

# Revisión del Sistema Internacional de Unidades

En el Sistema Internacional de Unidades del futuro, también unidades como el kilogramo o el ampère se definirán a partir de las constantes de la naturaleza

Robert Wynands y Ernst O. Göbel

## CONCEPTOS BASICOS

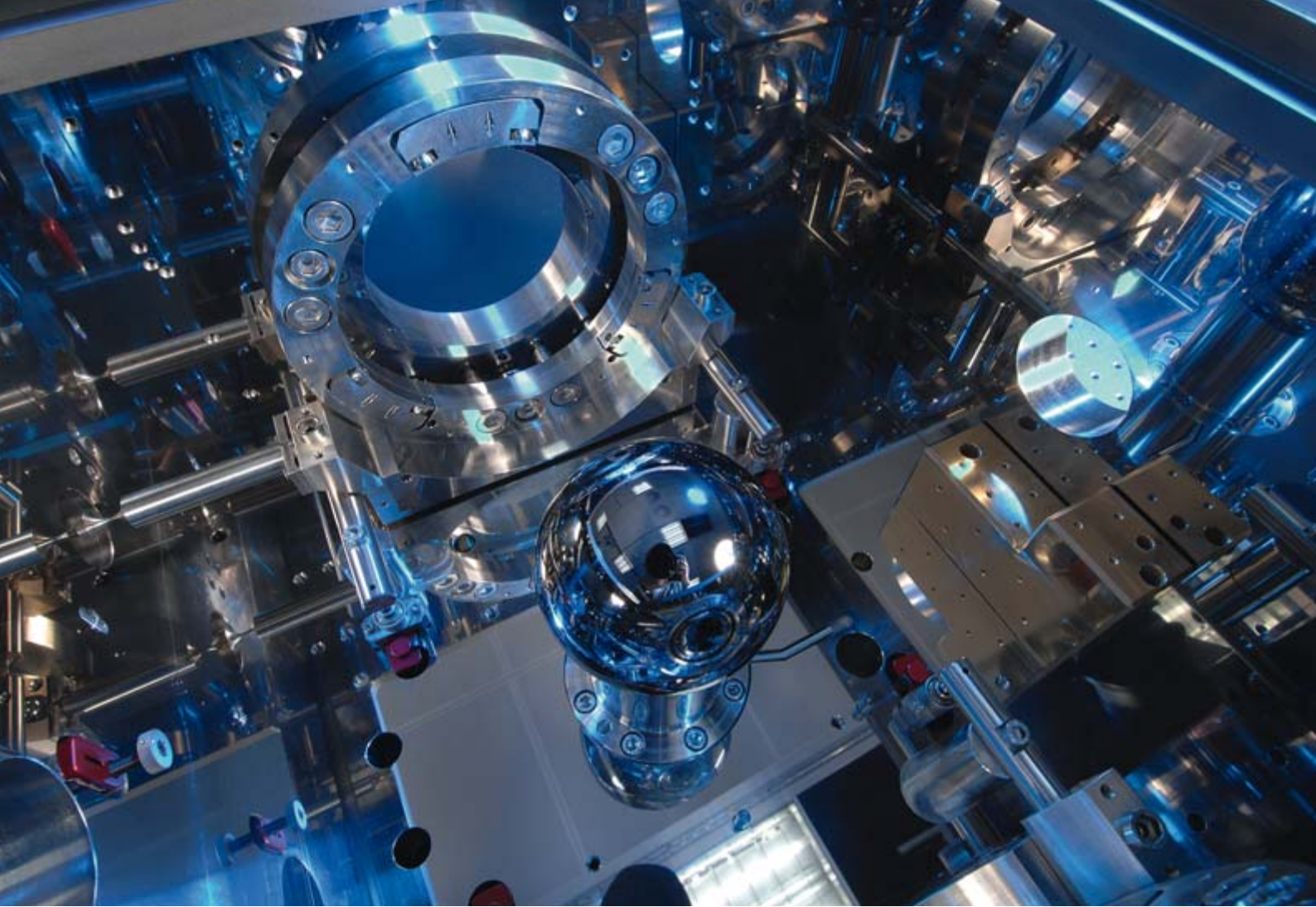
- La mayoría de las unidades del Sistema Internacional aún se definen en función de patrones estándar. El kilogramo, por ejemplo, se fija igual a la masa de cierto cilindro de platino e iridio custodiado en Sèvres.
- La metrología moderna busca unidades definidas a partir de las constantes de la naturaleza. La idea consiste en decidir un valor exacto para las constantes naturales y derivar, a partir de ellas, el de las unidades de medida.
- Hasta ahora, esto sólo se ha conseguido con el metro y el segundo. El metro se define como la distancia recorrida por la luz en exactamente 1/299.792.458 segundos. En el futuro se espera poder alcanzar la precisión experimental necesaria para establecer, de modo análogo, el resto de las unidades.

**S**i bien juristas y políticos aún debaten sobre una mayor cohesión entre los estados de la Unión Europea, en lo referente a pesas y medidas, la unidad de Europa se alcanzó hace largo tiempo. En 1875, diecisiete estados de todo el mundo acordaron un conjunto común de unidades en la Convención Internacional de Pesas y Medidas, también conocida como la “Convención del Metro”. Con ello se hacía realidad el sueño de los revolucionarios franceses, quienes, ya unos ochenta años antes, habían aspirado a un sistema independiente de toda circunstancia local y que sustituyese a las unidades de medida de la época (como la vara o la pulgada, derivadas con frecuencia de la longitud del antebrazo o la anchura del pulgar del soberano respectivo). Sólo en los territorios alemanes había docenas de varas, cuya longitud variaba desde los 40,38 centímetros en Erfurt hasta los 79,90 centímetros en Múnich. La unificación no solamente tenía razones ideológicas: la diversidad de estándares dificultaba el comercio libre y frenaba el desarrollo económico.

Hoy en día damos por supuestas unidades como el metro, el kilogramo o el grado Celsius, válidas en casi todo el mundo. Una excepción la constituye EE.UU., donde aún hoy se emplean la milla, la onza y el grado Fahrenheit, un hecho más que notable si se tiene en cuenta que EE.UU. fue, desde el principio, miembro de la Convención del Metro. También en Europa son habituales los datos en pulgadas para discos duros de ordenadores o pantallas de televisión, si bien tales etiquetas han de entenderse más como denominación de una clase que como unidades de medida.

Como su propio nombre indica, las unidades de medida sirven para medir y, por tanto, para comparar objetos. Para comprobar si el ancho de esta página mide 210 milímetros, su tamaño puede cotejarse con la cantidad de líneas de un milímetro que figuran en una regla. Las fracciones de segundo que, en el deporte de alta competición, distinguen entre vencedor y perdedor se determinan a partir de las marcas de tiempo de un cronómetro. Se trate de lo que se trate, para medir algo siempre hay que contar cuántas veces el estándar de una magnitud cabe en el intervalo en cuestión. Una consecuencia es que la precisión del resultado no puede ser mayor que la del estándar con que se compare. En el día a día, para determinar si una hoja de papel satisface las exigencias de la norma DIN, basta la regla antes mencionada. Ahora bien, la comprobación del paso de rosca de un tornillo ya implica estándares más finos, y aún mucho mayor es la precisión requerida para la elaboración de transistores, con tamaños de milésimas o incluso millonésimas de milímetro.

Posiblemente, el estándar más conocido sea el prototipo internacional del kilogramo, o “kilogramo patrón” (véase la figura 2): un cilindro de una aleación de platino e iridio que, por definición, cuenta con un kilogramo de masa. Desde el año 1889 se guarda en una caja fuerte de la Oficina Internacional de Pesas y Medidas (BIPM, por sus siglas en francés) en Sèvres, cerca de París. En su momento, reemplazó a la antigua definición de kilogramo, basada en la masa de un litro de agua de máxima densidad. Ello supuso un avance, ya que la definición anterior exigía determinar la temperatura y



presión del agua, cuya medición requería, a su vez, recurrir a una unidad de masa. Con el kilogramo patrón y la distribución de réplicas a los miembros de la Convención del Metro se instauró un estándar independiente de otras magnitudes, lugar o tiempo.

Una vez al año, en solemne ceremonia, se comprueba si el cilindro permanece todavía intacto y en su sitio. En 1950 y 1990 se compararon las réplicas con el prototipo. El resultado: la mayoría de las copias pesaban unos 50 microgramos más que el original. Probablemente, el paso del tiempo o la limpieza rutinaria provocasen el “adelgazamiento” del prototipo... y con él, en sentido estricto, ¡también el del kilogramo!

Aunque tan minúscula diferencia acarrea pocas implicaciones para la vida cotidiana (un panadero difícilmente podría llegar a pesarla), para la ciencia el panorama es distinto, ya que el kilogramo interviene en la definición de otras unidades, como la de tensión eléctrica o intensidad de campo magnético. En rigor, los valores numéricos en las fórmulas físicas deberían adaptarse a la pérdida de masa del kilogramo patrón. Algo carente de sentido.

Semejantes problemas de pérdida, deterioro o envejecimiento son inherentes a cualquier

estándar basado en artefactos, ya sean naturales (así, la anterior definición de kilogramo como la masa de un litro de agua) o artificiales. Por ello, hace ya más de cien años que el físico escocés James Clerk Maxwell (1831-1879) propuso determinar las unidades de medida a partir de propiedades invariables de átomos o moléculas.

En lo que respecta a la unidad de tiempo, el segundo, eso ya ha ocurrido. Hasta mediados del siglo xx aún se determinaba según la duración del día; esto es, a partir de la rotación de la Tierra sobre su propio eje. Más adelante pasó a definirse en función de la duración del año, dada por el giro de la Tierra alrededor del Sol. Pero nuestro planeta tampoco permite definir un estándar invariable de tiempo, ya que su rotación queda sujeta a fluctuaciones imprevistas, como las ocasionadas por los terremotos. Además, va frenándose poco a poco debido a la fricción de las mareas, lo que aproximadamente cada dos años hace necesaria la inclusión de un “segundo bisiesto”.

Cuando se hizo técnicamente posible, la Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM) acordó, en 1967, establecer la unidad de tiempo a partir de una determinada transición de los átomos de cesio. Así, un segundo

**1. UN MONOCRISTAL PULIDO DE SILICIO, de esfericidad casi perfecta y con una elevada pureza isotópica, debería ayudar a redefinir el kilogramo.** La alta precisión de su geometría permite determinar, con una precisión sin precedentes, el número de átomos contenidos en un mol de sustancia (el número de Avogadro). Esta constante natural serviría de base para una nueva definición del kilogramo.



## EL SISTEMA ACTUAL DE UNIDADES

■ El **segundo** coincide con 9.192.631.770 veces el período de la radiación correspondiente a la transición entre los dos niveles de la estructura hiperfina del estado fundamental de los átomos de cesio  $^{133}\text{Cs}$ .

■ El **metro** es la distancia recorrida por la luz en el vacío en un intervalo de  $1/299.792.458$  segundos.

■ El **kilogramo** se define como la masa del prototipo internacional del kilogramo, un cilindro de platino e iridio guardado en la Oficina Internacional de Pesas y Medidas, en Sèvres, cerca de París.

■ El **ampère** se define como la intensidad de una corriente constante que, al circular por dos hilos conductores paralelos, rectilíneos, infinitamente largos, con una sección transversal circular despreciable y separados por una distancia de un metro en el vacío, ejerce una fuerza entre los hilos de  $2 \cdot 10^{-7}$  newton por metro de longitud de los mismos.

■ El **kelvin**, la unidad de temperatura termodinámica, viene dado por  $1/273,16$  veces la temperatura termodinámica del punto triple del agua.

■ El **mol** es la cantidad de sustancia de un sistema que contenga tantos componentes como átomos hay en 0,012 kilogramos de nucleidos de  $^{12}\text{C}$ . Al emplear el mol siempre hay que especificar sus componentes; éstos pueden ser átomos, moléculas, iones, electrones u otras partículas o grupos de partículas, siempre y cuando su naturaleza quede perfectamente determinada.

■ La **candela** se define como la intensidad de la luz emitida, en una dirección específica, por una fuente de luz monocromática de frecuencia igual a  $540 \cdot 10^{12}$  hertz y cuya intensidad de radiación a lo largo de la dirección escogida es de  $1/683$  watt por unidad de ángulo sólido (estereorradián).

corresponde a la duración de 9.192.631.770 oscilaciones de la radiación emitida en dicha transición. Al principio, la precisión llegaba a unas 9 cifras decimales. Hoy en día, los mejores relojes del mundo (los relojes atómicos de cesio) alcanzan una precisión que supera las 15 cifras decimales (véase la figura 4). De ello no se benefician sólo los científicos: sin indicadores temporales tan exactos no sería posible sincronizar la transmisión de paquetes de datos en las redes de comunicaciones, ni tampoco determinar la posición mediante la navegación por satélite. Es probable que, dentro de pocos años, otro elemento químico supere al cesio: un elemento al que no se hará vibrar con microondas, sino con luz láser. Un “reloj óptico atómico” sería hasta cien veces más preciso gracias a la altísima frecuencia de la luz visible [véase “Reglas de luz”, por S. Cundiff, J. Ye y J. Hall; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio de 2008].

La unidad de longitud, el metro, también ha sido adecuada a los avances técnicos. En el pasado, una barra de platino e iridio, con una sección transversal específica y una longitud derivada de la circunferencia de la Tierra, sirvió como “metro patrón”. En 1960 fue reemplazado por un múltiplo determinado de la longitud de onda de cierta radiación emitida por los átomos de criptón. Si bien con ello se había introducido un estándar atómico, poco después el mismo dejaría de estar a la altura de las exigencias de la ciencia y la técnica. Eso se hizo patente en los años setenta del siglo pasado, cuando la precisión en las medidas de la velocidad de la luz quedó determinada (y limitada) por la exactitud con que podía reducirse la distancia de referencia a la definición del metro.

Sería por ello que, en 1983, se invirtieron los roles de ambas cantidades: se asignó a la luz una velocidad en el vacío de 299.792.458 metros por segundo. De esta manera, el metro quedaba definido como la distancia recorrida por la luz en el vacío durante  $1/299.792.458$  segundos.

### Actuación urgente

El Sistema Internacional de Unidades (SI) de hoy día se fraguó en las sesiones de la CGPM desde 1954 (véase el recuadro “El sistema actual de unidades”). Oficialmente bautizado con este nombre en 1960, ha sido adaptado varias veces (como en 1967, cuando se acordó la redefinición del segundo a partir de propiedades atómicas). La técnica ha evolucionado tremendamente desde entonces. Tanto es así, que hoy en día son las incertidumbres en la representación de varias unidades de medida las que limitan la precisión en un gran número de

experimentos. De ahí que aún siga pendiente una renovación del SI. En un futuro próximo, deben redefinirse en función de constantes naturales otras unidades, muy particularmente el kilogramo, el mol (la unidad de la cantidad de sustancia), el kelvin (temperatura termodinámica o absoluta, la que se mide respecto del cero absoluto), el ampère (intensidad de corriente) y, posiblemente, también la candela (la unidad de medida de la intensidad de la luz). Tal y como se hizo en el caso del metro, se intentará determinar las constantes adecuadas con tanta precisión como permita el SI actual, para después fijar de una vez para siempre estos valores y, finalmente, derivar a partir de ellos las nuevas definiciones.

La mayor urgencia la reviste el kilogramo. Al respecto, los metrologos han acordado dos procedimientos prometedores: la nueva determinación y posterior definición del número de Avogadro  $N_A$ , o bien del cuanto de acción de Planck  $h$  [véase “Un nuevo kilogramo”, por Ian Robinson; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero de 2007].

El primer planteamiento define el kilogramo a partir de la masa de un número exacto de átomos del mismo tipo. La creación de un “kilogramo patrón 2.0” requiere sumo control. Dado que la masa de un átomo es del orden de  $10^{25}$  veces menor que la de un kilogramo, la tarea exige el recuento de un número correspondiente de átomos. En realidad, se intentó exactamente eso: depositar sobre un sustrato una cantidad ponderable de átomos (de bismuto, en este caso) procedentes de un haz de iones. Esta línea de trabajo ha sido abandonada, pues hubieran sido necesarios varios años de ardua investigación hasta averiguar si podría alcanzarse la cota de precisión exigida ( $10^{-8}$ , una parte en 100 millones).

No obstante, existe un procedimiento alternativo. Una analogía simple nos permitirá visualizarlo con facilidad. Supongamos que hemos de contar las botellas de bebida contenidas en un camión. Una manera de hacerlo consiste en vaciar el vehículo y contar cada una de las botellas en cada caja. Pero si las cajas se hallan perfectamente ordenadas en el interior del camión, dispondremos de una alternativa menos costosa: determinar el volumen del espacio de carga, dividirlo por el volumen de una sola caja y multiplicar el resultado por el número de botellas por caja. Ahora bien, tal cálculo será correcto sólo si el interior del camión se halla completamente lleno con cajas dispuestas en perfecto orden y si, además, en ninguna caja faltan o sobran botellas ni hay escondidas botellas de otra clase.

Un consorcio internacional bajo la dirección del Instituto Federal Físico Técnico de Alema-

nia (PTB, por sus siglas en alemán) sigue este procedimiento. El papel del espacio de carga lo desempeña un monocristal de silicio  $^{28}\text{Si}$  de elevada pureza isotópica. La elección del silicio obedece a la dilatada experiencia con la que, gracias a la industria de semiconductores, cuenta la producción de cristales prácticamente sin impurezas ni defectos cristalinos. El cristal toma la forma de una esfera de unos 9,4 centímetros de diámetro, cuya superficie ha sido cuidadosamente pulida para obtener una geometría lo más perfecta posible (véase la figura 1). El tamaño escogido es tal que la masa de la esfera es muy próxima a la del kilogramo patrón, para así facilitar una comparación precisa entre ambos. El volumen del cristal se determina, con suma exactitud, mediante un interferómetro óptico expresamente desarrollado; medir este volumen cristalino corresponde, en la analogía del camión, a evaluar el volumen del espacio de carga.

En la red cristalina los átomos están ordenados regularmente. La difracción de rayos X revela la distancia entre los átomos de la red, análoga al tamaño de las cajas de botellas. Para contrastar el resultado se determina también la densidad del material, a fin de comprobar si existen cavidades o irregularidades. Además, mediante un espectrómetro de masas se evalúa, con finísima precisión, la masa atómica relativa de un átomo de silicio (con respecto a la definición vigente de kilogramo). Por último, hay que averiguar el grosor de la inevitable capa de óxido que se forma sobre la superficie de la esfera y corregir sus efectos en el resultado final (el óxido y el silicio presentan densidades diferentes).

Ya disponemos de todos los elementos necesarios para relacionar la masa de 1 kilogra-

mo (magnitud macroscópica) con una escala microscópica de masas, la masa atómica del isótopo  $^{28}\text{Si}$  (según el convenio habitual, relativa a la de los átomos del isótopo  $^{12}\text{C}$  del carbono):

$$M_{\text{esfera}} = \frac{1}{N_A} \frac{V_{\text{esfera}}}{a^3} n m_{\text{Si}}$$

Aquí  $n$  representa el número de átomos en una celda cúbica elemental de arista  $a$  (en nuestra analogía, el número de botellas por caja) y  $m_{\text{Si}}$  la masa molar del  $^{28}\text{Si}$ , en torno a 28 gramos. La constante de proporcionalidad es el número de Avogadro  $N_A$ , así denominado en honor del físico y químico italiano Amedeo Avogadro (1776-1856). Dicha constante indica el número de partículas presentes en una cantidad de sustancia igual a 1 mol (véase el recuadro "El sistema actual de unidades"). Al despejar  $N_A$  de la ecuación de arriba, el kilogramo queda definido como la masa de un número determinado de átomos.

En principio, la nueva definición podría basarse en el isótopo  $^{28}\text{Si}$  del silicio. No obstante, la escala de masas tradicional refiere siempre a la masa del isótopo  $^{12}\text{C}$  del carbono. Este convenio está tan firmemente establecido que cualquier cambio requeriría un enorme esfuerzo. Por ello, otra posible redefinición establecería el kilogramo como la masa de  $5,0184515 \times 10^{25}$  átomos de  $^{12}\text{C}$  en reposo y en el estado fundamental. Aquí hacemos constar el valor más preciso disponible del número de Avogadro dividido por la masa de un mol de partículas  $^{12}\text{C}$  (12 gramos). Los caracteres "XX" indican que las últimas cifras aún han de ser acordadas con exactitud.

No obstante, la esfera de silicio no sustituirá al kilogramo patrón. En principio, sólo había

**Sin indicaciones temporales de suma precisión no sería posible sincronizar la transmisión de datos en las redes de comunicaciones**

**2. EL KILOGRAMO PATRON, un cilindro de platino e iridio, se guarda en una caja fuerte en la Oficina Internacional de Pesas y Medidas, en Sèvres, cerca de París. Su masa es muy aproximada a la de un litro de agua sujeta a condiciones ambientales específicas.**





3. LA "VARA DE BRAUNSCHWEIG" fue empotrada en la pared del ayuntamiento histórico con el objetivo de que los comerciantes pudiesen regirse por ella. Quien no lo hiciera había de someterse a severas sanciones. (Inscripción: "Vara de Braunschweig, 57,07 cm. Medida de longitud prescrita para transacciones mercantiles desde el siglo xvi.")

sido fabricada para determinar el número de Avogadro. Para evitar inconsistencias, debería adaptarse la definición actual del mol: el mol, la unidad de cantidad de sustancia de una clase específica de partículas, quedaría determinado de tal manera que el número de Avogadro tomase el valor de  $N_A = 6,02214179XX \cdot 10^{23}$  partículas por mol.

### Determinación del kilogramo mediante efectos cuánticos

Un método alternativo emplea la balanza de Watt con el objeto de establecer una relación entre el kilogramo y otra constante natural, el cuanto de acción de Planck  $h$ . El peso de un objeto sobre el platillo de la balanza resulta compensado por una fuerza magnética. Esta tiene su origen en la interacción entre un campo magnético estático espacialmente inhomogéneo y el campo generado por una bobina, a través de la cual circula una corriente y que se halla unida al platillo de la balanza. La masa del objeto se deriva a partir de la intensidad de la corriente  $I_1$  necesaria para que se produzca dicha compensación, siempre y cuando la aceleración local de la gravedad y las inhomogeneidades del campo magnético se conozcan con precisión. Para determinar estas últimas con la exactitud requerida, en un experimento auxiliar se desplaza la bobina con velocidad constante a través del campo. Esto modifica el flujo magnético a través de la bobina, con lo que se induce una tensión eléctrica  $U_2$ , la cual proporciona una medida

de la inhomogeneidad del campo, cuyo efecto logra entonces caracterizarse con exactitud.

Según la ley de Ohm, la intensidad  $I_1$  se corresponde con el cociente de una tensión y una resistencia eléctrica:  $I_1 = U_1/R_1$ . Hoy en día, las tensiones eléctricas como  $U_1$  y  $U_2$  logran determinarse con una precisión muy fina gracias a los efectos cuánticos en las uniones Josephson, que consisten en dos elementos superconductores separados por una capa fina y de conducción eléctrica normal. Al irradiar el conjunto con microondas de frecuencia  $f_j$  se induce una corriente que genera una tensión entre los extremos de la unión Josephson; dicha tensión viene dada por  $U_n = n(h/2e)f_j$ , donde  $n$  es un número entero y  $e$  la carga del electrón. La constante  $K_J = 2e/h$  fue bautizada en honor del físico británico Brian Josephson, quien ya en sus estudios de doctorado, a la edad de 23 años, avanzó aspectos importantes sobre este tipo de contactos. Sus investigaciones al respecto le valdrían el premio Nobel en 1973.

Por su parte, para la medición de resistencias con una precisión comparable se recurre al efecto Hall cuántico. En 1985, su descubrimiento por parte del físico Klaus von Klitzing también sería recompensado con el premio Nobel. Dicho fenómeno se manifiesta cuando se hace circular una corriente a través de capas muy finas de semiconductores, al tiempo que se aplica un campo magnético intenso [véase "El efecto Hall cuántico", por Klaus von Klitzing; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo de 1986]. Bajo tales condiciones se induce una tensión eléctrica a lo largo de la dirección perpendicular a la de la corriente. El cociente de dicha tensión con la intensidad de la corriente se denomina resistencia Hall, la cual queda limitada a unos pocos valores cuantizados:  $R_H = h/(me^2)$ , donde  $m$  es un número entero. En esta fórmula aparecen las constantes naturales  $h$  y  $e$  en la combinación  $R_K = h/e^2$ , denominada constante de von Klitzing.

Volvamos a la balanza de Watt. Si se miden las magnitudes  $U_1$ ,  $U_2$  y  $R_1$  empleando para ello los efectos cuánticos mencionados, tras una serie de transformaciones matemáticas se obtiene una ecuación que relaciona el cuanto de acción de Planck  $h$  con la masa de prueba y con la aceleración de la gravedad en el lugar de la medición. Ello permite invertir las tornas y definir la unidad del SI de una manera un tanto peculiar: en el futuro, un kilogramo se definirá como la masa que otorga al cuanto de acción de Planck el valor de  $h = 6,62606896XX \cdot 10^{-34}$  joule  $\times$  segundo.

La dificultad de ambas estrategias radica en reducir las perturbaciones experimentales hasta

**En el futuro,  
el kilogramo  
podría definirse  
como la masa de  
 $5,0184515XX \cdot 10^{25}$   
átomos de  $^{12}\text{C}$   
en su estado  
fundamental**



alcanzar una precisión de  $10^{-8}$ , que es la que se conseguía hasta ahora al relacionar masas con el kilogramo patrón. Esto no se ha logrado todavía ni con el experimento basado en el número de Avogadro ni con ninguna de las cinco balanzas de Watt en construcción o en funcionamiento. Peor aún: ambos métodos arrojan resultados inconsistentes. Actualmente se están investigando las causas mediante análisis cuidadosos de los dispositivos, con la esperanza de detectar posibles fuentes de error. La Convención del Metro se ha decidido por el método que pasa por definir el cuanto de acción de Planck, si bien para ello un prerequisite es limar las diferencias entre ambos experimentos.

### Definición del grado kelvin

Otra definición problemática la constituye la del grado Kelvin (K) como unidad de temperatura termodinámica. Para ello se emplea agua purísima: a 273,16 kelvin, el agua alcanza su “punto triple”, un estado termodinámico en el que se hace posible el equilibrio entre las fases gaseosa, líquida y sólida. Dado que la composición isotópica y la presencia de las más ínfimas impurezas influyen en la localización de dicho punto, existe una prescripción precisa sobre cómo obtener una muestra de agua adecuada para la observación del punto triple. Debido a que cada océano exhibe una composición isotópica característica, dicha prescripción establece una mezcla muy precisa de aguas provenientes de todos los océanos del mundo. El problema radica en que, de nuevo, se asigna a un artefacto la calidad de estándar.

También aquí habría de recurrirse a una constante de la naturaleza. En este caso, la apropiada resulta ser la constante de Boltzmann  $k_B$ , la cual relaciona la temperatura  $T$  con la energía térmica de un sistema:  $E_T = k_B T$ , donde  $T = 0$  corresponde al cero absoluto. Siempre y cuando se pudiese determinar esa constante con una precisión de seis cifras, el kelvin podría definirse (sin pérdida de exactitud con respecto al estándar actual) de la siguiente manera: una variación de temperatura de 1 K se corresponde con un cambio en la energía térmica de  $1,3806504XX \cdot 10^{-23}$  joule. Ello relacionaría las mediciones de temperatura con las de energía.

No obstante, se ha optado por una definición alternativa, si bien físicamente equivalente: se define el kelvin de manera que la constante de Boltzmann ascienda exactamente a  $k_B = 1,3806504XX \cdot 10^{-23}$  joule/kelvin. Con ello, la definición del kelvin se torna independiente de cualquier realización experimental concreta.

También en este caso se realizan experimentos en todo el mundo para llegar, por vías diferentes, a esa nueva determinación. En el PTB se emplean la constante dieléctrica y experimentos de termometría de gases. Esta constante, también llamada permitividad, describe la permeabilidad de un material a los campos eléctricos. Si se coloca un material en el campo eléctrico existente entre las dos placas de un condensador, la constante dieléctrica del material influye sobre la capacidad del condensador (la cantidad de carga eléctrica que éste puede almacenar). Para una geometría dada de las placas del condensador, es posible calcular la permitividad del material interpuesto a partir de una medida de la capacidad.

En el caso de un gas, la permitividad depende de la temperatura. En el experimento del PTB, un condensador de precisión se llena con helio. La capacidad del condensador es función de la temperatura y de la cantidad de gas, que, a su vez, se relaciona directamente con la presión del gas en el volumen fijo del contenedor. Un análisis preciso de las condiciones bajo las que se realiza el experimento permite determinar la magnitud de la constante de Boltzmann a partir de las diferentes presiones y temperaturas.

### Los autores

**Robert Wynands y Ernst O. Göbel** trabajan en el Instituto Federal Físico Técnico (PTB, el organismo nacional de metrología) de Alemania, en Braunschweig. Wynands comenzó a cargo de los relojes atómicos; actualmente es directivo. Göbel preside el PTB y la Convención Internacional del Metro.

## SUGERENCIAS PARA UN SISTEMA DE UNIDADES MODERNO

Los comités de la Convención Internacional del Metro tienen por objetivo establecer las definiciones siguientes, basadas en constantes naturales y formuladas todas ellas de la misma manera. Las “X” indican que la cifra en cuestión aún ha de decidirse con exactitud. Además, la futura definición del segundo se basará en un átomo o ion diferente del cesio.

NOMBRE	LA UNIDAD DE...	SE DEFINE/DEFINIRÁ DE TAL MANERA QUE...
Segundo	tiempo	la frecuencia de transición entre los dos estados de la estructura hiperfina del estado fundamental del átomo $^{133}\text{Cs}$ sea $9.192.631.770$ hertz.
Metro	longitud	la velocidad de la luz en el vacío sea $299.792.458$ metros por segundo.
Kilogramo	masa	el cuanto de acción de Planck sea $6,62606896XX \cdot 10^{-34}$ joule $\times$ segundo.
Ampère	intensidad de corriente	la carga eléctrica del electrón sea $1,602176487 XX \cdot 10^{-19}$ coulomb.
Kelvin	temperatura termodinámica	la constante de Boltzmann sea $1,3806504XX \cdot 10^{-23}$ joule/kelvin.
Mol	cantidad de sustancia	el número de Avogadro sea $6,02214179XX \cdot 10^{23}$ partículas/mol.
Candela	intensidad de la luz	la intensidad espectral de la radiación monocromática de $540 \cdot 10^{12}$ hertz sea $683$ lumen/watt.



**4. UNO DE LOS RELOJES ATÓMICOS MAS MODERNOS DEL MUNDO** es el reloj atómico de cesio CSF2 del Instituto Federal Físico Técnico de Alemania. En su interior se iluminan átomos de cesio con un láser para refrigerarlos hasta temperaturas muy próximas al cero absoluto. La irradiación con microondas de la frecuencia exacta estimula una determinada transición en los átomos, que se emplea para determinar la duración de un segundo. Cerca de una docena de estos relojes repartidos por todo el mundo asegura la exactitud de la escala internacional de tiempo.

### Contar electrones 100 millones de veces

La definición del ampère, la unidad de intensidad de corriente eléctrica, tampoco resulta satisfactoria hoy en día. Estrictamente hablando, confeccionar una “regla de ampère” es imposible, ya que para ello se necesitarían dos hilos metálicos rectos y de longitud infinita (véase el recuadro “El sistema actual de unidades”). En su lugar se emplean configuraciones de hilos enrollados y se calculan las correcciones que se derivan de esa geometría. Los instrumentos que determinan el ampère a partir de la ley de Ohm (es decir, como el cociente entre un volt de tensión y un ohm de resistencia) son un orden de magnitud más exactos. También aquí, la tensión y la resistencia se miden mediante el efecto Josephson y el efecto Hall cuántico.

No obstante, dado que la corriente eléctrica se corresponde con la cantidad de carga eléctrica transportada por unidad de tiempo, es posible basar una nueva definición en el valor de la carga del electrón. Así, el ampère quedaría definido de tal manera que el valor de la carga del electrón viniese dado por  $e = 1,602176487XX \cdot 10^{-19}$  coulomb.

Para la medición directa se necesitan componentes electrónicos que dejen pasar un único

electrón a la vez, a modo de puerta giratoria que impidiese la entrada de más de una persona al mismo tiempo. Si tales componentes se sincronizan con una tensión periódica de control, con cada pulso pasará exactamente un electrón. La frecuencia de los pulsos puede determinarse con precisión haciendo uso de un reloj atómico. Así, la corriente que pasa por el componente electrónico resulta de aplicar al pie de la letra la nueva definición; esto es, dividiendo el valor de la carga de un electrón ( $1,602176487XX \cdot 10^{-19}$  coulomb) por la duración de un solo pulso.

Todo ello suena mucho más fácil de lo que en realidad es. El problema radica en que, para que el método funcione, en ningún caso pueden pasar dos electrones a la vez, ni tampoco puede darse la circunstancia de que, casualmente, no pase ninguno. El nivel de exigencia es enorme: en cada 100 millones de pulsos podemos permitirnos sólo una equivocación. Los investigadores aún se afanan en la consecución de “puertas” para un único electrón que resulten completamente fiables. Para ello, sobre una pastilla semiconductor o en un circuito superconductor se introduce una “isla” diminuta, de tamaño inferior al micrómetro, en la cual sólo puede ser depositado un electrón adicional, que puede ser posteriormente conducido hacia el otro lado.

Tales estructuras no son sólo difíciles de fabricar y reproducir; bastan débiles perturbaciones eléctricas para degradarlas. Además, las intensidades de corriente son demasiado exiguas para una técnica de medición viable. Los investigadores intentan superar el problema mediante el aumento de la frecuencia del pulso, la conexión en paralelo de varias de estas fuentes o el uso de comparadores criogénicos de corriente, una clase especial de transformadores que aumentan la intensidad de la corriente.

Por su parte, los expertos que persiguen una nueva definición de candela no se hallan aún sino en los inicios del proceso. Por lo menos, en este caso el sistema de unidades actual refiere la unidad para la intensidad de la luz a cierta radiación monocromática: la de  $540 \cdot 10^{12}$  hertz (correspondiente a una longitud de onda de 555 nanómetros; es decir, luz verde). Para una fuente que emite en dicha longitud de onda, la intensidad luminosa (en una dirección dada) es igual a 1 candela cuando la intensidad de la radiación asciende a  $1/683$  watt en un ángulo sólido de un estereorradián. Lo retorcido de estas cantidades se explica por la historia de esta unidad: la candela de hoy ha de coincidir con la establecida antaño mediante los estándares de llama o de metales candentes.

En cualquier caso, se trata ésta de una unidad que puede derivarse a partir del segundo, el metro y el kilogramo. A pesar de todo, se indaga en una definición independiente debido a su gran importancia económica, ya que la candela opera como unidad de referencia en la industria de la iluminación. A fin de poder relacionarla con magnitudes cuánticas fundamentales, se emplean nuevas fuentes de luz que emiten fotones individuales y cuya energía se mide con finísima precisión. Dichos fotones se recogen con detectores capacitados para detectar fotones aislados, lo que permite relacionar la potencia de la emisión microscópica con la de la radiación macroscópica. No obstante, dada la minúscula energía de un fotón, al igual que en el caso del ampère, también aquí resulta problemático obtener resultados precisos.

La estructura jerárquica de la Convención del Metro sólo autoriza a la Conferencia General de Pesas y Medidas, reunida una vez cada cuatro años, para acordar una modificación del SI. La próxima conferencia tendrá lugar en 2011, por lo que los trabajos de investigación anteriormente citados tienen esta fecha presente. Tras las nuevas definiciones, ya sea en 2011 o con posterioridad, los valores numéricos de las constantes  $h$ ,  $N_A$ ,  $k_B$  y  $e$  quedarán fijados. Cualquier intento de volver a determinarlas experimentalmente conduciría a un círculo vicioso. En cualquier caso, más importante que una obtención precipitada de nuevas definiciones es una consistencia duradera del sistema de unidades, tanto en lo que respecta a la ausencia de contradicciones internas como a la necesidad de evitar saltos en las escalas. Así, el nuevo ampère debe tener la misma magnitud que el antiguo y un kilogramo de platino no debe contener de repente más masa que antes. Ni la ciencia ni la vida cotidiana pueden sufrir las consecuencias de una modificación en los valores de las unidades.

Naturalmente, la solución ha de ser duradera y exenta de cualquier necesidad de modificación futura. Por esta razón la nueva definición de segundo se hará esperar: no existe todavía consenso sobre qué transición atómica representará, a largo plazo, la mejor opción para reemplazar a la del cesio.

Las instituciones implicadas son conscientes de su responsabilidad. Si las investigaciones en metrología actualmente en curso no llegan a una conclusión satisfactoria antes de 2011, la Convención del Metro dará tiempo a los investigadores hasta el siguiente encuentro, en 2015. ¿Qué sería este pequeño retraso comparado con la perspectiva de establecer un sistema de medidas duradero y basado únicamente en las constantes de la naturaleza?

**La candela de hoy  
debe referirse  
a la misma  
magnitud que  
año, cuando  
fue establecida  
mediante los  
estándares  
de llama o de  
metales candentes**

### Bibliografía complementaria

QUANTENNORMALE IM SI-EINHEITENSYSTEM. E. O. Göbel en *Physikalische Blätter*, n.º 53, págs. 217-223; 1997.

DAS INTERNATIONALE EINHEITENSYSTEM (SI). PTB-Mitteilungen; febrero de 2007. [www.ptb.de](http://www.ptb.de)

# Historia de la Ciencia

## INVESTIGACION Y CIENCIA

ha publicado sobre el tema, entre otros, los siguientes artículos:

**Ciencia, filosofía y teología en el proceso a Galileo,**  
de Rafael A. Martínez  
Julio 2009

**Los orígenes del telescopio,**  
de Sven Dupré  
Septiembre 2009

**Dos mundos, una física,**  
de Jochen Büttner  
Octubre 2009

**El origen galileo de la cosmología moderna,**  
de Matthias Schemmel  
Noviembre 2009

**El origen de la computación,**  
de Martin Campbell-Kelly  
Noviembre 2009

**La investigación del Sol en la época de Galileo,**  
de Horst Bredekamp  
Diciembre 2009

**La astronomía antes de Galileo,**  
de Giorgio Strano  
Enero 2010

**El mecanismo de Anticitera,**  
de Tony Freeth  
Febrero 2010



Prensa Científica, S.A.