

Universalidad de la unidad de medida: De la vara de medir a la luz

Universality of unit of measurement: From the yardstick to light

*María Tirado Miranda y Miguel Ángel Rodríguez Valverde**

Departamento de Física Aplicada

Facultad de Ciencias

Universidad de Granada

Campus de Fuentenueva s/n

ES18071 Granada (Spain)

Tel: +34-958243229 - Fax: +34-958243214

E-mail: marodri@ugr.es

Comentario para el editor

El presente trabajo trata un tema de actualidad: la redefinición de las unidades básicas del S.I. que tomará efecto mundial en 2019. Si bien esto no tendrá impacto real en las actividades de los físicos, sí lo tiene conceptualmente al concretar de manera distinta algunas de las unidades básicas del S.I. Este trabajo es útil para la enseñanza de la Física, en lo referente a la competencia de estimación numérica en la resolución de problemas de la Física.

Resumen

La Física, en su vocación de mejora continua, se actualiza cuando su esquema de trabajo resulta anacrónico. Este es el caso de la redefinición por parte de la Oficina Internacional de Pesas y Medidas de las unidades de medida básicas del S.I. para 2019 en términos de cinco constantes físicas fundamentales, con carácter universal antes que antropocéntrico. Con ello, la medición ganará en precisión y se adaptará a las tecnologías emergentes. En este trabajo se proponen concreciones de las unidades básicas afectadas en términos de las constantes físicas elegidas. Esto puede ayudar a ilustrar las nuevas definiciones, más abstractas. Este cambio debe alentarnos en persistir

en la enseñanza del reconocimiento del orden de magnitud de un resultado numérico y del sentido de escala en Física.

Abstract

In Physics, for continuous improvement, the framework is upgraded when it is outdated. Hence, Bureau International des Poids et Mesures proposes to redefine the S.I. base units in 2019 in terms of the five fundamental physical constants, with universal character rather than anthropocentric. This way, measuring action will gain in numerical resolution and will adapt to the developing technologies. In this work, we propose new realizations of the base units in terms of the chosen fundamental physical constants. These realizations will be helpful to illustrate the new definitions, more abstract. This change must encourage to continue teaching the realization of the order of magnitude of a numerical result and the scale sense in Physics.

Introducción

En la enseñanza de la Física, especialmente durante cursos iniciales, se presta atención a la correcta escritura de los símbolos de unidades de medida [1, 2], pero también es ineludible la concreción o materialización de una unidad de medida [3] que nos permita reconocer el orden de magnitud de un resultado numérico y tomar conciencia de cuán grande o pequeño es. Lo práctico para la concreción de una unidad de medida es elegir como referencia objetos cercanos o conocidos. Por ejemplo, el kilogramo se concreta en un objeto físico, como en su momento se hizo con el metro, el kelvin, se asocia al punto triple del agua, el amperio a dos conductores paralelos, rectilíneos, de longitud muy grande .., y el mol en el átomo de carbono. Sin embargo, estas arbitrariedades antropocéntricas del sistema de unidades no son recomendables. En la definición formal de una unidad de medida, las referencias deben ser eventos/entidades invariantes, con independencia de la escala espacial y temporal. Esto para el tiempo resulta difícil. De ahí que la definición actual de *segundo* sea:

“9 192 631 770 periodos de la radiación correspondiente a la transición entre los dos niveles hiperfinos del estado fundamental del átomo de cesio 133, en reposo y a 0 K”

El *kilogramo* a día de hoy, y desde 1889, sigue definido como:

“la masa del prototipo internacional del kilogramo, adoptado por la tercera Conferencia General de Pesas y Medidas en 1901.”

como reminiscencia de los estándares de pesadas para comercio. Sin embargo, son conocidos los desacuerdos entre los prototipos establecidos en diferentes conferencias debido a la variación de su masa por procesos superficiales. Para ganar estabilidad, y para entrar en el contexto de la Física Moderna como se hizo en 1983 con el *metro* y en 1967/68 con el *segundo*, desde la Oficina Internacional de Pesas y Medidas (BIPM) [4] se proponen adoptar nuevas definiciones de *kilogramo*, *mol*, *kelvin* y *amperio* que también involucren constantes físicas universales, sin cambiar por ello el valor intrínseco de la unidad. Se propone que cada unidad física fundamental dependa unívocamente de una constante física fundamental, cuyo valor será la nueva cantidad tomada como patrón (ver Figura 1). La consecuencia directa es el aumento de precisión en medidas obtenidas con tecnologías emergentes. La idea es que si una constante física universal resulta del producto de un número por una combinación de unidades base del S.I., fijando dicho número se tendrá fijada la unidad, previamente fijado el resto de unidades con otras

constantes. Este esquema no produce definiciones circulares, pues la unidad a definir no aparece incluida como parte de la definición.

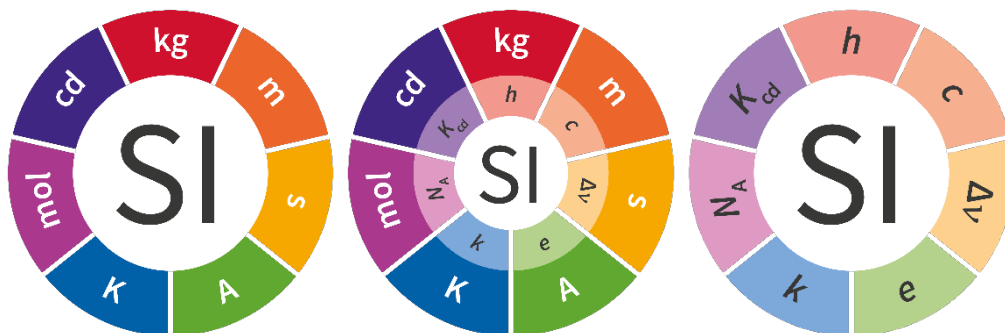


Figura 1. Logos promocionales del cambio de patrones en el S.I. publicados por el BIPM. Se ilustra la dependencia unívoca de cada unidad física fundamental con una constante física fundamental, que serán las nuevas cantidades tomadas como patrones (Licencia creative commons).

BIPM ha elegido por su relevancia y precisión alcanzada siete constantes universales [5]. Estas constantes pasan a definirse y por tanto se consideran exactas mientras el resto de constantes físicas son medibles y por ello tienen incertidumbre no nula. La hipótesis de invariancia de las constantes físicas despierta controversia pues podrían variar durante escalas de tiempo no observables aún, pero redundando en las leyes físicas establecidas [6, 7].

Tabla 1. Las cinco constantes físicas universales elegidas para redefinir las unidades del S.I., salvo el segundo y la candela.

| NOMBRE | SÍMBOLO | VALOR (S.I.) |
|---------------------------|---------|---|
| velocidad de la luz | c | 299 792 458 m/s |
| constante de Planck | h | $6.626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$ J.s |
| constante de Boltzmann | k | $1.380\ 649 \times 10^{-23}$ J/K |
| carga eléctrica elemental | e | $1.602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ A.s |
| número de Avogadro | N_A | $6.022\ 140\ 76 \times 10^{23}$ mol ⁻¹ |

Redefinición de unidades de medida del Sistema Internacional

La propuesta desde el Comité General de Pesas y Medidas de BIPM [8, 9] para el 2019 es tomar como referencia el valor numérico en el S.I. de cinco de las siete constantes físicas universales: la velocidad de luz en el vacío, la constante de Planck, la constante de Boltzmann, la carga eléctrica elemental y el número de Avogadro (ver Tabla 1) [5]. Esto obligará a derogar las definiciones actuales de kilogramo y amperio, revocar la de kelvin y revisar la de mol. En la normativa española y europea, se deberán actualizar las definiciones de UNIDADES LEGALES DE MEDIDA [10]. La propuesta tiene similitudes con el sistema de unidades naturales propuesto por Max Planck donde la velocidad de la luz, la constante de Boltzmann, la constante de Coulomb, la constante de la Gravitación Universal y la constante reducida de Planck toman el valor 1, aunque con dimensiones.

Formalmente, según el análisis dimensional, si se impone que las cinco constantes elegidas por la Oficina Internacional de Pesas y Medidas no poseen dimensiones, estamos fijando cinco de las siete dimensiones (unidades) fundamentales en términos de combinaciones (monomios) de los valores numéricos de las constantes. Las magnitudes fundamentales cuyas dimensiones cambian son: longitud, masa, intensidad de corriente eléctrica, temperatura termodinámica y cantidad de sustancia. Sin considerar la intensidad luminosa (candela), el tiempo (segundo) se mantiene por razones operativas como dimensión (unidad)-base. Si elegimos la luz y sus propiedades como referencia: velocidad de la luz constante, propiedades relativistas, dualidad onda-corpúsculo, radiación térmica .., la longitud tendrá dimensiones de tiempo pues $[c]=1$ aunque con un factor numérico entre metro y segundo igual a $1/c$. Como la masa en reposo es contenido en energía según la equivalencia masa-energía, y la energía ondulatoria es inversamente proporcional al tiempo (directamente proporcional a la frecuencia) según la relación de Planck, masa y frecuencia se comportan igual a efectos de dimensiones. El factor de conversión entre unidades dependerá de la velocidad de la luz c y de la constante de Planck h . Según las leyes de la radiación y la energía térmica de la materia, la temperatura termodinámica (energía) también es inversamente proporcional al tiempo. En este caso, el factor multiplicativo entre unidades dependerá de la constante de Boltzmann k y de la de Planck h . Hemos utilizado el hecho de que un oscilador armónico posee una energía promedio igual a $k \times temperatura$ conforme la equipartición de la energía. En electricidad, si la constante de carga elemental e se elige adimensional, la intensidad de corriente es inversamente proporcional al tiempo con un factor $1/e$. En la Tabla 2 se indican los

prefactores numéricos que deben multiplicar cada una de las magnitudes fundamentales del S.I. evaluadas en aquellas situaciones particulares referidas a 1 s o 1 Hz. El hecho de que masa, temperatura e intensidad de corriente en este esquema tengan dimensiones de inversa del tiempo confirma la interpretación de estas magnitudes como flujos o paso del tiempo, salvo para la longitud (acoplada al tiempo). Esto concuerda con la propuesta de que el segundo sea *la unidad fundamental* [11].

Tabla 2. Deducción de los prefactores numéricos del S.I. (sin unidades) a partir de análisis dimensional, donde f es la frecuencia, t el tiempo, T la dimensión tiempo, θ la temperatura termodinámica y N el número de entidades discretas que forman la sustancia (eléctrica o no). Se ha incluido el caso del mol para demostrar la consistencia del método.

| UNIDAD | CONDICIÓN | RELACIÓN DIMENSIONAL | PRE-FACTOR |
|-----------|-------------|------------------------------|-----------------|
| Metro | $[c] = 1$ | $[L] = [ct] = T$ | $\frac{1}{c}$ |
| Kilogramo | $[h] = 1$ | $[M] = [hf/c^2] = T^{-1}$ | $\frac{c^2}{h}$ |
| Kelvin | $[k] = 1$ | $[\theta] = [hf/k] = T^{-1}$ | $\frac{k}{h}$ |
| Amperio | $[e] = 1$ | $[I] = [Ne/t] = T^{-1}$ | $\frac{1}{e}$ |
| Mol | $[N_A] = 1$ | $[n] = [N/N_A] = 1$ | $\frac{1}{N_A}$ |

De la Tabla 2 se deduce que la carga eléctrica, entendida como cantidad de sustancia eléctrica, no tiene dimensiones aunque sí unidades (como el ángulo plano). Las constantes de los gases ideales $R = kN_A$ y la de Faraday $F = eN_A$ resultan igualmente adimensionales en este esquema. Lo mismo ocurre con la permeabilidad magnética en el vacío μ_0 (masa×longitud×intensidad²×tiempo⁻²), la permitividad eléctrica en el vacío $\epsilon_0 = 1/(\mu_0 c^2)$ y con ella la constante de Coulomb $1/(4\pi\epsilon_0)$. La constante de la

Gravitación Universal G ($\text{masa}^{-2} \times \text{longitud}^3 \times \text{tiempo}^{-2}$) tiene como dimensión la inversa del tiempo.

Con todo esto proponemos las siguientes concreciones de cinco de las unidades básicas:

1. “Un metro es $1/c$ veces la distancia que recorre un fotón en un segundo en el vacío”
2. “Un kilogramo es c^2/h veces la masa de un objeto con una energía equivalente igual a la de un fotón de un Hz en el vacío”
3. “Un kelvin es k/h veces la temperatura de un objeto a la que irradia un fotón de un Hz en el vacío”
4. “Un amperio es $1/e$ veces la corriente de una carga eléctrica elemental que circula por segundo”
5. “Un mol es $1/N_A$ veces la cantidad de sustancia de un sistema”

Para ilustrar la concreción del metro, se puede recurrir al artículo de Andreas Velten et al. [12]. La definición de kilogramo implica el concepto de que la masa siempre puede convertirse en energía radiante. Pero la masa en reposo también se puede convertir en energía térmica. La definición de kelvin se basa en que la materia “agitada” también irradia y viceversa (efecto fotoacústico), esbozando el acoplamiento cuántico entre fonones y fotones [13]. Las concreciones de amperio y mol coinciden con sus redefiniciones y por ello resultan más intuitivas.

Conclusiones

Proponemos una “escenificación” con fines didácticos de las redefinidas unidades básicas del S.I. en términos de las constantes físicas fundamentales elegidas con vistas a su implantación en 2019. Si bien nuestra propuesta puede ayudar a ilustrar la imagen mental de una determinada unidad básica, debemos persistir desde la enseñanza de la Física en ejercitar las habilidades de sentido de escala y aproximación para lo que el discente debe asociar diferentes órdenes de magnitud de las magnitudes físicas con casos particulares, en un amplio intervalo numérico. Sabemos que 1 kg equivale aproximadamente a la masa de un litro de agua, que 1 m a la longitud de la pierna de un adulto humano y que 1 s es el semiperiodo de un péndulo de 1 m de longitud. Además, si un limón mediano tiene una masa de 100 g, la fuerza gravitatoria sobre él es aproximadamente 1 N, de ahí que la intensidad de cualquiera fuerza se pueda dimensionar en términos comparativos al peso humano. Para estimar aceleraciones, se toma la aceleración gravitatoria estándar como

referencia. Sin embargo, otras muchas magnitudes físicas siguen siendo difícilmente “visualizables”. Habrá que seguir buscando estrategias para ello.

Referencias

- [1] Mulero A., Suero M.A., Vielba A., Cuadros F. El Sistema Internacional de Unidades ... en el supermercado. *Revista Española de Física*, Vol 16, nº 5, 2002, págs. 41-45.
- [2] Martínez Pons, J.A. El nombre de las unidades. “El sillón Φ ”, *Revista Española de Física*, Vol 18, nº 1, 2004, págs. 48-49.
- [3] <https://www.bipm.org/en/publications/mises-en-pratique/> 29-01-2018.
- [4] <http://www.cem.es/sites/default/files/files/Informaci%C3%B3n%20de%20CCs%20sobre%20la%20propuesta%20de%20revisi%C3%B3n%20de%20SI.pdf> 29-01-2018.
- [5] David B Newell, Franco Cabiati, Joachim Fischer, Kenichi Fujii, Saveley G Karshenboim, Helen S Margolis, Estefania de Mirandes, Peter J Mohr, Francois Nez, Krzysztof Pachucki, Terry J Quinn, Barry N Taylor, Meng Wang, Barry Wood y Zhonghua Zhang, The CODATA 2017 Values of h , e , k , and N_A for the Revision of the SI, *Metrologia*, 2017, doi: 10.1088/1681-7575/aa950a.
- [6] Melissa J. Duff, How fundamental are fundamental constants?, *Contemporary Physics* 56, 1, 2015, 35-47
- [7] Gabriel Pinto, Manuela Martín-Sánchez y María Teresa Martín-Sánchez, Sistema Internacional de Unidades: resumen histórico y últimas propuestas, *An. Quím.* 108(3), 2012, 236–240.
- [8] Elizabeth Gibney, New definitions of scientific units are on the horizon. *Nature* 550, 2017, 312–313, doi: 10.1038/550312a.
- [9] Experimentos para el nuevo SI, el Sistema Internacional de Unidades, *PTB-Mitteilungen* 126 (2), 2016, 1-107, doi: 10.7795/310.20160299ES.
- [10] BOE núm. 18, de 21 de enero de 2010, págs. 5607-5619- BOE núm. 43, de 18 de febrero de 2010, págs. 14880-14891.

- [11] <http://web.mit.edu/bskow/www/research/sec-per-sec.pdf> 29-01-2018.
- [12] A. Velten, D. Wu, A. Jarabo, B. Masia, C. Barsi, C. Joshi, E. Lawson, M. Bawendi, D. Gutierrez y R. Raskar, Femto-Photography: Capturing and Visualizing the Propagation of Light, ACM Transactions on Graphics 32(4), 2013, 44.
- [13] <http://francis.naukas.com/2016/02/19/el-acoplo-de-un-foton-con-un-fonon/> 29-01-2018.