

Sistema Internacional de Unidades: resumen histórico y últimas propuestas

Gabriel Pinto, Manuela Martín-Sánchez, María Teresa Martín-Sánchez

Resumen: El trabajo consta de cuatro partes: una breve reseña histórica sobre el Sistema Internacional de Unidades (SI), un resumen de las últimas propuestas de cambios en las definiciones y en las estructuras de las unidades básicas que se hicieron en la *XXIV Conferencia General del Comité Internacional de Pesos y Medidas* (que podrían ser efectivas en los próximos años), un análisis de las consecuencias de estos cambios, y una revisión de las opiniones sobre dichas propuestas por parte de diferentes autores.

Palabras clave: Sistema Internacional de Unidades, metrología, constantes físicas.

Abstract: This work has four parts: a brief history of the International System of Units (SI), a summary of the last proposals about new definitions for the base units as considered in the *24th Meeting of the International Committee of Weights and Measures* (that may be effective in the coming years), an analysis about what are the consequences of these changes, and a review of different comments about those proposals made by some authors.

Keyword: International System of Units, metrology, physical constants.

Nos ha parecido interesante recoger las nuevas propuestas acerca del Sistema Internacional de Unidades ya que aunque aún no son efectivas y quedan pendientes de experimentos, comprobaciones y algunos cálculos, consideramos que introducen tantos cambios en la filosofía del sistema que todos los profesores de ciencias experimentales de los distintos niveles educativos las deberían conocer.

Reseña histórica del Sistema Internacional de unidades^{1,2}

Aunque antiguas civilizaciones hicieron importantes contribuciones a la metrología, y ya hace siete mil años eran utilizadas distintas unidades de medida, podemos considerar que la historia del Sistema Internacional de Unidades comienza en la Francia de finales del siglo XVIII, en plena época revolucionaria. Lavoisier fue miembro (si bien más tarde sería expulsado) de la Comisión de Pesos y Medidas encargada de definir las bases del sistema métrico y se refirió al estudio de la unificación del sistema de pesos y medidas como

“*une des plus belles et des plus vastes conceptions de l'esprit humain*”. En dicha Comisión se integraron otros grandes científicos como Laplace, Coulomb y Lagrange.

En 1790 la *Académie des Sciences* decide establecer una unidad para medir la longitud que llamará metro (del término griego *μέτρον*, metron, que significa *medida*) y que se debería basar en algún hecho de la naturaleza. Entre otras alternativas, se decidió que fuera la diezmillonésima parte del cuadrante del meridiano terrestre. Para ello, dos astrónomos franceses, Jean-Baptiste Joseph Delambre y Pierre Méchain, fueron encargados de medir la longitud de arco del meridiano que va desde Dunkerque a Barcelona (en concreto, hasta el castillo de Montjuic). El resultado de estas medidas y los cálculos siguientes quedaron materializados, en 1799, en un metro patrón formado por una barra de platino. Por aquella época, se grabaron en mármol varios patrones de metro para familiarizar al pueblo con la nueva medida (ver Figura 1).



G. Pinto



M. Martín



M. T. Martín

E.T.S. de Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Madrid, José Gutiérrez Abascal 2, 28006 Madrid. Sección de Didáctica e Historia de la Física y la Química, Reales Sociedades Españolas de Química y de Física. C-e: gabriel.pinto@upm.es, mmartins@edu.ucm.es

Recibido: 31/05/2012. Aceptado: 12/07/2012.



Figura 1. Patrón del metro fabricado en mármol, ubicado en un muro de París desde finales del siglo XVIII.

En 1793 la Asamblea Nacional francesa tomó como unidad de masa, denominándola *grave*, la de un decímetro cúbico de agua destilada a una atmósfera de presión y a la temperatura de 4 °C (temperatura a la que el agua tiene la



Figura 2. Patrón del kilogramo que se conserva en la Oficina Internacional de Pesas y Medidas de Sèvres, cerca de París.

mayor densidad a presión atmosférica). En 1799 se propuso, para “materializar” la masa de un decímetro cúbico de agua, ya con la denominación de kilogramo, la masa de un cilindro de platino. En 1884 se preparó un nuevo prototipo internacional más resistente (conocido como “*Le Grand Kilo*”), para distinguirlo de las copias usadas como prototipos, fabricado con una aleación de platino iridiado (con 90% de platino y 10% de iridio, en masa) en forma cilíndrica (39,17 mm de diámetro y 39,17 mm de altura). Este prototipo (Figura 2) se conserva en la Oficina Internacional de Pesas y Medidas de Sèvres, cerca de París. Se estima que, desde su creación, su masa ha variado unos 50 μg .

Por otra parte, las unidades de medida del tiempo se han basado normalmente a lo largo de la historia en el movimiento del Sol y la Luna. El segundo fue introducido por Al-Biruni, en el siglo XI, como 1/86400 del día solar medio.

En 1832 Gauss midió la fuerza magnética de la Tierra utilizando como unidades básicas milímetros, gramos y segundos, unidades que el propio Gauss y Weber extendieron a los fenómenos eléctricos. En 1860 Maxwell y Thomson, a través de la Asociación Británica para el Avance de la Ciencia, aplicaron estas unidades a la electricidad y al magnetismo e insistieron en la necesidad de un sistema coherente. Dicha asociación estableció, en 1874, el Sistema CGS (centímetros, gramos y segundos).

En el año 1875 se reunieron diecisiete países (entre ellos España) en lo que se conoció como Convención del Metro y donde se firmó el Tratado del Metro por el cual se establecían los siguientes organismos:

- La Conferencia General de Pesos y Medidas (CGPM) que debería reunirse periódicamente, en periodos de entre cuatro y seis años, y en la que habría un representante de cada uno de los países firmantes del tratado.
- El Comité Internacional de Pesos y Medidas (CIPM) integrado por dieciocho científicos eminentes, de países diferentes, designados por la CGPM, que se reunirían anualmente y estarían encargados de asesorar a la CGPM.
- La Oficina Internacional de Pesos y Medidas (*Bureau International des Poids et Mesures*, BIPM) donde se ubicarían los laboratorios y las secretarías de estos organismos y cuya sede estaría en Sèvres (cerca de París).

En mayo de 2012 había 56 Estados miembros del BIPM y 34 asociados a la CGPM.



Figura 3. Reproducción del patrón de metro que se conserva en la Oficina Internacional de Pesas y Medidas de Sèvres, cerca de París.

El 28 de septiembre de 1899 se sancionaron los prototipos de metro (Figura 3) y de kilogramo que se depositaron en el BIPM, donde permanecen en la actualidad.

Giovanni Giorgi, en 1901, propuso combinar las unidades de electricidad dentro de un sistema cuyas unidades básicas fueran kilogramo, metro y segundo. Siguiendo sus ideas, después de diversas revisiones y acuerdos con otros organismos internacionales, entre ellos la *International Union of Pure and Applied Physics* (IUPAP), se aprobó en 1946 el sistema conocido como MKSA cuyas unidades fundamentales eran metro, kilogramo, segundo y amperio. En 1954 se añadieron como unidades fundamentales la candela y el kelvin.

Fue en 1960 cuando a este sistema se le bautizó como SI, que son las iniciales francesas (*Système International*) por su origen y no se le denominó IS (de *International System*) como podría haber sido si se considera el inglés como idioma científico más internacional. Ese mismo año se definió el metro partiendo de la longitud de onda de la transición entre dos niveles de energía del kriptón-86, definición que se cambió en 1983 para tomar como base la velocidad de la luz en el vacío. En 1967, como consecuencia del desarrollo de los relojes atómicos, se definió el segundo como 9192631770 periodos de la radiación correspondiente a la transición entre dos niveles hiperfinos del estado fundamental del cesio-133.

En 1971 se añadió el mol como séptima unidad básica, para medir la cantidad de sustancia.

Se tenía ya así el SI establecido con sus siete unidades básicas, como se recoge en la Tabla 1. Estas unidades y sus definiciones estaban dentro un marco de aceptación con

Tabla 1. Nombres y símbolos de las unidades básicas SI.

Magnitud física	Nombre de la unidad SI	Símbolo de la unidad SI
longitud	metro	m
masa	kilogramo	kg
tiempo	segundo	s
intensidad de corriente eléctrica	amperio	A
temperatura termodinámica	kelvin	K
cantidad de sustancia	mol	mol
intensidad luminosa	candela	cd

pequeños cambios según datos experimentales, salvo la definición de kilogramo que “chirriaba” bastante frente a las otras, pues seguía dependiendo de un patrón.

Otras unidades SI derivadas, como el hercio, el julio, el coulombio, el lumen y el vatio, cuyos símbolos son Hz, J, C, lm, y W, respectivamente, están relacionadas con las unidades básicas (segundo, metro, kilogramo, amperio, kelvin, mol y candela), según se especifica a continuación:

$$\text{Hz} = \text{s}^{-1}$$

$$\text{J} = \text{N m} = \text{m}^2 \text{ kg s}^{-2}$$

$$\text{C} = \text{A s}$$

$$\text{lm} = \text{cd sr} = \text{cd m}^2 \text{ m}^{-2}$$

$$\text{W} = \text{J s}^{-1} = \text{m}^2 \text{ kg s}^{-3}$$

Donde sr es el símbolo del estereorradián (unidad SI de la magnitud física ángulo sólido).

Propuestas del Comité Internacional de Pesos y Medidas para el futuro^{3,4}

Parece que, por fin y después de muchas discusiones, se terminará aceptando una nueva definición de kilogramo y se hará una revisión de todas las definiciones de las siete unidades fundamentales del SI, ligando estas definiciones a los valores de siete constantes, aunque todo esto no tendrá efectividad hasta 2014 porque quedan pendientes varias revisiones experimentales. Así, en la XXIV Conferencia General del Comité Internacional de Pesos y Medidas celebrada en octubre de 2011 se propuso una revisión del Sistema Internacional de unidades de acuerdo a los siguientes hechos:

- La frecuencia de radiación correspondiente a la transición entre dos niveles hiperfinos del estado fundamental del átomo de cesio-133, $\Delta\nu(^{133}\text{Cs})_{\text{hfs}}$, a la temperatura de 0 K, es exactamente 9192631770 Hz.
- La velocidad de la luz en el vacío, c , es exactamente 299792458 m/s.
- La constante de Planck, h , es exactamente $6,62606X \times 10^{-34}$ J s.
- La carga elemental, e , es exactamente $1,60217X \times 10^{-19}$ C.
- La constante de Boltzmann, k , es exactamente $1,380 65X \times 10^{-23}$ J K⁻¹.
- La constante de Avogadro, N_A , es exactamente $6,022 14X \times 10^{23}$ mol⁻¹.
- La eficacia luminosa, K_{cd} , de una radiación monocromática de frecuencia 540×10^{12} Hz es exactamente 683 lm W⁻¹.

En todos esos casos, la X representa una o más cifras pendientes de revisión.

En la conferencia señalada, se propusieron los siguientes cambios:

1. **Kilogramo:** seguirá siendo la unidad de masa pero su magnitud se establecerá fijando el valor numérico de la constante de Planck.
2. **Amperio:** seguirá siendo la unidad de intensidad de corriente eléctrica, pero su valor se fijará teniendo en cuenta el valor de la carga elemental.

3. **Kelvin:** seguirá siendo la unidad de temperatura pero su valor se fijará partiendo de la constante de Boltzmann.

4. **Mol:** seguirá siendo la unidad de cantidad de sustancia o de entidades elementales especificadas tales como átomos, moléculas, iones, electrones o cualquier otra partícula. Su magnitud se fijará a partir de la constante de Avogadro.

Además, se reformularon de nuevo las definiciones de las otras tres unidades básicas:

- **Segundo:** es la unidad de tiempo y su valor se fija partiendo del valor numérico de la frecuencia de la radiación correspondiente a la transición entre los dos niveles hiperfinos del estado fundamental del átomo de cesio-133 a 0 K, igual a 9 192 631 770 Hz.
- **Metro:** es la unidad de longitud y su magnitud se fija tomando como partida que el valor numérico de la velocidad de la luz en el vacío es exactamente igual a 299 792 458 m s⁻¹.
- **Candela:** es la unidad de intensidad luminosa en una dirección dada y su magnitud se toma fijando el valor numérico de la eficacia luminosa de la radiación monocromática de frecuencia 540×10^{12} Hz, exactamente igual a 683 lm W⁻¹.

La Conferencia añadió, además, varias notas relativas a las definiciones propuestas, entre las que destacamos:

- La masa del prototipo del kilogramo tendrá una incertidumbre igual al valor recomendado para la constante de Planck, h , justamente antes de la redefinición y el valor se determinará experimentalmente.
- La constante magnética de permeabilidad en el vacío, μ_0 , es igual a $4\pi \times 10^{-7}$ H m⁻¹, donde H es el símbolo del henrio (H = V A⁻¹ s), correspondiente a la magnitud física inductancia, pero con una incertidumbre igual a la del valor recomendado para la constante de estructura fina, α , cuyo valor se determinará experimentalmente. La constante de estructura fina, a veces denominada “de Sommerfeld” por haber sido introducida por este autor en 1916, es la constante física fundamental que caracteriza la fuerza de atracción electrostática. Es adimensional e incluye en su expresión la carga elemental, la constante de Planck y la velocidad de la luz en el vacío.
- La temperatura termodinámica del punto triple del agua será 273,16 K, pero con una incertidumbre relativa igual a la del valor recomendado para la constante de Boltzmann, k , cuyo valor se determinará experimentalmente
- La masa molar del carbono-12 será 0,012 kg mol⁻¹ pero con una incertidumbre igual a la del valor de la constante de Avogadro, N_A , que se determinará experimentalmente.

De alguna manera, se pretende que las actuales definiciones de las siete unidades básicas se formulen en términos de los valores de siete constantes fundamentales o constantes de la naturaleza que se cree son invariantes en el tiempo y en el espacio, asequibles a cualquiera, en cualquier lugar y en cualquier momento, que desee utilizar los valores de las unidades para hacer medidas.

En la Figura 4 se representa la relación entre las unidades básicas SI propuestas, entre sí y con las siete constantes fundamentales que tienen fijados valores numéricos.

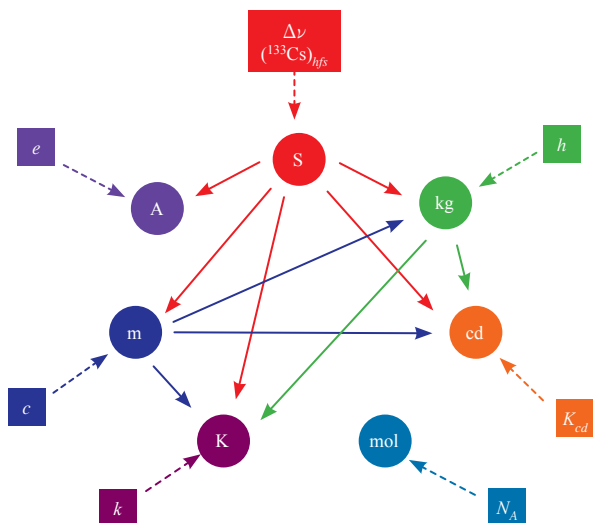


Figura 4. Relación entre las siete unidades básicas SI y las siete constantes fundamentales, según la reciente propuesta de la Conferencia General del Comité Internacional de Pesos y Medidas.

Consecuencias de los cambios propuestos

Los cambios más importantes que se vislumbran de las recomendaciones acordadas en la *XXIV Conferencia General del Comité Internacional de Pesos y Medidas* se resumen en los siguientes párrafos.

- La nueva definición del valor del kilogramo depende de las definiciones del segundo y del metro.
- En cuanto a la definición de amperio, se sustituye la actual (muy difícil de realizar con gran precisión) por otra más intuitiva y más fácil de realizar en la práctica. Por otra parte, ya no depende de las definiciones del kilogramo y del metro. Como se fija un valor exacto para la carga elemental, los valores de la permeabilidad del vacío, de la permitividad del vacío y de la impedancia del espacio libre, que hasta ahora eran exactas, quedarían con un pequeño margen de error experimental.
- La definición del kelvin sufre cambios importantes al fijar la escala según la energía proporcionada por la ecuación de Boltzmann (la energía contenida por las partículas de un sistema termodinámico es proporcional a la temperatura absoluta, siendo la constante de Boltzmann la constante de proporcionalidad). La determinación del valor del kelvin depende así de las definiciones del segundo, del metro y del kilogramo.
- La definición de mol rompe con el vínculo que tenía con el kilogramo, haciéndolo un número específico de entidades de alguna sustancia. Una consecuencia de este cambio es que la relación actual entre la masa del átomo ^{12}C , el dalton (cuyo símbolo es Da y es la unidad de masa atómica unificada, u), el kilogramo y la constante de Avogadro ya no será válida, por lo que tendrá que haber otros cambios en alguno de los valores siguientes:
 - La masa del átomo ^{12}C , que ya no sería exactamente de 12 Da.
 - La masa del propio Dalton; en este caso cambiarían las masas numéricas de todos los átomos de la tabla periódica, excepto del ^{12}C .
 - El número de átomos de ^{12}C en 12 g, que actualmente es la constante de Avogadro por definición.
- La definición propuesta de candela es similar a la actual.

Algunos comentarios en torno a las propuestas planteadas

La propuesta de cambio, a simple vista, es bastante revolucionaria en cuanto a su filosofía y está provocando diversas reacciones entre los científicos. Ya hace años que se esperaba con interés la definición de kilogramo, porque cuando se pueden hacer medidas con gran precisión parece obsoleto depender de un bloque de metal; sin embargo, no es tan fácil darle una solución y la nueva propuesta incluye cambios muy importantes en cuanto a toda la estructura y la relación de unas unidades con otras, lo que explica que el número de artículos que han salido y siguen publicándose sobre este tema es inabarcable. Por eso, nos limitaremos a citar algunos.

Atkins⁵ indica que hay varias lagunas en las propuestas y le parece muy complicado que tantas constante incluyan el kilogramo. Además, destaca que existe un importante obstáculo dentro de la filosofía que subyace como eje de las propuestas, y es que en una definición se siga echando mano de una sustancia como es la del cesio-133 en la definición de segundo porque, aunque sea una sustancia universal y de la que en cualquier sitio se puede disponer, rompe con la estructura que se defiende.

Price⁶ indica que la nueva propuesta puede tener serios inconvenientes y cita entre otros que puede:

- Causar confusión, debido a que las nuevas definiciones se refieren a constantes y no relacionan las unidades a un ejemplo de su cantidad.
- Causar problemas económicos debido a los costes de transacción y a las barreras al comercio internacional.
- Al ser un sistema de unidades con definiciones interdependientes podría llevar a la pérdida de compatibilidad y consistencia en las medidas, y lo que daría lugar a errores no fáciles de detectar que producirían, a su vez, errores sistemáticos con graves consecuencias en la toma de decisiones en actividades humanas.

Leonard⁷ ha sostenido que “*el concepto fundamental del mol requiere el número de entidades que comprende, es decir, el número de Avogadro, que ha de ser exactamente igual a la proporción de masas gramo-a-Dalton*” y que la propuesta rompe con esta condición de compatibilidad definiendo el kilogramo, el dalton y el mol de forma independiente.

Pavese⁸ piensa que hay temas que se tienen que entender mejor antes de cambiar las definiciones. Entre ellos, apunta la naturaleza del recuento y del valor del número de Avogadro, la pérdida de validez del concepto de unidad básica, la posibilidad de comprobar cambios futuros en las “constantes fundamentales”, el cambio a la unidad con incertidumbre experimental y algunos problemas léxicos entre otros.

Hill⁹ junto con Miller y Censullo¹⁰ hacen una crítica exhaustiva a la nueva propuesta del SI.

Hill⁹ opina que un amplio espectro de científicos y metrologos de diferentes países creen que la propuesta tiene fallos importantes. Insisten en la dificultad que habrá para enseñar la mayoría de esas unidades y la imposibilidad que tendrán muchos estudiantes y bastantes científicos para poder entender lo que se está definiendo. La definición de kilogramo se basa para su comprobación en un dispositivo electromecánico difícil de entender y usar para que pueda ser materializada con una incertidumbre apropiada en cualquier lugar. El hecho de que las definiciones sean circulares, porque unas dependen de otras, hace imposible hacerlas efectivas. Su crítica se centra sobre todo en la definición de mol y de kilogramo.

En la carta conjunta de Miller, Hill y Censullo¹⁰ dicen que la propuesta va en contra de las tres ideas fundamentales que defiende Mills (el presidente del grupo) que deben tener las definiciones de las unidades fundamentales: “*que sean tan simples y comprensibles que cualquiera las entienda*”, “*que estén disponibles para cualquiera y en cualquier momento*” y “*que sean verdaderas invariantes*”.

Estos tres autores¹¹ proponen una la definición alternativa de kilogramo como “*la masa de $84446889 \times 1000 / 12$ átomos de carbono-12 en su estado fundamental*”. El factor 1000 es para expresarlo en kilogramos y de esta forma se asegura que no es necesario cambiar las tablas de pesos atómicos.

Feller¹², en un extenso artículo, explica detenidamente cuáles deben ser las características de una unidad para que sea matemáticamente correcta; indica que de las siete constantes de las que se parte, en realidad solo cinco son “constantes” y se une a todas las críticas sobre la dificultad de entender estas unidades, así como la dependencia de unas con otras y la imposibilidad de materializarlas. Concluye que introducen términos y conceptos que están en contradicción con nociones matemáticas bien fundamentadas y que nunca fueron utilizados por los físicos del siglo XX. En particular, considera que “*el dogma usado con frecuencia de qué cantidad es un producto de un número y una unidad es una fuente de contradicciones y está lleno de errores lógicos. Términos más populares como: sistema de cantidades, cantidad base, cantidad derivada, unidad base y unidad derivada no suenan de forma lógica y llevan también a confusión y contradicción*”. Según su opinión, la confusión se puede evitar si se aplican las nociones matemáticas de forma correcta.

Khrushov¹³ se centra en el problema de definir las constantes físicas fundamentales (FPC), así como el de utilizar, como base de la definición de kilogramo, constantes conocidas y variables experimentales. Señala que, en este momento, las constantes de Avogadro y de Planck están medidas con una precisión inadecuada. Opina que si se adoptan las siete constantes tal como están se pueden producir problemas que afecten al progreso de la metrología y de la física y pone ejemplos de cómo la fijación de unas constantes puede influir en otras definiciones.

Conclusiones

Nuestra opinión general acerca de estas propuestas se basa sobre todo en la dificultad de entenderlas y, por tanto, de enseñarlas, así como en el hecho de que unas definiciones dependan de otras. Encontramos problemática, de una forma especial, la definición de mol y kilogramo. No obstante, el esfuerzo por mejorar la definición de las distintas unidades es digno de elogio. Por otra parte, la discusión sobre las propuestas elaboradas puede ser una buena ocasión para tratar estos temas en el aula, de forma que los alumnos aprecien que el Sistema Internacional de Unidades no es estático, sino que evoluciona por la demanda de mayores exactitudes y con el avance del conocimiento.

Agradecimientos

Se agradece la ayuda recibida por la Universidad Politécnica de Madrid, a través del proyecto de innovación educativa “*Enlaces múltiples: la química en los distintos niveles educativos*”.

Bibliografía

1. <http://www.bipm.org/en/si/history-si/>, visitada el 30/08/2012.
2. M. Bargalló, *Manual de Física*, Sardá, Reus, 1929.
3. <http://www.bipm.org/fr/convention/cgpm/resolutions.html>, visitada el 30/08/2012.
4. I. Mills, *Chem. Internat.* **2011**, 33 (5), 12–15.
5. P. Atkins *Chemistry World* **2011**, 8 (9), 42.
6. G. Price, *Accred. Qual. Assur.* **2011**, 16, 121–132; doi:10.1007/s00769-010-0738-x.
7. B. P. Leonard, *Metrologia* **2010**, 47, L5–L8; doi:10.1088/0026-1394/47/3/L01.
8. F. Pavese, *Accred. Qual. Assur.* **2011**, 16, 161–165; doi:10.1007/s00769-010-0700-y.
9. T. P. Hill, *Accred. Qual. Assur.* **2011**, 16, 471–472; doi: 10.1007/s00769-011-0810-1.
10. J. Miller, T. P. Hill, A. Censullo, *Accred. Qual. Assur.* **2011**, 16, 657–658; doi: 10.1007/s00769-011-0842-6.
11. J. Miller, T. P. Hill, A. Censullo, *Chem. Internat.* **2011**, 33 (5), 9–12.
12. U. Feller, *Accred. Qual. Assur.* **2011**, 16, 143–153; doi: 10.1007/s00769-010-0747-9.
13. V. V. Khrushov, en *Comments on redefinition of SI units based on fundamental physical constants with fixed values*, arXiv:1102.4831v1 [physics.atom-ph], **2011**.