

AUTORIDADES ACADÉMICAS

Rector: **Dr. Guillermo R. Tamarit**
Vicerrectora: **Mg. Danya V. Tavela**
Secretario General: **Abog. Diego J. Batalla**
Secretario de Investigación, Desarrollo y Transferencia: **Dr. Jerónimo E. Ainchil**
Secretaria Académica: **Abog. Ma. Florencia Castro**
Secretario de Extensión Universitaria: **Lic. Juan P. Itoiz**
Secretaria de Asuntos Económico-Financieros: **Cdora. Mariela E. García**
Secretario Legal y Técnico: **Abog. Carlos D. Pérez**
Secretaria de Cultura: **Lic. Laura Durán**
Prosecretaria de Investigación, Desarrollo y Transferencia: **Lic. Silvina Sansarriecq**
Directora de Instituto de Posgrado: **Prof. Ma. Rosa Depetris**
Directora Centro de Edición y Diseño: **DCV Ma. de las Mercedes Filpe**

Guardasellos: **Ing. Luis J. Lima**

DIRECTOR DE LA REVISTA
Dr. Ángel L. Plastino

SUMARIO

#2 AGUA RECURSO VITAL

PÁG. 4	PÁG. 30	PÁG. 37	PÁG. 44
DEL VIEJO SISTEMA MÉTRICO DECIMAL (1799) AL ACTUAL SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES (1960) Y DESPUÉS...	USO DEL AGUA SUBTERRÁNEA Y DESARROLLO SOSTENIBLE	LA FÍSICA CUÁNTICA EN EL MUNDO MACROSCÓPICO: LOS FLUIDOS CUÁNTICOS	LA RELEVANCIA DE CHINA EN EL ESCENARIO MUNDIAL ACTUAL
MARIO GARAVAGLIA	EDUARDO E. KRUSE	SUSANA HERNÁNDEZ	NORBERTO E. CONSANI

Edita



CEDi Centro de Edición y Diseño. UNNOBA
DCV Ma. de las Mercedes Filpe

Callao 289 3.º piso, CP.1022
Tel 54 11 53531520. Ciudad Autónoma
de Buenos Aires, Argentina

Diseño y diagramación

CEDi Centro de Edición y Diseño
Coordinador: DCV Cristian Rava
DCV Ma. de las Mercedes Ortín,
DCV Claudia Di Paola, DCV Bernabé Díaz

Corrector de estilo: Mariángel Mauri

Impresión

Buschi S.A.

Año 1 N.º 2

Agosto de 2015
Tirada 500 ejemplares
ISSN 2408-4492
Queda hecho el depósito
que marca la ley 11723

Se invita a potenciales colaboradores
a remitir sus trabajos al CEDi
(cedi@unnoba.edu.ar)

Sede Junín

Libertad 555, CP.6000
Tel 54 236 4407750
Junín, Prov. de Buenos Aires, Argentina

Sede Pergamino

Monteagudo 2772, CP.2700
Tel 54 2477 409500.
Pergamino, Prov. de Buenos Aires, Argentina

www.unnoba.edu.ar

EDITORIAL

Acercamos al amable lector el segundo número de la revista *NÚCLEOS*, perteneciente a la Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires, en el que se abordan cuatro temas de diversa naturaleza, con una interesante y muy importante temática.

La metrología es una disciplina científica sobre la que el público conoce poco, pero que está estrechamente vinculada a buena parte del quehacer productivo. Ofrecemos una magistral introducción a esta disciplina redactada por el profesor Mario Garavaglia.

El agua es el recurso básico de toda civilización. Su disponibilidad es cuestión de vida o muerte para la comunidad. Esta problemática debería ser de interés general, pero, nuevamente, no es fácil encontrar abordajes tan completos y certeros como el que aquí nos presenta el profesor Eduardo Kruse.

La física cuántica constituye la mayor revolución científica del siglo XX. Ha impactado y transformado profundamente nuestro mundo. Baste mencionar la computadora, el teléfono móvil y el tomógrafo como algunos de los tantos ejemplos que podrían traerse a colación. La vida misma es esencialmente un fenómeno cuántico. La profesora Susana Hernández nos habla en este número de los líquidos cuánticos, los cuales nos ofrecen novísimas posibilidades tecnológicas.

Finalmente, les brindamos una muy relevante y reciente disertación sobre un tema fundamental en el panorama contemporáneo: el de China, a cargo del profesor Norberto Consani.

Confiamos plenamente en que este abanico de discusiones ha de ser de interés y agrado para nuestros lectores.

Dr. Ángel Luis Plastino
Director revista NÚCLEOS

DEL VIEJO SISTEMA MÉTRICO DECIMAL (1799) AL ACTUAL SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES (1960) Y DESPUÉS...

MARIO GARAVAGLIA

1. RESUMEN INTRODUCTORIO

1. El actual Sistema Internacional de Unidades —cuya sigla en todos los idiomas es SI— fue promulgado por la XI Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM) reunida en París en octubre de 1960. Su origen se remonta a una de las primeras decisiones de la Revolución Francesa: la institución del Sistema Métrico Decimal. Siguiendo la idea de la necesidad de contar con una unidad universal de longitud —el metro—, propuesta por John Wilkins (1668) y por Christopher Wren (1670) en Inglaterra, por el abad Picard (1670) en Francia, por Christiaan Huygens (1673) en Holanda y por Tito Livio Burattini (1675) en Italia, el Sistema Métrico Decimal permitiría medir distancias, superficies, volúmenes y pesos (estos últimos a través del peso de un determinado volumen de agua destilada a 4 °C) y, además, contaría con múltiplos y submúltiplos según la escala decimal. El metro se definió como la longitud de la diezmillonésima parte del cuadrante del meridiano terrestre que pasa por París y se lo midió en el sector de tal meridiano desde Dunkerque hasta Barcelona y con una extensión hasta la isla Formentera. Finalmente, esa longitud se materializó en barras de platino y la que más ajustadamente se aproximó a la medida meridional del metro fue seleccionada y depositada el 22 de junio de 1799 (4 mesidor del año VII de la Revolución de los Jacobinos) en el Archivo Nacional. A esta barra que representaba el metro patrón se la denominó Metro de los Archivos. Esta barra métrica era una “regla de extremos”; sus extremos planos y paralelos entre sí estaban pulidos “a espejo” para facilitar las operaciones de comparación, que se realizaban empleando instrumentos ópticos, con las otras barras métricas o con las que representaban submúltiplos. Ese mismo día también se depositó en el Archivo el cilindro de platino iridiado que representaba el kilogramo patrón y se lo denominó Kilogramo de los Archivos. Se trata del único artefacto que en la actualidad sigue teniendo validez metrológica legal. Por entonces, la medición del tiempo estaba basada en observaciones astronómicas y su unidad, el segundo, se definía como 1/86400 de la duración del día solar medio.

Entonces, con la tríada de unidades formada por el metro, el kilogramo y el segundo prácticamente se satisfacían las exigencias de la actividad científica, de la producción de alimentos, de la industria, del comercio, de la construcción, del transporte y de la navegación. A dicha tríada se la conoció como Sistema MKS. Así, el siglo XVIII llegaba a su fin habiendo cumplido la notable proeza de dejarle al mundo un nuevo sistema de medir y pesar. Según Antoine Laurent de Lavoisier (1743-1794): “Nada más grande ni más sublime ha salido de las manos del hombre que el Sistema Métrico Decimal”.

2. Pero el siglo XVIII también acumuló nuevos conocimientos sobre fenómenos eléctricos y magnéticos logrados por Charles-Augustin de Coulomb (1736-1806), Alessandro Volta (1745-1827), André-Marie Ampère (1775-1836) y Johann Karl Friedrich Gauss (1777-1855). Y el siglo XIX agregó los estudios sobre electromagnetismo, termodinámica, el descubrimiento de las radiaciones emitidas por los núcleos radioactivos y el germen de la física cuántica con los aportes de Georg Simon Ohm (1789-1854), Michael Faraday (1791-1867), Wilhelm Eduard Weber (1804-1891), William Thomson, conocido como *lord Kelvin* (1824-1907), Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887), James Clerk Maxwell (1831-1879), John William Strutt, también conocido como *lord Rayleigh* (1842-1919), Ludwig Boltzmann (1844-1906), Wilhelm Konrad Röntgen (1845-

MARIO GARAVAGLIA

Nació en Junín, BA, en 1937. Graduado de Licenciado en Física (1960) por la Universidad Nacional de La Plata (UNLP) integró el grupo del Prof. Dr. Athos Giachettini en el Departamento de Física de dicha universidad y trabajó en la determinación interferencial óptica de Patrones Secundarios de ¹⁹⁸Hg (Clase A) y de ²³²Th (Clase B) a partir del Patrón Primario de ⁸⁶Kr (Ver Puntos 7, 8, 51 y 59). Completó la parte experimental de su Tesis Doctoral en la Universidad de Uppsala, Suecia, sobre la espectroscopía de la emisión del láser de Hg (1964-5); Doctorado en Física por la UNLP (1965). De 1980 a 1982 integró el Comité Consultativo para la Definición del Metro como miembro invitado, participando en la propuesta de 1982 para definir el Metro Patrón por la velocidad de la luz (Ver Puntos 53 a 59). Es Profesor Emérito de la UNLP e Investigador Superior (Contratado “ad-honorem”) del CONICET.

Este informe sobre la Metrología Fundamental está dedicado a la memoria del Prof. Rafael Steinberg, Metrólogo Emérito del INTI (1918-2014).

1923), Oliver Heaviside (1850-1925), Karl Ferdinand Braun (1850-1925), Albert Abraham Michelson (1852-1931), Antoine-Henri Becquerel (1852-1908), Max Planck (1858-1947), Wilhelm Wien (1864-1928), Giovanni Giorgi (1871-1950) Guglielmo Marconi (1874-1937), y *sir* James Hopwood Jeans (1877-1946). Sus descubrimientos no solo abrieron nuevos campos científicos, sino que requirieron la definición de nuevas unidades y formas de medirlas. Con ello, contribuyeron a ampliar la actividad metrológica internacional tratando de concebir un marco conceptual para el desarrollo de un sistema de unidades coherente que contuviera todas las magnitudes fundamentales.

3. El 20 de mayo de 1875 se firmó en París la Convención del Metro de la que participaron representantes de veinte países, entre ellos, Argentina. En ella se establecieron tres organizaciones intergubernamentales con el siguiente orden jerárquico: la Conferencia General de Pesas y Medidas, ya mencionada, el Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM) y la Oficina Internacional de Pesas y Medidas (BIPM, Bureau International des Poids et Mesures). Esta última fue instalada en el Pabellón de Breteuil, dentro del parque nacional de Saint-Cloud, Sèvres, en las afueras de París.

4. Al comprobarse que el Metro de los Archivos y las demás barras “de extremos” sufrían infimos desgastes que comprometían a largo plazo su calidad metrológica, a pesar del cuidadoso uso que se les daba, se decidió pasar a barras en las que se representara la medida meridional del metro “en línea”. Para ello, se diseñaron las barras de sección en X (sección de Tresca) de platino-iridio, en cuya parte plana longitudinal tenían grabados trazos finísimos cerca de sus extremos, de tal modo que la distancia entre dos de ellos fuera igual a la medida meridional del metro representada por el Metro de los Archivos. Se produjeron treinta barras y en la número 6 se determinó que la distancia entre los trazos era idéntica a la longitud del Metro de los Archivos, por lo cual fue consagrada como el Metro Prototipo Internacional por la I CGPM, reunida en 1889; esa barra fue depositada en el BIPM.

5. La misión del BIPM es asegurar la unificación mundial de las mediciones. Tiene a su cargo: i- el establecimiento de los patrones fundamentales para la medición de las principales magnitudes y la conservación de los prototipos internacionales, sean ellos históricos, como el Metro de los Archivos (1799) y el Metro Prototipo Internacional (1889), o de uso actual todavía, como el Kilogramo de los Archivos (1799); ii- efectuar las comparaciones periódicas de los patrones nacionales y los internacionales; iii- asegurar la coordinación de las técnicas de medición que correspondan, y iv- efectuar y coordinar la medición de las constantes físicas fundamentales que intervienen en las actividades metrológicas. El BIPM realiza su actividad bajo la exclusiva supervisión del CIPM, el que, a su vez, depende de la CGPM y a la que le presenta sus informes sobre los trabajos realizados por el BIPM.

6. La Conferencia General está integrada por los delegados de todos los estados miembros de la Convención del Metro y se reúne actualmente cada cuatro años para: i- discutir y promover la propagación y el perfeccionamiento del Sistema Internacional de Unidades (SI), la forma moderna del Sistema Métrico Decimal; ii- sancionar los resultados de las nuevas determinaciones metrológicas fundamentales y adoptar resoluciones científicas de carácter internacional; iii- adoptar las decisiones concernientes al presupuesto, dotación de personal, organización interna y desarrollo del BIPM, ya que, si bien en su origen (1875) estuvo limitado a las mediciones de longitud y masa y a los estudios relacionados con tales magnitudes, sus actividades se ampliaron a los patrones de las mediciones eléctricas (1921), de las fotométricas y radiométricas (1937), de las radiaciones ionizantes (1960), de las escalas de tiempo (1988) y de la química (2000).

7. En suma, el BIPM, el CIPM y la CGPM son tres organizaciones intergubernamentales cuya atención está permanentemente puesta sobre el progreso requerido al Sistema Internacional de Unidades por las exigencias que presentan todas las actividades humanas y las posibilidades de satisfacerlas que brindan la ciencia y la tecnología. Un ejemplo dramático de carrera contra reloj en la toma de decisiones oportunas lo ofrece el caso planteado por la pérdida de validez práctica del metro patrón basado en la barra en X, cuya calidad metrológica era de 5 partes por millón (5×10^{-6}), lo que resultaba suficiente para la atención técnica de la industria de precisión, que hacia 1900 exigía trabajar a $\pm 0,01 \text{ mm} = \pm 10 \text{ }\mu\text{m}$. La situación cambió y en 1950 dicha exigencia había alcanzado a $\pm 0,25 \text{ }\mu\text{m}$, con lo que una regla de extremos de 1 m de longitud construida con esa calidad mecánica resultaba mejor que el propio metro patrón. Afortunadamente, unos años antes ya se habían vuelto a recordar los trabajos pioneros de Albert A. Michelson, quien, en 1890, descubrió, empleando su interferómetro de brazos “en cruz”, que la luz roja emitida por el cadmio natural poseía un delgadísimo ancho espectral y una reproducibilidad insospechados para la época y propuso comparar su longitud de onda con la longitud de la barra en X del metro patrón. El BIPM lo autorizó a realizar dicha comparación y él llevó a Francia su interferómetro “en cruz”, pero en una versión novedosa de brazos “alineados”. Con la colaboración de J. René Benoit efectuó la comparación con una de las barras en X del Metro Patrón Internacional, la número 26. El resultado obtenido fue $1 \text{ m} = 1\,553\,163,5 \times \lambda_{\text{Cd Aire}}$, con una temperatura de 15 °C en el laboratorio y a una presión atmosférica de 760 mmHg. Luego, se calculó $\lambda_{\text{Cd Vacío}} =$

643,846 96 nm, lo que constituyó la primera determinación absoluta de una longitud de onda (corregida al vacío). Ese valor fue confirmado en 1906 por las mediciones realizadas por Charles Fabry, Alfred Perot y el propio Benoit, quienes emplearon un dispositivo óptico de su invención, conocido como Interferómetro de Fabry-Perot.

Conviene recordar, además, que Charles Fabry estudió interferencialmente en 1906 la emisión de color anaranjada en $\lambda = 606$ nm producida en la descarga eléctrica del criptón natural a baja presión y observó que su ancho espectral era menor aún que el de la emisión del cadmio. Este resultado sería premonitorio para la metrología fundamental de las longitudes medio siglo después.

8. Con estos antecedentes y después de notables trabajos sobre espectroscopía interferencial realizados en laboratorios de la anterior República Federal alemana, la antigua Unión Soviética y los Estados Unidos de América, la XI CGPM sancionó el 14 de octubre de 1960 la primera forma de definición inmaterial del metro basada en la longitud de onda de la luz anaranjada emitida por el isótopo ^{86}Kr en $\lambda_{\text{Kr}} = 605,780\,211$ nm con una calidad metrológica de 4×10^{-9} .

No obstante el logro alcanzado, los metrologos no ocultaban su inquietud. Ya a comienzos de la década de los sesenta se había alcanzado una calidad de maquinado mecánico de $0,1\,\mu\text{m} = 100$ nm. Y la de 1970 se perfilaba como para alcanzar los $0,01\,\mu\text{m} = 10$ nm, con lo que una “regla de extremos” de 1 m de longitud tendría una calidad de 1×10^{-8} , demasiado cerca de la reciente definición del metro. Se debía hacer algo pronto. La iniciativa la tomó en 1962 el Comité Consultativo para la Definición del Metro —uno de los órganos de la CGPM— al invitar al ya por entonces famoso espectroscopista interferencial francés Pierre Connes a analizar la posibilidad de utilizar el láser en metrología. Sus conocimientos y recomendaciones convencieron al Comité para que incentivara internacionalmente los estudios requeridos, cuyos resultados finalmente condujeron a que la XVII CGPM de 1983 sancionara la segunda forma de definición inmaterial del metro:

El metro es la longitud del camino recorrido por la luz en el vacío en el intervalo de tiempo de 1/299 792 458 de segundo.

De dicha definición resulta que el valor de la velocidad de la luz en el vacío es exactamente igual a $c = 299\,792\,458$ m/s, o sea, sin incertidumbre. Además, la realización práctica de la definición contemplaba el empleo de cinco sistemas de láseres diferentes. El de mejor calidad metrológica era el correspondiente a la emisión del láser de He-Ne filtrado por la absorción de la molécula CH_4 , banda ν_3 , transición P(7), componente $F_2^{(2)}$, de una longitud de onda igual a $\lambda = 3\,392\,231\,397,0$ fm y una frecuencia de $\nu = 88\,376\,181\,608$ kHz, con una incertidumbre experimental de $(\Delta\lambda/\lambda) = (\Delta\nu/\nu) = 1,3 \times 10^{-10}$.

Con la sanción de la segunda forma de definición inmaterial del metro por parte de la XVII CGPM de 1983 se cerraba el siglo XX habiéndonos dado las definiciones de las siete unidades fundamentales del SI correspondientes a las siete magnitudes de base reconocidas internacionalmente: longitud, masa, tiempo, corriente eléctrica, temperatura termodinámica, cantidad de sustancia e intensidad luminosa.

La resolución de la XVII CGPM de 1983 con respecto a la nueva definición del metro concluía con una clara señal de respeto histórico, pues indicó que el original del Metro Prototipo Internacional —la barra en X número 6—, que fue mencionada en la sanción de la unidad de longitud por la I CGPM en 1889, continuara depositada en el BIPM y mantenida en las condiciones especificadas en 1889.

9. La unidad de masa fue sancionada en 1889 por la I CGPM y definida como Prototipo Internacional del Kilogramo, según la declaración de que:

Este prototipo debe ser considerado desde ahora la unidad de masa.

Se lo depositó en el BIPM y se lo mantuvo en las condiciones especificadas en 1889. La III CGPM, reunida en 1901, después de despejar dudas sobre la ambigüedad en el uso popular de las palabras “masa” y “peso”, confirmó que:

El kilogramo es la unidad de masa; es igual a la masa del Prototipo Internacional del Kilogramo.

Se sigue, por lo tanto, que la masa del Prototipo Internacional del Kilogramo es siempre exactamente igual a 1 kg.

10. Con respecto a la unidad de tiempo, sigue en vigencia la definición sancionada por la XIII CGPM (1967/68), según la cual:

El segundo es la duración de 9 192 631 770 de períodos de la radiación correspondiente a la transición entre dos niveles hiperfinos del estado fundamental del átomo de ¹³³Cs.

Por lo tanto, el desdoblamiento hiperfino del estado fundamental del átomo de ¹³³Cs es exactamente igual a $\nu_{(hf\text{ }^{133}\text{Cs})} = 9\,192\,631\,770\text{ Hz}$. En 1997 la CIPM completó esta definición afirmando que debe considerarse el átomo de ¹³³Cs en reposo a la temperatura de 0 K. En 1999, el Comité Consultativo para Tiempo y Frecuencia indicó que las frecuencias emitidas por todos los patrones primarios de frecuencias debían corregirse por el corrimiento debido a la radiación ambiental.

11. La IX CGPM, reunida en 1948, adoptó el ampere como la unidad de corriente eléctrica a partir de la definición propuesta por el CIPM en 1946:

El ampere es la intensidad de una corriente constante que, mantenida en dos conductores paralelos, rectilíneos, de longitud infinita, de sección circular despreciable y ubicados en el vacío a una distancia de 1 metro entre ellos, producirá entre los conductores una fuerza igual a 2×10^{-7} newton por metro de longitud.

Luego, la constante magnética, μ_0 , también conocida como la permeabilidad del vacío, es exactamente igual a $4\pi \times 10^{-7}$ henry por metro, o $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\text{ H/m}$.

12. La XIII CGPM (1967/68) confirmó la definición de la unidad de la temperatura termodinámica consagrada por la X CGPM (1954). Además, adoptó el nombre “kelvin” y el símbolo K, con la siguiente conclusión:

El kelvin, unidad de la temperatura termodinámica, es la fracción $1/273,16$ de la temperatura termodinámica del punto triple del agua.

Por consiguiente, resulta que la temperatura termodinámica del punto triple del agua es exactamente igual a 273,16 kelvin, o bien, que la $T_{\text{pta}} = 273,16\text{ K}$. Además, el CIPM, en su reunión de 2005, afirmó que esta definición se refiere al agua que tiene exactamente la siguiente composición isotópica de acuerdo con las proporciones de las cantidades de sustancia: 0,000 155 76 mol de ²H por mol de ¹H; 0,000 379 9 mol de ¹⁷O por mol de ¹⁶O, y 0,002 005 2 mol de ¹⁸O por mol de ¹⁶O.

13. El reconocimiento de la magnitud “cantidad de sustancia” y la incorporación de la unidad respectiva, el “mol”, dentro del Sistema Internacional de Unidades demandó ingentes esfuerzos de entendimiento y acercamiento de las posturas sostenidas por físicos y químicos. Como los físicos separaban los isótopos con el espectrómetro de masas, le atribuían el valor 16 a uno de los isótopos del oxígeno, mientras que los químicos le atribuían el mismo valor a la mezcla de los isótopos 16, 17 y 18, porque así aparece naturalmente el elemento oxígeno. Finalmente, siguiendo las propuestas de la International Union of Pure and Applied Physics (IUPAP), de la International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) y de la International Standard Organization (ISO), el CIPM dio una definición satisfactoria del “mol” en 1967 y la confirmó en 1969. Esta fue adoptada por la XIV CGPM de 1971, según la cual:

1. El mol es la cantidad de sustancia de un sistema que contiene tantas entidades elementales como átomos hay en 0,012 kilogramos de carbono 12; su símbolo es “mol”.
2. Cuando el mol es usado, las entidades elementales deben ser especificadas y pueden ser átomos, moléculas, iones, electrones, otras partículas, o agrupamientos específicos de tales partículas.

En 1980 el CIPM aprobó el informe del Comité Consultativo para las Unidades en el que indicaba que en la definición debe entenderse que los átomos de carbono 12 no están ligados, están en reposo y en su nivel fundamental. Como consecuencia de ello, la masa molar del carbono 12 es exactamente igual a 12 gramos por mol o $M(^{12}\text{C}) = 12\text{g/mol}$.

14. La definición de intensidad luminosa y de su unidad de medida, la candela, se resolvió en 1979 al reconocerse, por un lado, la dificultad experimental de construir un radiador de Planck de elevadas temperaturas que emitiera en el visible y, por otro, las nuevas posibilidades de la radiometría de realizar mediciones directas de la potencia de haces luminosos. Así, la XVI CGPM, reunida en 1979, adoptó una nueva definición para la candela:

La candela es la intensidad luminosa, en una dada dirección, de una fuente que emite radiación monocromática de frecuencia 540×10^{12} hertz y con una intensidad radiante en tal dirección de $1/683$ watt por esterradián.

De este modo resulta que la eficacia luminosa espectral K de una radiación monocromática de frecuencia 540×10^{12} Hz es exactamente igual a 683 lumen por watt, $K = 683 \text{ lm/W} = 683 \text{ cd sr/W}$.

15. La transición del siglo XVIII al siglo XIX sorprendió por la gran apertura a nuevos y trascendentes temas científicos que hicieron posible que se pasara del Sistema Métrico Decimal de 1889, sancionado por la I CGPM, con tres unidades de base: el metro, el kilogramo y el segundo, al Sistema Internacional de Unidades de 1960, sancionado por la XI CGPM, con seis unidades de base: el metro, el kilogramo, el segundo, el ampere, el kelvin y la candela, y al que la XIV CGPM, reunida en 1971, le agregó el mol. Del mismo modo, la transición del siglo XX al XXI se presenta provocadora para la metrología fundamental de las magnitudes.

La cuestión planteada fue la siguiente: las siete magnitudes de base del SI —la longitud, la masa, el tiempo, la corriente eléctrica, la temperatura termodinámica, la cantidad de sustancia y la intensidad luminosa— son por convención tenidas como independientes y, sin embargo, sus respectivas unidades de base —el metro, el kilogramo, el segundo, el ampere, el kelvin, el mol y la candela— son interdependientes. Así, la definición del metro incorpora el segundo; la definición del ampere incorpora el metro, el kilogramo y el segundo; la definición del mol incorpora el kilogramo, y la definición de la candela incorpora el metro, el kilogramo y el segundo. Por lo tanto, sería posible que una unidad SI derivada, como el ohm, cuyo símbolo es Ω , y que es únicamente definida por la relación $\Omega = \text{m}^2 \text{ kg s}^{-3} \text{ A}^{-2}$, que depende de la definición del ampere (la cual es demasiado académica y no posee una forma de realización práctica), pueda ser directamente realizada con elevada calidad metrológica usando el efecto Hall cuántico y el valor de la constante de von Klitzing: $R_K = h/e^2 = 25\,812,807 \, \Omega$, la que se obtiene del cociente de la diferencia de potencial Hall por la corriente correspondiente al estado $i = 1$ del efecto Hall cuántico. Este camino fue propuesto por el CIPM en 1988 siguiendo las instrucciones de la XVIII CGPM, reunida en 1987, impartidas en relación con las posibilidades de usar la constante de von Klitzing para expresar el valor de una resistencia patrón como una función del efecto Hall cuántico. Finalmente, los trabajos experimentales de varios laboratorios internacionales le permitieron al CIPM, en su reunión del 2000, aprobar la siguiente declaración:

El efecto Hall cuántico, junto con el valor de R_K , pueden ser usados para establecer un patrón de referencia de la resistencia eléctrica con una incertidumbre estimada en 1×10^{-7} , y una reproducibilidad que es significativamente mejor.

Esta declaración ha abierto enormes posibilidades de trabajo científico y tecnológico a los laboratorios internacionales, como el NIST y el propio BIPM, para intentar cambiar el modo de definir la magnitud del SI relacionada con las mediciones eléctricas.

16. Por otro lado, el descubrimiento del efecto Josephson también hace posible establecer un patrón cuántico de unidades eléctricas que vincule el volt con la constante de Planck h y la carga del electrón e a través de la constante de Josephson, $K_J = 2e/h$. El efecto Josephson se produce en una delgada barrera eléctrica que separa dos superconductores; dicha barrera se denomina juntura de Josephson. La irradiación de la juntura con microondas de frecuencia f causa la aparición de una diferencia de potencial a través de la juntura que está cuantificada en escalones de voltaje $V_J = f/K_J$. Esta posibilidad también fue propuesta por el CIPM en 1988 siguiendo las instrucciones de la XVIII CGPM, reunida en 1987. El CIPM consideró que los estudios realizados permitían establecer para la constante de Josephson el valor $K_J = 483\,597,9 \text{ GHz/V}$ y usarlo como patrón de referencia de fuerza electromotriz con una incertidumbre estimada en 4×10^{-7} , y una reproducibilidad significativamente mejor. Por ello, el CIPM recomendó adoptar, por convención, la constante de Josephson con el valor exacto de $K_J = 483\,597,9 \text{ GHz/V}$ y usarla a partir del 1 de enero de 1990 en todos los laboratorios que trabajan en temas relacionados con el efecto Josephson. Asimismo, consideró que el valor recomendado para constante K_J no sería cambiado en el futuro previsible. Nótese cómo ante la diferencia en las incertidumbres estimadas para la constante de von Klitzing R_K (1×10^{-7}) y la constante K_J de Josephson (4×10^{-7}), el CIPM brindó un auspicio mayor a la primera al incluirla en su declaración del 2000.

17. Asimismo, la XXI CGPM, en 1999, refiriéndose a la definición del kilogramo, consideró que era necesario asegurar la estabilidad en el largo plazo del SI, por lo que le preocupó la intrínseca incertidumbre del artefacto que define la unidad de masa y, consecuentemente, la incertidumbre que afecta a otras unidades de base del SI: el ampere, el mol y la candela. Por esto observó los progresos alcanzados por algunos experimentos diseñados para relacionar la unidad de masa con constantes fundamentales o constantes atómicas, y recomendó a los laboratorios nacionales que continuaran con sus esfuerzos para refinar los experimentos que permitieran en un futuro la redefinición del kilogramo usando constantes fundamentales o constantes atómicas.

2. ALGUNAS ANTIGUAS FORMAS DE MEDIR Y DE COMPUTAR QUE LLEGARON HASTA NOSOTROS

18. Es un hecho que, desde la más remota antigüedad, las civilizaciones que han dejado más patentemente inscriptas sus improntas en el desarrollo histórico de la humanidad han sido aquellas que basaron sus diversas actividades en la posibilidad de efectuar mediciones cuantitativas y de relacionarlas numéricamente mediante operaciones matemáticas. El establecimiento de grandes unidades urbanizadas, las monumentales construcciones arquitectónicas, los sistemas de aprovisionamiento y transporte de agua y de alimentos, los trabajos agrícolas, la navegación, la explotación de canteras y minas, entre tantas otras actividades, se fundan en las mediciones confiables de longitudes y distancias, superficies, volúmenes, pesos y tiempos.

19. En el antiguo Egipto ya se utilizaba un sistema de medida para las longitudes, las superficies y los volúmenes que empleaba el método decimal para las relaciones numéricas y para determinar los múltiplos y submúltiplos a partir de una unidad de longitud de base llamada “meh” o codo real (Figura 1).

Fig. 1. Piezas para pesar y medir (c. 2200 a. C.). En primer plano: el “codo real” y sus submúltiplos decimales. (Museo del Louvre, París, Francia).



20. Los sumerios y los babilonios, en cambio, utilizaron el sistema sexagesimal, el cual presenta numerosas ventajas aplicativas por la simple razón de que 60 es divisible por 2, 3, 4, 5, 6, 10, 12, 15, 20 y 30. Esta manera de numerar y los conocimientos astronómicos que adquirieron estas antiguas civilizaciones mesopotámicas dieron como resultado un elevado nivel de precisión en la determinación de intervalos de tiempo y de las posiciones angulares de los planetas.

21. La importancia de estos hechos se aprecia mejor al observar que, aún hoy, las mediciones del tiempo y de los ángulos se siguen haciendo según el mismo esquema que se usaba entonces, a pesar de haber transcurrido más de cinco milenios. Sin embargo, lo más trascendente de ambos sistemas de numeración —el decimal y el sexagesimal— es que los símbolos que empleaban para designar las diez unidades o las sesenta unidades, respectivamente, eran los mismos que los usados para designar a sus unidades. Es decir, aquellos pueblos ya habían establecido la notación de posición, la que resultó facilitada por la introducción de la numeración del 1 al 9 (hacia el siglo VI a. C.) y el símbolo 0 (hacia el siglo II) para indicar el “vacío” o la “falta de algo”, en la India.

22. De todos modos, en el Imperio Romano —la mayor unidad política y económica de Occidente, que abarcó doce siglos desde su comienzo hasta su desmembramiento— se utilizaba un sistema de numeración propio en el que los números se representaban con letras latinas, las cuales tenían los siguiente valores: I = 1, V = 5, X = 10, L = 50, C = 100, D = 500 y M = 1000. Para representar el 2 usaban la forma II, o sea, sumaban I más I, al igual que el 3 se representaba mediante III. Pero para representar el 4 se lo hacía anteponiendo I a V, o sea, IV, con lo que se ejecutaba la resta. A la inversa, es decir, ubicando I después de V, o sea, VI, se representaba el 6, lo que implicaba sumar. El 20 era XX, el 200 era CC, etc. Pero no estaba permitido VV, pues existía el X para representar al 10. Lo mismo pasaba con LL para el 100: se debía usar C, o con DD para el 1000: lo correcto era usar M. Por lo tanto, el sistema de numeración romana no era un “sistema de posición”, como el de los sumerios-acadios o los egipcios, lo cual hacía sumamente complejo realizar operaciones matemáticas. Debido a su complejidad, solo lo entendían bien los “abaquistas”: los que sabían manejar los ábacos apropiados para realizar operaciones matemáticas, como los mercaderes y los funcionarios imperiales para cobrar los impuestos.

Los romanos impusieron en todo el imperio no solo su sistema de numeración; paralelamente lo hicieron también con su sistema de pesas y medidas: la libra para los pesos y el pie para las longitudes. La unidad de capacidad era el ánfora y equivalía a un pie cúbico. Para las medidas agrarias emplearon el “jugerum”, que era equivalente al doble del área de un cuadrado de 120 pies de lado.

Al morir el emperador romano Teodosio en 395 se produjo el desmembramiento del Imperio Romano en el de Occidente, con capital en Roma, y el de Oriente, con capital en Constantinopla, lo que no solo generó la dispersión del poder político, sino que introdujo el caos metrológico.

23. Casi 400 años después, en 789, Carlomagno inició su reinado sobre el Santo Imperio Romano Germánico (parte de los restos europeos continentales del Imperio romano de Occidente). En su capital, Aquisgrán (Aachen, actualmente), depositó los patrones de todas las medidas que se usarían, entre ellas, la llamada pila de Carlomagno que materializaba a la libra o *poids de marc*. La libra y sus submúltiplos se componían con 15 pesas de cobre que se encajaban entre sí y se guardaban en el estuche apropiado (Figura 2). Estas pilas se distribuyeron por todo el Imperio para uniformar el uso de la libra. En Aquisgrán también se depositaron los cuños de la nueva moneda, el franco. Todo este esfuerzo de organización trataba de contribuir al establecimiento de la justicia distributiva.



Fig. 2. La pila de Carlomagno.
(Conservatoire National
des Arts et Métiers, París, Francia).

24. Por esa misma época, la numeración de posición iniciada en la India en el siglo VI a. C. y completada en el siglo II fue propagada por los árabes desde el siglo VII, especialmente por obra del matemático Muhammad ibn Mūsā al-Jwārizmī (c. 780–c. 850). Su nombre significa “Muhammad hijo de Mūsā nacido en Jwārizmī” (actualmente Jiva, Uzbekistán, en Asia Central) y fue más conocido como Al-Jwārizmī. Él compiló y amplió la obra del matemático griego Diofanto—quien hizo escuela en Alejandría hacia el 275—y fue publicada con el título, en árabe, *Ilm-al-jabr-wa'l-muga-balah* o *Ciencia de la transposición y la cancelación. Algoritmo y álgebra* recuerdan su vida y obra. Por él es designada la numeración India como “algorítmica” en contraposición de la numeración “abaquista” de Roma.

25. Los conocimientos matemáticos de Al-Jwārizmī llegaron a la España dominada por los árabes e ingresaron en el resto de Europa merced a las relaciones del monje benedictino Gerbert d’Orlhac (938-1003) con el conde Borrell II, el gobernante de la ciudad condal de Barcelona. Durante el Imperio carolingio, Barcelona había quedado protegida del avance árabe dentro de la Marca Hispánica y, por ello, hacia el 1000, dependía de París. Borell II visitó en tres ocasiones Córdoba, de donde llevó a Barcelona varios libros que hizo traducir del árabe por Sunifred Llobet y le encomendó a Gerbert estudiar la *aritmética arábiga*, la *geometría*, la *astronomía* y la *música*, las cuatro ramas del “quadrivium”, el sistema clásico de enseñanza. Más tarde, Gerbert comenzó a enseñar la nueva matemática y, para facilitar los cálculos prácticos a quienes empleaban el ábaco romano, inventó un *ábaco decimal*, descrito así: “Estaba dividido en su longitud en 27 partes. Dispuso nueve cifras que representaban los números. Fabricó también mil fichas de cuerno que tenían grabadas aquellas cifras. Cuando las desplazaba por los 27 compartimentos del ábaco, indicaban la multiplicación y la división de los números”. Gerbert fue electo Papa en el 999 y asumió como Silvestre II. Durante su pontificado se preocupó por difundir en toda Europa los conocimientos de la nueva matemática que había adquirido y enseñado en Barcelona.

26. 200 años más tarde, en el siglo XII, otro matemático, Leonardo de Pisa, llamado Fibonacci (1170–1250), aprendió la matemática indo-arábiga en el norte de África y, de regreso en Italia, se dedicó a enseñar el beneficio de adoptar el sistema “algorítmista”, por su simplicidad, y así abandonar el sistema “abaquista” debido a su complejidad.

27. La coma decimal para separar las partes enteras y los decimales de una cifra fue introducida hacia 1590 por el escocés John Napier (o Neper), quien, además, inventó en 1614 los logaritmos—o los “números proporcionales”—para facilitar los cálculos con grandes números, ya que mediante los logaritmos las multiplicaciones se convertían en sumas y las divisiones en restas. Además, con sus logaritmos descubrió el número $e = 2,718\ 281\ 828\ 4...$

Otro gran progreso se observó en Europa en esa misma época con la introducción de la forma decimal de escritura de las fracciones. Por ejemplo, las cifras $8\frac{1}{4}$ y $137\frac{3}{8}$ se pasan a escribir 8,25 y 137,37 gracias a la obra del holandés Simon Stevin, aunque resulta difícil atribuirle la invención de la escritura decimal de las fracciones, puesto que se reconoce que los chinos ya la empleaban hacia el 1200. Asimismo, Stevin extendió el modo decimal de escribir las fracciones reemplazándolo por los múltiplos y los submúltiplos de alguna unidad de medida. Dicha manera de designar fue aplicada enseguida a las longitudes, las superficies, los volúmenes, los pesos, los ángulos e incluso a los sistemas monetarios.

Puede afirmarse, entonces, que hacia 1600 estaban ya asentadas las principales condiciones necesarias para elaborar un buen sistema de unidades.

3. DE LA BALANZA MÁS ANTIGUA QUE SE CONOCE A LA BALANZA DEL WATT

28. En una tumba prehistórica excavada en el desierto de Nagada, Egipto, se encontró una pequeña balanza cuya flecha mide unos 8,5 cm, que fue datada hacia el 5000 a. C., o sea que fue empleada hace unos siete milenios (Figura 3). Parece ser una balanza transportable utilizada para pesar objetos pequeños, como piedras preciosas, cristales naturales, o piezas de oro o plata. En tal caso, se puede conjeturar que se trataría de una balanza empleada por mercaderes en caravanas o artesanos joyeros para cerrar operaciones de compra-venta de materias primas o de pequeños objetos de arte. Las pesadas se efectuarían por contraste con piezas normalizadas, como las pequeñas piezas cilíndricas, esferoidales o rectangulares que se observan en la figura 1.

Fig. 3. Pequeña balanza (c. 5000 a. C.).
(Museo Petrie de Arqueología Egipcia,
University College London,
Londres, Inglaterra).



29. 7000 años después de que la pequeña balanza del desierto de Nagada fuera usada, se están construyendo en diversos laboratorios unas balanzas experimentales para determinar la masa de un objeto de prueba de modo muy preciso midiendo la corriente eléctrica que circula por unas bobinas especiales al aplicarles una diferencia de potencial. Como en estas balanzas la masa del objeto de prueba es proporcional al producto de la corriente por la diferencia de potencial, lo que resulta una potencia eléctrica, se las denomina “balanzas del Watt”. La pretensión está en determinar la masa del kilogramo patrón en función de la constante h de Planck.

Fig. 4. Balanza del Watt del National
Institute of Standards and Technology
(NIST), Boulder, Colorado, EUA.



El principio de funcionamiento de la balanza del Watt fue propuesto por B. P. Kibble, del British National Physical Laboratory, en 1975. Su balanza fue transferida en 2009 al National Research Council de Canadá. Otras balanzas del Watt se están construyendo en la Federal Office of Metrology (METAS), en Berna, Suiza; en el BIPM, en Sèvres, París, y en el Laboratoire National de Métrologie et d’Essais (LNME), en Trappes, Francia.

30. Tratar de determinar la masa del Prototipo Internacional del Kilogramo en función de la constante h de Planck parece una utopía. Pero esta aparente curiosidad se debe a que, después de varias décadas de experiencia intentando medir cada vez mejor la constante h de Planck empleando la denominada balanza del Watt, el National Institute of Standards and Technology (NIST, el nuevo nombre del antiguo National Bureau of Standards) decidió la construcción de la cuarta generación de la balanza del Watt, NIST-4, pensando en la próxima diseminación internacional de la realización práctica de lo que se pretende sea el nuevo kilogramo patrón (Figura 4). La instalación completa de la NIST-4 está al vacío, la elevación de la temperatura de la instalación por la provisión de energía eléctrica está compensada y tiene provisión de He líquido para los sistemas superconductores que actúan en su interior.

La figura 5 muestra dos dibujos esquemáticos del modelo NIST-4 de la balanza del Watt que describen los dos modos de operarla para lograr la realización práctica del nuevo kilogramo patrón proyectado. En cuanto balanza, la única característica geométrica novedosa del diseño de NIST-4 es el uso de una rueda en montaje vertical que reemplaza la tradicional barra de brazos iguales. En el primer modo (Ver Panel a) una bobina circular cuyo conductor tiene una longitud ℓ y conduce una corriente eléctrica I en un campo magnético radial B (representado por las flechas azules) experimenta una fuerza electromagnética $F_{em} = I\ell B$ que equilibra exactamente el peso de una masa de prueba, mg . La corriente I se determina midiendo la diferencia de potencial V , que genera a través de una resistencia patrón R (no se muestra en el dibujo), que ha sido calibrada comparándola con una resistencia patrón basada en el efecto Hall cuántico. Asimismo, el voltaje V , es medido con respecto a un patrón cuántico de voltaje por efecto Josephson construido dentro de la misma balanza del Watt.

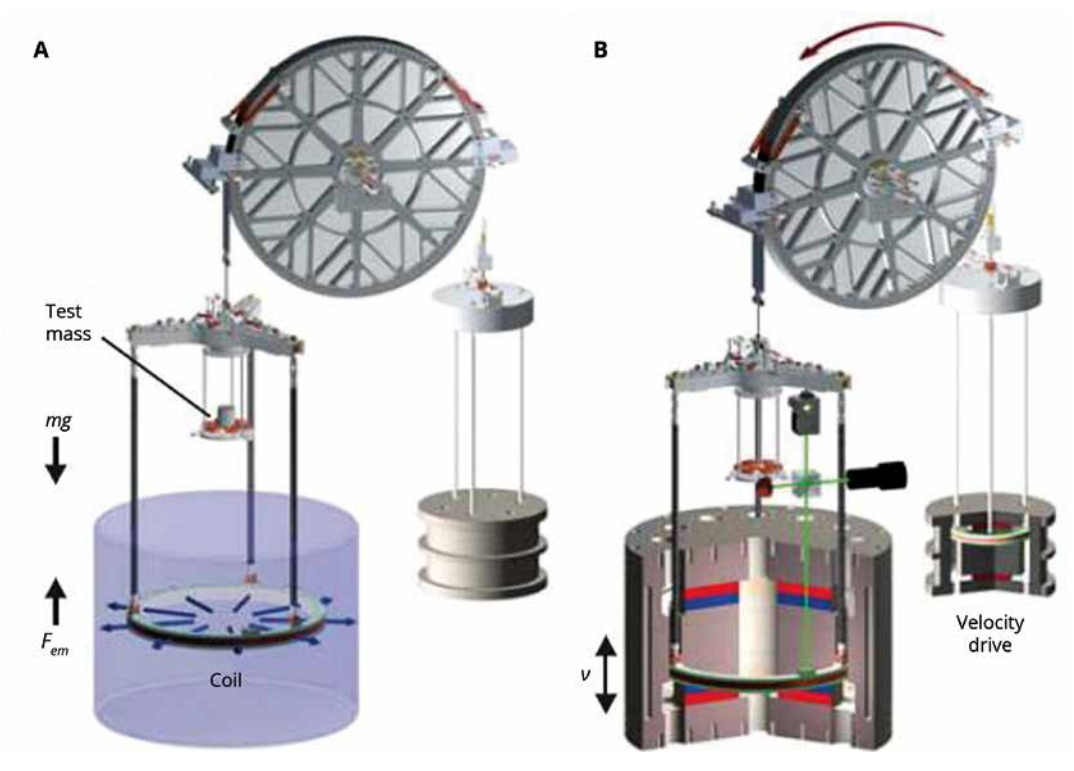


Fig. 5. Balanza del Watt. Panel a) Primer modo de operación. Panel b) Segundo modo de operación. Test mass = Masa de prueba, Coil = Bobina, Velocity drive = Sistema motorizado.

El valor local de la aceleración de la gravedad g que afecta a la masa de prueba m se determina por medio de una combinación de gravímetros absolutos con modelado computacional de su distribución geométrica. Luego, para determinar m en función de los parámetros eléctricos, lo que falta conocer es el factor electromagnético $B\ell$. Este factor $B\ell$ se determina poniendo en juego el segundo modo de operación de la balanza del Watt (Ver Panel b), que recuerda al de la máquina de Atwood. Este consiste en mover la bobina verticalmente a la velocidad v en el mismo campo magnético B . Este movimiento genera una fuerza electromotriz $V_2 = vB\ell$. La velocidad v es impartida por el sistema motorizado que pende de la misma cuerda que la masa de prueba, pero en el lado opuesto de la rueda. Tres interferómetros de Michelson “en cruz” a láser controlan el desplazamiento tridimensional de la bobina determinando su velocidad constante por

el conteo temporal de la cantidad de las franjas interferenciales barridas al completar el movimiento. En el Panel b está representado uno de los tres interferómetros iluminado con luz láser verde. De la misma manera que en el primer modo de operación de la balanza del Watt, el voltaje inducido V_2 se mide con respecto a un patrón cuántico de voltaje por efecto Josephson.

Combinando los resultados obtenidos por ambos modos de operación, la masa queda:

$$m = IB\ell/g = V_1V_2/Rgv.$$

Finalmente, como las mediciones eléctricas guardan relación directa con los patrones cuánticos, ellas pueden expresarse en términos de la constante de Josephson $K_J = 2e/h$ y de la constante de von Klitzing $R_K = h/e^2$ sustituyendo $V_J = f/K_J$ y $R = R_H = R_K/i$ en las expresiones del voltaje y de la resistencia, respectivamente. De esta manera la balanza del Watt pone en práctica la relación del kilogramo con la constante h de Planck:

$$m = h \frac{in_1in_2}{4} \frac{f_1f_2}{gv}$$

El entero i se origina en la cuantificación del patrón cuántico de resistencia eléctrica, el que se toma como $i = 1$ por la condición de trabajo que declaró admisible el CIPM en 2000 (Ver punto 15); n_1 y n_2 indican la cantidad de junturas de Josephson que se requiere conectar en los patrones cuánticos de voltaje, y f_1 y f_2 son las frecuencias de microondas usadas para excitar tales patrones. Cuando esté terminada la balanza del Watt NIST-4 será posible determinar la masa de 1 kg con una incertidumbre absoluta de unos 10 μg , o sea, con una calidad metrológica de 1×10^{-8} .

31. El estado del Prototipo Internacional del Kilogramo es verificado regularmente, al menos cada cuatro años durante la reunión de la CGPM. En tales ocasiones se lo retira de su doble alojamiento al vacío (Figura 6) y se lo pesa antes y después del procedimiento de limpieza, lavado y secado que se ha establecido. De la comparación de ambas pesadas se encuentran variaciones en su masa por contaminaciones superficiales reversibles del orden de 4 μg cada cuatro años, por lo que el CIPM declara que, dependiente de otros estudios, el Prototipo Internacional del Kilogramo sigue en servicio para calibrar los patrones nacionales de la aleación de platino-iridio. Por lo tanto, se sigue considerando que su calidad metrológica después de cuatro años es del orden de 4×10^{-9} .

Fig. 6. El Prototipo Internacional del Kilogramo dentro de su doble alojamiento al vacío.



4. EL ORIGEN DEL SISTEMA MÉTRICO DECIMAL (1795) Y LA CONVENCIÓN DEL METRO (1875)

32. Ya se han puesto como ejemplo de la solidez del desarrollo de algunas antiguas civilizaciones sus posibilidades de efectuar mediciones cuantitativas y de relacionarlas numéricamente. Sin embargo, el dominio de tales posibilidades no garantizó nunca la permanencia histórica de aquellas civilizaciones, puesto que tales posibilidades, fundadas en las más altas capacidades intelectivas de los humanos, son solo condiciones históricas necesarias, pero no suficientes. El análisis de los hechos muestra que lo mismo ocurrió con el Imperio Romano.

De todos modos, Europa recibió la herencia metrológica del Imperio Romano a través de su remanente occidental. Desde entonces, los sucesivos cambios sociales, económicos y políticos ocurridos sobre el mapa europeo generaron gran cantidad de incoherencias metrológicas, de modo que, cuando en el 789 Carlomagno inicia su reinado sobre el Santo Imperio Romano Germánico —parte de los restos europeos continentales del Imperio romano de Occidente—, con uno de los primeros decretos capitulares promulgó la unificación de las medidas y en su capital, Aquisgrán, depositó los patrones de todas las medidas que se usarían, así como también los cuños para acuñar moneda, el franco. Esto se debió a que Carlomagno comprendió la influencia que la uniformidad de las medidas y el empleo de una misma moneda ejercían sobre la unidad y la paz de su vasto Imperio.

33. Al morir Carlomagno el gran imperio se dividió y subdividió en feudos, principados y pequeños estados. En ellos, sus respectivos gobernantes eran amos absolutos y dueños de la tierra y de la producción, de las que determinaban su cuantía y valor utilizando pesos y medidas establecidos unilateral e independientemente por ellos mismos. Este proceder dio como resultado que Europa presentara un panorama caótico, ya que no solo las denominaciones de alguna magnitud física —como la longitud— eran diferentes en cada región o ciudad, sino que, muchas veces, bajo la misma denominación de una unidad se podían encontrar centenares de definiciones. Por ejemplo, los metales, la lana, el cuero y los comestibles se pesaban empleando la libra llamada *avoir du poids* y, a los efectos del intercambio comercial debía tenerse presente que 100 libras de París o de Amsterdam equivalían a 109,9 de Londres, a 166 de Venecia o a 146 de Roma. En este sentido, el gran químico francés Antoine Laurent de Lavoisier, cuando trabajaba como cobrador de impuestos, señaló: “Da miedo pensar que tan solo en el distrito de Peronne, cuya extensión no es muy grande, haya diecisiete medidas de *journal* diferentes”. El *journal* era una unidad de superficie agraria equivalente al área que un hombre podía labrar en un día. Tal definición no atendía a la calidad del terreno, era independiente de si era fértil o pedregoso, si contenía alguna fuente de agua o de la robustez del labrador. No es difícil imaginar que cualquier falla interpretativa o de redacción de los contratos podía desencadenar un conflicto, lo que, de hecho, ocurría habitualmente.

34. La evolución y decantación de las ideas, procedimientos e instrumentos para unificar los usos metrológicos ocurrió durante la misma época en que llegaron a Europa las nociones matemáticas indo-arábigas y chinas relativas a la numeración, la notación de posición y la escritura decimal de fracciones. En esa misma época se desarrollan en la sociedad feudal las técnicas artesanales y aparecen los primeros objetos manufacturados. A su vez, el desarrollo urbano acrecienta los intercambios entre las ciudades y el campo, y las ciudades más importantes y los estados pequeños, algunos de ellos asociados, inician la época de las grandes expediciones terrestres y marítimas. Y todo esto no ocurrió por obra del azar. El crecimiento de una cosa llevó a acrecentar las otras. El avance científico y tecnológico permitió, por un lado, producir de todo en más cantidad, con mejor calidad, en menos tiempo y menor precio, y, por el otro, produjo un avance de la cartografía y de los medios de navegación que ampliaron las fronteras de los conocimientos y de los mercados. Esto generó una gran demanda de nuevas materias primas y abrió nuevas sedes para colocar los productos, lo que, en definitiva, llevó a un más fuerte convencimiento de la necesidad de establecer un sistema de unidades que fuera universal, estable, preciso, simple y coherente.

35. Un sistema de unidades es universal cuando es reconocido oficialmente por todos los estados, a través de todos sus gobiernos; es estable, porque los patrones que materializan a las magnitudes de las unidades fundamentales no deben sufrir alteraciones a lo largo del período establecido para su validez; es preciso, por cuanto los patrones fundamentales deben definirse con tales exigencias que permitan la reproducción adecuada de réplicas apropiadas para el uso habitual; es simple, de modo que las relaciones entre múltiplos y submúltiplos de las unidades sean sistemáticamente decimales, y, finalmente, es coherente, porque las unidades derivadas de las unidades fundamentales deben poder introducirse empleando operaciones algebraicas y sin necesidad de que resulten afectadas por factores arbitrarios. Debe reconocerse que estas imposiciones provienen y se basan en los cada vez más exigentes planteos científicos y, en particular, en aquellos de la física. En efecto, el impulso dado a los estudios de los fenómenos físicos por Galileo Galilei (1564-1642), Johannes Kepler (1571-1630), René Descartes (1596-1650), Pierre de Fermat (1601-1665), Christiaan Huygens (1629-1695) e Isaac Newton (1642-1727) hicieron de la física una verdadera ciencia, lo que hacía imprescindible que las unidades de medida fueran exactamente definidas y rigurosamente estables. Para satisfacerlas se requerían patrones adoptados con criterios científicos, atendiendo a una simple ley física, por ejemplo, la Segunda Ley de la Dinámica de Newton:

$$F = ma = m (dv/dt) = m (d^2x/dt^2),$$

en la que F es la fuerza constante que, aplicada sobre la masa m , le imprime la aceleración constante a . La velocidad en aumento v , la posición cambiante x , y el tiempo t que transcurre son las magnitudes que caracterizan al movimiento de la masa m , por lo que un sistema coherente de unidades, para la época, debía contener una unidad de longitud, una unidad de masa y una unidad de tiempo.

36. Sin embargo, las dificultades para establecer un sistema de unidades eran de distinto carácter; formalmente no había dificultades científicas. Francia fue la nación que más esfuerzos realizó para lograrlo, hasta mediados del siglo XVIII. En efecto, a mediados del siglo XVII, Jean Baptiste Colbert (ministro de Luis XIV), quien fomentó el comercio y la industria, constituyó un consejo de gobierno para analizar la cuestión sin poder resolverla y Jacob Necker (ministro de Luis XV) intentó vanamente examinar el mismo problema tratando de introducir reformas de fondo en el ámbito de la metrología, en la segunda mitad del siglo XVIII.

37. Tanto los gobernantes como los científicos de la época eran conscientes del desorden y la incertidumbre que reinaban, lo que se hizo manifiesto con la comparación realizada en 1742 entre los patrones de longitud y de peso utilizados a la sazón en Francia e Inglaterra. Se comprobó que el “*pie*” y la “*livre*” francesas eran mayores en 6% y 8%, respectivamente, que las unidades inglesas “*foot*” y “*pound*”.

Entonces, se les prestó atención a dos propuestas que habían sido formuladas unos setenta años antes por medio de las cuales se trataba de que la unidad de longitud surgiera de un fenómeno natural y no de un decreto de la realeza, y, además, que sus múltiplos y submúltiplos se relacionaran siguiendo el sistema decimal, abandonando las relaciones empleadas en la época, basadas en factores arbitrarios. Una de las propuestas hacía referencia a la unidad universal de longitud definida como igual a la longitud del péndulo que bate un semiperíodo de oscilación en un segundo. Esta propuesta fue formulada en Inglaterra por John Wilkins en 1668, y por Cristopher Wren en 1670; en ese mismo año en Francia por el abad Picard; por Christiaan Huygens en 1673 en Holanda, y por Tito Livio Burattini en 1675 en Italia. La otra propuesta fue presentada por el abad Mouton de Francia, en 1670. En ella se planteaba la adopción de la unidad universal de longitud al arco de meridiano terrestre correspondiente a un ángulo de un minuto, a la que se denominó milla. También proponía los múltiplos de la milla, la decuria y la centuria, y sus submúltiplos, la décima y la centésima. En el proyecto del abate Mouton pueden verse con claridad las ideas que sirvieron de base a la sanción del Sistema Métrico Decimal en 1791 en Francia.

38. Después de la revolución francesa de 1789, Charles Maurice de Talleyrand Périgord propuso a la Asamblea Nacional Constituyente que sancionara el proyecto según el cual la longitud del péndulo que bate un semiperíodo de oscilación en un segundo fuera la definición de la unidad de longitud universal. Este proyecto fue cuestionado por la Academia de Ciencias francesa por la razón bien conocida de que el período de oscilación del péndulo depende no solo de su longitud, sino también del valor de la aceleración de la gravedad, el cual no es constante, ya que variaría con la latitud geográfica y la altitud sobre el nivel del mar, según las consideraciones de Newton. Tal efecto fue comprobado por las mediciones realizadas por Jean Richer (1630-1696), astrónomo del Observatorio de París. Richer emprendió en 1672 una expedición a Cayena, capital de la Guayana Francesa, para observar la oposición del planeta Marte. Con los datos que él obtuvo y las mediciones de Cassini en París se calculó la distancia de la Tierra a Marte. Durante la expedición, Richer notó que el reloj de péndulo, ajustado con exactitud a su partida de París, atrasaba casi dos minutos y medio por día al funcionar en Cayena, cerca del ecuador. Richer llegó a la conclusión de que este fenómeno se producía por la diferencia de la aceleración de la gravedad en ambas latitudes (París, 48° 52' Norte y Cayena, 4° 56' Norte), admitiendo que la Tierra no era perfectamente esférica, sino achatada en los polos, tal como lo aseguraba Newton —o de forma oblada con respecto a su eje de rotación— y en contra de lo que afirmaba Cassini, quien la suponía de forma ahusada —o prolada con respecto a su eje de rotación—. Ante estos antecedentes que socavaban la pretensión de definir la unidad universal de longitud, Talleyrand Périgord mantuvo su proyecto, pero agregándole que el péndulo debía localizarse “en la latitud media del mundo civilizado”, a los 45° Norte, o sea, la latitud media de Francia, entre las de Burdeos y Grenoble. Jean-Charles de Borda, un entusiasta adherente a la decimalización, criticó el proyecto por estar bajo estudio su propia propuesta de sistema decimal de la medición del tiempo, en la que el día se dividía en 10 horas, cada hora en 100 minutos y cada minuto en 100 segundos, por lo que debía esperarse que esta propuesta se aprobara para luego tratar la definición de la unidad de longitud.

39. Quedó, pues, a disposición de la Asamblea el otro proyecto relacionado con la longitud del meridiano. Este fue también presentado por Talleyrand Périgord y fue sancionado el 30 de marzo 1791. Con él quedó establecido un sistema de pesos y medidas basado íntegramente en la unidad de longitud —el metro— que sería igual a la diezmillonésima parte del cuadrante del meridiano terrestre. Las unidades de superficie y de volumen eran el metro cuadrado y el metro cúbico. Al decímetro cúbico se lo denominó litro, mientras que la unidad de masa pasó a ser la masa de un decímetro cúbico de agua destilada a la tem-

peratura correspondiente a su máxima densidad. A la unidad de masa se la denominó kilogramo, la que mantiene en su designación el prefijo “kilo” –un múltiplo– que significa 1000.

Como el sistema de unidades se basaba solo en el metro y los respectivos múltiplos y submúltiplos se obtenían multiplicando o dividiendo sucesivamente por diez, se lo reconoció como Sistema Métrico Decimal. Finalmente, el 7 de abril de 1795 (o “18 de germinal del año III del calendario de la Revolución de los Jacobinos”) la Asamblea promulgó el Sistema Métrico Decimal y definió al metro como la “10 millonésima parte del cuadrante de meridiano terrestre”. Lo sancionó como de uso obligatorio en toda Francia y fijó los modos prácticos de implementarlo. Junto con el metro, el litro y el kilogramo, se estableció, además, la nueva moneda de uso obligatorio en Francia, el franco.

40. Como resultaba imposible medir un cuadrante de meridiano desde el polo hasta el ecuador, se aprobó medir un tramo del llamado “meridiano de París” desde Dunkerque hasta Formentera, con base en Barcelona. En 1790 la Asamblea Nacional propuso el proyecto a la Academia de Ciencias y esta constituyó una comisión formada por Jean-Charles de Borda (instrumentos ópticos), Jean Antoine de Condorcet (matemático), Joseph Louis Lagrange (físico y matemático), Antoine Laurent de Lavoisier (químico), Mathieu Tillet (metalúrgico), Pierre Simon Laplace (astrónomo y matemático) y Gaspard Monge (astrónomo y matemático).

41. El proyecto fue dividido en dos: la sección norte del meridiano, de unos 742,7 km desde la torre de Dunkerque (Figura 7), hasta una de las torres de la catedral de Rodez (Figuras 8 y 9), cuya medición estuvo a cargo del astrónomo Jean-Baptiste Joseph Delambre (1749-1822), y la sección sur, de unos 333,0 km, desde Rodez a la torre de la fortaleza de Montjuïc, Barcelona (Figura 10), cuya medición estuvo a cargo del astrónomo Pierre François Méchain (1744-1804). Una cadena de triángulos con los vértices en montañas situadas a lo largo del “meridiano de París” permitió calcular su longitud a partir de dos “bases topográficas”, una en la sección norte, de una longitud de unos 10 km a lo largo de un tramo recto de una ruta cercana a Melun, al sur de París, y la otra, en la sección sur, de unos 6 km de longitud a lo largo de un tramo recto de una ruta cercana a Perpignan, en el sur de Francia. Esas bases fueron medidas cuidadosamente por medio de cuatro barras de platino ajustadas al patrón que entonces se utilizaba en Francia, la “toesa de la Academia”, que medía unos 3,9 m.

Mientras Méchain y Delambre completaban sus cálculos, la comisión en París hizo preparar una serie de barras de platino para representar provisoriamente al metro. Las barras eran reglas “de extremos” planos, paralelos entre sí y pulidos “a espejo”. Cuando el resultado final se conoció, se seleccionó la barra cuya longitud fuera más cercana a la definición meridional del metro y se la depositó en el Archivo Nacional el 22 de junio de 1799 (4 mesidor del año VII de la Revolución de los Jacobinos), como recuerdo permanente de la epopeya metrológica. A dicha barra se la denominó Metro de los Archivos. Finalmente, el 10 de diciembre de 1799 fue firmada la ley del Sistema Métrico Decimal por Napoleón Bonaparte, cónsul de Francia. En el trazado de Barcelona quedó para siempre el recuerdo de la epopeya metrológica con las dos avenidas perpendiculares cuyos carteles señalan, en catalán, a “L’avinguda de la Meridiana està alineada amb el meridià 2 graus 13 minuts i 45,38 segons Est.”, y a “L’avinguda del Paral·lel segueix el paral·lel terrestre 41 graus 22 minuts i 33 segons Nord”. Cabe señalar que la longitud geográfica de la torre de Dunkerque es 2° 22’ 34” Este, la de la torre de la catedral de Rodez es 2° 34’ 24” Este, y la torre de la fortaleza de Montjuïc en Barcelona es 2° 10’ 01” Este.



Fig. 7. Carrillón de Dunkerque (Belfry, en inglés, y Beffroi, en francés). Comienzo de la medición del arco del meridiano de París hasta Barcelona y la isla de Formentera.

Fig. 8. Vista de la catedral en el horizonte de Rodez.

Fig. 9. La torre de la catedral de Rodez.
Punto de unión de la sección norte con la
sección sur del arco de meridiano.
Fig. 10. Torre de la fortaleza de Montjuïc,
Barcelona. El final del arco de meridiano.



42. Revisiones posteriores llevaron al convencimiento de que el resultado obtenido por Méchain y Delambre fue más corto que la definición meridional en 0,213 mm; resultó ser 0,999 787 00 m. Por ello, se organizó una expedición complementaria, liderada por Jean-Baptiste Biot (1774-1862) y François Arago (1786-1853), para extender la medición del arco del meridiano de París hasta la isla de Formentera, lo que se realizó desde 1806 hasta 1809. Su resultado final fue que la diezmillonésima parte del cuadrante del meridiano de París era igual a 1,000 000 00 m. Por ello, el Metro de los Archivos se mantuvo como el metro patrón en Francia, tanto desde el punto de vista legal cuanto práctico.

El valor moderno de la diezmillonésima parte del cuadrante del meridiano de París obtenido por el World Geodetic System en 1984 (WGS 84) fue escasos 200 μm mayor: resultó 1,00019657 m. Este último valor, obtenido 175 años después del que obtuvieron Biot y Arago, es solo indicativo, aunque sí permite adjudicar un enorme crédito a la epopeya metrológica, sin tener en cuenta eventuales movimientos geológicos en la región que pudieran haber alterado las mediciones en ese lapso.

43. De todos modos, si bien la idea de emplear la longitud del péndulo que bate medio período de su oscilación en un segundo como definición de la unidad universal de longitud fue dejada de lado en Francia, sirvió para materializar la yarda en el Reino Unido, desde 1843 hasta 1878. Debe recordarse que Enrique I de Inglaterra en el año 1101 había establecido la yarda como la longitud de la distancia entre la punta de su nariz y el extremo de su dedo medio, teniendo el brazo extendido horizontalmente y mirando al frente.

44. Al crecer la adopción internacional del Sistema Métrico Decimal, las barras “de extremos” que habían sido producidas conjuntamente con la que había sido seleccionada como Metro de los Archivos fueron adquiridas para establecer los metros patrones nacionales con valor legal, aunque se sabía que no tenían las mismas longitudes que la establecida por la definición meridional. Además, esas barras, así como las nuevas que se fueron produciendo, eran “de extremos” pulidos “a espejo”, por lo que quedaban expuestas a sufrir desgastes por el uso, aunque este fuera muy cuidadoso. Todas estas cuestiones contradecían el principal propósito del Sistema Métrico Decimal: que fuera universal. En 1867 la Conferencia Internacional de Geodesia hizo un llamado para establecer un nuevo prototipo internacional del metro y coordinar un sistema a través del cual todos los patrones nacionales pudieran compararse con él. Además, para evitar el desgaste de los patrones “de extremos”, el nuevo prototipo del metro debería ser un patrón “en línea”, de modo que su longitud quedara definida como la distancia entre dos trazos grabados en una barra. Finalmente, se decidió que el nuevo metro tuviera la longitud del Metro de los Archivos “en el estado en que se lo encuentre”. El Gobierno francés prestó un apoyo fundamental al proyecto convocando a una Comisión Internacional del Metro, que se reunió en París con la participación de treinta países en 1870 y, luego de concluida la guerra prusiana, en 1872.

45. La construcción del nuevo metro se logró en 1874 empleando la última tecnología alcanzada por la metalurgia y la mecánica. Las barras de sección en X se fundieron en una aleación de 90% de platino y 10% de iridio, que resultó tener una dureza superficial significativamente mayor que el platino puro. Con esto se aseguraba un desgaste prácticamente despreciable. La sección en X o “sección de Tresca” fue desarrollada por el ingeniero francés Henri Édouard Tresca (1814-1885) para dar a las barras el máximo de rigidez con el mínimo de material y para minimizar los efectos de los esfuerzos torsionales que se podrían introducir al mover las barras en las operaciones de intercomparación entre las diferentes barras. La figura 11 reproduce un grabado que apareció en el periódico *L’Illustration* del 16 de mayo de 1874. En él se muestra un momento de la producción de las barras en el Conservatoire National des Arts et Métiers de París, donde Tresca era profesor. El trabajo se complementó con la producción de otras barras en X a cargo de la firma Johnson Matthey de Londres. Se fundieron exitosamente treinta barras que cumplían con las exigencias requeridas. En la barra N° 6, además, se determinó que la distancia entre los trazos grabados para definir la longitud del metro era idéntica a la longitud del Metro de los Archivos, por lo que sería consagrada como Prototipo Internacional del Metro por la I CGPM, reunida en 1889. La figura 12 muestra una fotografía del extremo de identificación de la barra en X N° 5, la figura 13 muestra los trazos de un extremo y en la figura 14 pueden verse tres microfotografías de los trazos grabados que muestran a) antes, b) durante y c) después de la operación de desbarbado.



Fig. 11. Grabado publicado por *L'illustration* del 16 de mayo de 1874.

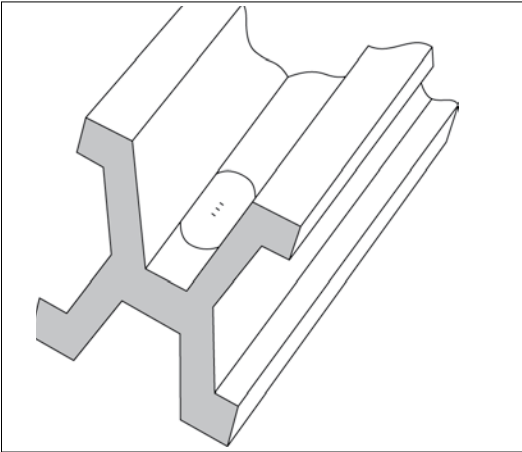
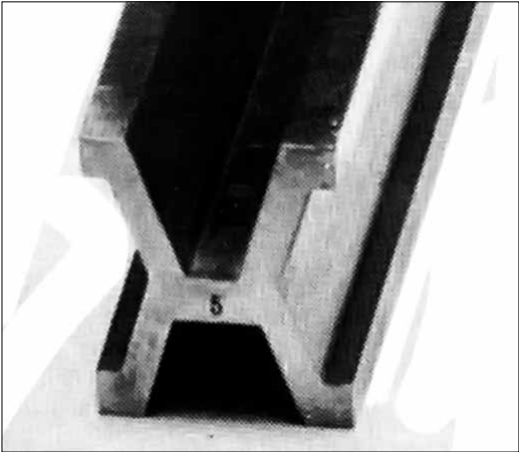


Fig. 12. Fotografía del extremo de identificación de la barra en X N.º 5
Fig. 13. Dibujo del extremo de una barra en X y los tres trazos grabados. La distancia entre los trazos medios de los extremos definen el metro.

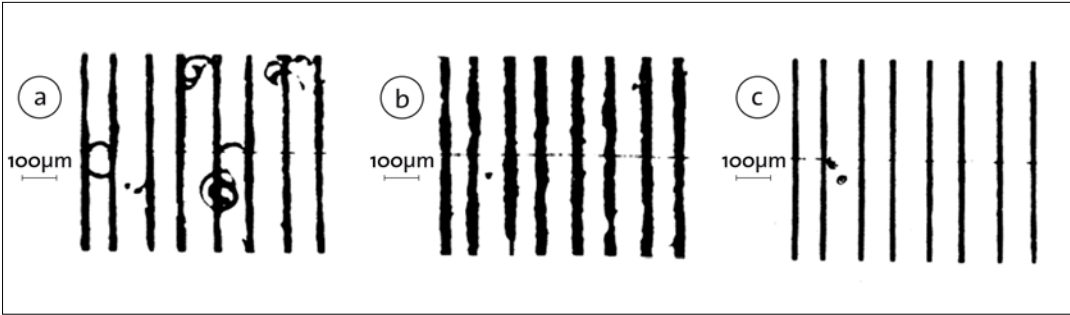


Fig. 14. Microfotografías de trazos grabados que muestran a) antes, b) durante y c) después de la operación de desbarbado.

46. A partir de la actividad de la Comisión Internacional del Metro, el Gobierno francés convocó a la Conferencia Diplomática del Metro, que se realizó el 1 de marzo de 1875. Ella estableció la Convención del Metro mediante un acuerdo firmado el 20 de mayo de 1875 en París por los representantes de diecisiete países: Alemania, Confederación Argentina, Imperio Austro-Húngaro, Bélgica, Brasil, Dinamarca, España, Francia, Italia, Perú, Portugal, Rusia, Suecia y Noruega, Confederación Suiza, Turquía, Estados Unidos y Venezuela. En representación del presidente de la Confederación Argentina, Nicolás Avellaneda, lo firmó Mariano Balcarce, enviado extraordinario y ministro plenipotenciario en París. Balcarce era yerno del general San Martín.

La Convención estableció tres organizaciones intergubernamentales con el siguiente orden jerárquico: la Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM), que sería una reunión de carácter diplomático; el Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM), que tendría responsabilidades científicas y tecnológicas, y la Oficina Internacional de Pesas y Medidas (BIPM, por sus siglas en francés), instalada en el Pabellón de Breteuil, dentro del parque nacional de Saint-Cloud, Sèvres, en las afueras de París, que desarrollaría las actividades experimentales de la metrología fundamental de las magnitudes de longitud y de masa.

La Convención ordenó que las restantes barras en X, una vez contrastadas con el Prototipo, fueran distribuidas entre las naciones signatarias que las requirieran para ser utilizadas como Metros Patrones Nacionales. Los Estados Unidos de América recibieron la barra N° 27, con una longitud calibrada de $0,999\,998\,4\text{ m} \pm 0,2\text{ }\mu\text{m}$ ($1,6\text{ }\mu\text{m}$ más corto que el Prototipo).

47. El que Argentina figurara entre los veinte países signatarios de la Convención del Metro en 1875 fue una consecuencia del mandato constitucional que establecía, en el inciso 10 del artículo 67 de la Constitución Nacional, que correspondía al Congreso “...adoptar un sistema uniforme de pesos y medidas para toda la Nación”. Dicho mandato fue cumplido desde los comienzos mismos de la vida organizada constitucionalmente de Argentina. Así, la ley N° 52 de 1863 adoptó el sistema uniforme de pesos y medidas métrico decimal con sus denominaciones técnicas y los prefijos para sus múltiplos y submúltiplos, mientras que la ley N° 845 de 1877 hizo de uso obligatorio el sistema métrico decimal de pesos y medidas, en tanto que prohibía el uso de pesos y medidas de otros sistemas.

48. A pesar de que Inglaterra no fue signataria de la Convención del Metro, la British Association for the Advancement of Science inició los trabajos para definir las unidades de electricidad empleando un grupo de tres unidades absolutas conocido como “QES System”. La Q se refería a la unidad de longitud surgida del cuadrante de la circunferencia polar de la Tierra, según la medición de Méchain y Delambre. La unidad de masa se denominó “eleventh-gram” definida como 10^{-11} gramos y la unidad de tiempo fue el segundo. Hacia fines del siglo XIX el hecho de que la unidad de longitud elegida tuviera una diferencia de 0,02% con respecto a su materialización no alcanzaba a tener un significado demasiado grave para las definiciones de las unidades eléctricas.

49. La I CGPM, reunida en 1889, declaró que el Prototipo del Metro “representará en adelante la unidad métrica de longitud cuando esté a la temperatura del hielo fundido”. Además, señaló que este metro de validez internacional se conservará en el BIPM y se denominará Metro Internacional.

A su vez, la VII CGPM, reunida en 1927, precisó el enunciado de 1889 según los términos siguientes: “La unidad de longitud es el metro, definido por la distancia a 0 °C entre los ejes de los dos trazos medios grabados sobre la barra de platino iridiado depositada en el BIPM, y declarada Prototipo del Metro por la I CGPM, cuando está sometida a la presión atmosférica normal y sostenida por dos cilindros de por lo menos un centímetro de diámetro situados simétricamente en un mismo plano horizontal y a una distancia de 571 mm uno del otro”. La ubicación de los cilindros se corresponden con los “puntos de Airy”, que deben estar separados en 5/9 de la longitud total de la barra para minimizar el efecto del pandeo por efecto gravitatorio para que la barra quede plana.

Lo más trascendente de los dos enunciados relativos a la definición del metro es que ya no invocan que la distancia materializada en las barras de platino iridiado guardaba relación con la longitud que se había obtenido de la medida en el meridiano de París.

50. Finalmente, desde 1921 y hasta 1936 se realizaron las comparaciones de los patrones nacionales del metro con el Metro Internacional, como lo había solicitado en 1867 la Conferencia Internacional de Geodesia. Los informes que se confeccionaron indicaron que los metros se habían preservado dentro de $\pm 0,2 \mu\text{m}$, que fue la tolerancia original. Estas comparaciones internacionales nunca más se repitieron.

5. DEL RIESGO DE PERDERLO TODO A LA DEFINICIÓN INMATERIAL DEL METRO Y EL COMIENZO DEL SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES (1960)

51. El riesgo de ver destruidas las barras del metro por los efectos de los bombardeos que sufrió París durante el asedio prusiano (1870-72) y, por consiguiente, la pérdida de la materialización del metro patrón aceleró los trabajos para lograr una forma de definición inmaterial. Los fundamentos de esta nueva forma de definir la unidad de longitud se remontan a 1827, cuando Jacques Babinet (1794-1872) clamaba por una definición con validez universal obtenida a partir de la luz emitida por los átomos excitados, que fue seguida por Maxwell, en 1859, quien propuso la luz amarilla emitida por el sodio, lo que fue desestimado por Armand Hippolyte Fizeau (1819-1896), quien en 1860 demostró experimentalmente que dicha emisión tenía dos componentes muy cercanas: $\lambda_1=589,0 \text{ nm}$ y $\lambda_2=589,6 \text{ nm}$. La XI CGPM, reunida en octubre de 1960, aprobó la definición basada en la longitud de onda de la radiación luminosa anaranjada emitida cuando se produce la transición entre los niveles de energía del átomo excitado de criptón 86, designados, según la convención espectroscópica introducida por Friedrich Paschen (1865-1947), como $2p_{10}$ y $5d_5$. Según esta definición, el metro es igual a 1 650 763,73 veces la longitud de onda anaranjada del criptón 86. En la figura 15 se ilustran los resultados de las investigaciones que llevaron a concluir que la mejor elección, hacia 1960, era, sin lugar a dudas, la radiación anaranjada del criptón 86 para emplear en la definición inmaterial del metro.

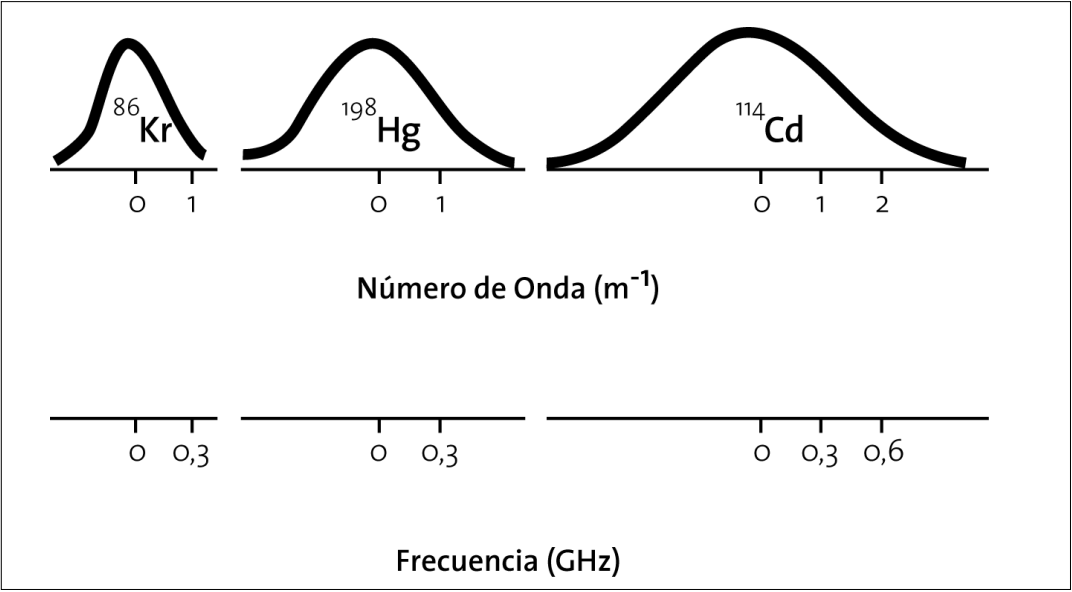


Fig. 15. La ilustración de los ensanchamientos de las líneas espectrales propuestas justifican la elección del ^{86}Kr .

La lámpara empleada para obtener esta radiación según las normas establecidas se muestra en la figura 16. La lámpara se introduce en un criostato y se la sumerge en un baño de nitrógeno líquido. El criostato es un vaso Dewar modificado en el que se hace un vacío parcial de modo que el baño refrigerante alcance la temperatura del punto triple del nitrógeno, es decir, aquella en la que coexisten los tres estados —gas, líquido y sólido— del nitrógeno ($-210\text{ }^{\circ}\text{C}$).



Fig. 16. La lámpara de ^{86}Kr .

Así, recién en 1960 —es decir, 133 años después de la propuesta de Babinet— se adoptó una forma de definición del metro de carácter inmaterial, abandonando definitivamente las barras de platino iridiado. No obstante ello, la misma sanción de la nueva definición del metro contiene una recomendación expresa sobre la custodia permanente y el control periódico del Metro Internacional depositado en el Pabellón de Breteuil del BIPM.

52. Pero la XI CGPM dio sanción, además, al Sistema Internacional de Unidades basado en las seis magnitudes físicas introducidas con anterioridad. Ellas son la longitud, la masa, el tiempo, la intensidad de corriente eléctrica, la temperatura termodinámica y la intensidad luminosa. Todas las demás magnitudes físicas —como la superficie, la densidad, el campo eléctrico, la cantidad de calor, el flujo luminoso y la radioactividad— deberán expresarse en función de las anteriores. Las correspondientes unidades de medida fueron designadas como unidades de base y unidades derivadas, respectivamente. También se introdujeron dos magnitudes geométricas: el ángulo plano y el ángulo sólido, cuyas unidades —el radián y el estereorradián o esterradián— fueron denominadas unidades suplementarias del Sistema Internacional. Se convino, asimismo, que en todos los idiomas se abreviara la mención del Sistema Internacional de Unidades con el empleo de la sigla SI. Resultaba evidente, tanto entonces y más aún hoy en día, que toda la estructura del SI estaba ligada íntimamente a la descripción de fenómenos físicos y, por lo tanto, tal como lo había confirmado la historia de la metrología, el avance de la ciencia haría que cualquier sistema de unidades no tuviera validez eterna. Así ocurrió con el SI. Luego de minuciosos estudios y largos análisis iniciados hacia fines del siglo XIX, la XIV CGPM, reunida en 1971, introdujo la cantidad de materia como la séptima magnitud del SI y su correspondiente unidad de base, el mol.

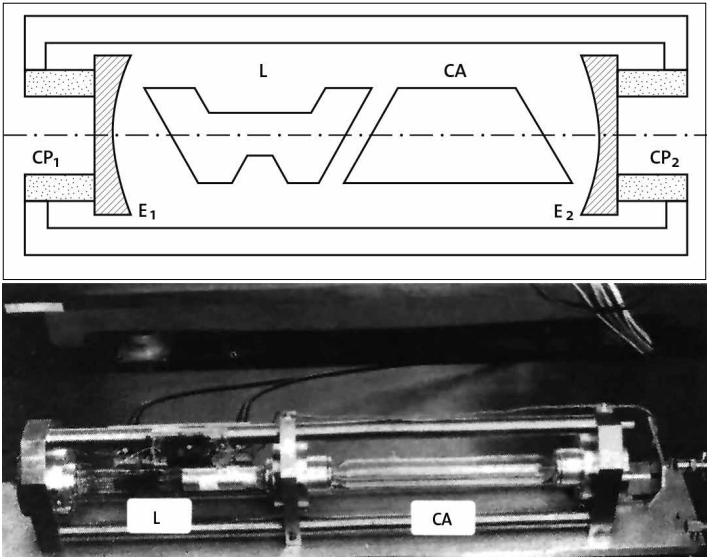
De todos modos, la misma evolución de los conocimientos científicos que antes había inducido los cambios en las definiciones sucesivas de la unidad de longitud y su modo de materializarla produjo, con el advenimiento del láser —cuya demostración práctica ocurrió cinco meses antes de las sesiones de la XI CGPM—, un fuerte movimiento tendiente a revisar la definición del metro basada en la radiación anaranjada del criptón 86.

53. En efecto, en 1962 el Comité Consultativo para la Definición del Metro (uno de los órganos de la Conferencia General de Pesas y Medidas) invitó al ya por entonces famoso espectroscopista interferencial francés Pierre Connes a debatir sobre las posibilidades futuras de utilizar el láser como fuente de luz en metrología. Durante su exposición, Connes reconoció la importancia que desempeñaría en metrología la gran coherencia de la radiación del láser, aunque puntualizó la seria dificultad que seguramente se presentaría debido a la falta de estabilidad del valor de la longitud de onda emitida. Previó que dicha estabilidad debería otorgársela al láser algún otro dispositivo natural, el cual sería en definitiva el patrón de longitudes. Al término de su exposición, Connes vaticinó que la interconexión que el láser permitiría establecer entre las mediciones de longitud y las mediciones de frecuencia sería muy fructífera. Los resultados de las investigaciones le dieron la razón. En efecto, ningún dispositivo mecánico o electrónico llegó a estabilizar el valor de la longitud de onda emitida por los láseres gaseosos —los más estables de entre los diferentes tipos existentes— en un grado tal que pudiera considerárseles como serios competidores de la lámpara de criptón 86. Si bien era cierto que en lapsos muy cortos (no más de unos pocos segundos) la exactitud de las mediciones de longitud de onda de algunos láseres gaseosos resultaba ser hasta diez mil veces mejor que la obtenida con la lámpara de criptón 86, no podía afirmarse lo mismo para períodos largos, apropiados para los trabajos metrológicos y menos aún para una eventual definición del metro patrón.

6. DE LA PRIMERA A LA SEGUNDA DEFINICIÓN INMATERIAL DEL METRO Y LA CONSTANCIA DE LA VELOCIDAD DE LA LUZ

54. Fue necesario esperar hasta 1969, cuando comenzaron a dar frutos los trabajos sobre la interacción de la radiación láser de He-Ne emitida en $\lambda=3,39\text{ }\mu\text{m}$ y una línea de absorción de la molécula de metano, CH_4 , en la cercanía de dicha longitud de onda, para verificar la sugerencia de Connes según la cual una nueva definición del metro patrón estaría basada en el empleo de radiación láser, pero controlada por un fenómeno natural. En el dispositivo desarrollado por Robert L. Barger y John L. Hall, la radiación de frecuencia ν_L emitida por el láser de He-Ne correspondiente a la longitud de onda $\lambda=3,39\text{ }\mu\text{m}$ interactúa con la transición P(7) de la banda vibro-rotacional ν_3 del CH_4 . En la figura 17 se muestra el esquema del experimento con el tubo del láser de He-Ne y la celda de absorción de CH_4 , junto a una fotografía del dispositivo usado.

Fig. 17. El láser de He-Ne (L) y la celda de absorción (CA) de CH_4 .



Al propagarse en un sentido, la radiación de frecuencia ν'_L emitida por el láser puede ser absorbida por aquellas moléculas animadas por una cierta componente de velocidad a lo largo del eje de la cavidad óptica formada por los espejos, de modo que, por el efecto Doppler-Fizeau, aparentan tener una frecuencia de absorción ν''_a . Como la radiación del láser se propaga en ambos sentidos dentro de la cavidad, cuando la radiación de ν'_L retorne luego de reflejarse en uno de los espejos será absorbida por aquellas otras moléculas animadas por una cierta componente de velocidad a lo largo del eje opuesta al caso anterior y que aparentan tener una frecuencia de absorción ν''_a . Luego, la potencia del haz del láser a la frecuencia ν'_L es absorbida por dos clases de moléculas que poseen componentes opuestas de velocidades, como se muestra en la

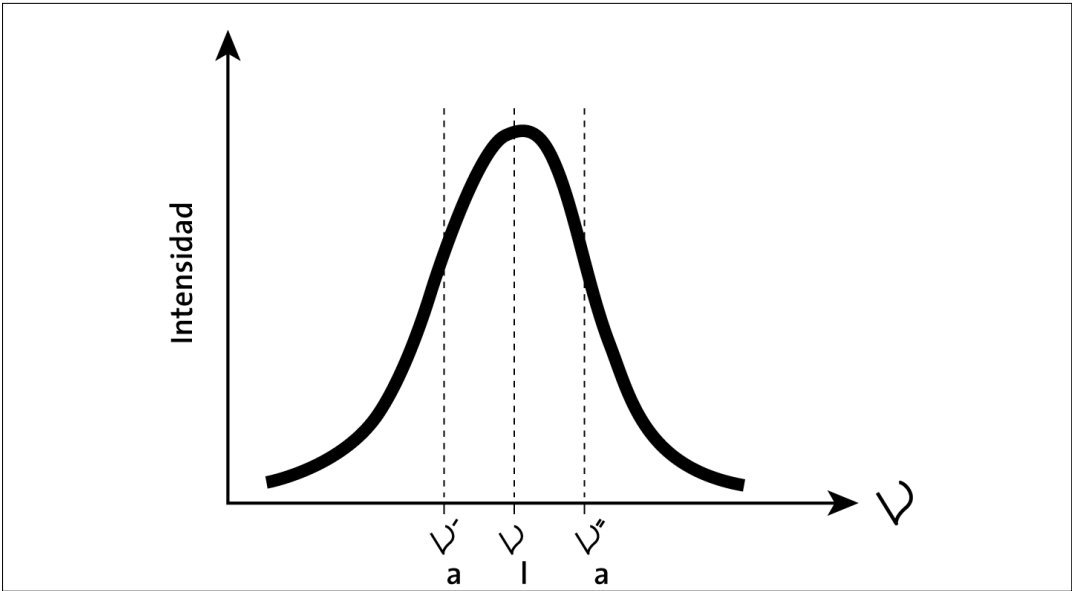


Fig. 18. Emisión del láser y banda de absorción.

figura 18. En el caso de que la radiación del láser sea absorbida por moléculas en reposo o por aquellas animadas de movimientos transversales a la dirección de propagación de la luz, resultará que $\nu'_a = \nu''_a = \nu_l$, con lo que la potencia del láser en la frecuencia ν_l dentro de la cavidad será más fuertemente absorbida que en las otras frecuencias ν'_l , debido a que el máximo de absorción ocurre en ν_l . Si la potencia del láser se incrementa, se alcanzará un valor a partir del cual la absorción de radiación se saturará; esto es, las moléculas ya no podrán absorber más radiación. Este fenómeno de absorción saturada ocurrirá primero en la frecuencia ν_l . En tales condiciones un incremento de la potencia del láser se traducirá en una aparente disminución de la absorción de la frecuencia ν_l , mientras que a las demás frecuencias laterales todavía seguirá produciéndose absorción. Si se continúa el proceso hasta que sea absorbida toda la radiación correspondiente a las frecuencias laterales, se observará la aparición de un estrechísimo pico en la emisión del láser a la frecuencia ν_l denominado “depresión inversa de Lamb”, en homenaje a Willis Eugene Lamb (Jr.), quien explicó dicho efecto. Mediante pequeñísimos y delicados movimientos del espejo E_1 comandado electrónicamente por el montaje de cerámica piezoeléctrica CP_1 se varía la longitud de la cavidad resonante óptica y con ello se lleva a sintonizar la frecuencia de emisión del láser con la línea de absorción del CH_4 . Una vez que se ha establecido la sintonía entre la cavidad y la línea espectral de absorción elegida y se ha producido el efecto de absorción saturada en ella, parte de la potencia de emisión del láser de He-Ne se canaliza a través de la frecuencia del pico de absorción saturada de Lamb del CH_4 , a pesar de que apenas sobresalga menos del 1% sobre el resto (Figura 19).

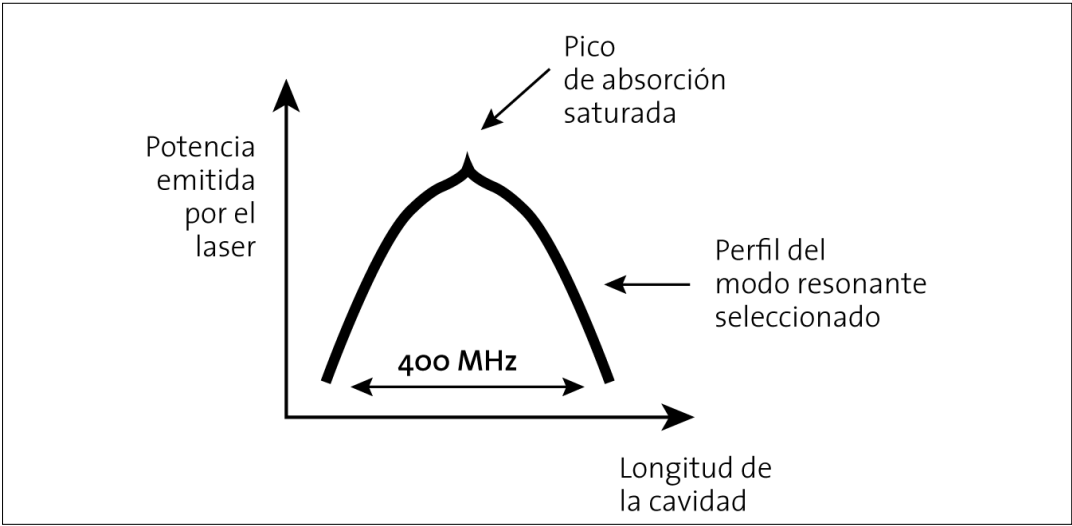


Fig. 19. El pico de la depresión invertida de Lamb o de la absorción saturada tiene un ancho de 100 kHz si la celda está a temperatura ambiente, pero, refrigerada a la temperatura de nitrógeno líquido, se reduce a 6 kHz.

El otro montaje piezoeléctrico, CP_2 , sirve para controlar la posición angular del restante espejo de la cavidad, el E_2 , a través de un circuito electrónico de retroalimentación para compensar cualquier variación en la potencia emitida por el dispositivo.

En el caso de un láser de He-Ne de 30 cm de longitud de cavidad que opera a temperatura ambiente, su ancho de banda es de unos 400 MHz. Al introducir la celda de absorción de metano también a temperatura ambiente el ancho del pico de la depresión invertida de Lamb es de solo 100 kHz, mientras que si

la celda se refrigera a la temperatura de nitrógeno líquido, el ancho de dicho pico se reduce a 6 kHz. Estas cifras permiten verificar que la radiación emitida por el láser del ejemplo no es mejor que la emitida por la lámpara de criptón 86. Sin embargo, la acción del proceso de absorción saturada del CH₄ permite “pulir” la emisión del láser hasta obtener una radiación de una pureza espectral que resulta ser cincuenta mil veces mejor que la emitida por la lámpara.

No obstante, el perfeccionamiento del sistema láser-celda de absorción con la introducción de celdas de metano a muy baja presión, la expansión del haz del láser dentro de la cavidad óptica hasta diámetros de unos 15 cm y el empleo de montajes antivibratorios y circuitos electrónicos de control permitió, hacia 1980, estabilizar la emisión del láser de He-Ne de modo que la frecuencia de la radiación no varió en más de 10 Hz, lo que corresponde a una calidad de algo más de una parte en diez billones $[(\Delta\nu/\nu) = (10 \text{ Hz}/88,4 \times 10^{12} \text{ Hz}) \approx (1,1 \times 10^{-13})]$.

55. Además, se han construido láseres estabilizados independientemente unos de otros, cuyas frecuencias de emisión discrepan en menos de 1 KHz. El láser de He-Ne estabilizado con la celda de metano irradia en una frecuencia de 88,4 THz o del orden del centenar de terahertz. Ante tales frecuencias, no existían antes de 1965 detectores que pudieran seguir las variaciones de amplitud del campo electromagnético, como ocurría con las antenas en la región de las ondas de radio. Sin embargo, los proyectos iniciados en el Massachusetts Institute of Technology (MIT) y en la sede del NIST en Boulder, Colorado, ambos en Estados Unidos, permitieron obtener resultados positivos con el empleo de los clásicos diodos a “bigote”, como los usados en los primeros años de la era de las transmisiones radiales, en los que se empleaba la galena. Los nuevos diodos, también del tipo metal-aislante-metal, están constituidos por un delgado filamento de tungsteno de unos pocos micrómetros de diámetro cuyo extremo hace contacto con una placa pulida de níquel. La juntura así constituida presenta características eléctricas no lineales, como la de los diodos rectificadores. Sobre ella se enfocaron los haces de los láseres cuyas frecuencias se deseaban comparar y se comprobó que el dispositivo era capaz de resolver señales electromagnéticas separadas a solo tres cienbillonésimos de segundo ($3 \times 10^{-14} \text{ s}$). De este modo, fue posible construir cadenas de comparación entre las frecuencias de diversos láseres que emiten en el rango de 1 a 100 THz, batiendo sus armónicas generadas en el nuevo diodo a “bigote” y mezclándolas con señales generadas por circuitos electrónicos resonantes a válvulas klystron hasta alcanzar la región de operación del oscilador de cesio 133, con el que se materializaba en el SI la definición del segundo con una incertidumbre de una parte en cien billones (1×10^{-14}) en la frecuencia de 9,2 GHz.

Una de esas cadenas de comparación fue compuesta por un klystron ($\nu_1 = 74 \text{ GHz}$), un láser gaseoso de HCN de 8 metros de longitud ($\lambda_2 = 337 \text{ }\mu\text{m}$, $\nu_2 = 890 \text{ GHz}$), un láser de vapor de agua de 8 metros de longitud ($\lambda_3 = 28 \text{ }\mu\text{m}$, $\nu_3 = 10,72 \text{ THz}$), y un láser de CO₂ ($\lambda_4 = 9,3 \text{ }\mu\text{m}$, $\nu_4 = 32,13 \text{ THz}$, y $\lambda_5 = 10,2 \text{ }\mu\text{m}$, $\nu_5 = 29,44 \text{ THz}$) para unir el reloj de cesio 133 y el láser de He-Ne estabilizado con la celda de CH₄ de frecuencia ν_6 . De las mediciones realizadas con la instalación descrita se obtuvo el siguiente valor de la frecuencia de la línea de absorción del metano correspondiente a la componente F₂⁽²⁾ de la transición P(7) de la banda vibro-rotacional ν_3 :

$$\nu_6 = 88\,376\,181\,607 \text{ kHz},$$

con una incertidumbre estimada en doscientas partes por billón (2×10^{-10}).

Pero, además, el mismo láser de He-Ne estabilizado con la celda de metano resultó ser un sistema adecuado para la metrología fundamental de las longitudes, por cuanto ofrece una radiación en la región óptica del espectro mejor definida que la propia línea espectral anaranjada del criptón 86. Esto permitió trazar la otra cadena de comparación por la que la longitud de onda en el vacío de la emisión del láser de He-Ne estabilizado con la celda de metano fue medida interferométricamente contra el patrón primario del kripton 86, obteniéndose el valor:

$$\lambda_6 = 3,392\,231\,40 \text{ }\mu\text{m},$$

con una incertidumbre de cuatro partes en mil millones (4×10^{-9}), resultante exclusivamente por la incertidumbre del propio patrón primario de criptón 86.

56. A pesar de haber constituido un notable resultado el determinar por separado la frecuencia ν_6 y la longitud de onda en el vacío λ_6 de la línea de absorción del CH₄, sus mediciones independientes permitieron obtener por primera vez el mejor y más confiable valor de la velocidad de la luz en el vacío, planteando simplemente la operación matemática siguiente:

$$c = \lambda_6 \times \nu_6 = 299\,792\,458 \pm 1,5 \text{ m/s}.$$

Este valor de la velocidad de la luz está afectado por la misma incertidumbre que el valor de λ_{g} , es decir, aquella que proviene de la definición del patrón primario de longitudes de criptón 86.

Estos resultados hicieron posible reformular la histórica experiencia de Michelson y Morley (1880-7) para verificar la constancia de la velocidad de la luz empleando láseres estabilizados por absorción saturada. De este modo pudo determinarse la isotropía del espacio con una sensibilidad 4000 veces mayor que la obtenida con el interferómetro de Michelson; esto es, con una incertidumbre de cuatro partes en mil billones (4×10^{-15}).

57. Otras determinaciones, esta vez satelitales, permitieron garantizar que el valor de la velocidad de luz no depende de la frecuencia de la radiación. En efecto, las observaciones de las emisiones pulsadas de rayos X y de ondas de radio emitidas por algunos cuásares y detectadas desde satélites afirmaron el hecho de que sus velocidades de propagación a través del vacío del universo son iguales, ya que los instantes de arribo de sus señales diferían en menos de una parte en mil billones (1×10^{-15}). Todos estos elementos sirvieron de argumentos firmes para que la Asamblea General de la Unión Científica Internacional de Radio (URSI, por sus siglas en francés), reunida en Varsovia en 1972, recomendara que se acordara internacionalmente la adopción de un valor fijo e inamovible para la velocidad de la luz y se declarara a tal valor exacto por definición y, por lo tanto, libre de incertidumbres. La misma sugerencia preconizó la Unión Astronómica Internacional, a la vez que propuso que se adoptara el valor de $c = 299\,792,5 \text{ km/s}$, lo cual redundaría en grandes ventajas para los trabajos astronómicos y geodésicos. Finalmente, atendiendo a los espectaculares resultados obtenidos en la medición de la velocidad de la luz y a las sugerencias consideradas, la XV CGPM, reunida en 1975, resolvió definir su valor:

$$c = 299\,792\,458 \text{ m/s},$$

sin incertidumbre alguna.

58. Todos estos antecedentes motivaron varias propuestas para definir el metro, las que fueron tratadas por el Comité Consultativo para la Definición del Metro (CCDM) en 1979. El resultado de las discusiones fue elevado en consulta al Comité Consultativo para las Unidades, cuyos análisis condujeron a que el CCDM abriera un periodo de reflexión y consulta preparatoria de la reunión decisiva que realizaría hacia mediados de 1982. El CCDM realizó, en efecto, su séptima sesión de reuniones los días 3 y 4 de junio de 1982 y, a su término, produjo dos recomendaciones —técnicamente llamadas M1 (1982) y M2 (1982)— relacionadas con la redefinición del metro, la primera, y con la puesta en práctica de los métodos posibles para materializarla con propósitos metrológicos, la segunda. Ambas recomendaciones fueron aprobadas por la XVII CGPM en su reunión de octubre de 1983. El texto de la primera resolución sobre la redefinición del metro fue el siguiente:

Considerando:

- Que la definición actual no permite cumplimentar el metro lo suficientemente preciso para todos los requerimientos;
- Que los progresos realizados en la estabilización de láseres permiten obtener radiaciones más reproducibles y más fáciles de utilizar que la radiación patrón emitida por una lámpara de criptón 86;
- Que los progresos realizados en la medición de las frecuencias y de las longitudes de onda de dichas radiaciones han llevado a resultados concordantes de la determinación de la velocidad de la luz cuya exactitud está limitada principalmente por la concreción del metro según su definición actual;
- Que los valores de las longitudes de onda determinados a partir de las medidas de frecuencia y de un valor dado de la velocidad de la luz tienen una precisión superior a aquellos que pueden ser obtenidos por comparación con la longitud de onda de la radiación patrón de criptón 86;
- Que existe una ventaja, notable para la astronomía y la geodesia, en mantener fijo el valor de la velocidad de la luz recomendada en 1975 por la XV CGPM en su Resolución 2: $c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$;
- Que una nueva definición del metro ha sido recomendada de varias formas, todas basadas en un valor exacto de la velocidad de la luz, igual al valor recomendado, y que ellas no introducen ninguna discontinuidad apreciable en la unidad de longitud, teniendo en cuenta la incertidumbre relativa de 4×10^{-9} de las mejores concreciones del metro según su definición actual;

- Que estas diversas formas, sea haciendo referencia al camino recorrido por la luz en un intervalo de tiempo especificado o a la longitud de onda de una radiación de frecuencia medida o especificada, han sido objeto de consultas y discusiones en profundidad, que han sido reconocidas como equivalentes y que un consenso ha emergido en favor del primer tipo;
- Que el CCDM está desde ahora en condiciones de dar instrucciones para la puesta en práctica de tal definición, instrucciones que podrán incluir el empleo de la radiación anaranjada del criptón 86 utilizada hasta ahora como patrón, las que podrán ser completadas o revisadas en lo sucesivo;

Decide:

1. El metro es la longitud del camino recorrido por la luz en el vacío durante el intervalo de tiempo de $1/299\,792\,458$ de segundo.
2. La definición del metro en vigencia desde 1960, basada en la transición entre los niveles $2p_{10}$ y $5d_5$ del átomo de criptón 86, es abrogada.

A su vez, el texto de la segunda resolución sobre la puesta en práctica de la nueva definición del metro fue:

La XVII Conferencia General de Pesas y Medidas

Invita al Comité Internacional de Pesas y Medidas

- a establecer las instrucciones para la puesta en práctica de la nueva definición de metro;
- a seleccionar las radiaciones que pudieran ser recomendadas como patrones de longitud de onda para la medida interferencial de longitudes y establecer las instrucciones para su empleo;
- a proseguir los estudios realizados para mejorar estos patrones.

59. Asimismo, el CCDM, cumpliendo la invitación de la XVII CGPM, aprobó la siguiente recomendación:

Que el metro sea cumplimentado por uno de los métodos siguientes:

- a. por medio de la longitud l del camino recorrido en el vacío por una onda electromagnética plana en el tiempo t y utilizando la relación $l = ct$, y el valor de la velocidad de la luz en el vacío $c = 299\,792\,458$ m/s.
- b. por medio de la longitud de onda en el vacío λ de una onda electromagnética plana de frecuencia ν ; siendo esta longitud de onda obtenida a partir de la medida de la frecuencia ν , utilizando la relación $\lambda = c/\nu$, y el valor de la velocidad de la luz en el vacío $c = 299\,792\,458$ m/s.
- c. por medio de una de las radiaciones de la lista adjunta, cuyas longitudes de onda en el vacío o cuyas frecuencias podrán ser utilizadas con la incertidumbre indicada, siempre que se observen las condiciones especificadas y el modo de operación reconocido como apropiado, y que en todos los casos sean efectuadas las correcciones necesarias para tener en cuenta las condiciones reales, como difracción, gravitación o imperfecciones del vacío.

La lista a la que hace referencia el inciso c. contiene radiaciones emitidas por láseres diferentes estabilizados por absorción saturada por moléculas de metano, CH_4 , o de yodo, $^{127}\text{I}_2$, y por radiaciones emitidas por lámparas espectrales.

Las frecuencias ν —expresadas en kHz o MHz— y las longitudes de onda λ —expresadas en fm— de las radiaciones de láseres estabilizados y de las lámparas, son las siguientes:

1. Molécula absorbente CH_4 , banda ν_3 , transición $P(7)$, componente $F_2^{(2)}$:

$\nu = 88\,376\,181\,608$ kHz

$\lambda = 3\,392\,231\,397,0$ fm

Incertidumbre: $(\Delta\nu/\nu) = (\Delta\lambda/\lambda) = 1,3 \times 10^{-10}$.

2. Molécula absorbente $^{127}\text{I}_2$, transición 17-1, Banda P(62), componente σ :

$\nu = 520\,206\,808,51\text{ MHz}$

$\lambda = 576\,294\,760,27\text{ fm}$

Incertidumbre: $(\Delta\nu/\nu) = (\Delta\lambda/\lambda) = 6 \times 10^{-10}$.

3. Molécula absorbente $^{127}\text{I}_2$, transición 11-5, banda R(127), componente i :

$\nu = 473\,612\,214,8\text{ MHz}$

$\lambda = 632\,991\,398,1\text{ fm}$

Incertidumbre: $(\Delta\nu/\nu) = (\Delta\lambda/\lambda) = 1 \times 10^{-9}$.

4. Molécula absorbente $^{127}\text{I}_2$, transición 9-2, banda R(47), componente σ :

$\nu = 489\,880\,355,1\text{ MHz}$

$\lambda = 611\,970\,769,8\text{ fm}$

Incertidumbre: $(\Delta\nu/\nu) = (\Delta\lambda/\lambda) = 1,1 \times 10^{-9}$.

5. Molécula absorbente $^{127}\text{I}_2$, transición 43-0, banda P(13), componente a_3

(denominada a veces componente s):

$\nu = 582\,490\,603,6\text{ MHz}$

$\lambda = 514\,673\,466,2\text{ fm}$

Incertidumbre: $(\Delta\nu/\nu) = (\Delta\lambda/\lambda) = 1,3 \times 10^{-9}$.

6. Lámpara de ^{86}Kr :

$\lambda = 605\,780\,210,2\text{ fm}$

Incertidumbre: $(\Delta\lambda/\lambda) = 4 \times 10^{-9}$.

7. Otras radiaciones recomendadas expresamente en 1963 por el CIPM y que son emitidas por los átomos de ^{86}Kr , ^{198}Hg y ^{114}Cd .

60. Recordando la invitación que la XVII CGPM le hiciera al CIPM en cuanto a proseguir los estudios realizados para mejorar los patrones que permitieron materializar la definición del metro en 1983 y a introducir otros, el CIPM, en su reunión del 2002, incorporó nuevas condiciones que debían tenerse en cuenta para que el metro fuera considerado propiamente la unidad de longitud. Esta vez lo hizo en el contexto de la relatividad general, en el que la definición del metro basada en la constancia de la velocidad de la luz en el vacío se aplica a una extensión espacial suficientemente pequeña como para que puedan ignorarse los efectos de la falta de uniformidad del campo gravitacional, los que en el caso de la Tierra alcanzan en la dirección vertical alrededor de 1 parte en 10^{16} por metro. En este caso, los efectos a tener en cuenta corres-

ponden a la relatividad especial solamente. El Comité Consultativo para Tiempo y Frecuencia constituyó un Grupo de Trabajo sobre la Aplicación de la Relatividad General a la Metrología.

61. Asimismo, dado que la ciencia y la tecnología continúan requiriendo que se mejoren las realizaciones prácticas de la definición del metro, se reduzcan sus incertidumbres y se amplíe el ámbito de sus aplicaciones para cubrir no solo la metrología dimensional de las longitudes, sino también la espectroscopía de alta resolución, la física atómica y molecular, las constantes fundamentales y las telecomunicaciones, constantemente aumentan los trabajos en los institutos nacionales de metrología, en el BIPM y en otros laboratorios, sobre fuentes de radiación en las frecuencias ópticas, las radiaciones emitidas por átomos e iones denominados “fríos”, esto es, por átomos (como el de Ca) e iones (como el de Hg⁺) aislados y en reposo, inmovilizados por la acción de haces de láseres que actúan según los tres ejes coordinados del sistema de referencia, por la emisión de celdas gaseosas, que incluyen longitudes de onda de la región de las comunicaciones ópticas. Cabe mencionar también la aparición de las nuevas técnicas de producción de “peines de Dirac ópticos”, o secuencias de pulsos emitidos por sistemas láser a frecuencias de 10¹⁵ Hz y con elevadísima estabilidad, que pueden convertirse en patrones de frecuencia para una diferente realización de la unidad de tiempo, el segundo, dentro del SI.

7. HACIA EL NUEVO FORMATO DEL SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES Y SUS DESAFÍOS

62. Puede decirse que el Sistema Métrico Decimal fue un sistema newtoniano de unidades, puesto que parecía una aplicación de la Segunda Ley de la Dinámica de Newton:

$$F = ma = m(dv/dt) = m(d^2x/dt^2),$$

a partir de la cual surgía un sistema coherente de unidades, apropiado para la época, basado en una unidad de longitud, el metro; una unidad de masa, el kilogramo; y una unidad de tiempo, el segundo.

El Sistema Internacional de Unidades de 1960, con sus seis unidades de base originales y con el agregado del mol en 1971, está compuesto actualmente por el metro, el segundo y la candela, cuyas definiciones dependen de constantes fundamentales o constantes atómicas; el kelvin y el mol, definidos a partir de las propiedades de sustancias; el kilogramo, cuya validez metrológica depende de un artefacto, y el ampere, que está basado en una definición académica.

Se consideró que esta situación era inapropiada para la estabilidad a largo plazo del propio SI. Por ello, la XXI CGPM, reunida en 1999, analizó la intrínseca incertidumbre del kilogramo de 4×10^{-9} , y consideró cómo ella afecta su propia estabilidad a largo plazo, así como también la de otras tres unidades de base del SI que dependen del kilogramo: el ampere, el mol y la candela.

De modo que, atento a los resultados ya obtenidos en diferentes experimentos diseñados para relacionar la unidad de masa con constantes fundamentales o constantes atómicas y considerando que lo deseable sería tener más de un método para realizar experimentalmente tal relación, recomendó a todos los laboratorios nacionales que refinaran sus experimentos en vista de una futura redefinición del kilogramo.

63. Siguiendo en esa misma dirección, la XXIII CGPM, reunida en 2007, solicitó el relevamiento de todos los experimentos que proveían datos sobre *valores fijos* de las constantes fundamentales de la naturaleza. El *valor fijo* de una constante fundamental se puede ejemplificar con la velocidad de la luz, cuyo valor fue definido en 1975 por la XV CGPM como $c = 299\,792\,458$ m/s, sin incertidumbre alguna. Es decir que los nueve dígitos que definen su valor se mantendrán fijos, de modo que, cuando los métodos experimentales permitan agregar algún décimo dígito al actual *valor fijo* de c, seguramente estará afectado de la incertidumbre atribuible a la metodología empleada.

Además, la XXIII CGPM solicitó desarrollar procedimientos experimentales seguros para la realización práctica de las nuevas unidades de base del SI que estuvieran relacionadas con constantes fundamentales de la naturaleza.

La XXIII CGPM cerró su actividad con un llamado a iniciar una campaña de difusión de los conocimientos necesarios para introducir en las sociedades de los países miembros el nuevo formato del SI basado en las constantes fundamentales de la naturaleza.

El progreso de los trabajos destinados a introducir el nuevo formato del SI lo estableció en 2010 el CIPM al elevar la nómina de las siete magnitudes que lo integrarían, de las constantes fundamentales de la naturaleza que las representarían y sus definiciones, para ser tratadas por la XXIV CGPM, reunida en 2011.

La XXIV CGPM formalmente adoptó la propuesta del CIPM, de modo que las siete nuevas magnitudes que tendrá el SI serán: frecuencia, velocidad, acción, carga eléctrica, capacidad calórica, cantidad de sustancia e intensidad luminosa. Teniendo en cuenta que tres de ellas ya están incorporadas al actual SI a través del metro, el segundo y la candela, invitó a los restantes comités consultativos a que completaran la puesta en práctica adecuada de las constantes que representan las magnitudes faltantes: la constante de Planck h , la carga elemental e , la constante de Boltzmann k y la constante de Avogadro N_A .

64. Luego, en octubre de este año 2015, cuando se reúna la XXV CGPM, podremos tener el anuncio de la consagración del nuevo formato del SI, o bien deberemos esperar otros cuatro años más hasta la reunión de la XXVI CGPM. En principio, el nuevo SI tendría el formato que se describe a continuación, según las magnitudes, las constantes fundamentales que las representan, sus definiciones y sus valores, que en solo tres casos son fijos y los otros están a la espera de serlo, por lo que el símbolo X en sus valores numéricos indica que se requieren dígitos adicionales para poder entrar en la redefinición del SI.

Frecuencia: $\Delta\nu(^{133}\text{Cs})_{\text{hfs}}$

La frecuencia del desdoblamiento hiperfino del estado fundamental sin perturbar del átomo de cesio 133 $\Delta\nu(^{133}\text{Cs})_{\text{hfs}}$ es igual a 9 192 631 770 hertz exactamente.

Velocidad: c

La velocidad de la luz en el vacío c es exactamente 299 792 458 metro por segundo.

Acción: h

La constante h de Planck es exactamente $6,626\text{X} \times 10^{-34}$ joule segundo.

Carga eléctrica: e

La carga elemental e es exactamente $1,602\text{X} \times 10^{-19}$ coulomb.

Capacidad calórica: k

La constante k de Boltzmann es exactamente $1,380\text{X} \times 10^{-23}$ joule por kelvin.

Cantidad de sustancia: N_A

La constante de Avogadro N_A es exactamente $6,022\text{X} \times 10^{23}$ mol⁻¹.

Intensidad luminosa: K_{cd}

La eficacia luminosa K_{cd} de la radiación monocromática de frecuencia 540×10^{12} hertz es exactamente 683 lumen por watt.

65. En 2007 la XXIII CGPM realizó un llamado a iniciar una campaña de difusión de los conocimientos necesarios para introducir en las sociedades de los países miembros el nuevo formato del SI basado en las constantes fundamentales de la naturaleza. Argentina es miembro desde la firma de la Convención del Metro, el 20 de mayo de 1875. Para recordar ese día de la firma, el 20 de mayo fue declarado el Día Mundial de la Metrología. Quizás en este 2015, en el que se cumplen los 140 años de la firma de Mariano Balcarce, deberíamos comprometernos en los ámbitos académicos a afrontar el desafío planteado por la XXIII CGPM en 2007 y participar en la campaña de difusión de los conocimientos necesarios para introducir en nuestra sociedad el nuevo formato del SI basado en las constantes fundamentales de la naturaleza, haciéndolo con la delicadeza de los maestros y la sensatez de los que trabajan para el bien común.

66. Napoleón Bonaparte, cónsul de Francia, promulgó el Sistema Métrico Decimal el 10 de diciembre 1799. Para su recuerdo se acuñaron las medallas con el anverso y el reverso alegóricos que se muestran en la figura 20.

Fig. 20. Medalla conmemorativa del Sistema Métrico Decimal.



El marqués de Condorcet presentó el Sistema Métrico Decimal “Para todos los tiempos y todos los pueblos”, lo que seguirá dando futuro al Sistema Internacional de Unidades.

REFERENCIAS:

- Todas las actividades de la CGPM, del CIPM y del BIPM hasta 2006 se puede encontrar en el sitio <http://www.bipm.org/en/publications/si-brochure/>.
- Después de la publicación de la 8.ª edición de la *Brochure sur le SI* en 2006, la CGPM y el CIPM publicaron los siguientes documentos concernientes al SI:
 - CIPM 2006, Recommandation 1, Au sujet des représentations secondaires de la seconde (page 123).
 - CIPM 2007, Recommandation 1, Révision de la liste des radiations recommandées pour la mise en pratique de la définition du mètre (page 85).
 - XXIII CGPM 2007, Résolution 9, Sur la révision de la mise en pratique de la définition du mètre et sur la mise au point de nouveaux étalons optiques de fréquence (page 171).
 - XXIII CGPM 2007, Résolution 10, Sur la clarification de la définition du kelvin, unité de température thermodynamique (page 172).

- XXIII CGPM 2007, Résolution 12, Sur l'éventuelle redéfinition de certaines unités de base du Système international d'unités (SI) (page 174).
- CIPM 2009, Recommandation 2, Mise à jour de la liste des fréquences étalons (page 105).
- XXIV CGPM 2011, Résolution 1, Sur l'éventuelle révision à venir du Système international d'unités, le SI (page 212).
- XXIV CGPM 2011, Résolution 8, Sur la révision de la mise en pratique de la définition du mètre et sur la mise au point de nouveaux étalons optiques de fréquence (page 227).
- CIPM 2013, Recommandation 1, Mise à jour de la liste des fréquences étalons (page 53).
- Newell, David B. (2014). "A more fundamental International System of Units". *Physics Today* 67(7), 35. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1063/PT.3.2448>.

Mario Garavaglia es profesor emérito de la UNLP, investigador superior del CONICET y Fundador del Centro de Investigaciones Ópticas (CIOp), actualmente dependiente del CCT CONICET La Plata y de la CIC.