguir la mayor exactitud, es necesario comparar directamente las cámaras de paredes de aire. El empleo de cámaras de transferencia acarrea una exactitud menor en las intercomparaciones". Esto obligó a que el BIPM modificase sus objetivos y, dejando de lado las cámaras de transferencia, se dedicara a la construcción de sus propias cámaras-patrón. A partir de entonces fue cuando el BIPM se encontró en condiciones de cumplir con los objetivos que le habían sido marcados.

Desde el año 1966 se han llevado a cabo una serie de comparaciones internacionales, en la zona de los rayos X blandos, entre la cámara del BIPM y las de algunos de los más importantes Laboratorios Nacionales. En estas comparaciones se han encontrado discrepancias máximas de 0,5%, una cifra comparable con las incertidumbres estimadas. Sin embargo, se han dejado entrever diferencias sistemáticas entre los resultados obtenidos con las cámaras de

.../...

pequeñas y de grandes dimensiones, lo que ha inducido a estudiar con más cuidado algunos de los factores de corrección.

En el año 1972 se comenzaron unas comparaciones entre la cámara de cavidad del BIPM y las de cuatro importantes laboratorios. Las medidas se realizaron en el haz de rayos gamma de ^{60}Co del BIPM. A pesar de que tres de los laboratorios implicados emplearon cámaras con geometrías y dimensiones diferentes entre sí, los resultados han sido muy satisfactorios. La diferencia observada, del orden de 0,3%, es perfectamente compatible con las incertidumbres estimadas. Lo mismo en este caso que en el citado anteriormente, no se debe interpretar la concordancia de resultados, por sí misma, como si la incertidumbre en la determinación absoluta de la exposición sea del mismo orden, ya que; en una comparación entre cámaras; se eliminan de los resultados varios de los factores de corrección, por ser idénticos para las diversas cámaras. Tal ocurre con el factor \bar{P} de las cámaras de cavidad. La incertidumbre que introduce este factor por sí solo en el resultado final es de 0,5%, y es la mayor contribución.

En su sesión del año 1972, la Sección I del CCEMRI, a la vista de las calidades de radiación empleadas en los diferentes Laboratorios Nacionales, seleccionó un conjunto de ellas, que puede verse en la tabla 1, para que fuesen las empleadas en las comparaciones internacionales de los patrones de rayos X, en los niveles de uso clínico. En el informe correspondiente, en el que además se aconsejaba su uso para la calibración de instrumentos secundarios, se dice: "... es necesario hacer notar que efectuando las calibraciones en estas calidades de radiación es cuando se obtendrá la mayor uniformidad mundial en las medidas de la exposición". En la sesión celebrada en el mes de Abril del presente año se añadió a la lista primitiva la calidad correspondiente a una tensión de aceleración de 25 kV con estas calidades prescritas, en 1974, se inició una serie de comparaciones con la cámara-patrón del BIPM, en la región de los rayos X duros. En esta ocasión, debido al volumen considerable de las cámaras-patrón, los Laboratorios Nacionales participantes no han tenido más remedio que utilizar cámaras de transferencia de muy buena calidad, previamente calibradas en sus países respectivos. Los resultados no han sido analizados todavía.

Por lo que respecta a los patrones de dosis absorbidas, entre este año y el

.../...

trascuro del venidero se va a llevar a cabo una serie de comparaciones en las que se utilizarán los calorímetros portátiles desarrollados en algunos de los Laboratorios Nacionales. En estas comparaciones el BIPM interviene empleando métodos ionométricos. Se determinarán dosis absorbidas, y una determinada profundidad de un maniquí de grafito, con cámaras de cavidad y con calorímetros. No cabe duda de que será una experiencia muy provechosa.

En el haber del BIPM hay que anotar, junto a estas comparaciones, la realización de numerosos trabajos concernientes a la determinación de los factores correctivos más importantes en la determinación de la exposición, como la recombinación de iones, la humedad, etc. En este mismo sentido, y siempre con la intención de sacar a la luz el mayor número de posibles errores sistemáticos, el BIPM ha llevado a cabo diversas experiencias únicas. Entre las más notables figura la comparación entre la actividad de una fuente de ^{60}Co de unos 37 GBq (1 Ci) y la tasa de exposición producida a una distancia bien determinada de la misma. Entre el resultado experimental de esta tasa y el calculado a partir de la actividad de la fuente, se encontró una discrepancia de 0,8%. Esta discrepancia puede provenir de la inexactitud en el conocimiento de la constante \bar{W} de la cámara de cavidad, o en el de la energía necesaria para producir un par de iones \bar{W} , o de ambas a la vez. Conviene pues insistir en las medidas de ambas, si se quiere mejorar las medidas tanto de la exposición como de la dosis absorbida. Creemos que, a la vista de todo lo dicho, queda bien de manifiesto tanto la competencia como la dedicación del BIPM y el papel de primera fila que le corresponde jugar en la mejora de la exactitud y uniformidad de los resultados de las medidas de todos los Laboratorios Nacionales.

.../...

Metrología de radiaciones ionizantes

Miguel Embid Segura

Director del Laboratorio Nacional de Referencia de Metrología de Radiaciones Ionizantes

Centro de investigaciones Energéticas, Medio Ambientales y Tecnológicas

La metrología de radiaciones ionizantes se ocupa de la organización y el desarrollo de los patrones de medida y de su mantenimiento. En España, las realizaciones prácticas de las unidades de medida (patrones nacionales) y su diseminación al resto de usuarios de la metrología se realiza por el Centro Español de Metrología y sus Laboratorios Asociados, dentro de los cuales el Laboratorio de Metrología de Radiaciones Ionizantes del Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), tiene la responsabilidad de mantener y custodiar los patrones nacionales de las unidades SI de actividad, exposición, kerma, dosis absorbida y fluencia neutrónica, en base al RD 207/2022. La multiplicidad de magnitudes en metrología de radiaciones ionizantes es una consecuencia directa de la necesidad de abordar los desafíos únicos asociados con la medición y evaluación de fenómenos invisibles, pero potencialmente perjudiciales. Estas magnitudes, meticulosamente definidas y estandarizadas, desempeñan un papel esencial en la protección de la salud humana y en la gestión segura de las aplicaciones radiológicas en diversos campos, contribuyendo así al progreso de la ciencia y la tecnología en un mundo en el que la radiación ionizante sigue desempeñando un papel fundamental.

La primera razón que motiva la existencia de varias magnitudes en metrología de radiaciones ionizantes radica en la propia naturaleza de estas radiaciones. A diferencia de muchas otras magnitudes físicas, como la longitud o la masa, las radiaciones ionizantes no pueden ser percibidas directamente por nuestros sentidos. No se pueden ver, oler ni tocar, lo que impide una evaluación empírica directa de su presencia o intensidad. En lugar de ello, se requiere el uso de dispositivos especializados, como

detectores de radiación, para medir y cuantificar estos fenómenos. Estos detectores están diseñados para responder a diferentes características de la radiación, lo que da lugar a la necesidad de magnitudes específicas para describir los aspectos relevantes de la radiación detectada.

En segundo lugar, la variedad de magnitudes en metrología de radiaciones ionizantes se justifica por la diversidad de efectos biológicos y físicos que estas radiaciones pueden inducir en la materia. Las radiaciones ionizantes pueden interactuar con los átomos y moléculas en su camino, generando una amplia gama de respuestas. Estas respuestas incluyen la ionización de átomos, la excitación de electrones, la producción de partículas secundarias y la liberación de energía térmica. Cada uno de estos efectos tiene importancia en diferentes contextos y aplicaciones, desde la radioterapia médica hasta la protección radiológica en entornos nucleares.

En tercer lugar, las magnitudes en metrología de radiaciones ionizantes están diseñadas para abordar diferentes aspectos de la exposición radiológica. Por ejemplo, algunas magnitudes se enfocan en la cantidad de radiación absorbida por la materia (dosis absorbida), mientras que otras se centran en la capacidad de la radiación para dañar los tejidos biológicos (dosis equivalente) o en la peligrosidad de la fuente radiactiva en sí (actividad).

En las últimas cinco décadas, la metrología de radiaciones ionizantes ha atravesado una evolución notable, caracterizada por avances tecnológicos y aplicativos de envergadura. Hace medio siglo, este campo emergente se hallaba en sus incipientes fases de desarrollo, sometido a limitaciones que, en el presente, se han superado con creces. Hoy en día, se hace imperativo considerar el empleo de partículas tales como protones y neutrones, aspectos que anteriormente no eran contemplados en el ámbito de la medicina nuclear o en las cotidianas mediciones radiológicas.

Esta evolución ha sido posible gracias al avance en diversas disciplinas. Estas comprenden desde los sofisticados detectores de radiación, que han experimentado un notable desarrollo, proporcionando instrumentos de una sensibilidad y precisión sin precedentes que permiten mediciones

precisas de varias radiaciones ionizantes, mejorando así la seguridad y eficacia en aplicaciones médicas, industriales y de investigación. Además, en el ámbito médico, tanto la radioterapia como la radiología diagnóstica han avanzado considerablemente en términos de precisión y seguridad, gracias a la dosimetría precisa y la supervisión de la exposición, lo que ha reducido los riesgos para los pacientes y el personal médico. En los últimos tres años, en España han surgido nuevos centros de tratamiento radioterapéutico, como la protonterapia, y se ha comenzado a medir la dosis neutrónica generada en tratamientos de radioterapia con fotones de alta energía (> 6 MeV). La conciencia pública y profesional sobre los riesgos asociados a la radiación ionizante ha aumentado significativamente, lo que se ha traducido en regulaciones de protección radiológica más estrictas que se aplican con rigor para garantizar la seguridad en diversos entornos. Por último, la digitalización y la automatización de los procesos de medición y análisis han simplificado la metrología de radiaciones ionizantes, mejorando la eficiencia en la gestión de datos y permitiendo tomar decisiones fundamentadas en información precisa y oportuna.

Los progresos vertiginosos en la metrología de las radiaciones ionizantes han desplegado un impacto trascendental en el ámbito de la seguridad y la eficiencia en una ecléctica panoplia de aplicaciones. Los detectores contemporáneos, con su sofisticación y exactitud inigualables, han propiciado el cotejo y la cuantificación precisa de todas las manifestaciones de radiación ionizante. Este logro innegable se erige como un pilar fundamental en la empresa de preservar y elevar la salud y el bienestar de la humanidad, demostrando, en última instancia, su valiosa contribución al florecimiento de la vida misma.

LABORATORIOS DE ENSAYOS INDUSTRIALES

Pedro Manuel Martínez Martínez

Laboratorio Central Oficial de Electrotecnia.

I.- A modo de introducción.

Este trabajo ha sido preparado por el personal del Laboratorio Central Oficial de Electrotecnia que, como se sabe, es un centro de ensayos de carácter industrial que viene actuando, desde hace más de 30 años, en campos directa e indirectamente relacionados con la Electrotecnia.

Desde hace algunos años venimos abrigando la idea de exponer, de alguna forma, la experiencia acumulada en el Laboratorio a lo largo de estos treinta años en materia de metrología a nivel industrial, debiendo indicar que, en todo cuanto se dirá a continuación, juega un papel muy destacado los contactos habidos en este tiempo con multitud de empresas nacionales, organismos oficiales y hasta personas particulares cuyas necesidades metrológicas "prácticas" -- creemos nos sean suficientemente conocidas.

La tesis de esta comunicación está constituida por la conveniencia, e incluso necesidad, de crear una red de laboratorios de ensayos que podríamos denominar "Laboratorios de ensayos industriales", y que constituiría la base real de un posible "Plan Metrológico Nacional".

Estos Laboratorios, cuyas características exponeremos más adelante, permitirían efectuar una comprobación sistemática, y al nivel adecuado, de la bondad exigible a los productos manufacturados,

lo que redundaría, en forma más o menos directa, en la mejora de su calidad, presentando incidencia notable sobre, al menos, los siguientes aspectos:

- a) Defensa del consumidor, en su más amplia acepción, ya sea particular, empresarial o estatal.
- b) Apoyo eficaz a los fabricantes que elaboran sus productos en forma correcta y con la calidad adecuada.
- c) Obligaría, indirectamente, a los fabricantes a crear o mejorar sus propios controles de calidad.
- d) Mejoraría la calidad de los productos que los haría competitivos a nivel internacional, aumentando con ello sus posibilidades de exportación y contribuyendo, así, a un mejor equilibrio de la balanza de pagos.
- e) Se atenuaría, en gran manera, la dependencia de muchas empresas nacionales, en cuanto a su apoyo en otras extranjeras, para el asesoramiento técnico y la prueba de sus fabricados.
- f) Se crearía, indudablemente, una beneficiosa mentalización, tanto en el proveedor como en el usuario, de que los productos están, o pueden estar, comprobados eficazmente en centros de ensayo nacionales especialmente constituidos y de reconocida garantía.
- g) Se limitaría la importación, sin garantía real de calidad, de muchos productos extranjeros, no fabricados en nuestro país y cuya calidad nos es imposible comprobar. Asimismo, se frenaría la importación de otros productos, de características similares a los de fabricación nacional, al ser demostrable la calidad de éstos.

- h) Se podría dar cumplimiento a las exigencias establecidas en reglamentos y especificaciones dictadas por la Administración, en cuanto a la calidad de los elementos fabricados, instalados y empleados. En la actualidad, por falta de suficientes o adecuados centros de ensayo, una gran parte de los requisitos exigidos no pueden ser verificados -- realmente, por lo que pierden mucha eficacia las numerosas disposiciones dictadas al respecto.
- i) Tanto la Administración como las empresas privadas o los individuos particulares, tendrían la oportunidad de disponer de centros de ensayo en los que poder verificar todo tipo de productos, con lo que se evitarían fraudes y se -- aseguraría un correcto funcionamiento y utilización de los elementos.
- j) Se podría, antes de dar a la publicidad una Norma, comprobar en los laboratorios su posibilidad de aplicación e incluso su conveniencia, teniendo en cuenta las posibilidades económicas nacionales del momento.
- k) Se evitaría la incongruencia de que una entidad pública o privada exija que ciertos productos cumplan las características propias de una cierta calidad, cuando realmente no existen centros de ensayo, o éstos están instalados en forma inadecuada, precaria o insuficiente, para poder realizar las comprobaciones exigidas con la debida garantía y prontitud.
- l) Se evitaría, como en la actualidad ocurre, la necesidad de que los prototipos de nuestros terminados, en gran número de ocasiones, tuvieran que probarse en laboratorios extran

jeros, con la consiguiente salida de divisas, demora por -
espera de turnos de ensayo, etc.

- m) Contribuiría muy notablemente, a la formación de personal calificado a todos los niveles, preparación de cursos de -
capacitación, colaboración con entidades docentes, etc.

Aunque se podría extender, aún más, esta ya larga relación de ventajas, con otros aspectos nada despreciables, entendemos que lo apuntado es más que suficiente para comprender la importancia que la creación de estos Laborato-
rios tiene para el conjunto de la industria nacional, y de la propia nación.

II.- Características de los Laboratorios de Ensayos Industriales.

Las características fundamentales que deberán reunir los ---
"Laboratorios de Ensayos Industriales", en cuanto a su misión, medios y régimen, serían las siguientes:

1º Su fin primordial sería la realización de pruebas y verifi-
caciones de carácter industrial, es decir, mediciones de precisión suficiente, pero no exhaustiva ni de muy alta calidad. De esta for-
ma se garantizaría el adecuado nivel de calidad del producto ensaya-
do y se agilizaría el ritmo de ensayos, al no ser éstos excesivamen-
te costosos ni de lenta realización.

2º Sus instrumentos e instalaciones serían de buena calidad y deberán ser verificados periódica y sisténticamente en otros Labo-
ratorios o Centros de Metrología de Precisión nacionales.

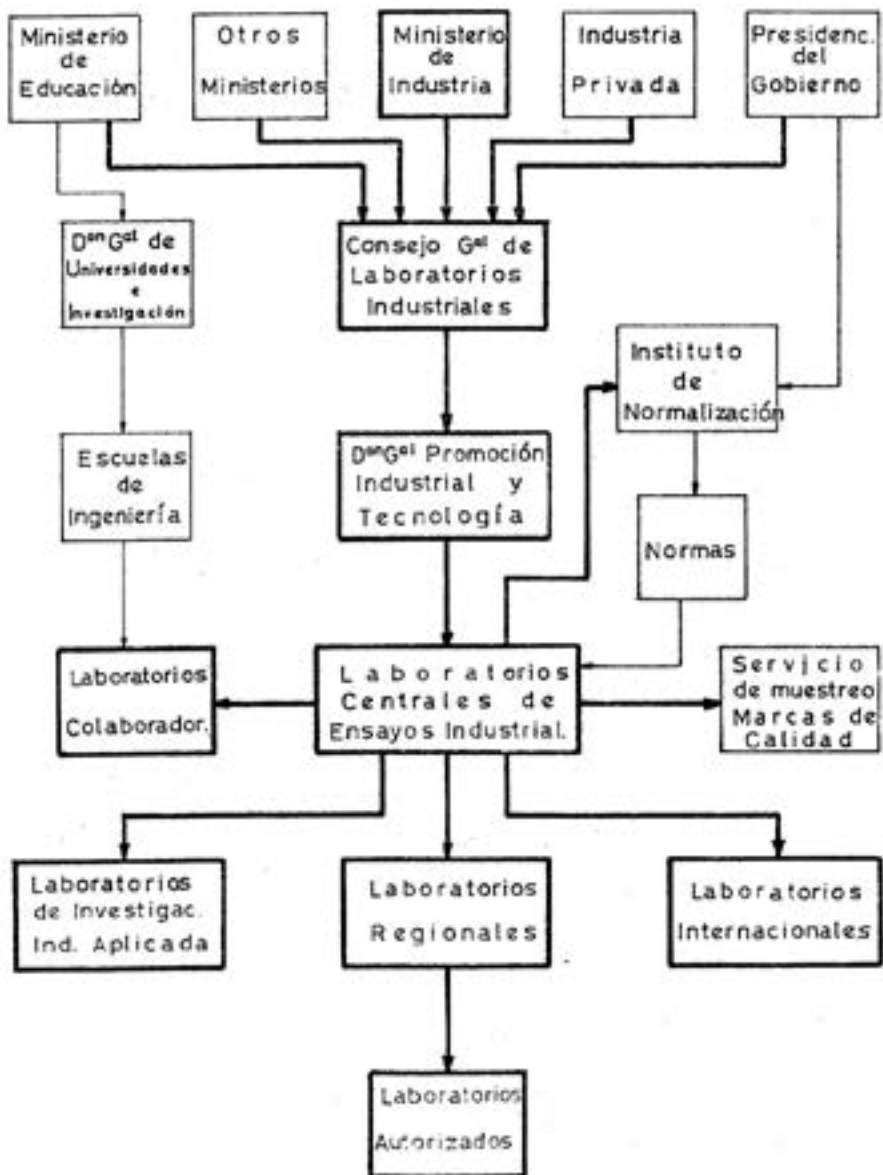
3º Su régimen jurídico y económico será el adecuado para asegurar su flexibilidad de actuación, si bien deberán estar controlados y fiscalizados por organismos centrales para garantizar, en forma absoluta, su imparcialidad.

III.- Organización.

En cuanto a la organización jerárquica de estos Laboratorios y su interconexión, podría a nuestro entender, ser la siguiente (reflejada en el gráfico adjunto).

Como núcleo central y básico de este plan consideramos a los llamados "Laboratorios Centrales de Ensayos Industriales" que serían, en cada rama de la actividad industrial, las entidades de ensayo de mayor rango, en las que existirían medios materiales y de personal para la ejecución de los ensayos que les fueran encomendados. Dictarían la normativa práctica de estos ensayos; expedirían informes, certificados y protocolos; realizarían estudios y trabajos especiales; crearían servicios especiales de normalización para comprobación de la adecuada redacción y conveniencia de las normas de ensayo; enviarían representantes y observadores a congresos y reuniones de carácter internacional; etc. etc. En estos Laboratorios Centrales se establecerían las técnicas de ensayo de aplicación en otros laboratorios subordinados o relacionados con ellos.

Entre éstos, a los que ahora nos referimos, figurarán los "Laboratorios de Investigación Industrial Aplicada", centros de carácter específico, dedicados a la promoción y realización de ensayos de tipo investigador con experimentación y desarrollo de nuevos productos o sistemas de aplicación industrial, propuestos por particulares, entidades oficiales, o de programación propia. Los "Labora



torios de Investigación Industrial Aplicada" estarían en íntima colaboración con los Centrales para complementar sus actividades aprovechando medios y compartiendo experiencias.

Dentro de los laboratorios de ensayo, directamente dependientes de los que hemos llamado "Laboratorios Centrales de Ensayos Industriales", podrían quedar englobados algunos "Laboratorios Regionales" los "Laboratorios Autorizados" y los "Laboratorios Colaboradores".

Los primeros, "Laboratorios Regionales de Ensayos Industriales" tendrían un funcionamiento similar al de los Centrales, pero con dedicación preferente a productos de predominante fabricación o consumo en la zona en que se encuentren situados, actuando, en consecuencia, a modo de delegaciones de aquellos y subordinados, por tanto, a ellos, en cuanto a organización general, técnicas de ensayo, etc, todo ello con vistas a que su actividad responda a un mismo y único -- criterio.

Por algunas empresas o entidades oficiales o particulares, se podría solicitar el reconocimiento para la realización, en sus propios laboratorios, de ensayos cuya validez pueda ser reconocida por terceros. Estos laboratorios adquirirían así el carácter de "Autorizados" y para ello, habrían de ser inspeccionados y controlados por los Laboratorios centrales o regionales, si bien entendemos, que -- los trabajos de estos Laboratorios Autorizados no deberían ser reconocidos como de rango oficial (marcas de calidad, certificaciones -- oficiales, dictámenes legales, etc.).

Pese a ello, su labor podría ser altamente beneficiosa ya que en múltiples ocasiones, podrían descargar de trabajo a los laboratorios oficiales en ensayos de rutina o sin efectos legales o reglamentarios.

Por último, podrían designarse "Laboratorios Colaboradores" entre los existentes en muchos centros docentes (escuelas de ingeniería superior y técnica, por ejemplo). En muchos de ellos existen instalaciones, aparatos y personal cuyas características pueden ser eficazmente aprovechadas para ensayos a nivel industrial. La actividad de estos laboratorios colaboradores debería ser programada y realizada de común acuerdo con los Laboratorios Centrales, que les encomendarían ciertos trabajos especiales de acuerdo con sus posibilidades y mediante un plan prefijado. Esta nueva actividad de los laboratorios docentes no se haría, desde luego, en menoscabo de su labor pedagógica, sino que, antes al contrario, podría constituir un excelente medio de contribución a la mejor capacitación de profesores y alumnos.

En cuanto a la política orientadora de la actividad y actuación de los Laboratorios Centrales, que como ya hemos dicho constituyen el núcleo básico de este plan, entendemos debiera ser fijada por la propia Administración del Estado, y más concretamente por el Ministerio de Industria, como más idóneo y conocedor de los fines a alcanzar mediante una política nacional de creación y defensa de una calidad. El Ministerio de Industria dispone ya del organismo, adecuado en nuestra opinión, para ejercer aquella política. Este organismo debiera ser la Dirección General de Promoción Industrial y Tecnología que, como órgano ejecutivo del Ministerio, sería el encargado de llevar a cabo la política adecuada para el desarrollo de los laboratorios, proveyendo los medios necesarios y ordenando la labor de los mismos.

Es indudable, por otra parte, que un Plan Metrológico como el que estamos exponiendo y cuya finalidad primordial es la mejora de

la calidad de todos nuestros fabricados a nivel nacional, lo que a su vez es la raíz de todas las ventajas que antes hemos expuesto, afecta con seguridad a todos los sectores de la Nación, por lo que, de alguna forma, habrá de proveerse el que estos sectores sean consultados.

Este órgano consultivo podría ser lo que hemos llamado "Consejo Superior de Laboratorios Industriales", en que participarían representantes de las entidades y organismos más directamente afectados por el control de la calidad. Su misión sería proponer planes, recomendar directrices, asesorar, recoger y estudiar sugerencias, etc, y su dictamen debería ser preceptivo para la implantación, o modificación, de la política a seguir en el funcionamiento de los laboratorios industriales.

IV.- Laboratorios de Metrología.

La organización, según se ha expuesto, de los Laboratorios de Ensayos Industriales, no solamente no excluye, sino que necesita, - de la simultánea creación de laboratorios de metrología legal o científica en los que descansa la garantía y posibilidad de efectuar, periódicamente, calibraciones de alta precisión, necesarias, entre otras, para comprobar el estado correcto de los instrumentos empleados en - aquellos.

No obstante, estos laboratorios de metrología de alta precisión no deberán recargarse con trabajos rutinarios ni de tipo industrial, que desvirtuarían su específica misión y agobiarían su funcionamiento con tareas de índole inferior.

V.- Marcas de calidad.

Aún cuando existen, desde hace tiempo, los instrumentos legales para el establecimiento de las marcas de calidad, sería muy deseable fomentar su desarrollo en amplitud e intensidad. A ello contribuiría muy eficazmente, la existencia de laboratorios de ensayo con la garantía de solvencia e imparcialidad de los que aquí estamos proponiendo.

Esta marca de calidad, que puede ser solicitada por empresas -- particulares, resultaría más eficaz si lo fuese por asociaciones de fabricantes. Su concesión correspondería, en última instancia, al Ministerio de Industria, previo informe o certificación de ensayo de los Laboratorios Centrales o Regionales establecidos.

La concesión de la marca de calidad implica una supervisión y control de los productos en ella amparados, que podrían ejercer los laboratorios a través de una inspección sistemática y una periódica comprobación de que se siguen cumpliendo los mínimos de calidad que aquella implique.

Los productos que ostentasen la marca de calidad deberían tener trato preferente en subastas y concursos, especialmente en aquellos promovidos por entidades de la Administración.

VI.- Normas de ensayo.

No queremos terminar esta breve y quizás deslabazada exposición sobre un tema de tan gran transcendencia, sin hacer una, muy escueta, llamada de atención sobre las Normas de ensayo.

Estas Normas deben, en nuestra opinión, recoger cuanto deba "ser normal" en el producto a que afectan, para garantizar, fundamentalmente, una uniformidad en su calidad. Asimismo, estas normas deben recoger los medios por los cuales pueda comprobarse que se reúnen los requisitos en ellas especificados.

Para el establecimiento de estos requisitos resulta imprescindible, si no se desea lesionar los intereses de nuestra industria nacional, la presencia activa, en el organismo de normalización, de los representantes directos de las industrias afectadas. Pero, al mismo tiempo, será precisa también la presencia o asesoramiento de los laboratorios que se han de ocupar de la comprobación de aquellas características, es decir, de los laboratorios de carácter industrial o laboratorios de ensayos industriales.

Esta necesaria colaboración evitaría, entre otras cosas, la incongruencia de establecer Normas de ensayo que no pueden ensayarse o Normas de obligado cumplimiento sin que se precise qué organismo ha de certificar éste.

Por otra parte, las Normas ya aprobadas pueden afectar a organismos tan dispares como pueden ser el Ministerio de Comercio y el de Educación y Ciencia, o el de Trabajo y el de Industria. Entendemos, por ello, que la promulgación, o simple aprobación de una Norma, debe estar sancionada por un organismo superior como pueda ser la Presidencia del Gobierno y que, en la elaboración de aquella forma parte, como elemento fundamental, la opinión de los Laboratorios de Ensayos Industriales.

VII.- Conclusión

Las ideas que acabamos de exponer, que se emiten desde luego - con el exclusivo fin de colaborar en lo posible a una mejora de --- nuestras estructuras en materia de metrología y control de calidad constituirían un poderosísimo instrumento capaz de impulsar la vida económica del país a niveles por todos deseados.

En este sentido transcribiremos un párrafo de las declaraciones del Exmo. Sr. Ministro de Industria, aparecidas en la prensa diaria del pasado 16 de enero, y que dicen;

"... que España ha entrado en una etapa de madurez industrial en la que el objetivo de industrialización a ultranza ha quedado -- atrás y es preciso ir a objetivos mucho más perfilados cualitativamente. No sólo hace falta perfeccionar ciertos sectores en los que - nuestra estructura deja mucho que desear, sino que es preciso crear y consolidar una tecnología nacional que impregne de calidad nuestros productos, haciéndolos más competitivos. A este respecto, el Ministerio se propone acometer en 1.975 la puesta en marcha de una política de desarrollo tecnológico que permita la generación de una tecnología industrial autóctona. Asimismo, se pondrán en práctica medidas para - el fomento de la calidad de los productos industriales"...

Madrid, 17 de Noviembre de 1.975

El sistema de acreditación de laboratorios de calibración en España: una perspectiva histórica

Beatriz Rivera Romero

Directora General

Entidad Nacional de Acreditación

A principios de los años 80, España se preparaba para incorporarse en la Unión Europea (entonces llamada Comunidad Económica Europea), lo que requería una modernización de la actividad económica y el alineamiento con las prácticas del resto de Estados miembros de forma que los productos españoles pudiesen competir en el nuevo mercado. En este contexto, las empresas necesitaban instrumentos para demostrar la calidad y seguridad de sus productos de acuerdo con los estándares europeos. La calidad de las medidas y su trazabilidad se convertían en condiciones indispensables.

Con este desafío en mente, el Ministerio de Industria pone en marcha en 1982 el Servicio de Calibración Industrial (SCI) con el objetivo de evaluar la competencia de los laboratorios de calibración, garantizando, así, la necesaria trazabilidad de las medidas llevadas a cabo por la industria.

Para llevar a cabo esta labor, las personas que en el Ministerio llevaron adelante este, en aquel momento, ambicioso proyecto, tomaron la sabia decisión de contar con el que, por entonces, era el foro más activo en materia de metrología, el Comité de Metrología de la AECC (hoy Asociación Española para la Calidad, AEC) donde profesionales de laboratorios públicos y privados trabajaban para impulsar la práctica metrológica en la industria. Representantes de los laboratorios más destacados del país se incorporaron al funcionamiento del SCI en el Grupo Asesor de Calibración, compuesto por las mentes más destacadas de la metrología en España. Este grupo, bajo la presidencia del añorado Leonardo Villena, desempeñó un papel fundamental en las primeras evaluaciones y en la concesión de las primeras acreditaciones.

La creación del SCI tenía por objeto, también, situar a la calibración española en su entorno natural, Europa, y con este fin, en 1985, el SCI ingresa en la Western European Calibration Cooperation (WECC), que había sido creada unos años antes.

En ese mismo año, con la aprobación de la Ley 3/1985, de Metrología, y del Real Decreto 415/1985, se crea el Centro Español de Metrología (CEM), que asume el establecimiento y custodia de los patrones nacionales a través de sus propios laboratorios y con el concurso de laboratorios asociados, algunos ya incluidos en el SCI.

Simultáneamente, a través de RENLEI, el Ministerio ya evaluaba la solvencia técnica de los laboratorios de ensayo que operaban en el campo industrial. Pero, es en 1986 cuando el Ministerio toma una decisión trascendental para el futuro modelo de acreditación español, como fue crear un organismo de acreditación independiente y externo al Ministerio involucrando en su creación e impulso a los mayores laboratorios industriales de España. Este nuevo organismo, la Red Española de Laboratorios de Ensayo (RELE), nació con la misión de dar servicio a la sociedad española en su conjunto, proyectándose hacia Europa y hacia el mundo. Desde su inicio, RELE se ajustó, tanto en su organización y operativa como en los criterios de acreditación, a las normas europeas e internacionales vigentes en aquel momento, logrando su pleno reconocimiento en Europa en 1992 con la firma del acuerdo multilateral de reconocimiento en la entonces EAL, actualmente European Accreditation, EA.

Con un organismo de acreditación ya plenamente operativo y con reconocimiento internacional en el área de ensayos, el Ministerio, a principios de los años 90, decide que RELE asuma las actividades de acreditación de los laboratorios de calibración que venía realizando el SCI. Para lograr esto, se contó con el decidido apoyo de los funcionarios que habían gestionado el SCI y la colaboración del mismo grupo de expertos que había colaborado con este último. Esta transición permitió una continuidad en la actividad técnica, y, en 1993, RELE otorgó sus primeras acreditaciones a laboratorios de calibración. En 1995, firmó el Acuerdo Multilateral de Reconocimiento para las actividades de calibración a nivel europeo.

Finalmente, en 1995, a través del Real Decreto 2200, se regula la actividad de acreditación en España, extendiendo su alcance a todas las actividades de evaluación de la conformidad como la certificación, verificación e inspección. Esto lleva a un cambio en la denominación de RELE a Entidad Nacional de Acreditación, ENAC y, posteriormente, tras la aprobación del Reglamento (CE) n°765/2008 que regula la acreditación en Europa, a su designación formal como Organismo Nacional de Acreditación en 2010 mediante el Real Decreto 1715.

Toda una pequeña pero gran historia de éxito que he tenido el privilegio de vivir en primera persona desde que, en 1988, me incorporo a RELE, compuesto entonces por dos personas trabajando en un pequeño despacho en las instalaciones del LCOE, hasta la actual ENAC, con más de 115 personas en plantilla, más de 900 auditores externos y firmante de acuerdos de reconocimiento internacionales existentes en todas las actividades de evaluación de la conformidad. Este éxito tiene, en mi opinión, tres causas principales.

En primer lugar, la visión de futuro de los responsables del Ministerio de Industria de aquel momento, que vieron la necesidad que la empresa española tenía de contar con laboratorios de calibración acreditados que operasen de acuerdo con estándares europeos y de contar con un modelo de organismo de acreditación que diera servicio a toda la industria española y tuviera la flexibilidad necesaria para adaptarse a las necesidades de todos los sectores.

En segundo lugar, el apoyo y el empuje de un conjunto de laboratorios que compartieron esta visión y colaboraron activamente para hacerla realidad, así como la contribución y apoyo constante del CEM y de sus profesionales, que han aportado todo su conocimiento y su esfuerzo en mantener el sistema al más alto nivel.

Y, por último, pero no por ello menos importante, nada de lo anterior hubiese sido posible sin el conocimiento técnico, el entusiasmo y la generosidad de un grupo de profesionales que pusieron sus conocimientos y su experiencia al servicio de la industria y los laboratorios españoles,

permitiendo que la acreditación y la metrología española ocupen el lugar destacado que tienen hoy en Europa y en el mundo, por lo que me gustaría terminar diciendo, parafraseando a Newton, que hemos llegado hasta aquí “a hombros de gigantes”.

Aprendiendo del pasado. Estrategia de la Metrología Nacional para la tercera década del siglo XXI

José Ángel Robles

Director

Centro Español de Metrología

La evolución en la metrología española en estos casi cincuenta años es una consecuencia directa de las bases existentes y la ilusión por el cambio de la década de los setenta, la evolución de la sociedad y de sus instituciones y el trabajo y dedicación de científicos extraordinarios que han tirado de vocación, imaginación y tiempo robado a la vida personal para desarrollar una metrología más acorde con las necesidades de España y el entorno europeo.

Si leemos con detenimiento las conclusiones de la I Asamblea Nacional de Metrología, nos daremos cuenta de que hemos satisfecho algunas de las demandas y recorrido parte de la hoja de ruta marcada, pero en algunas otras cuestiones, como la enseñanza, la visibilidad de la metrología en la sociedad, o la dotación de suficientes medios económicos y humanos, llevamos más de 40 años con el mismo diagnóstico en la mano pero no hemos sido capaces de dar una respuesta adecuada. Para hacer un símil, estas cuestiones estratégicas para el desarrollo de la metrología, serían como lo que le sucede al actor Bill Murray en el famoso “día de la marmota”. Constantemente hay que explicar qué es la metrología, qué aporta a la sociedad y solicitar medios económicos y humanos que permitan su desarrollo y evolución para satisfacer las necesidades sociales de cada época.

Hacemos nuestras las palabras del exministro de Educación y Ciencia, José María Maravall en 1985, todavía hoy muy actuales a pesar del tiempo transcurrido, y las extendemos a la metrología:

“Pocos discuten hoy el papel decisivo que la ciencia está desempeñando y habrá de desempeñar en el próximo futuro para que las naciones logren salir de la crisis y alcanzar niveles adecuados de progreso

y bienestar (...). Sobre España no pesa ninguna maldición histórica que nos impida participar, junto con el resto de países industrializados, en el vertiginoso cambio tecnológico que se desarrolla ante nuestros ojos.”

Las dificultades actuales para seguir avanzando no son pocas, pero hay que admitir que ante una situación de cambio tecnológico, cultural y generacional, la ilusión y vocación por la metrología se refuerzan y se sigue manteniendo el sueño de que, algún día, las cosas en España podrían cambiar y la METROLOGÍA, con mayúsculas, sea apoyada a nivel institucional como se merece.

Leíamos, hace algún tiempo, en un periódico, un artículo del investigador Miguel Delibes de Castro, en donde decía: “ ... *la ciencia en España camina a gatas, vacilante, insegura, sumisa, temerosa de alzar la cabeza y mirar al cielo*”, que desgraciadamente define muy claramente el sentimiento y la situación de la metrología española, no así, afortunadamente, a otras disciplinas de la ciencia que están teniendo un gran desarrollo.

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

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

- La sociedad actual requiere mediciones que aporten confianza y den los mismos resultados independientemente del lugar de

realización. Clave para la intercambiabilidad de piezas y componentes.

- La globalización del comercio y de la industria, con la creciente circulación de productos y servicios entre países, genera un aumento del interés por la exactitud y reproducibilidad de los resultados de medida que apoye al desarrollo económico y social. Clave para la economía de libre mercado.
- Es necesario contar con un sistema global de medida para la armonización internacional de unidades físicas, normas de productos, procedimientos de calibración, evaluación de incertidumbres, etc. Clave para el desarrollo científico y la transparencia en el comercio.
- La transformación digital necesita de referencias metroológicas que garanticen la calidad de los datos.
- Las nuevas definiciones de la unidades fundamentales del SI requieren nuevos desarrollos para la materialización de las unidades de medida y su diseminación posterior a la industria.

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

Conocedores de esta realidad, el Centro Español de Metrología ha realizado varios estudios sobre necesidades de la industria en materia de metrología y ha orientado sus planes estratégicos conforme a sus resultados siendo, por ejemplo, las grandes líneas del plan estratégico 2024 -2026:



Nos encontramos en la tercera década del siglo XXI con desarrollos tecnológicos tan potentes como las tecnologías cuánticas de segunda generación, la inteligencia artificial, la digitalización, la biotecnología, así como la utilización de nuevos materiales y nano-materiales y novedosos procedimientos de fabricación inteligente, encaminados a fomentar una economía sostenible de bajo nivel de carbono y una mejora de la salud y seguridad de los ciudadanos. Las industrias europeas y nacionales están afrontando los retos de la descarbonización y la digitalización con la máxima de mantener al ciudadano en el centro de sus acciones, en un entorno de autonomía estratégica abierta que se caracteriza por la dependencia de suministradores externos, la complejidad tecnológica, la dificultad de coordinación de políticas, la dinámica geopolítica variable y las inversiones y recursos limitados, entre otros.

En este contexto, la Metrología está llamada a jugar un papel relevante en la sostenibilidad de una sociedad justa, eficiente y moderna.

La metrología española tiene ya una estructura consolidada, descentralizada, coordinada y una visión de futuro que permitirá a buen seguro un desarrollo acorde con la ciencia y necesidades nacionales y europeas. Sólo

falta asumirla como cuestión de Estado, ya que sirve a todas las capas de la sociedad para su desarrollo y el aumento de la calidad de vida, sacarla del anonimato en que se encuentra con programas de formación a todos los niveles, integrarla en el conjunto de centros de investigación punteros de nuestro país, para que los investigadores y la metrología se beneficien mutuamente y dotarla con urgencia de los recursos humanos necesarios para atender la alta demanda de servicios y los nuevos retos a los que nos enfrentamos. Todo ello, si nuestras autoridades apuestan decididamente por viajar en el tren del progreso social para, seguidamente, ir avanzando hacia los vagones de cabeza, como ya hizo España en ciertos períodos históricos.

Parafraseando a Newton, “en medio de cada dificultad reside la oportunidad”.



CEM CENTRO ESPAÑOL
DE METROLOGÍA

CENTRO ESPAÑOL DE METROLOGÍA

Calle del Alfar, 2 • 28760 Tres Cantos, Madrid

Teléfono 91 807 47 00

cem@cem.es • www.cem.es

