

LAS DEFINICIONES DE LAS UNIDADES DE MEDIDA EN SU NUEVA ETAPA

Rubén J. Lazos Martínez y José M. López Romero
Centro Nacional de Metrología
km 4.5 Carretera a Los Cués, El Marqués, Qro., México
Tels. (442)211 0575 y 211 0543; rlazos@cenam.mx y jlopez@cenam.mx

RESUMEN

Ha transcurrido cerca de medio siglo desde que empezó a integrarse el Sistema Internacional de Unidades. La incorporación de nuevas unidades, de sus definiciones, del cambio de ellas, motivado por el avance científico y tecnológico, ha sido posible únicamente después de laboriosas investigaciones y de múltiples debates efectuados en cada uno de los organismos que regulan la metrología científica; este sistema, por lo tanto, no es estático sino que se adapta para responder a las exigencias de un mundo cuyas necesidades en materia de mediciones crecen inexorablemente.

Medir es comparar. Se compara con unidades de medida cuyos valores son aceptados como la mejor aproximación disponible a unidades ideales, imperturbables, perenes, constantes en el tiempo y en el espacio. De esta manera, las unidades de medida son parte ineludible de los resultados de medición. En su estado actual, el Sistema Internacional de Unidades está formado por unidades de medida definidas en términos de fenómenos físicos -reproducibles- con excepción de la masa (por el momento). Este sistema distingue entre unidades de las magnitudes de base y de las magnitudes derivadas. Las primeras son independientes entre sí y sirven para expresar las últimas en términos de ellas. Las magnitudes de base (con sus unidades correspondientes) son: el tiempo (segundo), la longitud (metro), la masa (kilogramo), la corriente eléctrica (ampere), la temperatura termodinámica (kelvin), la intensidad luminosa (candela) y la cantidad de sustancia (mol).

La evolución de las definiciones de estas unidades ha estado motivada en general por la exigencia creciente de menores incertidumbres de medida para atender los avances tecnológicos y científicos. Actualmente los valores de las constantes fundamentales se expresan mediante las unidades del SI, acompañados, por supuesto, de los respectivos valores de la incertidumbre de medida, que en general tienen valores no nulos, con la

notable excepción de la velocidad de la luz en el vacío cuyo valor tiene incertidumbre exactamente igual a cero.

En la última década se aprecia una clara tendencia en el SI que consiste en definir las unidades de medida en términos de constantes fundamentales, asignando a éstas los mejores valores encontrados hasta el momento con incertidumbres nulas. La tesis de fondo, correcta hasta donde lo permiten las limitaciones del experimento, es que las llamadas constantes fundamentales realmente mantienen sus valores en el tiempo y el espacio.

1. INTRODUCCIÓN

En la frase *una misma medida para todos los hombres y para todos los tiempos* se resume el ideal que conduciría al desarrollo del Sistema Internacional de Unidades, SI [1]. El SI constituye un conjunto de unidades de medida aceptado por todas las economías, y con la intención de ser utilizado para todos los usos.

Cabe notar que el SI considera la conveniencia de contar con siete unidades de base, y las unidades derivadas necesarias cuyas definiciones se hacen a partir de las primeras.

En la literatura se encuentra información amplia sobre la historia de las unidades de medida, por lo que en este trabajo solamente se apunta que la Conferencia General de Pesas y Medidas es el órgano internacional derivado del Tratado del Metro, suscrito en 1875, en el que se toman las decisiones sobre las definiciones de las unidades de medida, con el apoyo técnico del Comité Internacional de Pesas y Medidas y sus comités consultivos por especialidad, quedando las operaciones necesarias a cargo de la Oficina Internacional de Pesas y Medidas [2].

Cabe subrayar que la implementación de una unidad de medida en un país requiere, en general, de tres fases:

- Reconocimiento de la definición de la unidad de medida, la cual es adoptada por acuerdo internacional.
- Realización de la unidad de medida, por el instituto nacional de metrología del país.
- Diseminación de la unidad de medida, a cargo tanto del instituto nacional de metrología del país como de los laboratorios de calibración.

2. EVOLUCIÓN DE LAS UNIDADES DE MEDIDA

A partir del siglo XIX, época donde se desarrolla la revolución industrial, la evolución de las unidades de medida ha estado dictada por la necesidad de mediciones con mayores exactitudes; así por ejemplo, las comunicaciones o las tolerancias dimensionales en la manufactura requeridas actualmente no podrían realizarse con las definiciones del segundo y el metro acordadas en el siglo XIX. De hecho las unidades de medida definidas originalmente no incluían la candela, el mol ni alguna magnitud eléctrica.

Cabe ilustrar la evolución de las unidades de medida con algunos ejemplos:

El segundo

La definición inicial del segundo como la fracción $1/86400$ del día solar medio fue precisada posteriormente en 1956 y ratificada en durante la 11ª. CGPM como que un segundo es la fracción $1/31\,556\,925.9747$ del año tropical de 1900 en Enero 0 a las 12 horas, tiempo efemérico.

La definición actual, que data de 1967, es:
Un segundo es la duración de $9\,192\,631\,770$ períodos de la radiación correspondiente a la transición entre los dos niveles hiperfinos del estado fundamental del átomo de cesio 133
(13ª CGPM 1967).

El metro

Como unidad de medida de longitud tiene sus antecedentes en las ideas discutidas en Francia en 1795 respecto a considerarlo como la *diezmillonésima parte de un cuadrante del meridiano terrestre*, en la cual es notable la referencia al tamaño del planeta, probablemente considerado como un “invariante”. Esta definición se realizó mediante un artefacto de platino depositado en los *Archives de la Republique* en 1799, cuya longitud fue contrastada contra la longitud del un segmento del meridiano que pasa por Dunkerke y Barcelona. Este artefacto dio lugar a la primera definición adoptada en el marco del Tratado del

Metro como que el *Prototipo del metro* a la temperatura de fusión del hielo representara al metro como unidad de longitud (1ª CGPM 1897). En 1927 la CGPM en su 7ª reunión expidió la siguiente definición:

La unidad de longitud es el metro, definido por la distancia a 0o, entre los ejes de las dos líneas centrales marcadas en la barra de platino-iridio bajo el resguardo de la Oficina Internacional de Pesas y Medidas y declarada Prototipo del metro por la 1ª. CGPM, estando la barra sujeta a la presión atmosférica estándar y soportada por dos cilindros de al menos un centímetro de diámetro, simétricamente colocados en el mismo plano horizontal y separados 571 mm uno del otro. Se estima que la incertidumbre de medida que podía alcanzarse al utilizar el Prototipo era de alrededor de 10 μm .

En 1960, la CGPM acordó una nueva definición del metro como $1\,650\,763,73$ veces la longitud de onda en el vacío de la radiación correspondiente a la transición entre los niveles $2p^{10}$ and $5d^5$ del átomo de krypton 86. Es sustancial el cambio para pasar de un artefacto único, singular, el Prototipo, a un fenómeno al alcance de cualquier laboratorio apropiadamente equipado. Se estima que la incertidumbre de medida que podría alcanzarse en la época es del orden de 10 nm, en consideración a la aplicación de métodos de medición interferométricos.

La definición vigente, aprobada en 1983, es que un metro es la *longitud de la trayectoria recorrida por la luz en el vacío durante un lapso de $1/299\,792\,458$ de segundo* (17ª CGPM de 1983). Las realizaciones de ésta se alcanzan con una incertidumbre relativa de medida del orden de $5E-11$, esto es aproximadamente 0.05 nm al medir un metro [3].

El kilogramo

La definición del kilogramo vigente es la misma tomada desde el primer acuerdo internacional: el kilogramo es la masa del Prototipo internacional del kilogramo
(1ª y 3ª CGPM 1889 y 1901) [4].

3. UNIDADES DE MEDIDA DE BASE ACTUALES

Además de las ya mencionadas en la sección anterior para el segundo, el metro y el kilogramo, el SI establece, para el caso de corriente eléctrica, que:

El ampere es la intensidad de una corriente constante que mantenida entre dos conductores paralelos, rectilíneos, de longitud infinita, de sección circular despreciable, colocados en el vacío separados 1 m uno del otro, produzca una fuerza de 2×10^{-7} N/m entre estos conductores (9a CGPM 1948) [4].

El kelvin es la fracción $1/273.16$ de la temperatura termodinámica del punto triple del agua (13a CGPM 1967) [4].

La candela es la intensidad luminosa en una dirección dada, de una fuente de radiación monocromática con frecuencia de 540×10^{12} Hz y cuya intensidad energética en esa dirección es de $1/683$ W/sr (16a CGPM 1979) [4].

El mol es la cantidad de sustancia de un sistema que contiene tantas entidades elementales como número de átomos existen en 0.012 kg de ^{12}C (14a CGPM) [4].

Cabe notar que:

- a. Salvo la definición del kilogramo que depende de un artefacto único, estas definiciones hacen referencia a sustancias o a fenómenos naturales reproducibles en cualquier laboratorio con los medios apropiados.
- b. la relación de la definición de algunas de las unidades en términos de otras, el metro depende del segundo, el mol depende de la unidad de masa, etc.
- c. También es evidente que esta definición del metro implica que la velocidad de la luz en el vacío es exactamente $299\,792\,458 \text{ m s}^{-1}$.

Es notable que la definición del ampere sea extremadamente difícil de realizar directamente, y de hecho muy pocos institutos nacionales de metrología lo hicieron, o han intentado hacerlo.

4. LAS NUEVAS DEFINICIONES PREVISTAS

4.1 La evolución en las definiciones de las unidades de medición del SI puede ser considerada como una aproximación sucesiva que conduce a unidades de medición invariantes en el tiempo y en el espacio con la característica, no trivial, de ser susceptibles de realización de manera apropiada en cualquier laboratorio del mundo que cuente con la infraestructura de medición suficiente. Dicha evolución ocurre como resultado del avance del conocimiento científico y tecnológico, y constituye a

la vez un paso muy importante para el desarrollo de la ciencia y la tecnología. En el estado actual de la ciencia y tecnología las constantes fundamentales se presentan como una alternativa muy atractiva para definir las unidades de medición del SI. Adicionalmente, en vista de que otros prototipos han mostrado variaciones tan altas como $4 \mu\text{g}$ por año o tan bajas como unos cuantos microgramos cada 20 años [5], es válida la suposición de que el Prototipo internacional del kilogramo haya sufrido una deriva importante a lo largo de sus 120 años de existencia. Cabe apuntar que las nuevas definiciones, como se proponen, no generan la necesidad de efectuar cambios en las especificaciones para las mediciones industriales o comerciales que se utilizan en la actualidad.

Por otro lado, con base en resultados de experimentos muy delicados, se puede dar por hecho que, dentro de la incertidumbre experimental, las constantes fundamentales son efectivamente invariantes en el tiempo y en el espacio [6].

Los mejores valores para las constantes fundamentales son recopiladas por CODATA – Committee on Data for Science and Technology–[7], algunos de los cuales se muestran en la Tabla 1.

| | Valor | u_r |
|------------------------------------------|--------------------------------------------------|----------------------|
| Velocidad de la luz en el vacío C_0 | $299\,792\,458 \text{ m s}^{-1}$ | 0 |
| Constante de Planck h | $6.626\,068\,96 \times 10^{-34} \text{ J s}$ | 5.0×10^{-8} |
| Carga elemental e | $1.602\,176\,487 \times 10^{-19} \text{ C}$ | 2.5×10^{-8} |
| Número de Avogadro N_A | $6.022\,141\,79 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ | 5.0×10^{-8} |
| Constante de Boltzmann k | $1.380\,6504 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$ | 1.7×10^{-6} |

Tabla 1. Valores de algunas constantes fundamentales según [7]. Con u_r se denota la incertidumbre estándar relativa de medida del valor mostrado.

De manera similar a la definición vigente del metro en la cual se asigna un valor exacto a la velocidad de la luz en el vacío, se estudian las posibilidades de adoptar nuevas definiciones de las unidades de

base en términos de valores de constantes fundamentales. Una posible ruta es la siguiente [8]:

El kilogramo, la unidad de masa, es tal que la constante de Planck es exactamente igual a $6.626\ 068\ 96 \times 10^{-34}$ J·s.

El ampere, unidad de corriente eléctrica, es tal que la carga elemental es exactamente igual a $1.602\ 176\ 487 \times 10^{-19}$ C.

El kelvin, unidad de temperatura termodinámica, es tal que la constante de Boltzmann es exactamente igual a $1.380\ 6504 \times 10^{-23}$ J K⁻¹.

El mol, unidad de cantidad de sustancia de una entidad específica, la cual puede ser un átomo, molécula, ión, electrón, u otra partícula, o un grupo específico de tales partículas, es tal que el Número de Avogadro es exactamente igual a $6.022\ 141\ 79 \times 10^{23}$ mol⁻¹.

Y además re-escribir las definiciones vigentes para el segundo, el metro y la candela como:

El segundo, la unidad de tiempo, es tal que la frecuencia de la transición entre los dos niveles hiperfinos del estado fundamental del átomo de cesio 133 $\Delta\nu(^{133}\text{Cs})_{\text{hfs}}$ es exactamente igual a 9 192 631 770 hertz.

El metro, la unidad de longitud, es tal que la velocidad de la luz en el vacío c_0 es exactamente igual a 299 792 458 metros por segundo.

La candela, unidad de intensidad luminosa, es tal que la eficacia luminosa K_{cd} de la radiación monocromática con frecuencia de 540×10^{12} hertz es exactamente igual a 683 lúmenes por watt.

Debe notarse que esta propuesta:

- Implica que la constante de Planck, la carga elemental, la constante de Boltzmann y el Número de Avogadro se adoptan con valores exactos, sin incertidumbre, cuyos mejores estimados se muestran en la Tabla 1.
- Implica que la masa del Prototipo internacional del kilogramo, la temperatura del punto triple del agua pura, y la cantidad de sustancia contenida en 0.012 kg de ¹²C, tengan que ser medidos con valores de incertidumbre no nulos.
- Prefiere la referencia a constantes fundamentales de la naturaleza sobre los fenómenos o sustancias a que se refieren cuatro de las siete definiciones vigentes en vista de la mayor trascendencia de dichas constantes

fundamentales, aún cuando todavía depende de un fenómeno que ocurre en una sustancia particular como es el cesio.

- Presenta ciertas circularidades en el sentido de que se hace un uso aparente de las unidades bajo definición en las propias definiciones. La definición propuesta para el kilogramo lo hace tal que h tome un valor fijo en unidades de J·s, sin embargo el joule, J, unidad de energía, equivale a $\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$.

Otra aproximación para definir las unidades de medida en términos de constantes fundamentales expuesta claramente en [9], tiene las siguientes peculiaridades:

- A diferencia de la anterior, muestra relaciones de las unidades de base a productos de constantes fundamentales, con lo cual el sistema de unidades resultante quedaría más claramente definido, en contraposición a la presencia de las aparentes circularidades de la propuesta anterior.
- Haría innecesaria la distinción entre unidades de base y unidades derivadas.
- La unidad de tiempo se define en términos de la constante de Rydberg, eliminando así la referencia específica al Cesio u otro átomo para su definición.

Los avances recientes en óptica cuántica y óptica no lineal, particularmente del desarrollo de los peines de frecuencia hacen vislumbrar la posibilidad de realizar el segundo a frecuencias ópticas, con lo cual se podrían alcanzar niveles de exactitud de partes en 10^{18} .

4.2 La nueva definición del kilogramo

La nueva definición del kilogramo ha requerido de esfuerzos de los más grandes institutos nacionales de metrología por varios años.

Uno de los experimentos más prometedores hasta el momento para redefinir el kilogramo en términos de constantes fundamentales es conocido como la *balanza del Watt*, ver por ejemplo [10].

En breve, este método usa la conservación de la energía, específicamente la relación de igualdad entre potencia eléctrica y potencia mecánica para definir al kilogramo. Dicho experimento requiere de una fase estática y una fase dinámica. En ambas fases se utiliza una balanza en uno de cuyos platillos se coloca la masa m .

En la fase estática, Figura 1, una corriente eléctrica constante I circula por una bobina la cual es

atravesada en su sección transversal por un flujo magnético B constante produciendo así una fuerza en la bobina que es balanceada por el peso mg de la masa, de acuerdo a la ecuación

$$I \cdot \int dl \times B = mg$$

donde dl está relacionado con la longitud del segmento de la bobina.

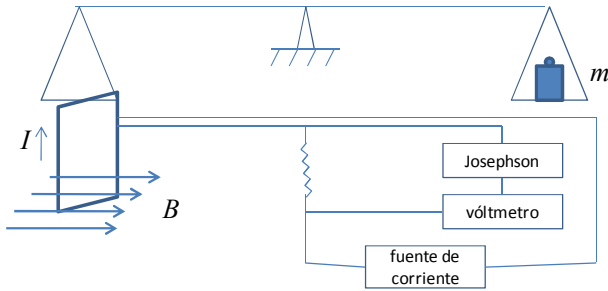


Figura 1. Fase estática del experimento con la balanza de Watt.

En la fase dinámica se mide la fuerza electromotriz inducida V_{ind} cuando se mueve la bobina respecto al campo magnético B con una velocidad v , por lo que se aplica la ecuación

$$V_{ind} = v \cdot \int dl \times B.$$

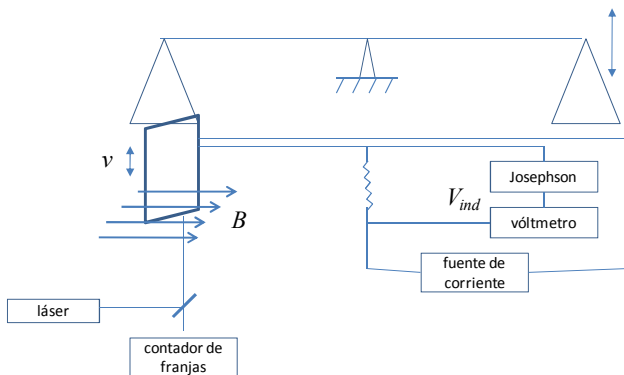


Figura 2. Fase dinámica del experimento con la balanza de Watt.

De modo que suponiendo que el valor de la integral es el mismo, la potencia mecánica iguala a la potencia eléctrica,

$$m \cdot g \cdot v = V_{ind} \cdot I.$$

La fuerza electromotriz y la corriente se miden con base en el efecto Josephson y el efecto Hall

cuántico, por los cuales se establecen las relaciones con la constante de Planck h y la carga del electrón e :

$$V_{ind} = C_J \cdot \frac{h}{2e} \cdot f$$

e

$$I = C_H \cdot \frac{h}{e^2},$$

en donde f es la frecuencia de la radiación utilizada en el efecto Josephson (típicamente en las región de las microondas) y C_J y C_H son constantes.

La velocidad de la bobina se mide con un reloj atómico y un interferómetro que utiliza un láser estabilizado en frecuencia, la cual es medida, a su vez, con relojes atómicos. El valor de g se determina simultáneamente con el experimento para lo cual se utilizan preferentemente experimentos de interferometría de ondas de materia.

Debido a que las mediciones involucradas en este experimento son de muy alta exactitud, éste es muy complejo y difícil de realizar. La eventual definición del kilogramo en términos de la balanza del watt requiere, como se ha mencionado, fijar el valor de la constante de Planck y asignarle incertidumbre cero.

5. CONCLUSIONES

La evolución de las definiciones de las unidades de medida está ligada estrechamente al avance de la ciencia. En la actualidad la Física gira alrededor de cantidades que, hasta donde la evidencia experimental permite distinguir, se pueden considerar como invariantes, y que por tanto son naturalmente aptas para servir como base a las definiciones de las unidades de medida, en tanto se desea que éstas tampoco presenten variaciones.

Se encuentra bajo consideración eventuales nuevas definiciones de las unidades de base del Sistema Internacional en términos de ciertas constantes fundamentales, bajo la consideración de que estas modificaciones no lleven consigo desarreglos para las mediciones que por millones se hacen actualmente en la industria, el comercio y la vida cotidiana.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Dr. Héctor Nava Jaimes por llamar su atención sobre algunos de los artículos utilizados para este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] The Bureau International des Poids et Mesures, *The International System of Units*. 8a. Ed. (2006). Disponible en http://www.bipm.org/en/si/si_brochure/general.html .
- [2] Consulta en <http://www.bipm.org/>
- [3] Consulta en http://www.cenam.mx/publicaciones/descargas/PDFFiles/cnm-pnm-2_2.PDF
- [4] Las referencias a la CGPM pueden consultarse en <http://www.bipm.org/en/convention/cgpm/resolutions.html>
- [5] Davidson, S. *Metrologia* **40** (2003) 324–338.
- [6] Petley, B. W., en *Quantum Metrology and Fundamental Physical Constants*, eds. P. H. Cutler and A. A. Lucas. Plenum Press (1983).
- [7] Mohr P. J., Taylor B. N., and Newell D. B. *CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2006*. *Rev.Mod.Phys.* **80** (2008). CODATA. Consulta en <http://www.codata.org/> el 22 de julio de 2010.
- [8] Consultative Committee for Units, paper CIPM 2009 – 48.
- [9] Cabiati F. and Bich W. *Metrologia* **46** (2009) 457–466.
- [10] Eichenberger, A., Jeckelmann B., Richard Ph. *Metrologia*, 2003, **40**, 356-365.