

En el Día Mundial de la Metrología

Hoy 20 de mayo se celebra el Día Mundial de la Metrología, no de la Meteorología, término con el que tiene gran similitud lingüística y que causa no pocos equívocos. La elección de dicho día se debe a que un 20 de mayo de 1875, 17 países, entre ellos España, firmaron en París el Tratado Diplomático del Metro, que estableció el sistema métrico decimal, desde 1960 denominado Sistema Internacional de unidades de medida y conocido por las siglas SI.

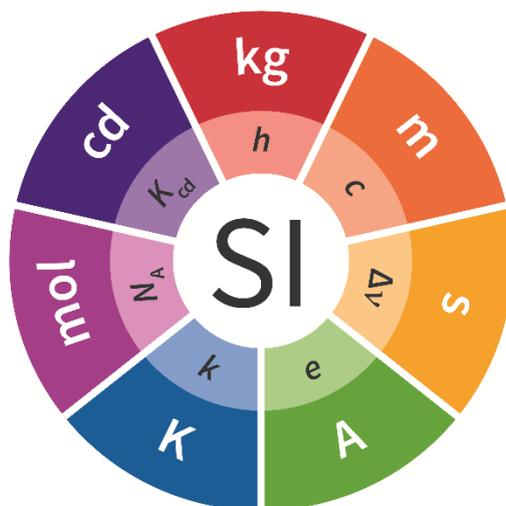
Y concretamente este 20 de mayo de 2019 tiene lugar un hecho tan trascendental como aquel en que vio la luz dicho sistema. Se trata de la entrada en vigor de la revisión más importante del SI desde su establecimiento, y que consiste en referir todas las unidades básicas de medida a constantes universales, en respuesta a las nuevas exigencias científico-técnicas del siglo XXI, tras su aprobación por la Conferencia General de Pesas y Medidas en su 26ª reunión de noviembre del pasado año 2018.

El Sistema Internacional de Unidades, SI, adoptado internacionalmente, utilizado en la práctica científica y el único legal en España, en la Unión Europea y en la práctica totalidad del resto de países del mundo, a excepción de tres, parte de un pequeño número de unidades denominadas *básicas* (metro, kilogramo, segundo, amperio, kelvin, mol y candela), correspondientes a otras tantas magnitudes. A partir de ellas, se obtienen las denominadas unidades *derivadas*. Todas ellas permiten cuantificar cualquier magnitud mensurable de interés en la investigación, la industria, el comercio o la sociedad, en campos tan variados como la salud, la seguridad, o la protección del medio ambiente.

Las actuales unidades de medida, objetivas, no antropométricas como surgieron en la historia, y acordadas por convenio, facilitan el entendimiento y la colaboración en la sociedad global, pero en un entorno altamente innovador y disruptivo como el actual, donde se dan varias revoluciones tecnológicas de forma simultánea, era necesaria una revisión conceptual de gran calado. Por ello, los institutos nacionales y los organismos internacionales de metrología han venido trabajando durante los últimos años para referir las unidades básicas a una serie de constantes universales, por definición invariables, lo que supone un cambio sustancial, conceptual y paradigmático.

El SI ha utilizado hasta hoy diferentes tipos de definiciones de las unidades básicas: artefactos como el prototipo internacional del kilogramo (*KPI*), estados físicos específicos, como el punto triple del agua en la definición del kelvin, prescripciones experimentales idealizadas como los casos de las definiciones del amperio y la candela, o constantes de la naturaleza, como la velocidad de la luz en el vacío, para la definición del metro.

Con la revisión del SI que hoy entra en vigor, todas las unidades básicas se definen a partir de constantes. El segundo, el metro y la candela, ya lo estaban, en función, respectivamente, de los valores numéricos asignados a la frecuencia $\Delta\nu_{Cs}$ del átomo de cesio 133, la velocidad de la luz en el vacío c , y la eficacia luminosa K_{cd} de una determinada radiación monocromática. A ellas se unen ahora el kilogramo, el amperio, el kelvin y el mol, basados en los valores numéricos establecidos, respectivamente, para la constante de Planck (h), la carga elemental (e), la constante de Boltzmann (k), y la constante de Avogadro (N_A). Fijados los valores numéricos de las constantes y con la ayuda de las leyes de la física, todas las unidades del SI pueden realizarse ahora de manera experimental.



De esta forma, la masa del prototipo internacional del kilogramo $m(KPI)$ pasa a ser 1 kg, con una incertidumbre relativa igual a la del valor numérico de h justo antes de la redefinición para, a partir de ahora, determinarse experimentalmente. La nueva definición del kilogramo basada en la constante de Planck h asegura la estabilidad a largo plazo de la unidad SI de masa, permitiendo además su realización en cualquier instante y lugar. Se pasa así por fin de la dudosa "estabilidad del patrón" a la "reproducibilidad de la unidad", como ya ocurre con el resto de unidades.

La temperatura termodinámica del punto triple del agua T_{TPW} pasa a ser 273,16 K, con una incertidumbre relativa igual a la del valor recomendado de k justo antes de la redefinición para, a partir de ahora, determinarse experimentalmente. La nueva definición del kelvin será ahora realizable mediante distintos experimentos, empleando termómetros "termodinámicos" que respondan a leyes físicas, y en un amplio rango de temperaturas, frente a una propiedad del agua, que solo puede realizarse a una única temperatura y depende del contenido de impurezas, la composición isotópica, etc.

La redefinición del mol respecto a un valor numérico exacto de la constante de Avogadro N_A , lo libera de su dependencia del kilogramo y muestra claramente la distinción entre "cantidad de sustancia" y "masa", haciendo por fin felices a los químicos.

Al disponer ahora de valores numéricos exactos para h y e , las constantes de Josephson ($K_J = 2e/h$) y de von Klitzing ($R_K = h/e^2$), fundamentales en la realización práctica del voltio y el ohmio a partir de los efectos Josephson y Hall cuántico, respectivamente, entran en el SI, y con valores exactos, abandonando así los valores convencionales establecidos en 1990. A través de los efectos Josephson y Hall cuántico, el amperio, el voltio, el ohmio y otras unidades eléctricas pueden obtener ahora una exactitud sin precedentes, acabando con el sistema actual de unidades eléctricas convencionales, situado fuera del SI.

Por otro lado, al tomar h , e , k y N_A valores numéricos exactos en el SI, las incertidumbres de muchas otras constantes universales y factores de conversión desaparecen o se reducen, mejorando el conocimiento sobre las constantes universales y sus valores, en beneficio del progreso científico.

La idea de definir las unidades de forma universal no es nueva; en el siglo XIX, James Clerk Maxwell ya sugirió utilizar las propiedades invariables de los átomos para definir las unidades de medida de longitud, tiempo y masa. Posteriormente Max Planck también sugirió el uso de las "constantes" al formular su ley de radiación. Las realizaciones prácticas y las tecnologías

disponibles han ido retrasando algo que estaba en los planteamientos originales de la Revolución Francesa y su Sistema Métrico Decimal: “para todos los tiempos y todos los pueblos”. Ahora ha llegado el momento de dar el salto al futuro.

En este SI renovado las realizaciones prácticas de las unidades están separadas conceptualmente de sus definiciones, de modo que las unidades pueden, por principio, realizarse independientemente en cualquier lugar y tiempo. Además, pueden mejorarse las realizaciones a medida que se desarrollen las tecnologías, sin necesidad de redefinir la unidad.

Se acaba así definitivamente con los patrones basados en artefactos materiales, en los que primaba su “estabilidad” a lo largo del tiempo, como fue en el origen del sistema métrico decimal el caso del metro y del kilogramo de platino e iridio, en favor de “realizaciones prácticas” reproducibles en cualquier tiempo y lugar. Precisamente, la inestabilidad del kilogramo, único patrón material que quedaba como tal, y de la que se hicieron eco los medios de comunicación a finales de 2018, con una “pérdida” de masa de unos 50 $\mu\text{g}/\text{siglo}$, venía justificando desde hace tiempo el cambio buscado, aparte de los riesgos de extravío o deterioro del patrón.

Precisamente, este día en el que coinciden tantos hechos históricos proporciona una buena oportunidad para visibilizar el concepto de metrología y divulgar su importancia, sacándola de los laboratorios en los que habitualmente se mueve. La metrología, lo que antiguamente se denominaba “Pesas y Medidas”, es la ciencia que se ocupa de las mediciones, tanto en el plano teórico como en el experimental, en cualquier campo de la ciencia y la tecnología, y en cualquier nivel de incertidumbre; se trata de una ciencia horizontal, ubicua, pero invisible e ignorada, incluso en ámbitos científicos y técnicos, y entre responsables y gestores de la ciencia, que desconocen su verdadera dimensión e importancia, y no la perciben bajo los logros que a diario nos sorprenden.

La investigación en Metrología es una actividad a largo plazo que marcha en paralelo con el avance científico, retroalimentándose continuamente, y que se adelanta a la innovación tecnológica y a las necesidades industriales y sociales. Los metrologos, con especialidad no reconocida en derecho, pero ejercida de hecho por físicos, ingenieros, matemáticos, etc., que colaboran entre sí de forma sinérgica, dedican sus esfuerzos a desarrollar instrumentación y métodos de medida, y a participar en proyectos de investigación transnacionales, que den respuesta a los nuevos retos de medición, en cualquier ámbito y escala, a fin de asentar el conocimiento sobre bases sólidas, contribuyendo por tanto al progreso de la ciencia y de la sociedad.

Sin el concurso de la metrología, los investigadores no podrían garantizar y demostrar la fiabilidad de sus datos, quedando en entredicho sus publicaciones e impidiendo la confirmación de sus hipótesis de partida. Tampoco los fabricantes podrían garantizar el cumplimiento de las especificaciones de sus productos, ni el Estado podría garantizar que los instrumentos de medida utilizados para facturar los consumos de los ciudadanos, o imponerles sanciones, poseen errores inferiores a los permitidos por la legislación.

Todas las civilizaciones prósperas conocidas han dispuesto de un sistema de unidades (pesas y medidas) como herramienta de apoyo a su desarrollo. Como hemos visto anteriormente, nuestra sociedad del siglo XXI dispone del Sistema Internacional de Unidades, SI, el cual sirve

como lenguaje común de las comunicaciones, la tecnología, la investigación, la ciencia y el comercio internacional, considerándose uno de los grandes logros del siglo XX y una herramienta fundamental en la globalización.

Se estima que las mediciones suponen entre el 1 % y el 3 % del PIB en los países desarrollados, generando un retorno equivalente al 7 % del mismo. Además, todas las revoluciones industriales acaecidas hasta ahora, desde la primera, basada en la máquina de vapor, hasta la segunda revolución cuántica en la que estamos inmersos, pasando por la fabricación en serie o la microelectrónica, han requerido de la metrología, no solo para su aparición, sino para su asentamiento y posterior desarrollo. El caso de las nanotecnologías, de aparición en los años 80, es paradigmático ya que ha sido precisamente la dificultad de medición y de contar con la trazabilidad adecuada, junto al valor inaceptablemente alto de la incertidumbre de medida en relación a la magnitud medida, lo que ha retrasado su desarrollo prácticamente hasta nuestros días.

Ya decía William Thomson, más conocido por Lord Kelvin: *“Cuando se puede medir aquello de lo que se habla y se puede expresar en números, se conoce algo del tema; pero cuando no se puede medir, cuando no se puede expresar en números, el conocimiento es pobre e insatisfactorio: puede ser el principio del conocimiento, pero no es conocimiento”*. También dijo aquello de que *“solo se puede mejorar aquello que se puede medir”*.

Pero medir no es simplemente leer un instrumento de medida y anotar el valor que indica. Medir supone comprender y definir la propiedad medida, diseñar un proceso de medición, controlar el entorno ambiental en el que se produce la medición, establecer el modelo matemático que conduce, desde las magnitudes de entrada a la magnitud o magnitudes de salida, determinando los factores de sensibilidad entre ambas, corregir o estimar los posibles errores sistemáticos, evaluar las contribuciones a la incertidumbre de medida de todas las componentes que intervienen en la medición, siguiendo un método universalmente aceptado, y obtener el resultado de la medición con su incertidumbre de medida asociada, para un nivel de confianza dado (cuantificando así la propia duda sobre el resultado) de forma que a partir del resultado y su incertidumbre, puedan tomarse decisiones, ya sea sobre hipótesis científicas, fabricaciones industriales, sanciones legales, tratamientos médicos, cambio climático, etc.

Cuando no se mide correctamente, o las mediciones se realizan empleando diferentes sistemas de medida o con instrumentos no calibrados, puede ocurrir que la nave *Mars Climate Observer* de la NASA se estrelle contra la superficie de Marte, que el experimento LIGO no detecte ondas gravitacionales, hasta optimizar la planitud de los espejos utilizados en el gran interferómetro, tras mejorar su medición, o que los neutrinos parezcan viajar a mayor velocidad que la luz, causando la dimisión de los responsables del experimento.

La denominada Metrología Fundamental o Científica se ocupa de la definición, realización práctica, mantenimiento y diseminación de las unidades de medida. En España, dichas realizaciones prácticas (patrones nacionales) y su diseminación hacia la sociedad está a cargo del Centro Español de Metrología (CEM) y sus Laboratorios Asociados (Real Observatorio de la Armada, Instituto de Óptica del CSIC, Laboratorio Central Oficial de Electrotecnia, CIEMAT, INTA e Instituto de Salud Carlos III).

Este grupo de instituciones conforma pues la cúspide de la estructura piramidal que caracteriza a la Metrología, y proporciona desde ella trazabilidad metrológica a las mediciones de todo el sistema científico-industrial español, trazabilidad equivalente a la ofrecida por otros países avanzados y que supone el reconocimiento a nivel mundial de nuestras actividades de medición

y calibración, facilitando así la aceptación de los resultados, el libre comercio internacional y la eliminación de las barreras técnicas de los exportadores españoles, al cumplir las estrictas exigencias del Acuerdo de Reconocimiento Mutuo (MRA) del Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM), del cual el CEM es firmante.

Aprovechando la oportunidad que brinda este 20 de mayo en el que el SI surge renovado hacia el futuro, permitiendo abordar la Industria 4.0, la segunda revolución cuántica o el estudio del cambio climático de manera confiable, deseamos que más personal titulado e investigador se interese por la metrología y que ésta alcance una mayor visibilidad e importancia dentro del ámbito científico-técnico español, mejorando así el desarrollo y el nivel de vida de nuestro país.

Dr. Emilio Prieto

Jefe de Área Técnica del Centro Español de Metrología (CEM)

Miembro del Comité Consultivo de Unidades, del Comité Internacional de Pesas y Medidas

Presidente electo del Comité Técnico de Longitud, de EURAMET