

Joaquín ValdésInstituto de la Calidad Industrial, Universidad
Nacional de San Martín (UNSAM)-Instituto
Nacional de Tecnología Industrial (INTI)

Adiós al kilogramo patrón

A fines de 2008, al cumplirse los veinte años de publicación de CIENCIA HOY, sacamos un artículo en un suplemento especial de la revista sobre la cooperación en ciencia y tecnología entre Brasil y la Argentina en el que anunciamos próximos cambios en las unidades de medida. El kilogramo, la única de las siete unidades de base que aún se definía por referencia a un artefacto físico, dejaría de estar basado en la masa de una pesa patrón mantenida desde 1889 en París. El Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM) analizaba entonces la posibilidad de definir un kilogramo por fenómenos eléctricos o, alternativamente, por fenómenos atómicos. Al mismo tiempo serían redefinidos el amperio, el kelvin y el mol, respectivamente las unidades de intensidad de corriente eléctrica, temperatura y cantidad de materia. La aprobación de ese cambio llegó en 2018, cuando nuestra revista cumplía treinta años. En el número 163

de CIENCIA HOY, de enero-febrero del presente año, se resumieron las nuevas definiciones y, desde el 20 de mayo de 2019 las mencionadas siete unidades de base quedaron establecidas por el valor de las constantes que muestra la tabla de la página siguiente.

Cabe preguntarse cómo se define una unidad fijando el valor de una constante. Toda unidad es un modo particular de expresar el valor numérico de algo medible, algo como una longitud, una temperatura o una velocidad. Si cambia la unidad, también cambia dicho valor. Por ejemplo, una velocidad puede expresarse en metros por segundo (m/s) o en kilómetros por hora (km/h); decir que un automóvil se desplaza a 50m/s es lo mismo que afirmar que va a 180km/h, aunque el valor numérico para expresar la velocidad sea distinto, pues depende de la unidad elegida.

También el valor numérico de las constantes de la naturaleza depende de la unidad de medida. Así, la longitud

¿DE QUÉ SE TRATA?

Después de haber estado en funciones en París durante 130 años, el precioso kilogramo patrón de platino e iridio quedó relegado a la venerable categoría de pieza de museo. ¿Qué es ahora 1kg?

Unidad	Segundo	Metro	Kilogramo	Amperio	Kelvin	Mol	Candela
Símbolo	s	m	kg	A	K	mol	cd
Constante	$\Delta\nu$	c	h	e	k	N_A	K_{cd}

Constantes físicas mediante las cuales se definen las unidades del Sistema Internacional de Unidades vigentes desde el 20 de mayo de 2019. En esta nota solo se discute la tercera, en rojo, es decir, el kilogramo y la constante de Planck. $\Delta\nu$ indica la frecuencia de transición hiperfina del átomo de cesio 133; c es la velocidad de la luz; h es la constante de Planck; e es la carga elemental; k es la constante de Boltzmann; N_A es la constante de Avogadro; y K_{cd} es la eficacia luminosa. Cuadro confeccionado adaptando documentos del BIPM.

de onda de una radiación naranja emitida por el átomo de kriptón en su variedad kriptón 86 (^{86}Kr) tenía cierto valor cuando todavía se definía el metro como la longitud de una barra patrón de platino con 10% de iridio, mantenida en Sèvres, cerca de París, en el Buró Internacional de Pesas y Medidas (BIPM). En términos prácticos, operar con un objeto material como patrón ocasionaba un sinnúmero de inconvenientes, por lo cual, cuando se pudo llegar a medir las mencionadas longitudes de onda naranja con suficiente exactitud, se redefinió el metro como 1.650.763, 73 longitudes de onda en el vacío de dicha radiación del átomo de kriptón 86.

Ese cambio, que data de 1960, equivalía a fijar exactamente el valor de una constante atómica, como lo es la longitud de onda típica de un átomo. La idea no era nueva, pero ponerla en práctica requería poder medir la cantidad de longitudes de onda que coincidían con la longitud de barra patrón por lo menos con una precisión comparable a la estabilidad de esa barra. Así, el cambio no afectaría las mediciones de longitud que se realizaban en todo el mundo. Desde 1960, pues, la barra quedó en desuso y en distintos laboratorios del planeta se pudo acceder al patrón de longitud con mayor exactitud midiendo la radiación naranja del kriptón. En el INTI dispusimos tempranamente de esa capacidad de tener en casa el mejor patrón del redefinido metro.

El siguiente cambio en la definición del metro tuvo lugar en 1983. Se optó entonces por el valor de otra constante, la velocidad de la luz en el vacío, en sustitución de la longitud de onda típica del kriptón 86. La ventaja era que la velocidad de la luz vale lo mismo cuando es emitida por cualquier tipo de átomo, no solo por el del kriptón. Para ese entonces ya se habían desarrollado láseres que emitían en longitudes de onda más estables que el kriptón. Para no tener que ir modificando la definición cada vez que surgiera una fuente de luz mejor, se

acordó el cambio, aún hoy vigente, basado en fijar el valor de la velocidad de la luz en el vacío.

La tarea de aplicar estos conceptos de medición al caso del kilogramo fue sumamente compleja porque en sus 130 años de vida el kilogramo corporizado en un cilindro de platino con 10% de iridio se comportó increíblemente bien. Se ha estimado, por comparaciones del prototipo con otras pesas similares consideradas testigos, que en todos esos años la masa del kilogramo patrón había disminuido una cantidad del orden de la octava cifra decimal, es decir, solo había perdido algunas cien milonésimas de su valor. Para aprobar una nueva definición que permitiera disponer de un kilogramo patrón equivalentemente en distintos lugares del planeta se requería realizar experimentos con resultados repetibles que tuvieran esa precisión: una o dos partes en 100.000.000. Ello se esperaba lograr por dos caminos distintos, respectivamente llamados el kilogramo atómico y el kilogramo eléctrico. El CIPM, en consecuencia, decidió esperar hasta que se lograran con ambos experimentos coincidencias experimentales en la octava cifra decimal.

El experimento del kilogramo atómico consistió, esencialmente, en calcular la cantidad de átomos contenidos en una esfera de silicio de 1kg con un error de, a lo sumo, un átomo cada 100 millones (10^8). Hacia 2005 se podía hacerlo con error de un átomo cada millón (10^6), y en 2017 se llegó a la precisión buscada, 100 (10^2) veces mayor que doce años antes. Obtenido ese resultado,

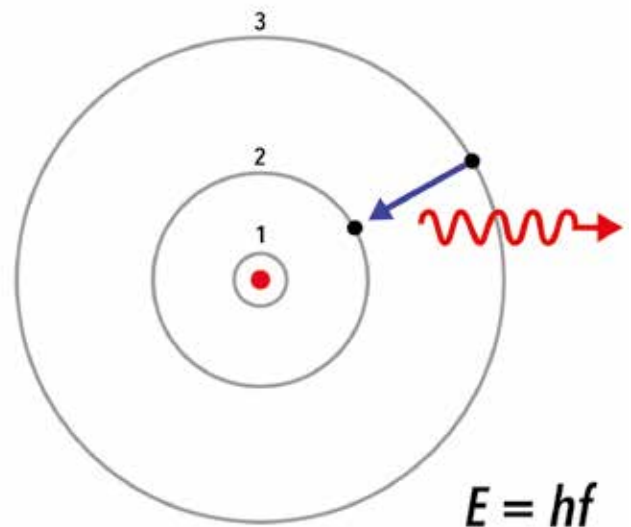


Diagrama del modelo atómico de Bohr. El punto rojo es el núcleo denso del átomo; las circunferencias que lo rodean son las posibles órbitas de los electrones que giran en torno al núcleo, caracterizadas por niveles crecientes de energía. Los dos puntos negros representan a un electrón que cambia de órbita y decae del nivel 3 de energía al 2. Con ello, el átomo emite radiación representada por la línea ondulada en una cantidad expresada por la ecuación $E = hf$, en la que f es la frecuencia de la onda electromagnética emitida y h es la constante de Planck.

se pensaba en redefinir el kilogramo como la masa de una cierta cantidad exacta de átomos de silicio. Pero había otra alternativa.

El experimento del kilogramo eléctrico se basó principalmente en la *balanza electromagnética de Kibble*, llamada así en honor del metrologo inglés Bryan Kibble (1938-2016), quien la inventara en 1976. Por analogía con una balanza tradicional, se puede decir que consiste en colocar en uno de sus platillos una pesa de un kilogramo y en el otro una bobina. La acción del campo magnético que se genera al circular corriente eléctrica por la bobina produce una fuerza que compensa la atracción gravitatoria de la pesa. Dicho campo magnético no se puede medir con la exactitud requerida, pero Kibble encontró la manera de prescindir de ese valor haciendo que la balanza se mueva con determinada velocidad, la cual induce una tensión eléctrica. Luego se compara la potencia mecánica con la potencia eléctrica. En el cálculo de la potencia eléctrica está implícito un parámetro fundamental de la naturaleza establecido en el marco de la mecánica cuántica, llamado la constante de Planck (h), para la cual el valor exacto es $6,62607015 \cdot 10^{-34} \text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$. Por referencia a este valor queda finalmente calculada la masa de la pesa. La explicación de cómo se introduce aquí h requiere formación avanzada en física.

Es evidente que una definición del kilogramo basada en cierta cantidad de átomos hubiera sido mucho más comprensible que otra basada en el valor de h . Sin embargo, se prefirió la segunda por el carácter de h como parámetro fundamental del mundo físico y porque las mediciones eléctricas basadas en efectos cuánticos mejoran mucho si se fijan los valores de h y de la carga eléctrica elemental (e). El valor de esta última queda establecido por la nueva definición del amperio. Adicionalmente, existen otros caminos que permiten vincular tanto la realización del kilogramo eléctrico como la del kilogramo atómico con h . Ambos métodos experimentales relacionan la constante de Planck h con una masa macroscópica. Los principales institutos nacionales de metrología optaron por uno u

otro método, pero en ambos casos cumplen con la nueva definición del kilogramo.

Desaparecido el kilogramo patrón de platino e iridio, ¿qué es ahora un kilogramo? Constituye todo un desafío didáctico explicarlo a los lectores. La experiencia reunida en nuestra cátedra de metrología de la UNSAM a lo largo de más de veinte años nos dice que, aun en el nivel de posgrado, son muy pocos los cursos universitarios en los que se maneja la constante de Planck. Entre graduados universitarios con conocimientos generales de física, química y matemáticas, cuesta encontrar a quienes sepan por qué emite luz un tubo fluorescente. Solemos explicar en clase que allí se esconde h , porque fue justamen-



Una balanza de Kibble. A pesar de tratarse de un instrumento altamente complejo y delicado, diversos grupos de investigación lograron construir varias en distintos países. Como consecuencia, ya no se depende más de una única pesa patrón. Foto BIPM

te Max Planck (1858-1947) quien encontró que la luz es emitida en forma de paquetitos (llamados cuantos) de igual energía (E).


Seguidamente explicamos el modelo de átomo imaginado en 1913 por el danés Niels Bohr (1885-1962) y el neocelandés Ernest Rutherford (1871-1937), por lo común conocido por *modelo atómico de Bohr* (o de Rutherford-Bohr), que se esquematiza en la figura de la página 36. En esta visión, el átomo se concibe, a semejanza del sistema solar, como un pequeño y denso núcleo rodeado de electrones que se desplazan en determinadas órbitas alrededor de aquel, controlados por fuerzas electrostáticas mucho mayores que las fuerzas gravitatorias. A cada órbita por la que se desplaza un electrón corresponde un nivel de energía, y cuando un electrón decae de una órbita de energía superior a otra de energía inferior emite radiación en forma de ondas electromagnéticas en cantidad equivalente a la diferencia de energía entre los dos niveles.

La energía emitida es proporcional a la frecuencia f de la onda emitida multiplicada por una constante que es, precisamente, la constante de Planck (h). Esto va expresado en la ecuación que se lee en la figura ($E = hf$). Por otro lado, con la energía emitida a causa del decaimiento del electrón, la masa del átomo disminuye en una cantidad directamente proporcional a ella, la cual puede calcularse con la ecuación de Einstein que expresa la equivalencia de materia y energía al establecer que energía es igual a masa multiplicada por el cuadrado de la velocidad de la luz ($E = mc^2$). En otras palabras, la masa del átomo disminuye en un valor equivalente a la diferencia de energía entre las dos órbitas dividida por el cuadrado de la velocidad de la luz ($m = E \div c^2$).

Finalmente, ¿cómo se responde a alguien sin suficientes conocimientos de física, química y matemáticas

que pregunte: ahora qué es un kilogramo? Si la nueva definición se hubiera basado en una masa atómica, la respuesta hubiera sido sencilla y fácilmente comprensible: es una cantidad establecida de átomos de cierto elemento químico. Pero igualmente es correcto responder a nuestro hipotético interrogador que ahora 1kg es algo que se puede obtener juntando un número muy grande de átomos de silicio, y que también se puede obtener de otras formas más complejas de explicar. Se puede agregar que esas operaciones recurren a algunos capítulos avanzados de la física de hoy, como la mecánica cuántica, e incluyen célebres ecuaciones, entre ellas la que define la constante de Planck y la ecuación de Einstein sobre la equivalencia de materia y energía, que muestran la relación entre masa y h .

Sí es perfectamente comprensible mostrar que el nuevo sistema tiene la gran ventaja de haber eliminado la dependencia de los posibles vaivenes sufridos o a sufrir por la masa de una única pesa. También quedará en el pasado la producción de una cadena de comparaciones con pesas de valor mayor o menor que 1kg para finalmente conseguir calibrar en todo el mundo las balanzas de uso doméstico, industrial o comercial, en toda la escala. Ahora se investigan métodos para reducir esos errores. Incluso se aspira a poder determinar la masa de un cubo de 1 nanómetro de lado (10^{-9}m) con menor error que la de un cuerpo de 1kg, algo importante para aplicaciones nanotecnológicas. Y ya la masa de 1 átomo se puede conocer con una incertidumbre 100 veces menor que la del kilogramo.

No menos complejo que explicar rigurosamente qué es hoy 1kg resulta explicar qué son ahora 1 segundo, 1 kelvin, 1 amperio o 1 mol. Pero eso debe quedar para futuros números de CIENCIA HOY. 

LECTURAS SUGERIDAS

AAVV, 2019, 'Una cuestión de medida', CIENCIA HOY, 28, 163: 14-16.

BIPM, <https://www.bipm.org>.

INTI, <http://www.inti.gob.ar/metrologia/#cambiosSI>.

VALDÉS J, 2008, 'Cambios en las unidades de medida', CIENCIA HOY, 18, 108 (suplemento): 74-79.



Joaquín Valdés

Doctor en ingeniería, Universidad de Braunschweig, Baja Sajonia.

Decano del Instituto de la Calidad Industrial, UNSAM-INTI.

Profesor titular de metrología, UNSAM.

jovaldes@inti.gob.ar