

# ¿Se acerca el fin de los sistemas de unidades de medida?

Daniel Slomovitz, *Senior Member, IEEE*

DESDE el antiguo Egipto, y probablemente antes, el hombre ha tenido necesidad de realizar mediciones, y para ello ha definido unidades y patrones. El pie de Carlomagno es un buen ejemplo. La cantidad de veces que su pie (o reproducción del mismo) cabía en la longitud del objeto a medir, representaba numéricamente la medida del mismo. Por arcaica que nos parezca esta definición de unidad de longitud, es similar a la vigente de masa. La unidad de masa, definida actualmente por el SI (Sistema Internacional), es la masa de un cilindro de platino-iridio guardado en la bóveda del BIPM (Bureau Internacional de Pesas y Medidas). La única diferencia es tecnológica. Este cilindro es más estable que cualquier miembro de un ser humano, y no sufre de “juanetes” u otras deformaciones burdas. Igualmente, hay serios indicios que indican que este objeto ha variado su masa en los últimos 100 años en un orden cercano a 5 partes en  $10^8$ . Pero no piense que desde el punto de vista filosófico hay diferencias.

En principio, unidad y patrón son cosas diferentes, pero en estos dos ejemplos se confunden. La definición de una unidad es una descripción; opera como una receta. En el caso del actual ampere, su definición es la siguiente: 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  $2 \times 10^{-7}$  N/m. En cambio, un patrón es un objeto material que permite compararlo con el objeto a medir. Aquí queda claro que el patrón que representa la unidad es algo muy diferente a la definición de unidad. La realización del patrón de corriente implica complejos dispositivos con bobinas, medidores de distancia y fuerzas, que resultan en un instrumento real que materializa 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 oscura 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  $\mu_0$ . La ecuación que liga la fuerza con la corriente es

$$F = \frac{\mu_0 l}{2\pi d} I^2$$

donde  $l$  es la longitud de los conductores y  $d$  la distancia entre ellos. Fijando arbitrariamente el valor de la constante de proporcionalidad, y usando esta ecuación, queda definida la unidad de corriente. El valor actual asignado a  $\mu_0$  es de  $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$  (en unidades SI), de manera que sea válida la definición antes mencionada. 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.

Por el contrario, la idea de basar la definición de la unidad en el propio patrón presenta múltiples inconvenientes. En primer lugar, dicho objeto deberá ser cuidadosamente manipulado de manera de no afectarlo. En el caso del kilogramo, sólo se ha intercomparado tres veces a lo largo de toda su historia. Por otro lado, no hay forma de conocer cuál es su incertidumbre. Es más, algunos metrólogos proponen asignarle incertidumbre nula, dado que por definición la masa que tenga en cualquier momento (aun siendo variable) es la unidad, exactamente. Como sea, todos estamos de acuerdo en que su variación constituye un problema. Finalmente queda el gran inconveniente de su reproducibilidad. Es único, no se



Libro de los muertos del antiguo Egipto. El grabado muestra la existencia de la balanza en tiempos tan remotos. En la escena se pesa el corazón de los difuntos antes de concederles la vida eterna. ¡Una extraña aplicación metrológica!

El autor se desempeña como Jefe del Laboratorio de UTE (Usinas y Trasmisiones Eléctricas) y catedrático de la Facultad de Ingeniería de la UDELAR, Uruguay, (e-mail: d.slomovitz@ieec.org).

puede usar frecuentemente y varía. Peores cualidades no se podrían juntar en la propia definición de una unidad.

Pero, tal es la historia del SI. En 1960, así se definieron el kilogramo y el ampere. Completan las unidades básicas el segundo definido por un determinado múltiplo del período de una emisión atómica del cesio, el metro, basado en el recorrido de un rayo de luz durante cierto tiempo, el kelvin, necesario para la temperatura, a partir del punto triple del agua, el mol y la intensidad luminosa.

El truco de asignar valores a constantes de ecuaciones para definir una nueva unidad no es un invento nuevo. Es bien conocida la relación entre resistencia, tensión y corriente dada por la ley de Ohm.

$$R = \frac{V}{I}$$

Sin embargo, en tiempos de Ohm, la ecuación anterior no tenía ese aspecto. ¡Es que falta una constante de escala! Lo máximo que Ohm pudo haber aseverado es que había una relación proporcional entre la tensión y la corriente que atraviesa un determinado conductor. Por comodidad se asignó el valor arbitrario 1 a dicha constante y nos hemos olvidado que está allí. Esta ecuación de la física es la que permite al actual SI definir el ohm. No es necesario mantener ninguna resistencia patrón como patrón primario ni realizar experimentos complicados con mercurio. Una antigua definición basaba el ohm en la resistencia de una determinada columna de mercurio de cierta longitud y sección. Como se imaginará, ambas definiciones conllevan problemas de estabilidad. Definir un resistor en particular como el ohm patrón sería similar a la definición de masa por el kilogramo patrón, mientras que la definición basada en el mercurio sufriría de problemas derivados de su realización. Distintos laboratorios tendrían diferentes posibilidades en cuanto a la exactitud e incertidumbre. Hay muchos elementos involucrados: la uniformidad del tubo, su dilatación térmica, la pureza del mercurio, el tipo de electrodo, y podríamos seguir enumerando muchos más. Habría diferencias entre patrones nacionales realizados en los distintos NMI (Institutos Metrológicos Nacionales) lo que afectaría el intercambio de bienes y productos tecnológicos. En un mundo altamente globalizado, como el actual, eso no sería admisible. Es preferible mantener inconsistencias dentro del propio sistema de unidades, a que los patrones de diferentes países no coincidan entre sí. Justamente, en aras de lograr tal coincidencia se ha tomado la penosa decisión de soportar inconsistencias. 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  $h$ . Desde hacia algunas décadas se habían implementado dispositivos que materializaban el volt y el ohm, basados en efectos cuánticos. Éstos fueron las fuentes de tensión basadas en el Efecto Josephson y los resistores basados en el QHE (Efecto Cuántico Hall), derivado de los trabajos de Von Klitzing. Ambos efectos relacionan las magnitudes eléctricas, directamente con  $e$  y  $h$ .

$$V = \frac{h}{2e} n f \quad R = \frac{h}{e^2} \frac{1}{n}$$

Existen equipos que implementan ambas ecuaciones. Esto es, fuentes de tensión Josephson cuya salida depende solo de las constantes mencionadas y de la frecuencia  $f$  de una radiación que es parte del dispositivo; y resistores QHE de valores determinados solo por  $h$  y  $e$ .  $n$  es un número natural que se determina en los propios experimentos. Si conociéramos los valores de estas dos constantes, tendríamos una forma de definir esas magnitudes como primarias, con estabilidades del orden de 1 parte en  $10^9$ , varios órdenes mejor a lo disponible a tal fecha. El problema es que en el SI ya no caben más asignaciones arbitrarias. En el área electromecánica, ya están asignados valores a  $c$ ,  $\mu_0$ , 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 sabemos que la situación es incompatible, pero se ha dado un gran paso en la estabilidad de los patrones en el área eléctrica que aparentemente justifica esa inconsistencia. Actualmente, el watt definido a partir de las magnitudes mecánicas no coincide con el watt definido por el volt y el ampere.

Tampoco es que no haya gente preocupada, deseosa de resolver el tema. Hay propuestas de nuevos cambios en el sistema de unidades para arreglar este lío. Los candidatos naturales a dejar el SI son 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. También existen otras posibilidades. El ampere podría ser básico, pero definido a partir de la carga del electrón y el segundo.

¿Por qué no se ha hecho todavía? Es que no solo el mundo de la electricidad está proponiendo cambios. Algunos laboratorios nacionales, en proyectos internacionales conjuntos con el BIPM, han desarrollado 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 son evaluadas. Todo lleva a que la cantidad de átomos pueda ser calculada con muy baja incertidumbre. El kilogramo sería un determinado múltiplo de la masa del átomo de silicio, la que debería ser asignada.

La forma de destronar al kilogramo de platino-iridio es lograr una nueva realización de la unidad con una incertidumbre en el orden de unas pocas partes en  $10^8$ , que es el orden de estabilidad que se supone tiene el actual patrón. Realmente, la variabilidad del “gran K” (así es como se lo

conoce entre los metrologos dedicados a esta magnitud) no se puede determinar. Solo tenemos comparaciones contra otros kilogramos los que fueron construidos con similares técnicas. Esto podría implicar fuertes correlaciones que impidan detectar cambios, al ser todos hacia un mismo lado y con similar valor.

No se trata simplemente de pasar de objetos materiales a constantes universales. Ya lo hemos padecido con el ampere. Su definición es fantástica, pero su realización imposible con las bajas incertidumbres que demanda la tecnología actual. Curiosamente, tanto los impulsores de la esfera como los metrologos del mundo eléctrico reivindican incertidumbre del orden mencionado en sus realizaciones, pero lamentablemente los valores centrales distan más que lo justificado por esas incertidumbres. Los experimentos que se han hecho hasta el presente con equipos basados en efectos cuánticos eléctricos y con esferas de silicio no son compatibles entre sí. Valores determinados por éstos, que deberían ser iguales, distan más que los rangos permitidos por las incertidumbres de cada uno de ellos. Hay un error en algún lado que aún nadie ha encontrado. Incluso, contando con acuerdo internacional en introducir  $e$  y  $h$  al SI, no sería prudente hacerlo hasta no tener claro la razón de la inconsistencia experimental.

Pero, ¡algo hay que hacer! Esto es justamente lo que se debate actualmente. Un primer paso que se está proponiendo para desenredar este nudo, sería independizar el sistema de unidades de experimentos concretos. Solo se definirían los valores de las constantes. No se mencionaría cuál es la ecuación asociada, y por consiguiente no quedaría vinculada la unidad a ningún método particular de realización de la misma. Pongamos un ejemplo hipotético para aclarar esta idea. Admitamos que se fijan los valores numéricos de  $e$  y  $h$ . Una posibilidad de realizar el ampere sería, 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 determinado tiempo. Esto ya es posible con un alto grado de exactitud. El sistema de unidades “such that” (así se le llama entre los metrologos a la propuesta de solo fijar valores a las constantes) no prioriza a ninguna de estas alternativas.

¿Qué ventajas tiene? Estaríamos a salvo de futuros descubrimientos y desarrollos técnicos. Cualquier ecuación física, que contuviera las constantes definidas, podría ser usada para definir una unidad, sin necesidad de cambiar el SI. 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 para mejorar continuamente los patrones.

Pero todo tiene su precio. En el lado oscuro de esta propuesta hay varias cosas. Sería perfectamente válido que un país fijara su patrón del ampere 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 solapan, ¿quién tendría la razón? No habría forma de laudar dicha diferencia, ya que por la propia definición (o

mejor sería decir indefinición) del sistema, ambos serían equivalentes. La tecnología no lo admitiría. Uno de los principios que impulsó la implantación de sistemas de unidades universales, sería violado. De todas formas, avancemos en este enfoque y analicemos qué aspecto tendría el SI actual si sus definiciones de unidades se realizaran de esa manera. El ampere sería aquella corriente “tal que” la constante  $\mu_0$  valiera  $4\pi 10^{-7}$  N/A<sup>2</sup>. El metro, la longitud “tal que” el valor de la velocidad de la luz fuera 299 792 458 m/s, y así para las demás. Cuando se resuelvan las inconsistencias entre las esferas del silicio y el mundo eléctrico, simplemente se cambiarían las constantes básicas elegidas actualmente por otras, ¡y listo! ¿En qué quedaría el Sistema Internacional de unidades? Se resumiría a un conjunto de constantes con valores fijos. ¿Es eso un sistema de unidades? Muy lejos estaríamos de Carlomagno y sus metrologos, donde la tecnología no sería muy buena pero sus bases filosóficas, muy firmes. A partir de un instrumento comparador se define una magnitud, tomando como unidad a un representante particular de esa magnitud. Magnitudes derivadas son definidas a partir de leyes y constantes, siendo ambas integrantes constituyentes del modelo físico. En la propuesta actual tanto se pretende simplificar, que las leyes han desaparecido. ¿Es eso razonable?

Otros puntos oscuros menores (o no tanto) son la circularidad y la falta de clasificación en unidades básicas y derivadas. 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 la definición del ampere se cita el valor de la constante  $\mu_0$  usando las unidades del propio ampere. No parece muy claro ni sensato.

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 éste 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 generaría gran confusión e incompatibilidad entre calibraciones realizadas en diferentes laboratorios sobre un mismo dispositivo.

Por otra parte, tampoco piense que ésta es una propuesta novedosa. Hace más de 100 años Max Planck propuso un sistema al que se le llamó Sistema de Unidades Naturales, en el cual se propone asignar valores a las constantes  $c$ ,  $h$  y  $G$  (velocidad de la luz, constante de Planck y constante de gravitación). La elección de estas tres constantes universales es interesante. Ninguna está asociada a objetos materiales y por tanto son independientes de la naturaleza de los cuerpos.

Por otra parte, son constantes que vinculan magnitudes inseparables. La constante de Planck relaciona energía con frecuencia; la velocidad de la luz: distancias con tiempos; y la constante de gravitación: propiedades inerciales con gravitatorias. Aunque no fue propuesto inicialmente por Planck, a este sistema se le puede agregar una más,  $\mu_0$  o  $\epsilon_0$ , para completar el conjunto de cuatro, necesario para incluir el electromagnetismo.

Asignando valores unitarios a las tres primeras constantes quedan definidas todas las unidades de la mecánica. Esto es, “definidas” desde un punto de vista teórico, pues en la práctica no se encontraron experimentos capaces de realizar patrones con baja incertidumbre que implementen las ecuaciones que relacionan estas constantes con la masa, longitud y tiempo, de acuerdo a

$$m = \sqrt{\frac{h'c}{G}} \quad l = \sqrt{\frac{h'G}{c^3}} \quad t = \sqrt{\frac{h'G}{c^5}}$$

donde  $h'$  es la constante reducida de Planck. Dejando de lado que los tamaños de estas unidades difieren sustancialmente de las vigentes, lo cual impediría usar este sistema en la práctica corriente de ingeniería, incluso desde un punto de vista formal es inadmisibles una definición de un sistema de unidades que no propone forma alguna de realizar los patrones correspondientes. Si no existe la posibilidad de realizar un

patrón primario que materialice la definición, y por tanto ninguna medición, ¿qué contacto posee una teoría de este estilo con la realidad?

Otra cosa diferente sería considerar la propuesta de Planck como un simple cambio de escalas, interpretación que frecuentemente se le da. Se seguiría usando el sistema de unidades convencional (que en la época de Planck era muy distinto al presente), y simplemente las ecuaciones mencionadas definirían valores de masas, longitudes y tiempos útiles para ciertas teorías como la Gravedad Cuántica.

A esta altura, admito que el lector me pregunte ¿quién decide sobre estas cuestiones? Formalmente la Conferencia General de Pesas y Medidas, integrada por todos los representantes de las naciones signatarias de la Convención del Metro; pero con el fuerte asesoramiento de los 18 expertos que forman el CIPM (Comité Internacional de Pesas y Medidas). Éstos ya han laudado una propuesta, basados en los informes del CCU (Comité Consultivo sobre Unidades).

Lo que en definitiva ocurra lo sabremos muy pronto. En octubre de este año 2011 se reúne la Conferencia General y veremos que resulta.

MAYOR INFORMACIÓN

BIPM: [www.bipm.org](http://www.bipm.org)