

Nuevo Sistema de Unidades de Medida

Daniel Slomovitz, *Senior Member, IEEE*

HACE unos 10 años escribí un pequeño artículo titulado “Se acerca el fin de los sistemas de unidades”. En estos momentos (diciembre de 2018), el fin pudo haber llegado. En aquel entonces, discutí sobre la eventualidad que se defina un nuevo Sistema de Unidades Internacional (SI) basado en la asignación de valores a ciertas constantes universales. Simplemente, entre otros, se decretarían valores para la carga del electrón, la constante de Plank, la velocidad de la luz y la radiación del átomo de cesio. Estos dos últimos ya figuran en el SI de 1960, pero los dos primeros serían nuevas incorporaciones. Para poder incorporar nuevas constantes, hay que abandonar otras. Los candidatos a salir son la constante magnética μ_0 (usada para definir el ampere) y el patrón de masa. Este último es el único elemento en que un objeto físico define una unidad de medida.

Los inconvenientes en las definiciones del ampere y el kilogramo son muchos. La unidad de masa, definida hasta ahora por el SI₆₀, es la masa de un cilindro de platino-iridio guardado en la bóveda del BIPM (Bureau Internacional de Pesas y Medidas). En primer lugar, dicho objeto debe ser cuidadosamente manipulado de manera de no afectarlo. En el caso del kilogramo, sólo se ha intercomparado cuatro veces a lo largo de toda su historia. Por otro lado, no hay forma de conocer cuál es su incertidumbre. Es más, algunos metrólogos le asignan incertidumbre nula, dado que por definición la masa que tenga en cualquier momento (aun siendo variable) representa la unidad, exactamente. Como sea, todos estamos de acuerdo en que su variación constituye un problema, y hay indicios que al menos ha variado 5 partes en 10^8 a lo largo de más de un siglo de vida. Finalmente queda el gran inconveniente de su reproducibilidad. Es único, no se puede usar frecuentemente y varía. Peores cualidades no se podrían juntar en la definición de una unidad.

Por el lado del ampere, las cosas no son mejores. La definición vigente hasta ahora era: el ampere es la corriente que pasando por dos conductores rectilíneos, paralelos, de longitud infinita y sección despreciable, colocados en el vacío a 1 m de distancia, produce una

fuerza entre ellos de 2×10^{-7} N/m. La realización de un patrón que materialice esta definición no es simple. Implicaría desarrollar un instrumento real con complejos dispositivos con bobinas, medidores de distancia y fuerzas, que realicen lo que la definición propone. ¡Tan complejo es realizar la unidad actual de corriente eléctrica, que nadie lo hace! Sin embargo, este tipo de definición de unidades tiene una ventaja sobre el ejemplo de la masa. Es más democrática. No hay necesidad de conservar ningún patrón universal en ninguna bóveda de seguridad. Cualquier laboratorio con los recursos adecuados puede reproducirlo. Adicionalmente, detrás de esa definición del ampere se oculta otra gran ventaja. Se usa una ecuación de la física para ligar el ampere a otras magnitudes, asignando un valor fijo a la constante μ_0 . La ecuación que liga la fuerza con la corriente es

$$F = \frac{\mu_0 l}{2\pi d} I^2 \quad (1)$$

donde l es la longitud de los conductores y d la distancia entre ellos. Fijando arbitrariamente el valor de la constante de proporcionalidad, μ_0 , y usando esta ecuación, queda definida la unidad de corriente. El valor asignado por el SI₆₀ a μ_0 era de $4\pi \cdot 10^{-7}$ exactamente (en unidades SI). En el fondo de este asunto, en lugar de asignar un valor fijo a un objeto material, se lo asigna a una constante universal, en este caso relacionada con campos electromagnéticos. Sin lugar a dudas, es una elección con mayor estabilidad.

Completan las unidades básicas del SI₆₀, el kelvin, definido a partir del punto triple del agua, el mol basado en el átomo de carbono y la intensidad luminosa relacionando lumen con watt.

A partir del 1990, se produjo un cambio sustancial en este mundo de unidades y patrones. Dos efectos cuánticos macroscópicos incursionaron en las mediciones eléctricas. Ellos fueron el Efecto Josephson y el Efecto Cuántico Hall. El primero, descubierto por Brian David Josephson, por la década del 60, liga voltaje con frecuencia.

$$V = \frac{h}{2e} f \quad (2)$$

Bajo ciertas condiciones, el voltaje en bornes de un dispositivo superconductor solo depende de la frecuencia de irradiación de un flujo de microondas, y los valores de la carga del electrón y la constante de Plank. Dado que la frecuencia es una magnitud que se puede medir con un altísimo grado de estabilidad, (1 parte en 10^{15}), este dispositivo se convierte en un generador de voltaje con similar incertidumbre. Es un patrón ideal. Cualquiera que disponga de tal dispositivo puede reproducir el voltaje con una coincidencia fantástica.

El otro efecto cuántico macroscópico fue descubierto alrededor de la década del 80 por Klaus von Klitzing. Es un efecto que liga las mismas constantes universales con el valor de una resistencia, mediante la ecuación

$$R = \frac{h}{e^2} \quad (3)$$

También en este caso el nivel de estabilidad del dispositivo que materializa esta ecuación es mucho mayor que la incertidumbre del ohm dada por las definiciones del SI₆₀. Entre ambos efectos es posible redefinir el volt y el ohm en base a signar valores a e y h . Ambas constantes se pueden determinar basándose en los patrones del SI₆₀, pero sus incertidumbre son demasiado altas comparadas con las estabilidades de los equipos desarrollados por efectos cuánticos. Asignar valores exactos a e y h es algo así como una revolución. Se genera un sistema paralelo al SI, con posibles incompatibilidades. Pero la fuerza de los hechos es grande. En 1990, la CGPM (Conferencia General de Pesas y Medidas) votó asignar valores arbitrarios, exactos, a la carga del electrón e y a la constante de Planck h .

El problema es que en el SI₆₀ ya no cabían más asignaciones arbitrarias. En el área electromecánica, ya estaban asignados valores a c , μ_0 , a la frecuencia asociada a la transición hiperfina del átomo de cesio 133 y al famoso kilogramo de platino-iridio. Cuatro magnitudes con cuatro asignaciones. Incluir dos más implicaba eliminar dos vigentes. Nadie tuvo el valor de hacerlo en aquel momento, por lo cual convivimos con un sistema formal SI, más dos magnitudes básicas extra (algo así como la monarquía y el parlamento). Se han fijado los valores de e y h , sin modificar el SI. Todos sabíamos que la situación era incompatible, pero se dio un gran paso en la estabilidad de los patrones en el área eléctrica que aparentemente justificó esa inconsistencia.

Mucha gente se dedicó a resolver ese problema con propuestas de nuevos cambios en el sistema de unidades. Los candidatos naturales a dejar el SI eran las actuales definiciones del kilogramo y el ampere. El volt y el ohm podrían pasar a ser unidades básicas y la masa y el ampere, derivadas, aunque existían otras posibilidades. Varios proyectos internacionales desarrollaron fantásticas esferas de silicio, tan puras y geoméricamente tan perfectas, que permiten calcular la cantidad de átomos que poseen. Al ser el material de extrema pureza, sus átomos están dispuestos regularmente según una red cristalina bien conocida, casi sin distorsiones por impurezas o dislocamientos. Las distancias entre átomos de esa red pueden ser medidas con gran precisión por métodos de difracción de rayos X, al igual que las dimensiones geométricas de la esfera. Otras fuentes de incertidumbre, tales como irregularidades en la superficie, efectos del pulido y limpieza, también fueron evaluadas. Todo lleva a que la cantidad de átomos pueda ser calculada con muy baja incertidumbre. El nuevo kilogramo podría ser un determinado como múltiplo de la masa del átomo de silicio, la que debería ser asignada.

La forma de destronar al kilogramo de platino-iridio era lograr una nueva realización de la unidad con una incertidumbre en al menos 1 parte en 10^8 . Esto recién se acaba de obtener, lo que derivó en la votación de un nuevo SI que regirá a partir del 20 de mayo de 2019.

El nuevo sistema de unidades no obliga asociar ningún experimento concreto. Solo se asignan valores a las constantes. No se asocian constantes con ecuaciones, y por consiguiente no quedan vinculadas las unidades a ningún método particular de realización de las mismas, aunque hay recomendaciones. Pongamos un ejemplo para aclarar esta idea. Una posibilidad de realizar el ampere sería por la ley de ohm, como ya mencionamos, a través del volt y el ohm definidos por efectos cuánticos; pero otra sería contando la cantidad de electrones que atraviesan la sección de un conductor en un segundo. Esto ya es posible con un alto grado de exactitud. El sistema de unidades “such that” (así se conoce entre los metrólogos a la propuesta de solo fijar valores a las constantes) no prioriza a ninguna de estas dos alternativas. ¿Qué ventajas tiene? Estamos a salvo de futuros descubrimientos y desarrollos técnicos. Cualquier ecuación física, que contenga las constantes definidas, podría ser usada para definir la unidad, sin necesidad de cambiar el SI₁₉. Los científicos experimentales usarían los valores universales sin preocuparse de estar incurriendo en inconsistencias, y los teóricos quedarían más que satisfechos al disponer de todos los elementos que les son necesarios para el

tratamiento matemático de sus modelos. Sería un sistema que quedaría a salvo de las presiones generadas por el progreso tecnológico de mejorar continuamente los patrones.

Pero todo tiene su precio. En el lado oscuro de este sistema hay varias cosas. Sería perfectamente válido que un país fijara su patrón nacional del amperio basado en el conteo de electrones y otro, en los efectos cuánticos eléctricos. Si los valores así determinados, con sus intervalos de incertidumbre, no se solaparan, ¿quién tendría la razón? No habría forma de laudarse dicha diferencia, ya que por la propia definición (o mejor sería decir indefinición) del sistema, ambos serían equivalentes. Uno de los principios que impulsa la implantación de sistemas de unidades universales, sería violado.

Otros puntos oscuros menores (o no tanto) son la circularidad, la falta de clasificación en unidades básicas y derivadas y la dificultad para explicar este sistema a la población general. Por circularidad entendemos un uso recursivo en la propia definición. Por ejemplo, al definir el metro se cita el valor de la velocidad de la luz, pero ésta queda expresada en metros por segundo. Lo mismo ocurre con las demás magnitudes. En cuanto a la jerarquía de las unidades, siempre se dividieron entre unidades básicas y derivadas. Esto ha dado lugar a siete unidades básicas, tres de las cuales determinan las magnitudes mecánicas, y con una adicional, las magnitudes electromagnéticas. Existen variadas formas de organizar esta estructura, todas equivalentes desde un punto de vista teórico, pero diferentes en cuanto a su realización experimental. El fijar solo constantes elimina la clasificación y da paso a la coexistencia de varios sistemas diferentes en los cuales las unidades básicas y derivadas son distintas. Para los metrologos este es un punto importante. Mantener patrones e instrumentos calibrados, implica tener una cadena de trazabilidad bien definida, donde quede claro cuáles son las magnitudes básicas a partir de las cuales se mantienen los patrones primarios básicos. Los patrones derivados se calibran contra los primeros. La no existencia de esta pirámide genera cierta confusión.

No es una cuestión menor la dificultad en explicar el nuevo SI a la población general. Quizás el volt o el mol no interesen demasiado, pero hay que hacer esfuerzos en que al menos el kilogramo sea más o menos entendible para alguien con instrucción de enseñanza media. La definición que se acaba de votar dice: "The International System of Units, the SI, is the system of units in which

- the unperturbed ground state hyperfine transition frequency of the caesium 133 atom $\Delta\nu_{Cs}$ is 9 192 631 770 Hz,
- the speed of light in vacuum c is 299 792 458 m/s,

- the Planck constant h is $6.626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$ J s,
- the elementary charge e is $1.602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ C,
- the Boltzmann constant k is $1.380\ 649 \times 10^{-23}$ J/K,
- the Avogadro constant N_A is $6.022\ 140\ 76 \times 10^{23}$ mol⁻¹
- the luminous efficacy of monochromatic radiation of frequency 540×10^{12} Hz, K_{cd} , is 683 lm/W."

(Disculpe haber dejado el texto en su idioma original, pero no quise agregar, a lo ya bastante confuso, errores de traducción). En este sistema, la unidad de masa queda relacionada con las unidades de longitud, tiempo y la constante h . Explicar la relación entre el metro y la velocidad de la luz es relativamente simple (desde un punto de vista teórico). Basta pensar en tener una linterna en una mano y un cronómetro en la otra. Disparamos un rayo de luz y conjuntamente ponemos en marcha el cronómetro. Cuando marque 1/299 792 458 s, vemos hasta dónde avanzó el rayo de luz, y allí tendremos 1 m.

Cronómetros basados en relojes atómicos no parece complicado de explicar. Muchos dispositivos domésticos tienen señalizadores con laser cuya luz está ligada a la frecuencia de vibración de determinados elementos químicos. Pero, ¿cómo explicar la relación entre la constante de Planck y la masa? Es más, ¿cómo explicar a un joven estudiante de enseñanza media qué es la constante de Planck? Va aquí un intento.

Empecemos por cosas simples. ¿Qué es una fuerza? Pensemos en empujar contra una pared. La pared obviamente no se moverá, pero nosotros estamos aplicando una fuerza. Sostener en nuestra mano un teléfono celular es otro ejemplo. La gravedad trata de hacerlo caer, pero nuestra mano ejerce una fuerza que lo mantiene quieto. ¿Qué valor tiene esa fuerza? Aproximadamente 1 newton.

La energía es otro concepto que se necesita aclarar. Está ligada a la fuerza, pero adiciona el movimiento. Empujar un auto que se ha quedado detenido, por un trecho de 100 m, requerirá una gran energía que nos agotará. Para tener una idea de valores, subir 1 metro el teléfono que manteníamos quieto, requerirá de nuestra parte aproximadamente 1 julio de energía. El julio se define como newton×metro, dado que la energía es equivalente a fuerza por distancia.

Hasta aquí, puede ser que nuestro adolescente comprenda relativamente bien estos conceptos porque integran el entorno de sus experiencias diarias. Si es así, pasemos al siguiente escalón: la acción. La acción se define como energía×tiempo, pero ¿qué significa? Ya vimos que energía es fuerza×distancia, por lo cual la acción es fuerza×distancia×tiempo. Pequeñas fuerzas que mueven objetos en pequeñas distancias y en corto tiempo representan pequeñas acciones. Una

gota de lluvia es acelerada por la gravedad con una fuerza de aproximadamente 0.0005 N hasta alcanzar una velocidad límite, constante, de 10 m/s. Por tanto, demora 0.001 s en recorrer 0.01 m, al pasar delante de nuestros ojos. La acción resultante está en el orden de 10^{-6} J s. Es una acción tan pequeña que no la podemos percibir. Si cayera más lentamente podríamos verla, porque el valor de esa acción sería mayor. Que no podamos verla, no significa que no exista. Con una cámara fotográfica especial, podemos obtener fotografías de la lluvia donde se ve la acción de las gotas en su movimiento de caída.

Lo que parece increíble es lo que deriva del descubrimiento de Max Planck. En esa época (alrededor del 1900) se estaba estudiando en Europa cómo fabricar lámparas más eficientes para una novel red de iluminación eléctrica que desplazaría al gas. Se sabía que el color de la luz que emitía la lámpara estaba relacionado con la temperatura del filamento, y todo esto con su eficiencia. Físicos experimentales habían encontrado una curva que mostraba cómo variaba la intensidad de la luz según su color y la temperatura del objeto que la emitía. El problema era que los físicos teóricos no encontraban explicación a la forma de esa curva. Para ellos, la intensidad de la luz debería incrementarse a medida que el color pasaba de rojo a verde, de verde a azul, de azul a ultravioleta, y así sucesivamente. A esa inconsistencia se la conoció como la *catástrofe ultravioleta*. Planck encontró una solución, postulando que la energía de un mínimo paquete de luz debía ser proporcional a su frecuencia.

$$E = h \cdot f \quad (4)$$

A la constante de proporcionalidad se la llamó h (letra que se usaba en esa época para representar cosas muy pequeñas). Así surge a la vida la constante de Planck. Tiene las dimensiones de acción (energía×tiempo), y su valor es muy pequeño comparador con el mundo macroscópico que nos rodea. En términos de julio y segundo vale: $6.626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$ J s, o lo que es equivalente a unas 10^{-27} acciones de gotas de lluvia. ¡Realmente pequeño! Esta es la razón que en nuestra vida diaria no notemos que los fenómenos varían de a saltos.

Pero para nuestro propósito, de relacionarla con el kilogramo, tenemos que seguir por el camino de la acción. Es la mínima acción que nuestro universo está dispuesto a admitir. No hay ningún fenómeno con valor de acción menor que h . No es un problema de nuestros aparatos de detección. Es una regla de la naturaleza. Pero, ¿por qué imponernos algo tan arbitrario? Nos dejan ejercer fuerzas tan débiles como queramos, mover objetos a distancias sin mínimos límites durante tiempos tan insignificantes como se

nos ocurra. Sin embargo, *alguien* hace la multiplicación de esos tres valores y si da menor que h prohíbe dicha acción. ¡Increíble! Más aun pensado que esa fiscalización hay que realizarla para todos los fenómenos que ocurren en todo el universo. En parte este tipo de razonamientos hizo que la mayoría de los científicos de la época no tomaran muy en serio el descubrimiento de Planck. El propio Planck, creía que solo se trataba de un truco matemático para ajustar la curva del *cuerpo negro* (así se llama a la radiación de los objetos que se estudiaban) a las formas conocidas experimentalmente. Llevo varios años para que otro científico (Einstein) mostrara que la teoría de los *cuanta* sí representaba algo real en el funcionamiento de nuestro mundo.

En fin, como sea, el nuevo SI₁₉ aprovecha la existencia del cuanto de acción para definir la unidad de masa. La acción tiene en sus entrañas la masa, recordando que se expresa como kg.m.s. De alguna forma, la unidad de masa puede asociarse a una cierta cantidad de cuanta de acción. Por ejemplo, el kilogramo sería una masa tal que cuando se eleva a una altura de 0.1 m en 1 s, consume unos 10^{33} cuanta de Planck (ignorando algún detalle del cálculo). Pudiendo medir metros y segundos, podríamos tener una balanza que relacionara h con kg. Una balanza de ese tipo fue inventada por Brian Kibble en la década del 70.

Hasta aquí es lo que se me ocurre como explicación simple a nivel de instrucción media. Si pretendemos seguir adelante, ya necesitamos que nuestro interlocutor tenga nociones de electromagnetismo. Si ese es el caso, y a esta altura no está exhausto, continuemos.

La balanza mencionada, más conocida como balanza de Watt (porque se relaciona con potencias) tiene dos brazos. En uno de ellos colocamos un objeto de cierta masa m , generando una fuerza gravitatoria

$$F_g = m \cdot g \quad (5)$$

El otro brazo es empujado hacia abajo por un electroimán compuesto por una bobina y un imán permanente. Cuando circula una corriente I por la bobina de longitud de alambre L , se produce una fuerza magnética

$$F_m = BLI \quad (6)$$

Ajustando la corriente para que se equilibre la balanza, se tiene

$$mg = BLI \quad (7)$$

El problema práctico de usar esta última fórmula, es que el campo magnético no se puede determinar con la gran exactitud requerida actualmente. Por este motivo, hay una segunda medición con la balanza. Se quita la masa y la fuente de corriente, y mediante un motor se mueven los brazos a velocidad constante v . El voltaje inducido en la bobina será

$$V = BLv \quad (8)$$

Entre las últimas dos ecuaciones, se puede eliminar el producto BL , quedando

$$m = \frac{VI}{gv} \quad (9)$$

El voltaje se puede determinar directamente basando en el efecto Josephson. La corriente, se determina por la ley de ohm, midiendo la caída de voltaje V' en un resistor referido al efecto cuántico hall. El producto VI , usando (2) y (3), queda

$$VI = \left(\frac{h}{2e}\right)^2 f \cdot f' \frac{e^2}{h} \quad (10)$$

o sea

$$VI = \frac{h}{4} f \cdot f' \quad (11)$$

Las frecuencias f y f' son las correspondientes a los voltajes V y V' . Finalmente,

$$m = \frac{h}{4gv} f \cdot f' \quad (12)$$

Además de h , la masa necesita de la definición de las unidades de longitud y tiempo, que dependen de las constantes: velocidad de la luz y radiación del cesio. Fijado el valor de h más el valor de esas dos constantes, queda definida la unidad de la masa, mediante el experimento de la balanza de Watt.

Si el lector entiende que aún no son suficientes estos esfuerzos de explicación de cómo se define el nuevo kilogramo, lo remito a quienes votaron el nuevo sistema de unidades el 16 de noviembre de 2018. Formalmente es la CGPM (Conferencia General de Pesas y Medidas), integrada por todos los representantes de las naciones signatarias de la Convención del Metro (unos 60 miembros), con fuerte asesoramiento de los 18 expertos que forman el CIPM (Comité Internacional de Pesas y Medidas), asesorados por los Comités Consultivos, en particular por el CCU (Comité Consultivo sobre Unidades).

Ruego me exima a mí de responsabilidades.

MAYOR INFORMACIÓN

BIPM: <https://www.bipm.org/en/measurement-units/rev-si/>, accedida 09, diciembre, 2018.